



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOMPUTASI DNA, KEGALATAN, DAN KEKUASAAN
UNTUK RE-NURTURASI ALAM
SUATU PERSPEKTIF FOUCAULDIAN**

TESIS

AHMAD IBRAHIM BADRY

NPM. 0906499865

**FAKULTAS ILMU PENGETAHUAN BUDAYA
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU FILSAFAT**

DEPOK

2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**KOMPUTASI DNA, KEGALATAN, DAN KEKUASAAN
UNTUK RE-NURTURASI ALAM
SUATU PERSPEKTIF FOUCAULDIAN**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Humaniora

AHMAD IBRAHIM BADRY

NPM. 0906499865

**FAKULTAS ILMU PENGETAHUAN BUDAYA
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU FILSAFAT**

DEPOK

2011

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini dengan sebenarnya menyatakan bahwa ~~skripsi/tesis/disertasi~~ ini saya susun tanpa tindakan plagiarisme sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Indonesia.

Jika di kemudian hari ternyata saya melakukan tindakan Plagiarisme, saya akan bertanggung jawab sepenuhnya dan menerima sanksi yang dijatuhkan oleh Universitas Indonesia kepada saya.

Jakarta, 14 Juli 2011



Ahmad Ibrahim Badry

PERNYATAAN ORISINALITAS

~~Skripsi/Tesis/Disertasi~~ ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ahmad Ibrahim Badry

NPM : 0906499865

Tanda Tangan

:



Tanggal

: 14 Juli 2011



LEMBAR PENGESAHAN

Tesis yang diajukan oleh :
Nama : Ahmad Ibrahim Badry
NPM : 0906499865
Program Studi : Magister Ilmu Filsafat
Judul : Komputasi DNA, Kegagalan, dan Kekuasaan untuk
Re-Nurturasi Alam: Suatu Perspektif Foucauldian

ini telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Humaniora pada Program Studi Magister Ilmu Filsafat, Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya, Universitas Indonesia.

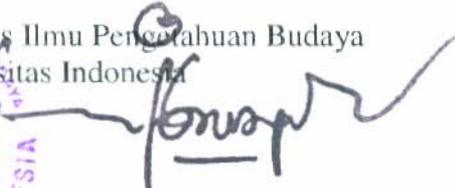
DEWAN PENGUJI

Ketua Penguji/Anggota : Dr. A. Harsawibawa (.....)
Pembimbing/Anggota : Dr. Akhyar Yusuf Lubis (.....)
Anggota : Vincensius Y. Jolasa, Ph.D. (.....)
Anggota : Dr. Embun Kenyowati E. (.....)
Anggota : Dr. Donny Gahral Ahdian (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 14 Juli 2011

oleh

Dekan
Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya
Universitas Indonesia


Dr. Bambang Wibawarta
NIP. 196510231990031002

KATA PENGANTAR

Pertama-tama, puji syukur penulis panjatkan atas nama Allah tak terpuskan. Ia yang telah memberi hidup dan kehidupan bagi semesta tak terlukiskan. Semoga penulis, dengan selesainya penulisan tesis di Departemen Filsafat, Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya, Universitas Indonesia ini dapat meniti Jalan Cahaya yang lebih terang lagi.

Perlu dicatat bahwa ada banyak kekurangan, dalam pikiran dan sikap yang mungkin dihadirkan saat pengembaraan itu dimulai. Juga tiada kelebihan, tanpa pencerahan dan uluran tangan kala pengalaman itu bersatu dalam pembacaan akan ada. Oleh karenanya, sedikit kata dan ucapan salam, pula terima kasih, penulis haturkan untuk:

1. Dr. Akhyar Yusuf Lubis, selaku pembimbing yang dengan sabar dan memberikan keleluasaan dalam mengembangkan tesis ini.
2. Vincensius Y. Jolasa, Ph.D., selaku ketua Departemen Filsafat yang selalu akrab dan sangat ramah dalam menjalani apa yang semestinya *di-lakoni*.
3. Dr. Embun Kenyowati Ekosiwi, selaku pembimbing yang mengarahkan jalan akademika hingga selesai dengan baik.
4. Para dosen yang berkenan berbagi interpretasi dan kemungkinan-kemungkinan teoretisnya.
5. Ibunda, yang telah dengan sabar dan berbesar hati menjaga garis batas normativitas, pula dukungan tak kenal lelah. Salam doa semoga tersampaikan untuk Ayahanda. Buat kakak dan adik-adik, semoga ada jalan pula melangkah dekat.
6. Para pihak dari Dirjen DIKTI, Kopertis IV, dan staf Rektorat Universitas Indonesia, yang telah mengabulkan permohonan BPPS dan memprosesnya secara *on going*.

7. Teman-teman seperjuangan sebagai trio *musketeer*, Otong Jaelani dan Aurora Rani, berikut lainnya, yang tidak dapat penulis ucapkan satu per satu.
8. Pimpinan Sekolah Tinggi Hukum Galunggung (STHG) Tasikmalaya, atas izin dan dukungannya selama penulis menunaikan tugas lanjutan untuk belajar kembali.
9. Rekan-rekan sesama pengajar di STHG Tasikmalaya, untuk dukungan moril yang membesarkan hati.

Akhirnya, tiada gading yang tak akan retak, tiada jalan tanpa lubang sekotak (khusus di Indonesia), yang memberikan sekumpulan ilustrasi bahwa hidup adalah proses tiada henti untuk memperbaiki dan menata diri. Di tesis ini, ketika galat ditemukan, silahkan dikoreksi hingga tak lagi runyam itu pikiran. Bersama-sama pengetahuan itu lengkap, sendiri saja itu bias. Benarkah?

Depok, 14 Juli 2011

Ahmad Ibrahim B.

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Ibrahim Badry
NPM : 0906499865
Program Studi : Magister Ilmu Filsafat
Departemen : Filsafat
Fakultas : Ilmu Pengetahuan Budaya
Jenis karya : ~~Skripsi/Tesis/Disertasi~~

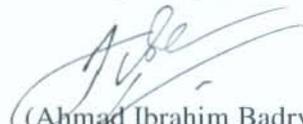
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Komputasi DNA, Kegagalan, dan Kekuasaan untuk Re-Nurturasi Alam
Suatu Perspektif Foucauldian

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 14 Juli 2011
Yang menyatakan


(Ahmad Ibrahim Badry)

ABSTRAK

Nama : Ahmad Ibrahim Badry
Program Studi : Magister Ilmu Filsafat
Judul : Komputasi DNA, Kegagalan, dan Kekuasaan untuk Re-Nurturasi Alam: Suatu Perspektif Foucauldian

Tesis ini adalah kajian filosofis atas pengembangan komputasi DNA yang menggunakan analisis Arkeologi dan Genealogi dari Michel Foucault. Dalam penelitian ini, ditemukan adanya kesejajaran antara tiga *episteme* yang telah diungkap Foucault dengan tiga teknologi komputasi yang telah dikembangkan (penerapan metode Arkeologi) dan suatu jenis *exercise* atas kekuasaan-pengetahuan sebagaimana diurai Foucault dengan titik tekan pada normalisasi, pengembangan model *Artificial Intelligent Creatures*, dan kemungkinan model *panopticon* molekuler (penerapan metode Genealogi). Hasil penelitian ini juga mengandaikan bahwa problem yang muncul harus disikapi dengan rumusan etika baru. Sebab, etika yang sudah dikembangkan tidak dapat mengatasi persoalan yang sekiranya dapat terjadi dengan dikembangkannya komputasi DNA.

Kata Kunci: Komputasi DNA, Michel Foucault, Etika.

ABSTRACT

Name : Ahmad Ibrahim Badry
Study Program : Master of Philosophy
Title : DNA Computation, Errorness, and Power to Re-Nurturation of Nature: A Foucauldian Perspective

This thesis is a philosophical study about DNA computation development which uses Genealogical and Archaeological analytics from Michel Foucault. In this thesis had been found parallelism between three *episteme* which described by Foucault with the three technology of computation (Archaeological applied) and a kind of exercise of knowledge-power as identified by Foucault which focusing in normalization, developing *Artificial Intelligent Creatures*, and possibility of molecular *panopticon* (Genealogical applied). This thesis supposes to formulate a new ethical approach. It is because the ethics which were developed not have an adequacy to solve a problematical discourse which comes from DNA computation development.

Keywords: DNA Computation, Michel Foucault, Ethics.

DAFTAR ISI

Judul	i
Surat Pernyataan Bebas Plagiarisme	ii
Pernyataan Orisinalitas	iii
Lembar Pengesahan	iv
Kata Pengantar	v
Pernyataan Persetujuan Publikasi Tugas Akhir untuk Kepentingan Akademis	vii
Abstrak	viii
<i>Abstract</i>	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Tabel, Gambar, dan Daftar Lainnya	xi
Bab I. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Landasan Teoretis	4
1.3. Metodologi Penelitian	7
1.3.1. Uraian Teoretis Metode Penelitian	8
1.3.2. Perumusan Masalah Penelitian	15
1.3.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian	16
1.3.4. Tipe Penelitian	16
1.3.5. Batasan dan Model Penelitian	17
1.4. <i>Thesis Statement</i>	17
1.5. Sistematika Penulisan	17
Bab II. DNA dan Proses Rekayasa Genetika	20
2.1. DNA sebagai Substansi Dasar Unit Pewarisan (Gen)	20
2.2. Komposisi dan Struktur Biokimiawi DNA	24
2.3. Mekanisme Operasional DNA di dalam Sel	30
2.4. Kerusakan DNA dan Mutasi sebagai Masalah Genetika	39
2.5. Metode dan Teknik Manipulasi DNA	54

Bab III. Kemungkinan Pemrograman DNA dan Kegagalan dalam Komputasi	63
3.1. Dasar Teoretis dan Eksperimentasi Komputasi DNA	63
3.2. Model dan Aplikasi Komputasi DNA	76
3.3. Galat dan <i>Debugging</i> dalam Proses Komputasi DNA	88
Bab IV. Pemrograman DNA sebagai Modus Perluasan Kekuasaan	96
4.1. Ekstensivitas Kekuasaan <i>qua</i> Model Komputasi DNA	96
4.2. Genealogi Komputasi dan Problematika Subversivitas Epistemologis	104
4.3. Dari Normalisasi hingga Kemungkinan Model Panopticon Molekuler	131
Bab V. Etika <i>Biotechne</i> Model <i>Parrhesiastic</i> dalam Konteks Re-Nurturasi	
Alam	140
5.1. Komputasi DNA dalam Perspektif Bioetika	140
5.2. Komputasi DNA dalam Perspektif Etika Informasi	149
5.3. Genealogi Etik, Hasrat Re-Nurturasi Alam, dan Dua Pertanyaan Etis dari <i>Parrhesiastes</i> tentang Kehidupan	166
Bab VI. Penutup	181
6.1. Kesimpulan	181
6.2. Saran	183
Referensi	185

DAFTAR TABEL DAN GAMBAR

Tabel

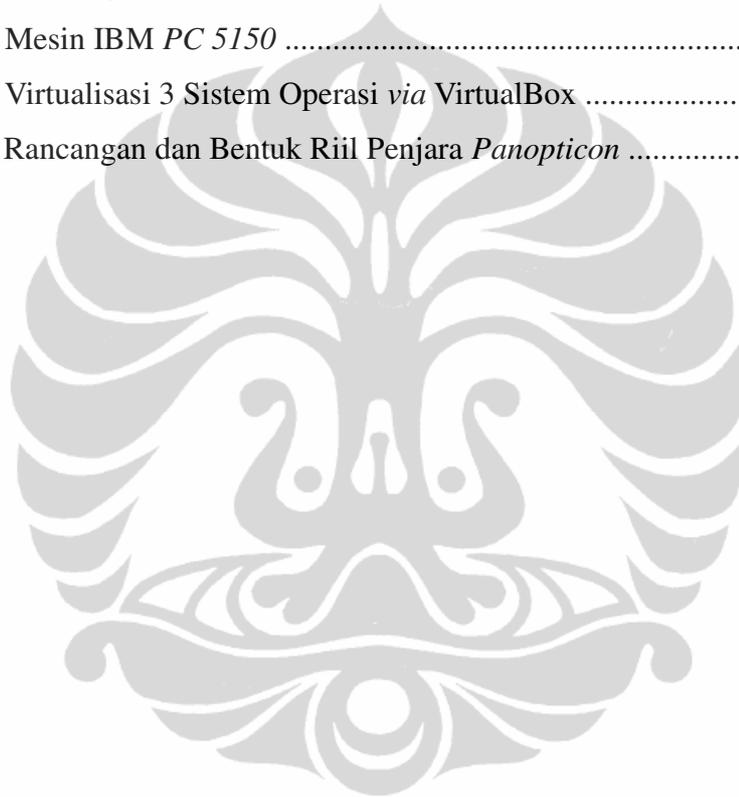
Tabel 1.1. Konversi Konsep Kunci Metode Foucauldian dalam Kajian Komputasi DNA	11
Tabel 3.1. Contoh Program Mesin Turing	66
Tabel 3.2. Contoh Perhitungan (1 + 3) dengan menggunakan Program Mesin Turing	68
Tabel 3.3. Nama Kota Tujuan dan Jalur Penerbangan dalam Bahasa DNA	72
Tabel 3.4. Model, Macam, Sifat, Aplikasi, dan Masalah beserta Cara Kerja Beragam Komputasi DNA	80-5
Tabel 4.1. Komparasi Komputasi Analog, Digital, dan Nanolog	117
Tabel 5.1. Prinsip dan Kerangka Kerja Bioetika Model <i>Belmont Report</i>	141
Tabel 5.2. Tahapan Revolusi Teknologis Terbuka Moor	155
Tabel 5.3. Tahapan Revolusi Teknologis Terbuka Moor untuk Komputasi Digital	156
Tabel 6.1. <i>Exercise</i> Kekuasaan-Pengetahuan dalam Konteks Komputasi	182
Tabel 6.2. Sikap Etis atas <i>Exercise</i> Kekuasaan-Pengetahuan dalam Konteks Komputasi DNA	182

Gambar

Gambar 2.1. Bakteri Penyebab Pneumonia	21
Gambar 2.2. Alur Percobaan Griffith	22
Gambar 2.3. Tipe Basa Nitrogen Purin	25
Gambar 2.4. Tipe Basa Nitrogen Pirimidin	25
Gambar 2.5. Nukleosida dan Nukleotida	25
Gambar 2.6. Pasangan Basa Nitrogen A-T dan G-C	26
Gambar 2.7. Rangkaian Nukleotida DNA beserta Rumus Kimiawinya	27
Gambar 2.8. Model Heliks Ganda Watson-Crick atau B-DNA dengan Arus Ganda	28

Gambar 2.9. Model-model Struktur DNA yang telah ditemukan	29
Gambar 2.10. Hierarki Struktural yang ada pada Sel Organisme	30
Gambar 2.11. DNA, Histon, dan Nukleosom dalam Kromatin	31
Gambar 2.12. Aktivasi Enzim Cdk dan Perizinan Awal oleh Enzim Kompleks Prareplikatif Gambar dalam Proses G1	34
Gambar 2.13. Proses Replikasi DNA	36
Gambar 2.14. Proses Daur Sel	37-8
Gambar 2.15. Mutagen dan Efek yang dihasilkan pada DNA	41
Gambar 2.16. Mutasi yang terjadi karena Galat dalam Proses Replikasi DNA	41
Gambar 2.17. Mutasi yang terjadi pada DNA Induk dalam Proses Replikasi DNA	42
Gambar 2.18. Mutasi yang terjadi karena Selip Replikasi dalam Proses Replikasi DNA	43
Gambar 2.19. Mutasi Pergeseran-Kerangka	44
Gambar 2.20. Perbandingan Mutasi Pergeseran-Kerangka dan Mutasi Tiada-Arti	45
Gambar 2.21. Kerangka Kerja Tahapan Perbaikan DNA	48
Gambar 2.22. Teknik dan Mekanisme Perbaikan DNA	52-3
Gambar 2.23. Tahapan Proses Kloning DNA	55
Gambar 2.24. Proses Kloning DNA dengan menggunakan Teknik PCR	59
Gambar 2.25. Proses Pembuatan Tanaman Transgenik	61
Gambar 2.26. Proses Pengobatan dengan menggunakan Terapi Gen	62
Gambar 3.1. Mekanisme Mesin Turing	69
Gambar 3.2. Jalur Hamiltonian untuk Penerbangan Bandung, Semarang, dan Yogyakarta	70
Gambar 3.3. Jalur Hamiltonian untuk Penerbangan Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit	71
Gambar 3.4. Formasi Nama Kota dan Jalur Penerbangan dalam <i>Ligation</i>	73
Gambar 3.5. Contoh Penyeleksian Rangkaian Untai DNA yang tidak memenuhi Syarat Jalur Hamiltonian oleh Primer DNA	74
Gambar 3.6. Model Heliks Ganda DNA untuk Jalur Hamiltonian pada Kasus Penerbangan Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit ...	75
Gambar 3.7. Proses Umum Alur Komputasi DNA	87

Gambar 4.1. <i>Astrolabe</i> sebagai Contoh Mesin Komputasi Analog Pertama	106
Gambar 4.2. Mesin <i>Moniac</i> buatan Bill Phillips	107
Gambar 4.3. Mesin <i>Differential Analyzer</i> buatan Vannevar Bush	107
Gambar 4.4. Mesin Komputasi Analog Elektromekanis TRIDAC	108
Gambar 4.5. Mesin Komputasi Digital Terprogram ENIAC	109
Gambar 4.6. Mesin <i>Differential Engine</i> Babbage	110
Gambar 4.7. Mesin <i>Whirlwind I</i> MIT	111
Gambar 4.8. Mesin <i>System/360 Model 65</i> IBM	112
Gambar 4.9. Mesin <i>IBM PC 5150</i>	113
Gambar 4.10. Virtualisasi 3 Sistem Operasi <i>via</i> VirtualBox	114
Gambar 4.11. Rancangan dan Bentuk Riil Penjara <i>Panopticon</i>	136



BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini merupakan gambaran singkat mengenai apa yang menjadi dasar dan fokus dari kajian yang hendak dilaksanakan dalam penelitian. Pembahasannya akan meliputi empat aspek pokok, yaitu: (1) latar belakang kenapa penelitian ini perlu dilakukan, (2) landasan teoretis yang digunakan sebagai perspektif untuk penelitian, (3) aspek metodologis yang akan diterapkan dalam penelitian ini, dan yang terakhir adalah (4) tesis yang hendak diuji dalam penelitian ini. Berikut adalah penjelasan mengenai keempat aspek pokok yang dimaksudkan.

1.1. Latar Belakang

Kasus kloning dalam dunia bioteknologi telah menjadi hal yang lazim dilaksanakan. Setelah sempat menjadi perdebatan yang cukup signifikan ketika pertama kalinya muncul lewat kasus kloning domba yang bernama “Dolly”,¹ hal ini nampak berjalan lenggang hingga sekarang. Para pakar bioteknologi tidak dapat berhenti karena perdebatan serupa itu. Hasilnya, tanaman transgenik telah dimunculkan sebagai varian lain dari teknologi kloning, meski banyak pihak yang menentang.

Tanaman transgenik ini adalah salah satu aplikasi termaju bidang rekayasa genetika yang menjadi inti dari teknik yang digunakan dalam bioteknologi. Secara sederhana, tanaman transgenik merupakan tanaman yang direkayasa sifatnya dengan memasukkan unsur gen makhluk lain yang dikehendaki. Misalnya, tanaman kapas sekarang ini telah direkayasa untuk lebih tahan terhadap serangan hama maupun dalam peningkatan produktivitasnya. Walaupun demikian, tentu saja ada beberapa efek samping yang dihasilkan selain hal positif tersebut. Misalnya, karena adanya unsur mutasi gen yang terjadi pada tanaman kapas tersebut, maka kemungkinan perubahan genetis pada hama yang menyerang tanaman kapas akan

¹ Baca mengenai proses kloning kambing Dolly ini dalam Ian Wilmut. “Cloning for Medicine”. dalam *Scientific American*. Vol. 279. No. 6. Desember 1998, hal. 58-63 dan bdk. dengan keterangan kloning yang disampaikan penulis di sub bab 2.5.

lebih besar. Selain itu, ada kemungkinan pula serangga yang tadinya bukan hama menjadi ikut terbasmi atau mengubah serangga itu menjadi hama yang utama.²

Namun demikian, walaupun sudah kita lihat perkembangan bioteknologi melalui aplikasinya yang paling maju, ternyata ada perkembangan lain yang cukup menarik sekaligus memberikan harapan bagi perluasan bidang bioteknologi itu sendiri. Pada sisi ini, telah terjadi konvergensi antara bidang bioteknologi dengan bidang teknologi informasi. Hasil dari konvergensi ini yang sekarang disebut dengan teknologi komputasi DNA. Pada teknologi komputasi DNA, dimungkinkan bagi seseorang untuk memanfaatkan DNA sebagai wahana untuk melakukan proses-proses komputasi. Artinya, komputer yang sekarang ini berwujud fisik akan berubah wujudnya menjadi sesuatu yang biologis.

Dalam bayangan Martyn Amos, di masa depan, kita akan menggunakan **koloni sel yang hidup** (*colonies of living cell*) sebagai jantung dari proses komputasi. *Neal Mendal* akan memanipulasi sel hidup tersebut lewat bahasa mereka sebagai ganti dari bahasa pemrograman yang biasanya dipakai dalam teknik berkomunikasi dengan mesin komputer. Lebih jauh, Amos melanjutkan ceritanya seperti berikut ini ketika Neal melakukan proses **pengecasan** (*charging*).³

“Tugas pertama Neal hari ini adalah mengganti nutrisi dalam unit pemrosesan utama. Ia lalu membuka rangkaian tutup tempat penyimpanan nutrisi, membuang wadah (cartridge) lamanya ke tong sampah, dan, dengan hati-hati, meletakkan penggantinya itu ke tempatnya. Ia memperhatikan cairan yang jernih itu merembes turun perlahan dari permukaan yang mendaki, serta berjaga-jaga dengan baik agar segel wadah tersebut tidak mengalami kebocoran. Modul organik itu sangat berharga (too valuable to risk) untuk dibiarkan mengering begitu saja.”

Apa yang disampaikan oleh Amos ini adalah gambaran yang sulit untuk kita percayai selainnya fiksi ilmiah walaupun bukan sesuatu yang mustahil untuk terwujud. Sebab, Amos tidak berupaya sendirian dalam konteks ini. Ehud Shapiro dan Yaakov Benenson telah mengupayakannya juga secara praktis melalui eksperimen mereka ketika berusaha menciptakan model komputer DNA. Mereka

² Baca uraian tanaman transgenik ini selengkapnya dalam Muladno. *Teknologi Rekayasa Genetika*. Ed. II. Bogor: IPB Press, 2010, hal. 121-6 dan bdk. dengan uraian penulis di sub bab 2.5.

³ Martyn Amos. *Genesis Machines: The New Science of Biocomputing*. London: Atlantic Books, 2006, hal. xii.

membuat model komputer DNA sesuai dengan prinsip Turing dan sekaligus mengujicobanya langsung pada DNA itu sendiri.⁴ Model ini merupakan terapan yang lebih jauh dari apa yang sudah mereka rumuskan dalam surat yang disampaikan dalam majalah *Nature*.⁵

Bila mereka sukses menciptakan model komputer DNA yang dapat menjalankan simulasi komputasi yang lebih kompleks, maka gambaran Amos tentang komputer DNA hanya tinggal selangkah lagi. Dari satu sisi, hal ini mengandaikan harapan yang positif seperti dimiliki oleh Neal Mendal. Namun, di sisi lain, kita juga bertanya-tanya apakah manusia sedang berperan dalam “permainan menjadi Tuhan” atau tidak?

Pendapat yang terakhir ini sebenarnya telah disinggung oleh Anthony Dyson dan John Harris dalam buku yang mereka sunting dengan judul, *Ethics and Biotechnology*. Dalam buku ini, mereka menjelaskan bahwa perkembangan bioteknologi itu “telah menghasilkan revolusi berjangka panjang dalam kapasitas kita, bukan hanya untuk memanipulasi sesuatu yang hidup dari mulai sel-sel tumbuhan tunggal hingga manusia itu sendiri, tetapi juga dapat membuat bentuk-bentuk kehidupan baru hampir ‘dari dasar’ (from scratch). Kekuasaan untuk membentuk dan membuat bentuk-bentuk kehidupan seringkali diibaratkan sebagai kekuasaan untuk ‘bermain menjadi Tuhan’ (play God). Dalam pengertian ini, kekuasaan tidak berbeda secara radikal dari kekuasaan yang selalu manusia miliki dan *coba* (exercised). Dilema kekuasaan bukanlah apakah percobaan itu sendiri—secara literer kita tidak dapat menolong diri kita sendiri—melainkan bagaimana mencobanya itu.”⁶

Pendapat mereka ini tentu saja mencakup apa yang disebutkan dalam paragraf terdahulu mengenai tanaman transgenik. Ini karena sifat tanaman transgenik yang dapat dimanipulasi dari *scratch*. Sejalan dengan kasus tanaman

⁴ Ehud Shapiro and Yaakov Benenson. “Bringing DNA Computers to Life”. *Scientific American*. Vol. 294 No. 5, Mei 2006.

⁵ Yaakov Benenson, et al. “Programmable and Autonomous Computing Machine made of Biomolecules”, dalam *Nature*. Vol. 414. 22 November 2001, dan Yaakov Benenson, et al. “An Autonomous Molecular Computer for Logical Control of Gene Expression”. *Nature*. Vol. 414. 28 April 2004.

⁶ Anthony Dyson and John Harris, Ed. *Ethics and Biotechnology*. London: Routledge, 1994, hal. 1. Cetak tebal berasal dari penulis.

transgenik, kasus komputer DNA juga mengandaikan efek yang dikatakan Dyson dan Harris. Sebab, dengan semua teknik tersebut, genetika sebagai unsur paling dasar dari suatu makhluk hidup telah masuk dalam kerangka “permainan” yang dilakukan manusia.

Bila demikian halnya, tak pelak lagi bahwa jalur perkembangan bioteknologi pada masa kontemporer ini semakin membawa kita pada masalah-masalah etis. Hal ini melengkapi kasus-kasus yang muncul dari bidang kedokteran yang juga sama-sama menyimpan dilemma etis. Semisal masalah euthanasia, aborsi, perekayasa sel induk untuk pengobatan, juga tentang perawatan para pasien yang sudah dianggap tidak dapat sembuh lagi (atau *hospitium*).⁷

Masalah etis, walaupun mungkin mengandaikan bahwa hal itu belum tentu dapat dipecahkan dengan baik, secara minimal hal ini sebaiknya dihadapi dengan pandangan kritis. Dalam kerangka seperti inilah penelitian tentang komputasi DNA akan dibuat. Bahwa telaah atas komputasi DNA akan mengandaikan bahwa perspektif yang dibuat akan bersifat kritis. Selain itu, untuk membuat perspektif yang lebih utuh, kita juga akan melihat seberapa besar kemungkinan positif dari komputasi DNA di satu sisi dan meninjau kemungkinan negatif dari komputasi DNA secara lebih cermat dan seksama.

1.2. Landasan Teoretis

Dalam mengkaji aspek filosofis komputasi DNA, ada dua perspektif yang dapat dipakai. *Pertama*, ini didasarkan pada teori bioetika dan yang *kedua* didasarkan pada etika informasi. Pertanyaan yang kemudian muncul adalah kenapa harus dengan bioetika dan etika informasi?

Perspektif ini bukanlah tanpa alasan. Sebab, kalau menilik secara lebih jauh atas apa yang disebut komputasi DNA, hal ini mengandaikan sesuatu yang disebut dengan pemrograman DNA untuk kepentingan manusia. Kalau demikian halnya, maka ketika manusia melakukan hal itu, ada konsekuensi lanjutan yang

⁷ Untuk kasus-kasus bidang kedokteran ini, penulis mengambil contohnya dari artikel-artikel Bertens dalam Kees Bertens. *Perspektif Etika Baru: 55 Esai tentang Masalah Aktual*. Yogyakarta: Kanisius, 2009, bab IV.

diandaikan muncul dari kegiatan pemrograman DNA, baik hal yang berupa efek negatif maupun efek positif.

Bila sudah masuk pada perdebatan yang menyangkut aspek negatif dan positif, maka itu tidak lain daripada bidang kajian etika. Sebab, suatu tindakan yang dianggap menghasilkan efek positif akan diganjar sebagai perbuatan baik. Sementara tindakan yang dianggap menghasilkan efek negatif akan dicap sebagai perbuatan buruk. Namun, bukan hanya masalah baik dan buruk yang menjadi bahasan etika tentunya. Lebih jauh, hal ini akan masuk dalam perdebatan **nilai yang dianggap lebih layak** (*valuable*) dibandingkan dengan **nilai yang dianggap tidak layak** (*invaluable*).

Persis dalam konteks inilah bioetika dipahami secara lebih luas. Apa yang dikatakan James F. Childress tentang bioetika, “*salah satu alasan ketertarikan yang luas dalam metode untuk melakukan sesuatu pada bioetika adalah menentukan suatu pedoman yang baik bagi tindakan manusia*”,⁸ mungkin bisa jadi catatan penting yang dapat mengarahkan fokus penelitian ini. Utamanya, ketika menyangkut batasan etis seperti apa yang “sebaiknya” boleh dilaksanakan dalam pemrograman DNA.

Namun di sisi lain, masalah komputasi DNA juga mengandaikan adanya pembahasan mengenai etika informasi. Pada konteks ini, bila penulis memakai model etika informasi dari Luciano Floridi, hal ini dapat dikategorikan masuk di bawah pembahasan mengenai **etika informasi-sebagai-sumber-daya** (*information-as-a-resource ethics*).⁹ Sebab, komputasi DNA mengandaikan satu eksplorasi atas informasi yang disediakan oleh DNA dan digunakan sebagai sumber daya komputasi.

Meskipun demikian, kajian atas komputasi DNA mengandaikan suatu dimensi epistemologis yang jauh melampaui apa yang selama ini menjadi perdebatan kubu empirisisme dan rasionalisme. Pengetahuan dalam konteks komputasi DNA mengandaikan sisi teoretis dan praktis yang bukan saja berpijak

⁸ James F. Childress. “Method in Bioethics”, dalam Bonnie Steinbock, Ed.. *The Oxford Handbook of Bioethics*. Oxford: Oxford University Press, 2007, hal. 15.

⁹ Luciano Floridi. “Information Ethics”, dalam Luciano Floridi, Ed. *The Cambridge Handbook of Information and Computer Ethics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, hal. 78.

pada pengalaman dan rasio yang kita miliki, tetapi juga berpijak pada imajinasi dan hasrat manusia untuk “bermain sebagai Tuhan” sebagaimana telah dikatakan Dyson dan Harris pada uraian sebelumnya. Kalau boleh dikatakan, pengetahuan manusia pada sisi ini dapat dikatakan memiliki sifat **subversif** (*subversive*).¹⁰

Ketika pengetahuan ditafsirkan sebagai sesuatu yang subversif, tak pelak lagi bahwa hal ini akan mengandaikan adanya masalah kekuasaan seperti disinggung dalam “permainan menjadi Tuhan” oleh Dyson dan Harris di muka. Pada sisi ini, analisis atas kekuasaan tentunya menjadi sesuatu yang semestinya dilaksanakan, terutama dalam kerangka perspektif kritis. Argumentasi kritis dalam kerangka analisis kekuasaan ini telah ditunjukkan jalannya oleh Michel Foucault dalam telaahnya mengenai kegilaan, klinik, ilmu kemanusiaan, penjara, hingga persoalan seksualitas.¹¹

Dengan luasnya telaah Foucault ini, hal tersebut mengandaikan bahwa analisis Foucault dapat dijadikan suatu analisis model bagi telaah mengenai masalah kekuasaan yang ada dalam komputasi DNA. Ini juga seperti dibayangkan oleh Foucault sendiri bahwa dalam melakukan riset: “*seorang seharusnya membaca segala sesuatu, juga mempelajari segala sesuatu.*”¹² Sehingga, dengan anjuran serupa ini, komputasi DNA dapat diangkat dan dibawa masuk dalam analisis kekuasaan model Foucauldian.

Sehubungan dengan analisis kekuasaan model Foucauldian ini, dengan pertimbangan bahwa analisis ini akan menjadi bagian dari analisis sekaligus metode yang akan dipakai dalam penelitian, maka penerapannya akan mendahului dua landasan teoretis yang telah disinggung sebelumnya, yaitu bioetika dan etika informasi. Hal ini dilaksanakan dalam kerangka untuk memperoleh perspektif kritis yang komprehensif sebelum memberikan suatu penilaian etis. Pada konteks

¹⁰ Gagasan ini juga telah muncul dalam pikiran Mark G.E. Kelly ketika membahas analisis Michel Foucault mengenai kekuasaan. Ia mengatakan bahwa sains dapat juga bersifat subversif karena dikorupsi oleh kekuasaan. Mark G.E. Kelly. *The Political Philosophy of Michel Foucault*. New York: Routledge, 2009, hal. 46.

¹¹ Mengenai konsep apa saja yang muncul dalam pikiran Foucault dalam telaahnya mengenai kekuasaan dapat dibaca dalam Clare O’Farrell. *Michel Foucault*. London: SAGE Publications, 2005, dalam apendiks 2 pada poin *Power*.

¹² Michel Foucault. “The Order of Things”, 1966, dalam Michel Foucault. *Aesthetics, Method, and Epistemology. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Vol. II. Ed. James D. Faubion. New

ini, penilaian etisnya mungkin akan berbeda dari biasanya dengan yang terdapat dalam teks bioetika ataupun etika informasi karena berkelindan dengan analisis kekuasaan. Meskipun begitu, hal ini tidak menjadi masalah mengingat perspektif Foucauldian pada akhirnya juga bermuara dalam suatu kajian etis.¹³

1.3. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang hendak digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisis kekuasaan model Foucauldian. Namun demikian, sebelum masuk dalam penjelasan teoretis metode ini, ada beberapa catatan yang perlu digarisbawahi berkenaan dengan penerapan analisis kekuasaan model Foucauldian dalam mengkaji permasalahan kekuasaan yang ada pada komputasi DNA. Berikut adalah catatan yang dimaksud.

Pertama, perlu dicatat bahwa belum ada model baku atau model standar dalam analisis kekuasaan yang dapat dijadikan acuan mengingat Foucault sendiri tidak pernah merumuskan format yang pasti dan sistematis dari analisis kekuasaan yang digunakan dalam riset-risetnya tersebut.¹⁴ Kedua, dalam analisisnya ini, Foucault seringkali menggunakan dua pendekatan metodologis secara tak tentu yang sangat bergantung pada kebutuhannya, yaitu: **arkeologi** (*archaeology*) dan **genealogi** (*genealogy*).¹⁵ Catatan ketiga adalah objek dari penelitian ini bukanlah arsip dan tidak berkerangka perspektif historis sebagaimana dilaksanakan oleh Foucault.¹⁶ Apa yang hendak dikaji pun bukan pada aspek **diskontinuitas**

York: The New Press, 1998, hal. 263. Untuk keperluan pengutipan, karya Foucault yang ini disingkat menjadi *EW2*.

¹³ Karya Foucault yang berhubungan dengan masalah etis ini dapat dibaca dalam Michel Foucault. *Fearless Speech*. Ed. Joseph Pearson. Los Angeles: Semiotext(e), 2001. Karya Foucault di atas selanjutnya disingkat menjadi *FS*.

¹⁴ Foucault memang menulis secara khusus sebuah buku metodologi yang ia maksudkan sebagai penjelasan dari metode yang diterapkannya dalam penelitian-penelitian terdahulu. Buku ini berjudul *L'archéologie du savoir* yang terbit pada tahun 1969. Namun demikian, dalam buku ini, kalau kita membacanya secara seksama, maka analisis kekuasaan tidak mendapatkan pembahasan. Yang muncul dalam buku ini adalah sistematisasi **wacana** (*discourse*). Lihat selengkapnya penjelasan Foucault tentang wacana ini dalam Michel Foucault. *The Archaeology of Knowledge and the Discourse on Language*. Trans. A.M. Sheridan Smith. New York: Pantheon Books, 1982. Karya Foucault yang ini selanjutnya disingkat menjadi *AKD*.

¹⁵ Sehubungan dengan masalah ini, catatan kritis telah diberikan O'Farrell. Ia mengatakan bahwa Foucault sangat samar dan membingungkan dalam menjelaskan apa yang dimaksud dengan arkeologi dan genealogi. Lihat dalam O'Farrell. *Op.cit.*, hal. 129.

¹⁶ Foucault mengatakan bahwa objek yang dikajinya adalah arsip dan bukannya bahasa. Lihat dalam Michel Foucault. "On the Ways of Writing of History", 1967, dalam *EW2*, hal. 289.

(*discontinuity*) dalam **formasi diskursif** (*discursive formations*) dan lebih ke arah **hubungan dan mekanisme kekuasaan** (*relation and mechanism of power*) yang ada dalam wilayah komputasi DNA.¹⁷ Inilah catatan keempat dari perbedaan dasariah antara penelitian model Foucauldian yang sudah dilakukan dengan kajian komputasi DNA yang ingin penulis laksanakan.

1.3.1. Uraian Teoretis Metode Penelitian

Catatan mendasar yang dibuat sebelumnya membuat metode penelitian model Foucauldian yang digunakan akan berbeda pada konteks penelitian ini. Meskipun ada perbedaan, hal ini diupayakan untuk tidak keluar dari perspektif Foucauldian itu sendiri. Di sisi ini, menjadi relevan untuk menggunakan aspek metodologi genealogis daripada arkeologis. Pertimbangan ini didasarkan pada beberapa poin yang sudah disampaikan oleh Foucault sendiri mengenai perbedaan arkeologi dan genealogi. Hal ini terutama berdasarkan pada penekanan Foucault sendiri yang menyatakan genealogi itu dekat dengan persoalan-persoalan kekuasaan. Berikut adalah poin-poin penting yang disampaikan oleh Foucault mengenai hal ini.

1. Dengan “arkeologi”, saya ingin menunjukkan bukan hanya suatu disiplin, tetapi suatu wilayah penelitian, yang akan dapat diterapkan pada: suatu masyarakat, wujud-wujud yang berbeda dari pembelajaran, gagasan-gagasan filosofis, pendapat sehari-hari, tetapi juga lembaga-lembaga, praktek-praktek komersial dan aktivitas-aktivitas politik, lebih jauh—semuanya mengacu pada suatu pengetahuan yang tersirat [*savoir*] khusus untuk masyarakat ini. Pengetahuan ini sangat berbeda dari wujud-wujud pembelajaran [*des connaissances*] bahwa seseorang dapat mencarinya dalam buku-buku ilmiah, teori-teori filsafat, dan pembenaran-pembenaran agama, tetapi hal ini dimungkinkan adanya pada satu waktu tertentu dengan munculnya suatu teori, suatu pendapat, suatu praktek.¹⁸
2. Arkeologi, sebagaimana saya memahaminya, tidaklah mirip dengan geologi (sebagai analisis dari substrata) atau dengan genealogi (sebagai deksripsi permulaan dan pergantian); ini adalah analisis wacana dalam **bentuk arsipnya** (archival form).¹⁹
3. Kita di sini menaruh perhatian yang cukup pada pemberontakan pengetahuan-pengetahuan yang bertentangan secara pokok bukan dengan isi, metode, atau konsep dari suatu ilmu, tetapi pada efek-efek dari pemusat-

¹⁷ Konsep diskontinuitas ini menjadi sentral dalam penelitian Foucault. Ini dibahas secara panjang lebar dalam kerangka metodis di dalam *AKD* pada pengantar dan dalam bab 2 pada sub bab *Discursive Formations*. Foucault, *AKD*, hal. 14 dan 33.

¹⁸ Foucault. *The Order*, dalam *EW2*, hal. 261.

¹⁹ Foucault. *On the Ways*, dalam *Ibid.*, hal. 289.

an kekuasaan yang terhubung dengan lembaga dan difungsikan sebagai suatu wacana ilmiah yang terorganisir dalam suatu masyarakat sebagaimana kita alami. Pun bukan menjadi suatu masalah mendasar bahwa kebanyakan dari pelebagaan dari wacana ilmiah ini terwujud dalam suatu universitas, atau, secara lebih umum, dalam suatu **aparapendidikan** (educational apparatus), dalam suatu lembaga komersial-teoretis seperti psikoanalisis atau dalam kerangka acuan yang disediakan oleh sistem politik seperti Marxisme; karena hal ini benar-benar melawan efek-efek dari kekuasaan suatu wacana yang telah dipertimbangkan menjadi ilmiah dalam mana genealogi harus membayar perjuangannya ini.²⁰

4. 'Arkeologi' akan menjadi suatu metodologi yang tepat atas analisis dari **kewacanaan lokal** (local discursivities), dan 'genealogi' akan menjadi taktiknya di mana, pada basis deskripsi dari kewacanaan lokal ini, **pengetahuan tentang subjek** (subjected knowledge) yang sudah dikemukakan kemudian akan dibawa ke dalam suatu permainan.²¹
5. Saya tidak percaya bahwa suatu problem dapat diselesaikan dengan menyejarahkan subjek sebagaimana diusulkan oleh fenomenolog, membuat subjek yang berkembang melalui rangkaian sejarah. Seseorang tidak memerlukan subjek yang dikonstitusi, untuk mendapatkan sesuatu yang luput dari subjek itu sendiri, dengan kata lain, untuk sampai pada suatu analisis yang dapat diperhitungkan sebagai konstitusi subjek dalam kerangka sejarah. Hal inilah yang akan saya sebut dengan genealogi, yaitu, suatu bentuk sejarah yang dapat diperhitungkan sebagai konstitusi pengetahuan, wacana-wacana, wilayah-wilayah objek, dan yang lainnya, tanpa memiliki acuan pada suatu subjek, baik yang *transendental* dalam kaitannya dengan lapangan peristiwa ataupun yang berjalan kesamaan yang kosong melalui rangkaian sejarah.²²

Bila dikaitkan dengan poin-poin di atas ini, nampak bahwa catatan kedua yang sudah dibuat sebelumnya menjadi signifikan urgensinya. Ini karena Foucault adakalanya berganti pemahaman tentang apa yang disebut arkeologi dan genealogi. Sehingga, kesulitan pun akan muncul ketika seorang peneliti mencoba untuk menggunakan metode Foucault dalam penelitiannya tersebut. Meskipun demikian, dengan tidak mengesampingkan aspek problematis yang ada dalam metode Foucault ini, penulis pada akhirnya akan menggunakan bantuan formatif dari Gavin Kendall dan Gary Wickham tentang elemen metodologis apa saja yang

²⁰ Foucault. "Two Lectures", 1976, dalam Michel Foucault. *Power/Knowledge: Selected Interviews and Other Writings 1972-1977*. Ed. Colin Gordon. New York: Pantheon Books, 1980, hal. 84. Untuk selanjutnya, karya Foucault ini disingkat menjadi *PK*.

²¹ Foucault. *Ibid.*, hal. 85.

²² Foucault. "Truth and Power", 1977, dalam Michel Foucault. *Power. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Vol. III. Ed. James D. Faubion. New York: The New Press, 2000, hal. 118. Karya Foucault ini selanjutnya disingkat menjadi *EW3*.

ada dalam metode Foucault ini. Berikut adalah rumusan metodologis Foucauldian yang mereka susun.

Dalam metode arkeologi Foucault, ada tujuh elemen metodologis yang perlu dilaksanakan dalam suatu penelitian. Elemen-elemen ini adalah:²³

1. *petakan hubungan antara yang **dapat dikatakan** (sayable) dengan yang **dapat dilihat** (visible);*
2. *analisis hubungan antara **pernyataan** (statement) yang satu dengan pernyataan lainnya;*
3. *rumuskan **aturan untuk keberulangan pernyataan** (rules for repeatability of statements) (atau, jika kamu suka, penggunaan pernyataan);*
4. *analisis **posisi** (position) yang dibangun antara subjek – untuk mana sesuatunya itu dapat kita pikirkan sebagai subjek sebagaimana manusia – dalam hubungannya dengan pernyataan;*
5. *jelaskan '**permukaan kemunculan**' (surfaces of emergence) – tempat dalam mana objek-objek ditunjukkan dan bertindak atas apa;*
6. *jelaskan '**lembaga-lembaga**' (institutions), yang memperoleh otoritas dan menyediakan batasan-batasan dalam mana objek wacana ini mungkin bertindak atau hadir;*
7. *jelaskan '**bentuk-bentuk kekhususan**' (forms of specification), yang mengacu pada cara-cara dalam objek wacana dijadikan sasaran. Suatu '**bentuk kekhususan**' ini adalah sistem untuk memahami fenomena partikular dengan maksud menghubungkan hal itu ke fenomena yang lainnya.*

Sedangkan untuk metode genealogi Foucault, mereka telah menyusun elemen-elemen metodologisnya sebagai berikut:²⁴

1. *jelaskan pernyataan-pernyataan tetapi dengan tekanan pada kekuasaan;*
2. *perkenalkan kekuasaan melalui suatu '**sejarah kekinian**', yang berkenaan dengan '**fungsi-fungsi yang tidak menyenangkan dan asal-asal yang jelek**' (disreputable origins and unpalatable functions), ... dengan menunjukkan fungsi-fungsi dan asal-asal yang mereka lebih suka untuk tetap menyembunyikannya;*
3. *jelaskan pernyataan-pernyataan sebagai suatu proses yang berjalan, daripada suatu cuplikan dari jaringan wacana;*
4. *konsentrasikan pada penggunaan strategis dari arkeologi untuk menjawab problem-problem kekinian.*

Elemen metodologis Foucauldian yang mereka rumuskan ini lebih jelas dan sederhana dibandingkan dengan apa yang Foucault sampaikan tadi. Kalau

²³ Gavin Kendall and Gary Wickham. *Using Foucault's Methods*. London: SAGE Publications, 1999, hal. 26.

²⁴ Kendall and Wickham. *Ibid.*, hal. 34.

misalnya ini dikonversikan ke dalam kajian komputasi DNA dan mempertimbangkan catatan ketiga yang tadi telah diberikan, maka penulis akan mencoba mengkonversikan konsep-konsep kunci yang diberikan Kendall dan Wickham sebagai berikut.

Tabel 1.1. Konversi Konsep Kunci Metode Foucauldian dalam Kajian Komputasi DNA

Konsep Kunci Metode	Konsep Konversi dalam Kajian Komputasi DNA
Yang dapat dikatakan (<i>Sayable</i>)	Teori komputasi DNA
Yang dapat dilihat (<i>Visible</i>)	Eksperimen komputasi DNA
Pernyataan (<i>Statement</i>)	Model komputasi DNA
Aturan keberulangan (<i>Rules for repeatability</i>)	Protokol dan Prosedur yang digunakan di laboratorium untuk kebutuhan komputasi DNA
Posisi (<i>Position</i>)	<i>Developer</i> atau pengembang komputasi DNA
Permukaan kemunculan (<i>Surface of emergence</i>)	<i>In vitro, in silico, in vivo</i> (tempat yang digunakan sebagai medium untuk komputasi DNA)
Lembaga-lembaga (<i>Institutions</i>)	Departemen Biologi Molekuler, Departemen Komputer, dan Departemen Matematika di Universitas tempat riset dilaksanakan, serta Lembaga Penelitian di luar Universitas
Bentuk kekhususan (<i>Form of specification</i>)	<i>Biocomputing machine</i>
Sejarah kekinian (<i>History of present</i>)	Pemrograman virus dan bakteri (sudah dijalankan) Pemrograman seluruh makhluk hidup (termasuk manusia)
Proses yang berjalan (<i>Ongoing process</i>)	Riset mengenai model komputasi DNA

Pengkonversian konsep kunci ini mungkin akan menimbulkan tanda tanya besar mengingat perubahan yang dibuat cukup signifikan, terutama dalam konversi *statement* menjadi *model*. Sehubungan dengan hal ini, ada beberapa argumentasi yang dapat dikemukakan. Dalam komputasi DNA, apa yang disebut model komputasi tiada lain dari sejumlah pernyataan logis yang disusun dalam bentuk algoritma dan program untuk memenuhi pelaksanaan proses komputasi. Oleh karenanya, model komputasi DNA dapat disebut *statement* karena berisi pernyataan.

Demikian pula dengan pengkonversian konsep kunci *sayable* dan *visible* menjadi teori dan eksperimentasi. Ini karena teori hanya dapat dibicarakan, namun belum tentu dapat direalisasikan. Sedangkan eksperimentasi, hal ini jelas dapat dilihat seketika, baik prosesnya dan hasil dari proses tersebut. Sedangkan dalam *history of present*, sesuatu yang disebut *disreputable origins and unpalatable functions* ini terletak dalam penerapan komputasi DNA dalam makhluk hidup di tingkat mikro, yaitu bakteri dan virus. Aplikasi komputasi DNA pada makhluk hidup di tingkat mikro ini mengandung aspek problematis yang sangat rumit mengingat bahwa jika ini berhasil dilaksanakan dengan baik, maka manusia sebagai *developer* akan cenderung menerapkannya pada makhluk hidup dengan tingkatan yang lebih tinggi seperti dilaksanakan dalam percobaan-percobaan farmakologis ataupun dalam proses kloning.

Berdasarkan pada beberapa alasan ini, penulis beranggapan bahwa konversi konsep kunci metode Foucauldian dalam kajian komputasi DNA dapat dianggap “ **mungkin untuk diterapkan** ” (*feasible*) walaupun tidak dapat dianggap adekuat. Sehingga, penelitian mengenai komputasi DNA dapat dilaksanakan meskipun harus dilengkapi dengan beberapa **pertimbangan metodologis** (*methodological precaution*) tambahan yang telah dibuat oleh Foucault. Pertimbangan metodologis ini diberikan oleh Foucault dalam konteks analisis kekuasaan, yang mau tidak mau harus penulis masukkan sebagai bagian dari batasan metodologis.

Adapun pertimbangan metodologis yang dimaksud, hal ini dapat dibaca dalam poin-poin berikut ini:

1. *Analisis dalam perumusan masalahnya ini seharusnya tidak memusatkan dirinya dengan bentuk-bentuk kekuasaan yang telah diregulasi dan dianggap sah dalam lokasi pusatnya, dengan suatu mekanisme umum yang memungkinkan mereka untuk beroperasi, dan pada efek-efek yang berkelanjutan dari hal tersebut. Sebaliknya, analisis harus dipusatkan pada kekuasaan dalam bentuknya yang ekstrim, dalam tujuan utamanya, yang dengan poin ini kekuasaan menjadi seperti **pembuluh darah** (capillary), artinya, dalam bentuk-bentuk dan lembaga-lembaga yang lebih regional dan lokal. Pusat perhatian yang terpenting, faktanya, seharusnya berkenaan dengan poin di mana kekuasaan mengatasi aturan-aturan hak yang diorganisir dan tidak dibatasi, serta memperluas dirinya melampaui hal tersebut, menanamkan dirinya dalam lembaga-lembaga, menjadi terwujud dalam teknik-teknik, dan meleng-*

kapi dirinya dengan peralatan-peralatan, serta pada akhirnya dengan cara-cara keras dari campurtangan material.²⁵

2. Analisis tidak seharusnya dipusatkan pada kekuasaan di level keputusan atau maksud yang disadari; bahwa hal itu seharusnya tidak diusahakan untuk mempertimbangkan kekuasaan dari sudut pandangan internalnya dan bahwa hal itu dijaga dari penempatan pertanyaan yang tidak dijawab dan seperti labirin jalannya: 'Siapa yang kemudian memiliki kekuasaan dan apa yang ada di pikirannya? Apa maksud dari seseorang yang memiliki kekuasaan?' Sebagai gantinya, ini adalah kasus pengkajian kekuasaan pada poin di mana maksudnya, jika hal itu dimiliki, ditanamkan secara lengkap dalam praktek-praktek yang efektif dan nyata. Apa yang dibutuhkan adalah kajian kekuasaan dalam wajah eksternalnya, pada poin di mana hal ini ada dalam hubungan yang langsung dan segera dengan sesuatu yang secara sementara dapat kita sebut itu sebagai objek, sasarannya, lapangan penerapannya, di sana—dengan kata lain—dalam mana hal itu memasang dirinya sendiri dan menghasilkan efek-efek yang nyata.²⁶
3. Kekuasaan itu tidak dapat diambil sebagai fenomena dari dominasi homogen dan yang terkonsolidasi dari seorang individu atas yang lainnya, atau dari suatu kelompok atau kelas atas yang lainnya. Secara kontras, apa seharusnya disimpan dalam pikiran adalah bahwa kekuasaan, jika kita tidak mengambil pandangan yang terlalu jauh atasnya, bukannya suatu yang dapat membuat perbedaan antara seseorang yang secara eksklusif memiliki dan menyimpannya, dan seseorang yang tidak memiliki dan tidak dimasukkan ke dalamnya. Kekuasaan seharusnya dianalisis sebagai sesuatu yang **menyebar** (circulates), atau tepatnya sebagai sesuatu yang hanya berfungsi dalam bentuk suatu rantai. Kekuasaan tidak pernah dilokalisasi di sini atau di sana, tidak pernah ada dalam tangan seseorang, tidak pernah tepat sebagai suatu komoditas atau potongan dari kekayaan. Kekuasaan itu **dicoba dan dipekerjakan** (employed and exercised) melalui organisasi yang **menyerupai jaringan** (net-like). Dan bukan hanya dilakukan individu penyebaran di antara galurnya; mereka selalu ada di posisi yang secara bersamaan menjalani dan mencoba kekuasaan ini. Mereka bukan hanya tak berdaya atau sasaran yang dituju; mereka juga selalu merupakan elemen artikulasinya ini. Dengan kata lain, individu adalah wahana kekuasaan; bukannya poin dari penerapannya.²⁷
4. Ketika saya mengatakan bahwa kekuasaan itu membentuk jaringan yang dapat menyebar dengan bebas, hal ini benar hanya pada suatu poin yang pasti. Dalam kebanyakan gaya yang sama, kita dapat mengatakan bahwa oleh karena kita memiliki sejenis fasisme dalam kepala kita, atau yang lebih dalam, bahwa kita semua memiliki kekuasaan dalam tubuh kita. Namun, saya tidak percaya seseorang seharusnya menyimpulkan dari hal ini bahwa kekuasaan itu sesuatu yang tersebar dengan baik di dunia, meskipun dalam beberapa pengertian hal itu memang demikian adanya. Kita tidak berhadapan dengan suatu jenis penyebaran kekuasaan yang anarkis atau demokratis melalui tubuh. Dengan kata lain, hal

²⁵ Foucault. Two Lectures, dalam PK, hal. 96.

²⁶ Foucault. *Ibid.*, hal. 97.

²⁷ Foucault. *Ibid.*, hal. 98.

itu nampak bagi saya bahwa sesuatu yang penting itu bukanlah suatu upaya dari beberapa jenis deduksi kekuasaan yang berasal dari pusatnya dan bertujuan pada penemuan perluasannya, untuk mana hal itu meresap hingga ke dasarnya, suatu derajat untuk mana hal itu mereproduksi dirinya sendiri turun kepada dan memasukkan banyak unsur molekuler dari masyarakat. Seseorang seharusnya lebih mengarahkan dirinya pada suatu analisis menaik dari kekuasaan, yang dimulai, yaitu, dari *mekanisme terkecil* (infinitesimal mechanism), yang masing-masingnya ini memiliki sejarahnya sendiri, jejaknya sendiri, taktik dan tekniknya sendiri, dan kemudian melihat bagaimana mekanisme kekuasaan ini telah—dan terus dilanjutkan—diinvestasikan, dikolonisasi, digunakan, involusif, diubah, dipindahkan, diperluas, dsb., oleh mekanisme yang lebih umum dan oleh bentuk-bentuk dari dominasi global.²⁸

5. Hal ini benar-benar mungkin bahwa mekanisme utama dari kekuasaan telah dilengkapi oleh produksi ideologis. Di sana ada, misalnya, kemungkinan suatu ideologi pendidikan, ideologi monarki, ideologi demokrasi parlementer, dsb.; tetapi, secara mendasar, saya tidak percaya bahwa apa yang telah mengambil tempat itu dapat disebut sebagai ideologis. Hal tersebut lebih banyak dan lebih kurang dari ideologi. Ini adalah produksi dari instrument efektif untuk perumusan dan akumulasi dari pengetahuan—metode pengamatan, teknik registrasi, prosedur penyelidikan dan penelitian, aparat pengendalian. Semuanya ini berarti bahwa kekuasaan, ketika hal itu diuji-coba melalui mekanisme yang sangat halus ini, tidak dapat melainkan memperkembangkan, mengorganisasikannya, dan menempatkannya ke dalam persebaran pengetahuan, atau lebih tepatnya, aparat pengetahuan, yang bukan merupakan suatu bangunan ideologis.²⁹

Bila kelima poin metodologis ini kita kaji secara seksama, apa yang tersaji di dalamnya bukanlah hal yang mudah untuk dicerna. Namun demikian, penulis dapat mencatat beberapa konsep kunci yang dapat dijadikan patokan dasar dalam menerapkan analisis kekuasaan model Foucauldian ini. Pada poin pertama, analisis kekuasaan tidak boleh dilaksanakan pada *pusat*-nya secara umum, tetapi dapat dilaksanakan pada *ujung*-nya yang sudah “mendarah daging”.

Ketika orang menyadari kekuasaannya, hal ini bukanlah bagian dari analisis. Yang menjadi bagian dari analisis kekuasaan pada poin kedua adalah kekuasaan yang berada di luar kesadaran dan ada dalam praktiknya yang efektif. Aspek kekuasaan yang hendak dikaji dalam poin ketiga adalah bukannya pada kekuasaan hegemonis, melainkan pada aspek kekuasaan yang menyebar, berantai, dan juga bersifat seperti jaringan yang terorganisasi. Untuk lebih mudahnya,

²⁸ Foucault. *Ibid.*, hal. 99.

²⁹ Foucault. *Ibid.*, hal. 102.

aspek kekuasaan di poin keempat dikaji dalam model *bottom up* dan bukannya *top down*, dengan mempertimbangkan hubungannya dengan jaring kekuasaan yang lebih besar dan lebih luas. Sedangkan dalam poin kelima, kekuasaan bukanlah sesuatu yang ideologis melainkan kekuasaan itu dihasilkan secara lebih sistematis melalui pengetahuan dan metode-metode yang diterapkan secara khusus untuk itu.

Demikian, inilah beberapa pertimbangan metodologis yang menjadi batasan metodologis untuk model analisis kekuasaan yang akan penulis terapkan dalam penelitian komputasi DNA. Adapun uraian lebih jauh mengenai kekuasaan yang dipaparkan oleh Foucault akan penulis jelaskan, sekaligus diterapkan dalam kerangka analisis kekuasaan atas komputasi DNA di bab 4.

1.3.2. Perumusan Masalah Penelitian

Telaah mengenai bidang komputasi DNA masih jarang dilaksanakan dalam kerangka wacana social, politik, maupun kebudayaan. Khususnya, jika penelitian ini dititikberatkan pada aspek filosofis atas masalah tersebut, terlebih dalam aspek analisis kekuasaan. Ini mengingat bahwa studi komputasi DNA masih dalam tahap perkembangan. Walaupun demikian, ada hal penting yang perlu diketahui dari studi tersebut. Hal ini meliputi satu pertanyaan mendasar:

Jika sudah ditemukan cara komputasi DNA yang praktis, apakah masalah yang dihadapi secara langsung oleh para pemrogram DNA dan efek apakah yang sekiranya mungkin terjadi dengan dilakukannya pemrograman DNA?

Meskipun kita sudah memiliki satu pertanyaan dasar dalam penelitian ini, pertanyaan mendasar yang telah disampaikan bukanlah rumusan masalah atas apa yang ingin dikaji oleh penulis. Pertanyaan ini lebih merupakan pertanyaan dasar yang menjadi bagian integral dari studi komputasi DNA. Bila ini terkait langsung dengan apa yang ingin dikaji oleh penulis atas aspek filosofis studi komputasi DNA, hal ini berupa perumusan masalah sebagai berikut:

Jika pemrograman DNA sudah dapat dipraktikan secara massal seperti halnya dalam studi teknologi informasi, maka batasan seperti apa yang sekiranya mungkin diterapkan dalam kasus komputasi DNA

dengan mempertimbangkan aspek-aspek kekuasaan yang ada dalam kajian tersebut?

Perumusan yang terakhir ini tentu saja akan membawa penulis pada suatu telaah mengenai batasan etis yang dimungkinkan dalam kasus komputasi DNA dalam kaitannya dengan aspek-aspek kekuasaan yang ada dalam kajian ini.

1.3.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah membongkar semua kemungkinan hubungan dan mekanisme kekuasaan yang ada dalam studi pemrograman DNA beserta aspek-aspek konfliktualnya. Menurut hemat penulis, dengan melakukan kajian yang serupa ini, kita akan dapat mengambil manfaat untuk bersikap kritis terhadap teknologi baru yang akan mengubah cara kita hidup di dunia ini pada masa yang akan datang.

Selain itu, dalam penelitian ini, akan diperlihatkan pula bahwa etika yang sudah dikembangkan tidak memadai untuk dapat diterapkan dalam konteks komputasi DNA. Ini karena etika yang sudah ada tidak dapat mengantisipasi perkembangan yang ada dalam komputasi DNA. Oleh karenanya, dalam penelitian ini akan dicoba dirumuskan suatu etika baru yang lebih sesuai dengan konteks komputasi DNA.

1.3.4. Tipe Penelitian

Tipe dari penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian referensi. Walaupun demikian, ciri utama dari penelitian ini hampir mirip dengan tipe penelitian kepustakaan. Perbedaan terpenting antara penelitian referensi dengan penelitian kepustakaan dapat diterangkan sebagai berikut.

Dalam suatu penelitian kepustakaan, sumber atau bahan yang dipergunakan itu lebih banyak berupa bibliografi (terutama buku cetak) atau media yang sejenis dengannya. Sedangkan dalam penelitian referensi, sumber atau bahan yang dipergunakan adalah semua jenis media yang mungkin. Artinya, sumber ataupun bahannya tidak terbatas dalam media yang berbentuk buku saja, namun juga melingkupi media lainnya seperti filmografi (dalam bentuk CD), file

(dalam bentuk data digital, seperti halnya sumber daya yang terdapat di Internet), ataupun fonografi (dalam bentuk kaset). Dengan demikian, perbedaan yang terutama terdapat dalam penelitian ini dengan tipe penelitian kepustakaan adalah dalam hal sumber atau bahan yang dipergunakan.

1.3.5. Batasan dan Model Penelitian

Dalam penelitian ini, aspek material yang dikaji adalah fenomena perkembangan komputasi DNA beserta teori, eksperimen, dan model praktis yang telah dibuat untuk keperluan komputasi DNA. Sehingga, penelitian ini terbatas pada dua aspek yang telah disebutkan. Sedangkan untuk aspek analitisnya, apa yang menjadi fokus kajian adalah hubungan dan mekanisme kekuasaan yang ada dalam komputasi DNA.

Adapun model penelitian yang digunakan, modelnya ini akan menggunakan analisis kekuasaan Foucauldian dengan beberapa penyesuaian yang telah dibuat dalam penjelasan mengenai uraian teoretis metode ini pada sub bab 1.3.1.

1.4. Thesis Statement

Menurut hemat penulis, pemrograman DNA mengandaikan suatu aspek dari **perluasan kekuasaan** (*extend of power*) yang akan memungkinkan manusia untuk mengontrol hidup dan kehidupan. Ini juga akan memungkinkan manusia untuk menggali pengetahuan yang baru, namun sekaligus memperlihatkan bahwa pengetahuan manusia akan sesuatu tidak akan pernah lengkap adanya.

1.5. Sistematika Penulisan

Hasil dari penelitian ini akan disampaikan dengan mempertimbangkan apa yang sudah Foucault sampaikan di muka. Meskipun hal ini tidak akan memenuhi semua ekspektasi yang diinginkan, namun paling tidak sudah mendekati apa yang disyaratkan Foucault dengan 5 pertimbangan metodologisnya. Oleh karenanya, susunan atau sistematika penulisan dari penelitian ini akan berbeda dengan yang biasanya dilaksanakan dalam kajian tokoh atau bila menggunakan metode selain Foucauldian. Berikut adalah sistematika dari penulisan penelitian ini.

Bab pertama mengutarakan latar belakang kenapa penelitian ini dibuat dan sekaligus penjelasan atas aspek metodologis penelitian yang dipergunakan. Dalam hal metodologi, seperti telah dikemukakan, penelitian ini akan meminjam metodologi dan analisis Foucauldian. Selain itu, dalam bab pertama ini, suatu thesis statement akan coba dirumuskan dan menjadi pedoman yang mengarahkan fokus penelitian ini.

Setelah persiapan dilaksanakan, uraian mengenai objek material atau objek yang akan dikaji disampaikan dalam bab kedua dan bab ketiga. Ini dilaksanakan demikian oleh karena objek materialnya bersifat sangat teknis dan juga mempertimbangkan pertimbangan metodologis Foucault yang keempat, bahwa: “*sesorang seharusnya lebih mengarahkan dirinya pada suatu analisis menaik dari kekuasaan, yang dimulai, yaitu, dari mekanisme terkecil (infinitesimal mechanism), yang masing-masingnya ini memiliki sejarahnya sendiri, jejaknya sendiri, taktik dan tekniknya sendiri, dan kemudian melihat bagaimana mekanisme kekuasaan ini telah—dan terus dilanjutkan—diinvestasikan, dikolonisasi, digunakan, involusif, diubah, dipindahkan, diperluas, dsb., oleh mekanisme yang lebih umum dan oleh bentuk-bentuk dari dominasi global.*” Dalam membaca uraian Foucault ini, terutama istilah *infinitesimal mechanisms*, penulis menafsirkannya sebagai permintaan Foucault untuk kedetilan suatu penjelasan atas semua mekanisme serta proses yang berhubungan dengan objek material. Walaupun dapat berbeda penafsiran, namun pemahaman seperti inilah yang penulis ambil dan digunakan dalam penelitian ini.

Adapun analisis atas objek material, ini disampaikan secara penuh dalam uraian di bab keempat. Oleh karena dibutuhkan pula suatu pemahaman yang lebih baik, penulis telah melakukan suatu pendekatan arkeologis di sub bab 4.2. untuk melengkapi analisis genealogis yang akan digunakan. Sedangkan bab kelima, merupakan refleksi penulis atas semua persoalan yang mungkin akan menjadi masalah signifikan dan mengemuka setelah dilakukannya analisis kekuasaan atas mekanisme dan proses objek material yang telah dikemukakan di bab keempat.

Terakhir, dalam bab keenam, penulis akan merangkum semua hasil penelitian dalam ikhtisar yang cukup ringkas mengingat penelitian ini cukup detil

di hampir keseluruhan uraiannya. Selain itu, tentu saja penulis akan sampaikan beberapa saran yang dapat dipakai bila hendak mengkaji tema penelitian sejenis. Bila dimungkinkan, penulis akan memberikan suatu epilog atas penelitian ini setelah mendapatkan saran dan kritik yang dapat lebih me-“najam”-kan hasil dari analisis penelitian ini.



BAB II

DNA DAN PROSES REKAYASA GENETIKA

Dalam bab yang terdahulu, penulis telah menyinggung banyak hal yang berkaitan dengan aplikasi bioteknologi kontemporer, termasuk adanya aplikasi lintas bidang dengan teknologi informasi yang disebut dengan komputasi DNA. Namun demikian, apa yang dimaksudkan dengan DNA itu sendiri? Jawaban atas pertanyaan ini tentu saja akan menjadi landasan bagi penulis untuk masuk dalam uraian-uraian bab II ini secara lebih jauh.

2.1. DNA sebagai Substansi Dasar Unit Pewarisan (Gen)³⁰

Lama berselang pada awal tahun 1920-an, para ahli genetika masih berdebat tentang apakah substansi dasar biokimia yang dapat disebut unit pewarisan (gen) dan merupakan pembawa sifat-sifat dasar makhluk hidup. Ada dua pilihan yang mereka miliki. Pertama adalah **protein** (*proteins*) dan yang kedua adalah **asam nukleat** (*nucleic acids*). Kandidat substansi dasar yang pertama merupakan pilihan yang paling disukai karena kompleksitas struktur kimiawi yang dimilikinya. Sedangkan kandidat substansi dasar kedua dipandang tidak signifikan karena struktur kimiawinya lebih sederhana. Namun begitu, pilihan belum lagi diputuskan.

Berbicara mengenai substansi dasar yang pertama, protein itu tidak lain daripada serangkaian susunan **asam amino** (*amino acids*).³¹ Terdiri dari empat lapis struktur, protein boleh dikatakan sebagai makro molekul. Ini berbeda dengan asam nukleat—walaupun dapat disebut juga makro molekul—yang hanya terdiri dari unsur **gula** (*sugar*), **fosfat** (*phosphate*), dan **basa nitrogen** (*nitrogen*

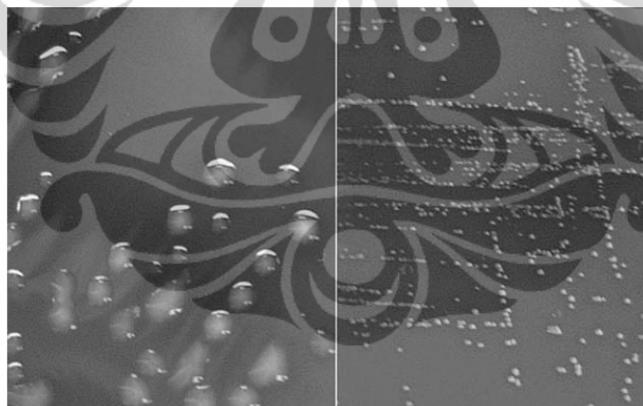
³⁰ Uraian pada bagian ini didasarkan pada penjelasan yang disampaikan oleh Anna C. Pai. *Dasar-dasar Genetika: Ilmu untuk Masyarakat*. Penerj. Muchidin Apandi. Ed. II. Jakarta: Erlangga, 1992 dan penjelasan dari Eberhard Passarge. *Color Atlas of Genetics*. 2nd Ed. Stuttgart: Thieme, 2001.

³¹ Yang dimaksud dengan asam amino itu adalah senyawa kimia gabungan yang terdiri dari zat Karbon, Oksigen, dan Hidrogen (-COOH) sebagai unsur asamnya. Sedangkan unsur amino adalah senyawa kimia gabungan yang terdiri dari zat Nitrogen dan Hidrogen (-NH₂). Lihat keterangan tentang asam amino ini dalam Don Rittner and Ronald A. Bailey. *Encyclopedia of Chemistry*. New York: Facts On File, Inc., 2005, hal. 11 dan Passarge. *Op.cit.*, hal. 30.

base). Keduanya berperan penting dalam membentuk sel yang menjadi inti dari makhluk hidup.

Namun, pada akhirnya, F. Griffith telah membantu para ahli genetika untuk menemukan jalannya di tahun 1928. Melalui percobaan yang dilakukannya pada tikus di laboratorium, Griffith menemukan bahwa bakteri *Diplococcus Pneumoniae* (bakteri yang menyebabkan sakit pneumonia atau radang paru-paru) telah ber-*transformasi* ketika disuntikkan pada tikus. Eksperimen ini dapat dijelaskan sebagai berikut.³²

Griffith memiliki dua jenis bakteri setelah serangkaian percobaan. Pertama, ada jenis bakteri yang secara normal menyebabkan penyakit dengan lapisan yang licin dan mengkilap. Kedua, ia memiliki varian lain dari bakteri tersebut yang mengalami perubahan genetik ketika ditumbuhkan pada agar. Bakteri yang terakhir terlihat kasar dan suram, serta tidak menyebabkan sakit pneumonia. Untuk lebih jelasnya, dua bakteri yang dimaksudkan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.³³



Gambar 2.1. Bakteri Penyebab Pneumonia

Keterangan:

Bakteri penyebab pneumonia yang bersifat virulen gambarnya terletak di sebelah kiri. Sedangkan untuk bakteri yang kehilangan sifat virulennya ada pada gambar sebelah kanan.

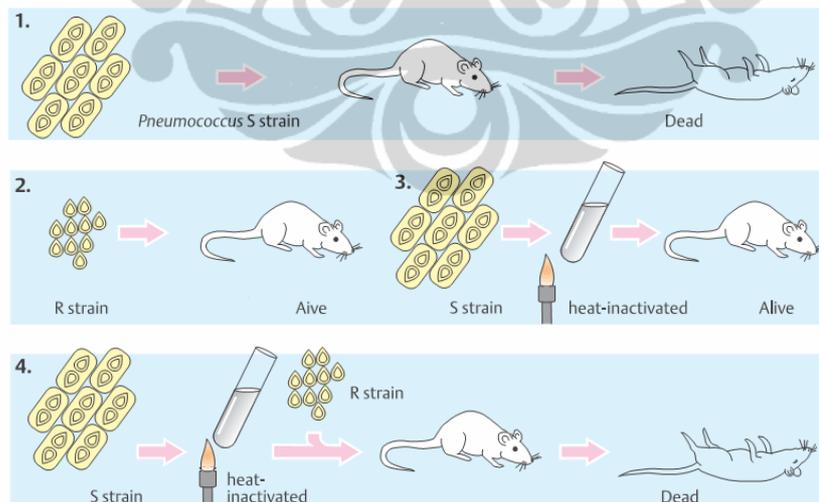
Setelah dua jenis bakteri ini diperoleh, ia lalu mencoba bereksperimen dengan tikus. Kelompok tikus pertama disuntikkan bakteri yang terlihat kasar dan

³² Lihat dalam Pai. *Op.cit.*, hal 106-7 dan juga dalam Passarge. *Op.cit.*, hal. 6 dan 34.

³³ Gambar dikutip dari Charlotte K. Omoto and Paul F. Lurquin. *Genes and DNA: A Beginner's Guide to Genetics and Its Applications*. New York: Columbia University Press, 2004, hal. 5, yang merupakan hasil foto dari Kirstin Malm.

suram. Kelompok tikus kedua disuntikkan bakteri normal yang licin dan mengkilap namun telah dimatikan terlebih dahulu dengan cara pemanasan. Sedangkan pada kelompok tikus ketiga, gabungan antara bakteri kasar yang hidup dan bakteri licin yang telah dimatikan secara bersamaan disuntikkan ke dalam tikus-tikus itu.

Hasilnya tidak begitu mengherankan ketika didapati bahwa tikus-tikus pada kelompok pertama dan kedua masih terlihat sehat dan tidak sakit. Hasil yang justru mencengangkan justru didapati dari reaksi tikus pada kelompok ketiga. Ternyata, tikus-tikus yang ada di kelompok ketiga mengalami sakit dan mati. Berdasarkan pada hasil percobaan ini, Griffith kemudian menemukan bahwa dalam bangkai tikus kelompok ketiga telah muncul bakteri normal yang licin dan mengkilap. Ia lalu mencatat ada dua kemungkinan yang terjadi: (1) bakteri normal yang mati telah menyebabkan perubahan pada bakteri yang kasar, dan (2) bakteri normal yang mati hidup kembali karena percampuran dengan bakteri yang kasar. Hasil dari eksperimen Griffith ini dikenal dengan nama **efek Griffith** (*Griffith's effect*) atau disebut pula **Prinsip Transformasi** (*Transformation Principle*). Secara sederhana, percobaan Griffith ini dapat diringkaskan melalui gambar berikut ini.³⁴



Gambar 2.2. Alur Percobaan Griffith

Keterangan:

1. Bakteri pneumonia virulen (*S strain*) yang disuntikkan mengakibatkan kematian pada tikus.
2. Tikus yang disuntikkan bakteri pneumonia avirulen (*R strain*) masih dapat bertahan hidup.

³⁴ Gambar dikutip dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 35.

3. Tikus yang disuntikkan bakteri pneumonia virulen yang telah dimatikan melalui proses pemanasan masih dapat bertahan hidup.
4. Bakteri pneumonia virulen yang telah dimatikan melalui proses pemanasan ditambah bakteri pneumonia avirulen yang masih hidup mengakibatkan kematian pada tikus tersebut.

Percobaan Griffith ini lalu diulang kembali oleh Oswald T. Avery, C.M. MacLeod, dan McCarty di Rockefeller Institute, New York pada tahun 1944 dengan menggunakan bakteri yang agak berbeda namun memiliki sifat yang sama, yaitu *Streptococcus Pneumoniae*. Hasilnya, mereka lalu menyimpulkan bahwa yang bertanggung jawab atas perubahan bakteri kasar dan suram menjadi bakteri yang licin dan mengkilap itu tidak lain daripada bagian asam nukleat yang terdapat dalam inti sel yang disebut Asam Deoksiribonukleat atau DNA.³⁵

Apa yang diungkapkan oleh Avery dan rekan-rekannya ternyata masih belum dapat menjadi bukti yang kuat untuk mengatakan bahwa DNA itu adalah penyebab dari Prinsip Transformasi. Oleh karena itu, hasil yang didapatkan oleh Avery dan rekan-rekannya harus diperkuat dan dibuktikan oleh percobaan lainnya. Percobaan ini lalu dibuat oleh A.D. Hershey dan M. Chase di tahun 1952. Mereka menggunakan virus sebagai ganti dari bakteria. Dalam percobaannya ini, mereka menemukan bahwa ketika virus bereproduksi, virus itu tidak menggunakan protein. Virus hanya perlu menginfeksi sel dari luar dan memasukkan DNA ke dalam sel inang. Dalam prosesnya ini, selaput protein virus dibiarkan berada di luar sel, sementara DNA yang masuk dari tubuh virus akan membuat sel inang itu mereproduksi virus yang baru.³⁶

Akhirnya, setelah percobaan Hershey dan Chase diumumkan, barulah para pakar biologis memiliki kepercayaan bahwa DNA-lah yang memang bertanggung jawab atas terjadinya Prinsip Transformasi. Mereka lalu menetapkan DNA sebagai substansi dasar yang disebut gen dan membawa sifat-sifat dasar makhluk hidup. Namun, mereka masih terganjal oleh satu pertanyaan berikutnya, yaitu: seperti apakah struktur DNA itu?

³⁵ Pai. *Loc.cit.* dan Passarge. *Op.cit.* hal. 6 dan 34. Uraian lain tentang eksperimen ini dapat dibaca dalam buku Omoto dan Lurquin. *Op.cit.* hal. 3-6.

³⁶ Pai. *Loc.cit.* dan Passarge. *Loc.cit.* Agar lebih jelas dalam memahami percobaan Hershey dan Chase ini, animasinya dapat dilihat dalam situs McGrawHill: <<http://highered.mcgraw-hill.com/olcweb/cgi/pluginpop.cgi?it=swf::535::535::/sites/dl/free/0072437316/120076/bio21.swf:Hershey%20and%20Chase%20Experiment>>, diakses pada tanggal 08 Mei 2011.

2.2. Komposisi dan Struktur Biokimiawi DNA

Penelaahan lebih jauh atas DNA tidak dapat dilepaskan dari pemahaman atas asam nukleat itu sendiri. Seperti telah disinggung sebelumnya dalam uraian sub bab 2.1, asam nukleat memiliki tiga elemen dasar pembentuk, yaitu: gula, fosfat, dan basa nitrogen. Gula adalah senyawa kimia dari jenis karbohidrat yang memiliki rumus umum: $(CH_2O)_n$ dan juga disebut **sakarida** (*saccharides*).³⁷ Dalam asam nukleat ini, gula memiliki fungsi untuk membantu pembentukan DNA.³⁸ Fosfat atau tepatnya **kelompok fosfat** (*phosphate group*) adalah zat fosfor yang telah bersenyawa dengan oksigen (*oxygenated phosphorus*) dan memiliki rumus: $(-PO_4)$. Senyawa ini berperan penting dalam terjadinya komunikasi antar sel dan menggabungkan rangkaian senyawa gula dalam asam nukleat.³⁹

Sedangkan untuk basa nitrogen, ini adalah senyawa utama pembentuk DNA. Ia terbagi dalam dua tipe kelompok senyawa, yaitu **purin** (*purine*) dan **pirimidin** (*pyrimidine*). Pada tipe basa purin, ada dua basa nitrogen yang termasuk di dalamnya, yaitu **adenin** (*adenine*, disingkat menjadi A) dan **guanin** (*guanine*, disingkat menjadi G). Dalam tipe basa pirimidin, ada **sitosin** (*cytosine*, disingkat menjadi C) dan **timin** (*thymine*, disingkat menjadi T), jika gula yang membentuknya adalah jenis **deoksiribosa** (*deoxyribose*). Sedangkan bila gula yang membentuknya adalah jenis **ribosa** (*ribose*), maka basa nitrogen yang muncul adalah sitosin dan **urasil** (*uracil*, disingkat menjadi U). Penamaan senyawa pembentuk asam nukleat yang memiliki jenis gula deoksiribosa adalah DNA (*Deoxyribonucleic Acid*), sedangkan dengan jenis gula ribosa adalah RNA (*Ribonucleic Acid*).⁴⁰

Lima basa nitrogen beserta tipenya ini memiliki rumus kimianya masing-masing. Dalam ilustrasi perbandingan yang ada di bawah ini, perbedaan beserta uraian rumus kimiawinya akan nampak secara lebih jelas. Berikut ini adalah gambar perbandingan yang dimaksud.⁴¹

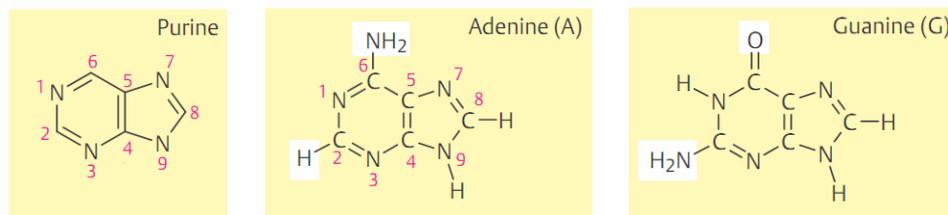
³⁷ Rittner and Bailey. *Op.cit.*, hal. 259.

³⁸ Passarge. *Op.cit.*, hal. 24.

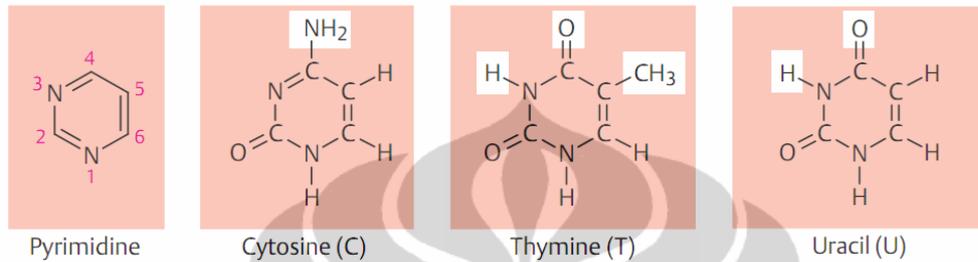
³⁹ Rittner and Bailey. *Op.cit.*, hal. 211.

⁴⁰ Pai. *Op.cit.*, hal. 112-3, Passarge. *Op.cit.*, hal. 28, dan Omoto and Lurquin. *Op.cit.* hal. 6.

⁴¹ Gambar 2.3. dan 2.4. dikutip dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 29.



Gambar 2.3. Tipe Basa Nitrogen Purin

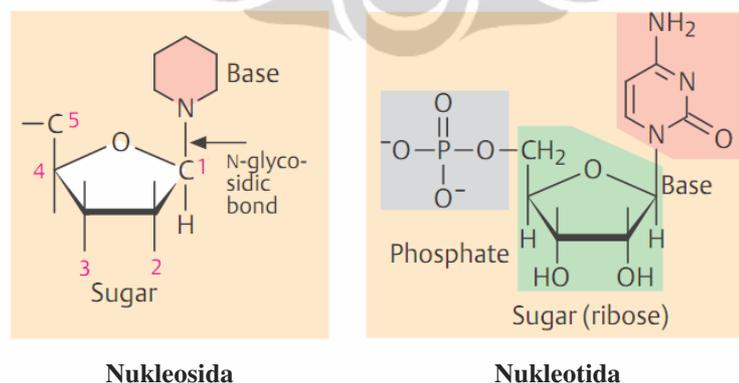


Gambar 2.4. Tipe Basa Nitrogen Pirimidin

Keterangan:

Dalam tipe basa purin, unsur nitrogen yang dimilikinya ada 4 bagian. Sementara itu, pada tipe basa pirimidin, unsur nitrogennya hanya terdiri dari 2 bagian saja. Berdasarkan pada banyaknya unsur nitrogen inilah pembagian tipe basa purin dan pirimidin dilaksanakan.

Pada struktur yang lebih lanjut dalam asam nukleat, gabungan antara gula dengan basa disebut dengan **nukleosida** (*nucleoside*). Bila kemudian gabungan ini bertambah lagi senyawanya, dengan hadirnya fosfat, maka ini disebut dengan **nukleotida** (*nucleotide*). Berikut adalah gambar dan rumus kimia dari kedua hal yang telah disebutkan.⁴²



Nukleosida

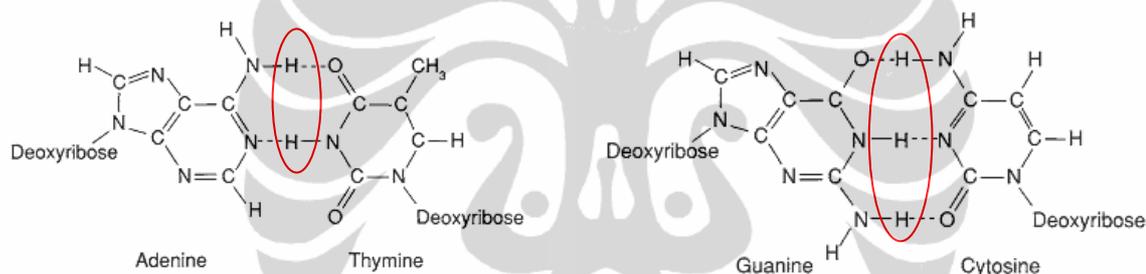
Nukleotida

Gambar 2.5. Nukleosida dan Nukleotida

⁴² Keterangan dan gambar 2.5. dikutip dari Passarge. *Ibid.*

Oleh karena paduan senyawa inilah, asam nukleat sendiri seringkali disebut pula sebagai **rantai nukleotida** (*nucleotide chain*). Ini karena asam nukleat yang ada dalam suatu makhluk hidup memang terbentuk dari banyak rantai nukleotida.

Dalam asam nukleat deoksiribosa (DNA), rantai-rantai nukleotida ini membentuk struktur yang memiliki kompleksitas lebih sederhana bila dibandingkan protein. Struktur ini merupakan pasangan basa nitrogen yang telah disebutkan ditambah senyawa gula dan fosfat. Basa nitrogen A akan selalu berpasangan dengan basa nitrogen T. Sedangkan basa nitrogen G akan selalu berpasangan dengan basa nitrogen C. Kedua pasangan basa ini disatukan oleh **ikatan hidrogen** (*hydrogen bond*). Pasangan basa nitrogen A-T memiliki 2 unsur hidrogen dalam ikatannya, sementara pasangan basa nitrogen G-C memiliki 3 unsur hidrogen dalam ikatannya. Berikut adalah gambar dari dua pasangan basa pembentuk DNA.⁴³



Gambar 2.6. Pasangan Basa Nitrogen A-T dan G-C

Keterangan:

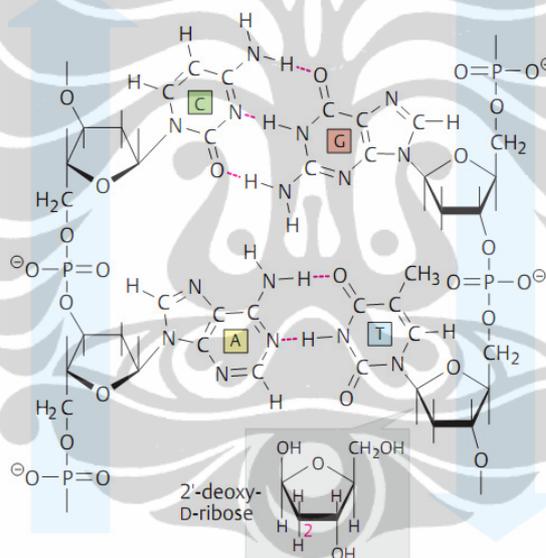
Dalam gambar di atas ini, yang dimaksud dengan ikatan hidrogen adalah ikatan yang menggabungkan basa nitrogen dengan unsur H dan terdapat dalam lingkaran merah.

Kedua pasangan basa ini secara lebih jauh bergulung dan berpilin dalam rantai nukleotida yang digabungkan oleh senyawa gula dan fosfat. Kalau rangkaian ini disederhanakan, pada satu sisi (kiri) akan ada rangkaian fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen A. Sementara, di sisi lainnya yang bersebrangan (kanan), akan ada rangkaian fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen T. Di level berikutnya, rangkaian ini akan berisi fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen C di sisi (kiri). Di sisi sebrangnya (kanan) akan terisi fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen G. Kemudian, berseling kembali pada level berikutnya rangkaian

⁴³ Keterangan dan gambar dikutip dari N. V. Bhagavan. *Medical Biochemistry*. 4th Ed. California: Academic Press, 2002, hal. 523.

pasangan fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen A dengan fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen T atau dapat juga berupa rangkaian pasangan fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen G dengan fosfat—deoksiribosa—basa nitrogen C. Apa yang terjadi pada level di atas ini sangat bergantung pada pola rantai nukleotidanya. Namun, secara normal, tetaplah dua alternatif rangkaian pasangan nukleotida yang telah disebutkan.⁴⁴

Antar rangkaian nukleotida yang bersebrangan ini dihubungkan oleh ikatan hidrogen seperti telah dijelaskan dalam konsep pasangan basa nitrogen. Sedangkan pada hubungan antar level ini digabungkan oleh fosfat. Agar lebih jelas apa yang diuraikan dalam konteks ini, gambar berikut akan melukiskan bagaimana hal-hal yang telah dijelaskan ini berhubungan satu dengan yang lainnya.⁴⁵



Gambar 2.7. Rangkaian Nukleotida DNA beserta Rumus Kimiawinya

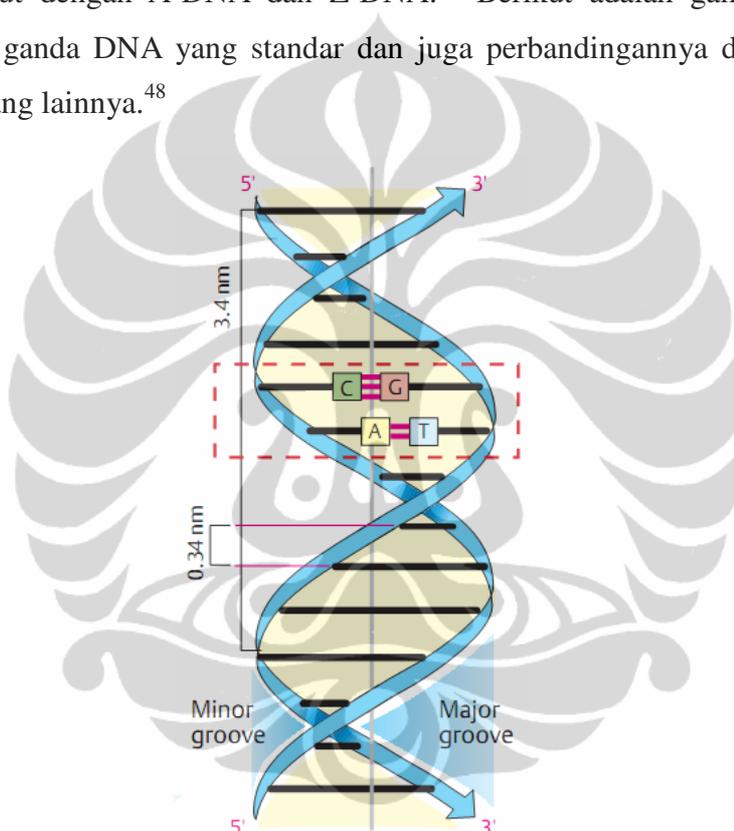
Keterangan:

Sisi kiri dari rangkaian nukleotida mengarah ke atas, sedangkan sisi kanan nukleotida mengarah ke bawah. Dalam rangkaian ini, pada sisi kanan, CH₂ menjadi ujung dari deoksiribosa berbentuk segilima yang bersenyawa dengan O sebagai ujung fosfat. Kemudian, O yang terletak di ujung bersebrangan, akan bersenyawa kembali dengan deoksiribosa yang memiliki ujung O pula. Dalam inset deoksiribosa, ujung CH₂ sebelumnya memiliki rumus CH₂OH dan ujung O sebelumnya memiliki rumus OH. Unsur OH pada deoksiribosa menjadi lebur dengan unsur O pada fosfat setelah keduanya bersenyawa.

⁴⁴ Jan Koolman and Klaus-Heinrich Roehm. *Color Atlas of Biochemistry*. 3rd Ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005, hal. 84.

⁴⁵ Gambar dikutip dari Jan Koolman and Klaus-Heinrich Roehm. *Ibid.*, hal. 85.

Berdasarkan pada pola rangkaian nukleotida inilah dan data fotografis sinar X kristal DNA yang berhasil dibuat oleh Rosalind Franklin, James D. Watson dan Francis H. Crick menemukan dan membuat model tiga dimensi struktur DNA yang disebut model **heliks ganda** (*double helix*) di tahun 1953.⁴⁶ Ini merupakan model standar untuk DNA. Walaupun demikian, pola rangkaian nukleotida DNA tidak hanya memiliki pola yang serupa ini. Ada pola lain lain yang telah ditemukan. Pola dasar ini disebut dengan B-DNA dan pola dasar lainnya disebut dengan A-DNA dan Z-DNA.⁴⁷ Berikut adalah gambaran dari model heliks ganda DNA yang standar dan juga perbandingannya dengan pola dasar DNA yang lainnya.⁴⁸



Gambar 2.8. Model Heliks Ganda Watson-Crick atau B-DNA dengan Arus Ganda

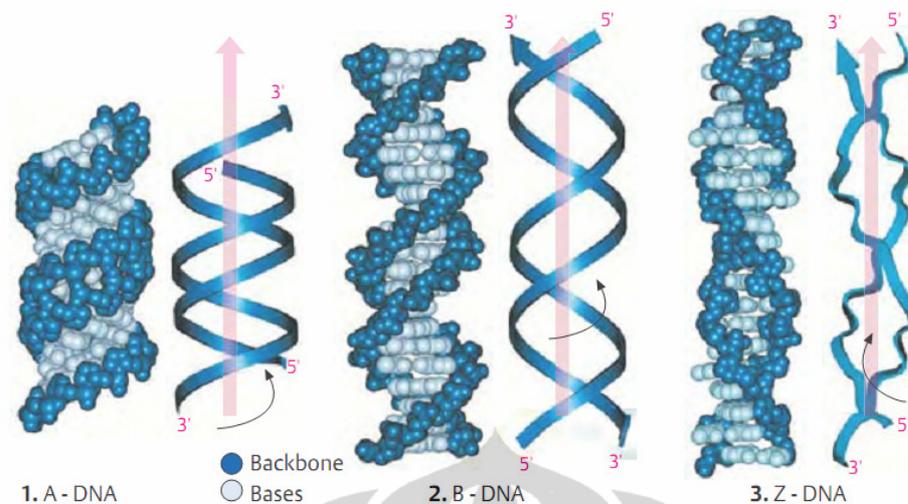
Keterangan:

Rangkaian nukleotida pada gambar ini, sisi kiri ke atas dimulai dengan 5' yang berarti adalah senyawa kelompok fosfat pada posisi karbon 5 (C5) dan berakhir pada 3' yang berarti adalah senyawa hidroksil pada posisi karbon 3 (C3). Begitu pula dengan sisi kanan yang memiliki arah sebaliknya, karena dari atas ia memiliki ujung 5' dan berakhir ke bawah pada ujung 3'.

⁴⁶ Omoto and Lurquin. *Op.cit.*, hal. 8-9.

⁴⁷ Pai. *Op.cit.*, hal. 111-2. A-DNA diberikan keterangannya pada Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 86.

⁴⁸ Gambar pola dasar heliks ganda yang standar atau B-DNA dikutip dari Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 85, sedangkan gambar perbandingan antara pola-pola dasar DNA dikutip dalam hal. 87.

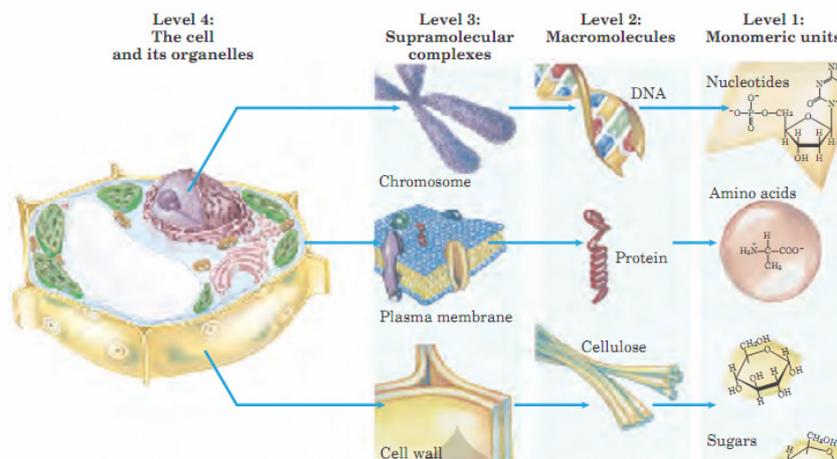


Gambar 2.9. Model-model Struktur DNA yang telah ditemukan

Inilah gambar model dari struktur biokimiawi yang dimiliki DNA. Secara sekilas, kita dapat melihat melalui gambar di atas ini bahwa pola struktur DNA seibarat pita yang berpilin dan memutar tiang. Masing-masing memiliki pola tersendiri dan pola yang cukup rumit hadir dalam Z-DNA. Ini karena pola pitanya nampak kusut dan mendapat nama Z-DNA karena ia memiliki pola yang zig-zag.

Pada level yang lebih kompleks lagi, struktur biokimiawi DNA telah menjadi penopang bagi struktur biokimiawi sel makhluk hidup bersama-sama dengan protein. Ini karena dalam struktur organisme yang disebut **eukariotik** (*eukaryotic*), di mana dalam domain organisme ini terdapat kelompok hewan, kelompok tumbuhan, dan kelompok organisme kompleks lainnya, secara umum mereka akan memiliki minimal asam nukleat serta protein sebagai elemen pembentuk sel yang mereka miliki. Berikut ini adalah gambaran yang cukup lengkap mengenai unsur-unsur pembentuk sel yang dimaksud beserta hierarkinya.⁴⁹

⁴⁹ Gambar dikutip dari David L. Nelson and Michael M. Cox. *Lehninger Principles of Biochemistry*. New York: W. H. Freeman, 2004, hal. 11.



Gambar 2.10. Hierarki Struktural yang ada pada Sel Organisme

Keterangan:

Ini adalah gambar hierarki struktural yang ada pada sel tumbuhan. Sel ini terdiri dari asam nukleat atau DNA, protein, dan **selulosa** (*cellulose*) pada level makromolekulnya. Pada sel hewan, struktur yang dimiliki akan lebih kompleks lagi.

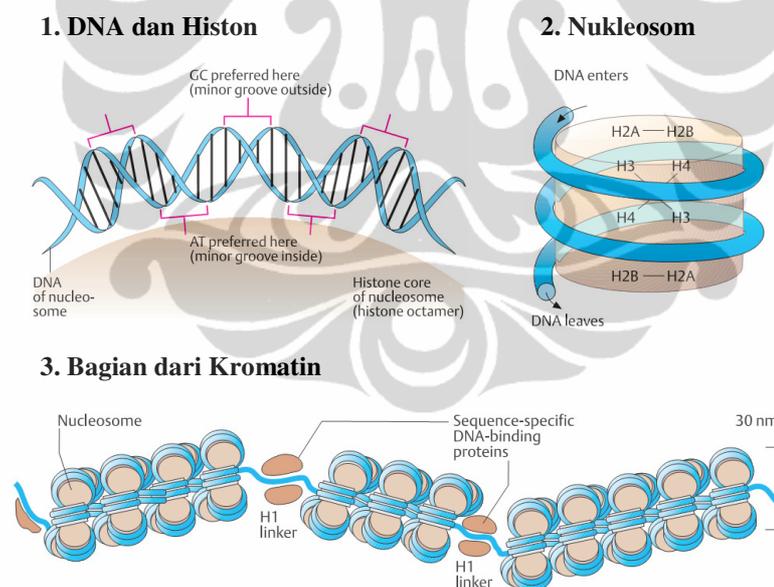
Demikian, kita sudah mendapatkan penjelasan yang cukup sederhana dan jelas mengenai komposisi dan struktur biokimiawi DNA. Namun demikian, muncul pertanyaan selanjutnya dalam kaitannya dengan struktur biokimiawi DNA ini. Setelah kita mengetahui bahwa DNA itu adalah gen yang berfungsi untuk membawa sifat-sifat dasar makhluk hidup, maka bagaimanakah caranya DNA ini dengan struktur biokimiawinya tersebut melaksanakan fungsinya itu? Atau, pertanyaan ini dapat diubah menjadi lebih praktis, yaitu: seperti apakah mekanisme yang dimiliki DNA saat ia berlaku sebagai pembawa sifat-sifat dasar makhluk hidup?

2.3. Mekanisme Operasional DNA di dalam Sel

Pertanyaan yang telah dibuat dalam akhir sub bab 2.2 ini secara tidak langsung akan membawa kita pada penjelasan mengenai posisi dan cara kerja DNA di dalam sel itu sendiri. Sebab, seperti telah dijelaskan dalam sub bab 2.1, khususnya pada percobaan Hershey dan Chase, hal ini menunjukkan kalau DNA itu bekerja dalam sel walau sel tersebut hanya merupakan inang bagi DNA virus tersebut. Selanjutnya, sebagai permulaan dari uraian atas masalah ini, penulis akan menguraikan posisi atau letak DNA di dalam sel.

Dalam gambar 2.10, kita telah melihat DNA yang berkelak sebagai makromolekul pembentuk **kromosom** (*chromosome*). Dengan pemikiran sederhana, kita akan secara mudah mengatakan bahwa letak DNA dalam sel itu terletak dalam kromosom. Namun demikian, seperti apakah yang dimaksud kromosom itu?

Kromosom adalah bagian dari **inti sel** (*nucleus*) dan terbentuk dalam proses **daur sel** (*cell cycle*). Ia adalah kumpulan dari benang halus dalam inti sel yang disebut **kromatin** (*chromatin*) saat terjadinya proses daur sel ini.⁵⁰ Pada kromatin inilah letak DNA yang sebenarnya. DNA menjadi pembentuk kromatin bersama-sama dengan protein yang disebut **histon** (*histones*, disingkat menjadi H). H ini adalah protein yang asam aminonya itu bermuatan positif sehingga dapat berpasangan dengan DNA yang bermuatan negatif. Pasangan DNA dan H ini kemudian membentuk apa yang disebut sebagai **nukleosom** (*nucleosome*). Dalam gambar yang ada di bawah ini, kita dapat melihat pada bagian mana letak DNA dan juga letak H tersebut secara jelas.⁵¹



Gambar 2.11. DNA, Histon, dan Nukleosom dalam Kromatin

Keterangan:

Dalam gambar 2.11.1 dan 2.11.2 ini, DNA nampak mengelilingi dan membalut H (yang terdiri dari beberapa tipe histon, yaitu: H2A, H2B, H3, dan H4). Sedangkan H yang lain (H1) justru menjadi penyambung sekumpulan nukleosom bersama DNA seperti nampak pada gambar 2.11.3.

⁵⁰ Pai. *Op.cit.*, hal. 22.

⁵¹ Keterangan tentang kromatin ini dikutip dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 170 dan gambar berasal dari hal. 171.

Berkenaan dengan kromosom ini, jawaban atas pertanyaan tentang bagaimana kromosom itu terbentuk adalah sekaligus juga jawaban tentang bagaimana cara kerja DNA itu sendiri di dalam sel. Sebab, DNA memiliki peranan yang penting dalam proses daur sel. DNA adalah substansi dasar yang memungkinkan sel itu terbelah dan mengalami proses reproduksi. Oleh karenanya, penulis akan masuk dalam uraian mengenai proses daur sel dalam deskripsi selanjutnya.

Proses daur sel terjadi setiap saat karena sel memerlukan pembaruan, baik untuk mengganti sel yang rusak ataupun membuat sel yang baru. Fungsi ini dimiliki oleh setiap organisme.⁵² Sebab, bila sel tidak pernah membelah dan diperbarui, maka organisme itu akan kehilangan sifat reproduksinya. Kehilangan sifat reproduksi akan berarti kehilangan daya hidup dan perkembangan. Ini akan mengantarkan organisme pada kematian secara perlahan-lahan tentunya.

Kembali pada soal proses daur sel, kalau ini diringkaskan, daur sel “hanya” melakukan dua tahapan proses. Pertama adalah penggandaan komponen sel yang identik dengan sel induknya. Kemudian, proses yang kedua adalah pembagian komponen sel tersebut menjadi dua bagian yang sama.⁵³ Akan tetapi, dua proses yang sederhana ini, bila dilihat dalam kaca mata biologi molekuler, justru terdiri dari beberapa proses yang cukup rumit sebenarnya.

Awal proses daur sel dalam perspektif biologi molekuler dimulai dari suatu fase yang disebut **interfase** (*interphase*). Pada tahap interfase ini, daur sel terbagi dalam beberapa proses yang dapat dipilah. Ada fase G₀, G₁, G₂, dan S. G₀ adalah fase jeda di mana sel itu berhenti untuk tidak membelah diri. G₁ adalah fase jeda yang memberikan waktu bagi sel untuk melakukan persiapan agar dapat berkembang memasuki fase S. S adalah fase di mana DNA dalam kromatin mengalami proses **replikasi** (*replication*). Sedangkan G₂, ini adalah fase jeda setelah fase S di mana sel mempersiapkan diri sebelum ia memasuki tahap selanjutnya dalam daur sel.⁵⁴

⁵² David O. Morgan. *The Cell Cycle: Principles of Control*. London: New Science Press, 2007, hal. 2.

⁵³ Morgan. *Ibid.*, hal. 3.

⁵⁴ Morgan. *Ibid.*, hal. 4. G yang disebutkan dalam interfase adalah singkatan dari *Gap*. Di sini, penulis mengartikannya sebagai jeda. Oleh karena itu, *Gap phase* dapat diterjemahkan sebagai fase jeda.

Di interfase ini, urutan fasenya adalah: $G1/G0 \rightarrow S \rightarrow G2$. Dalam urutan yang pertama, kita lihat bahwa ada $G1/G0$. Maksud dari perlambangan ini adalah sel itu pertama-tama mempersiapkan diri untuk melakukan daurnya. Pada fase jeda ini, apabila sel berhasil mempersiapkan segala sesuatu yang dibutuhkan untuk fase selanjutnya, maka daur sel akan masuk dalam fase S ($G1$). Namun sebaliknya, ketika sel gagal membuat persiapan, maka sel akan **menunda** (*paused*) untuk masuk ke fase S. Akan tetapi, bila sel ini mengalami kegagalan total dalam persiapannya itu, ia akan masuk fase jeda yang membuat dirinya tidak akan dapat berproses lebih lanjut ($G0$).⁵⁵

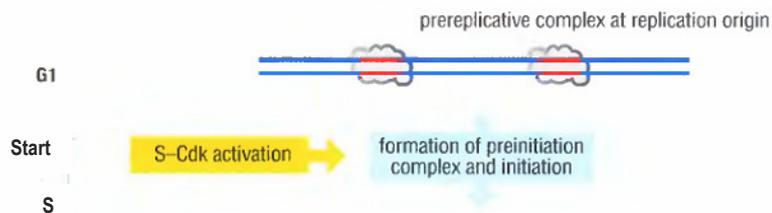
Persiapan yang dilakukan dalam $G1$ ini tiada lain adalah pengaktifan enzim protein **kinase yang bergantung pada siklin** (*cyclin-dependent kinases*, disingkat menjadi Cdk). Ini terjadi setelah kondisi yang dibutuhkan daur sel dianggap ideal. Pengaktifan enzim Cdk sekaligus penentuan **titik pengecekan** (*checkpoints*) yang dinamakan **Mulai** (*Start*). Titik pengecekan atau Mulai ini prosesnya ada di antara akhir fase $G1$ dan awal fase S. Selain pengaktifan enzim Cdk, protein juga melaksanakan proses **perizinan awal** (*origin licensing*) dengan memasang enzim yang bernama **kompleks prareplikatif** (*prereplicative complex*) di lokasi mana replikasi DNA akan diproses (atau lokasi ini disebut pula dengan *replication origin*).⁵⁶

Sekali perizinan awal ini telah diaktifkan pada lokasi yang telah ditentukan, kompleks prareplikasi akan dilepaskan. Ini berguna supaya tidak terjadi proses replikasi pada lokasi yang tidak ditentukan. Bila kondisi ideal yang dibutuhkan oleh daur sel tidak tercapai, enzim Cdk akan dinonaktifkan kembali dan kompleks pra-replikasi tidak akan digunakan untuk memuat enzim yang dibutuhkan dalam proses replikasi DNA ke lokasi yang dimaksud. Artinya, daur sel akan masuk dalam fase $G0$. Untuk lebih mudahnya, gambar berikut akan membantu mengilustrasikan apa yang disampaikan dalam uraian di paragraf ini.⁵⁷

⁵⁵ Morgan. *Ibid.*

⁵⁶ Morgan. *Ibid.*, hal. 8 dan 58.

⁵⁷ Morgan. *Ibid.* Gambar berasal dari Morgan. *Ibid.*, hal. 59.



Gambar 2.12. Aktivasi Enzim Cdk dan Perizinan Awal oleh Enzim Kompleks Prareplikatif dalam Proses G1

Keterangan:

Gambar yang seperti awan itu adalah proses pemasangan enzim kompleks prareplikatif pada lokasi replikasi DNA yang telah ditentukan. Dua garis merah yang dikelilingi oleh awan adalah lokasi di mana proses replikasi DNA akan dilaksanakan.

Setelah persiapan dibuat dalam fase G1, sel akan memasuki proses selanjutnya dalam fase S jika lolos dari titik pengecekan yang ditetapkan dalam akhir fase G1. Apa yang terjadi dalam fase S ini adalah protein mula-mula akan membuka struktur heliks ganda DNA sebagai proses awal replikasi dengan menggunakan enzim **helikase** (*helicases*) sehingga membentuk struktur yang disebut **garpu replikasi** (*replication fork*) yang berbentuk Y (*Y-shape*). Kemudian, protein mencegah struktur heliks ganda untuk menutup dan bersatu kembali dengan bantuan **protein pengikat untai-tunggal** (*single-strand binding protein*, atau *SSB protein*).

Namun demikian, oleh karena struktur DNA adalah heliks ganda, selain helikase, proses pemisahan untai DNA tersebut melibatkan pula enzim **topoisomerase** (*topoisomerases*). Topoisomerase ini bertugas untuk menjaga agar untai yang terpisah itu tidak berbelit dan kusut setelah memotong elemen fosfat yang mengikat pasangan basa nitrogen. Setelah proses pencegahan dan penjagaan untai dilakukan, **primase** (*primase*) akan bekerja untuk membaca pola contoh DNA asal, lalu menyisipkan rangkaian nukleotida baru yang akan dijadikan **untai penggagas RNA** (*RNA primer*) dengan meminjam bantuan tenaga dari RNA (**pembawa-pesan RNA** atau *messenger RNA*, disingkat menjadi mRNA) berdasarkan pola contoh DNA asal tersebut. Ini karena enzim **polimerase** (*polymerases*) yang bertugas untuk mensintesis DNA hanya dapat melanjutkan rangkaian nukleotida yang sudah ada dan tidak dapat membuat yang baru.⁵⁸

⁵⁸ Penjelasan mengenai proses replikasi DNA ini secara khusus bersumber dari animasi yang telah dibuat Charlotte W. Pratt and Kathleen Cornely untuk proses replikasi DNA dalam situs Wiley: <http://www.wiley.com/college/pratt/0471393878/student/animations/dna_replication/>

Proses selanjutnya adalah penambahan rangkaian nukleotida pada untaian penggagas RNA yang memiliki arah 5'—3' dengan menempelkannya di akhir posisi 3' oleh polimerase. Dalam penambahan rangkaian nukleotida ini, polimerase dibantu oleh protein pembantu yang disebut **pengapit luncur** (*sliding clamp*) untuk mempermudah polimerase bergerak dari akhir 3' mengikuti arah 5'—3' dari untaian penggagas RNA. Selagi proses penambahan ini berlangsung, polimerase yang dibantu pengapit luncur juga melepaskan *SSB protein* agar struktur heliks ganda DNA terbentuk kembali. Namun demikian, proses penambahan ini tidak selalu berlangsung sinambung. Untaian DNA baru yang terbentuk dengan proses yang sinambung (*continuing process*) diberi nama **untai pemimpin** (*leading strand*). Sedangkan untaian DNA yang terbentuk dengan proses yang tidak sinambung (*discontinuing process*) disebut dengan **untai susulan** (*lagging strand*). Proses yang tidak sinambung dalam penambahan ini hanya membentuk untaian DNA yang pendek dan disebut dengan **potongan Okazaki** (*Okazaki fragments*) sesuai dengan nama penemunya.⁵⁹

Begitu proses penambahan selesai, untaian penggagas RNA kemudian dibuang oleh enzim **ribonuklease H** (*RNase H*) dan diganti dengan rangkaian nukleotida oleh polimerase. Khusus untuk untaian susulan yang terpotong-potong (potongan Okazaki), proses penyempurnaan sambungannya dilakukan oleh **ligase DNA** (*DNA ligase*). Demikian, setelah semua tersambung, maka proses replikasi DNA telah selesai dilaksanakan.⁶⁰

Untuk mempermudah dalam memahami keseluruhan proses replikasi DNA ini, maka di bawah ini akan diberikan beberapa gambar yang dapat membantu mengilustrasikan proses replikasi DNA.⁶¹

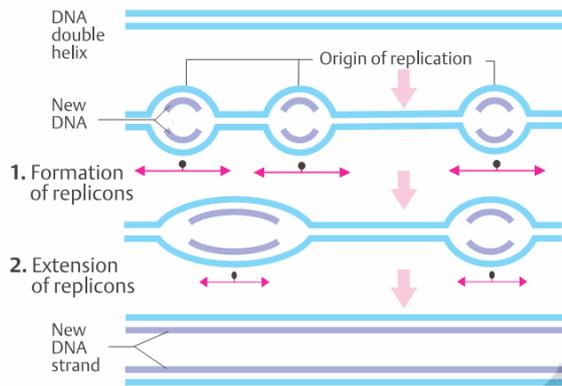
index.html>. Sedangkan untuk teks yang dipakai sebagai bahan penjelasan ada dalam situs Wiley dengan alamat: <http://www.wiley.com/college/pratt/0471393878/student/animations/dna_replication/anim_text.html> Dalam kaitannya dengan enzim topoisomerase, keterangan tentang hal ini diambil dari penjelasan proses replikasi DNA yang ada di situs Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_replication>. Situs Wiley dan Wikipedia ini diakses pada tanggal 07 Mei 2011. Bandingkan pula penjelasan ini dengan penjelasan dari Morgan dalam *Op.cit.*, hal. 58-61 dan Passarge dalam *Op.cit.* hal. 42.

⁵⁹ Pratt and Cornely dalam situs Wiley, Morgan. *Op.cit.*, hal. 60-1, dan Passarge. *Loc.cit.*

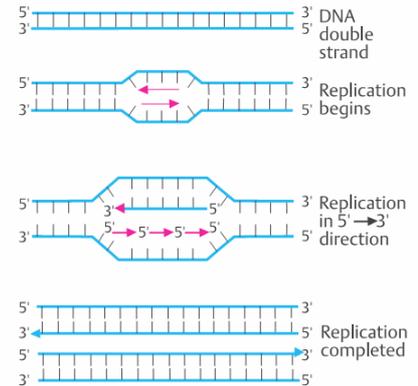
⁶⁰ Pratt and Cornely dalam situs Wiley dan Morgan. *Op.cit.*, hal. 61.

⁶¹ Sumber gambar untuk 2.13.1 dan 2.13.2 berasal dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 43, gambar 2.13.3 berasal dari Pratt dalam situs Wiley, dan gambar II.13.4 berasal dari situs Wikipedia dengan

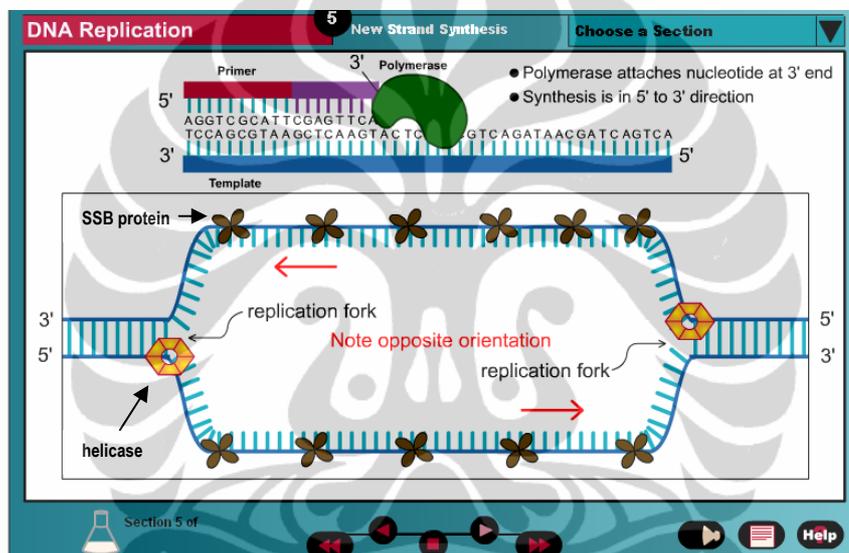
1. Skema Umum Replikasi DNA



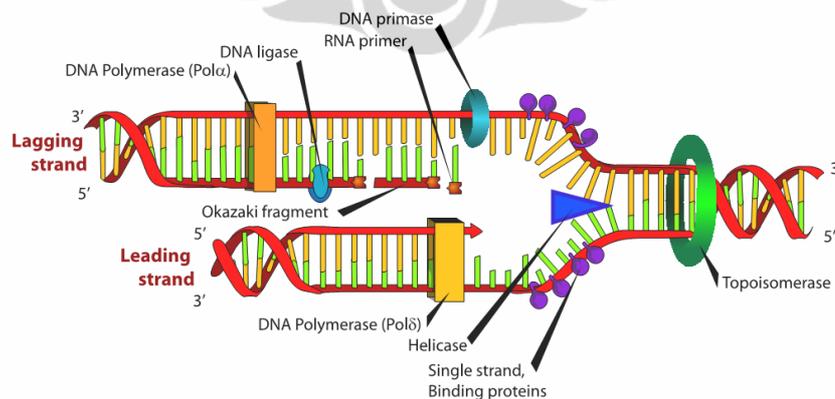
2. Skema 5'—3' Replikasi DNA



3. Proses Penambahan Rangkaian Nukleotida oleh Polimerase pada Untaian Penggagas RNA



4. Gambaran Umum Proses Replikasi DNA

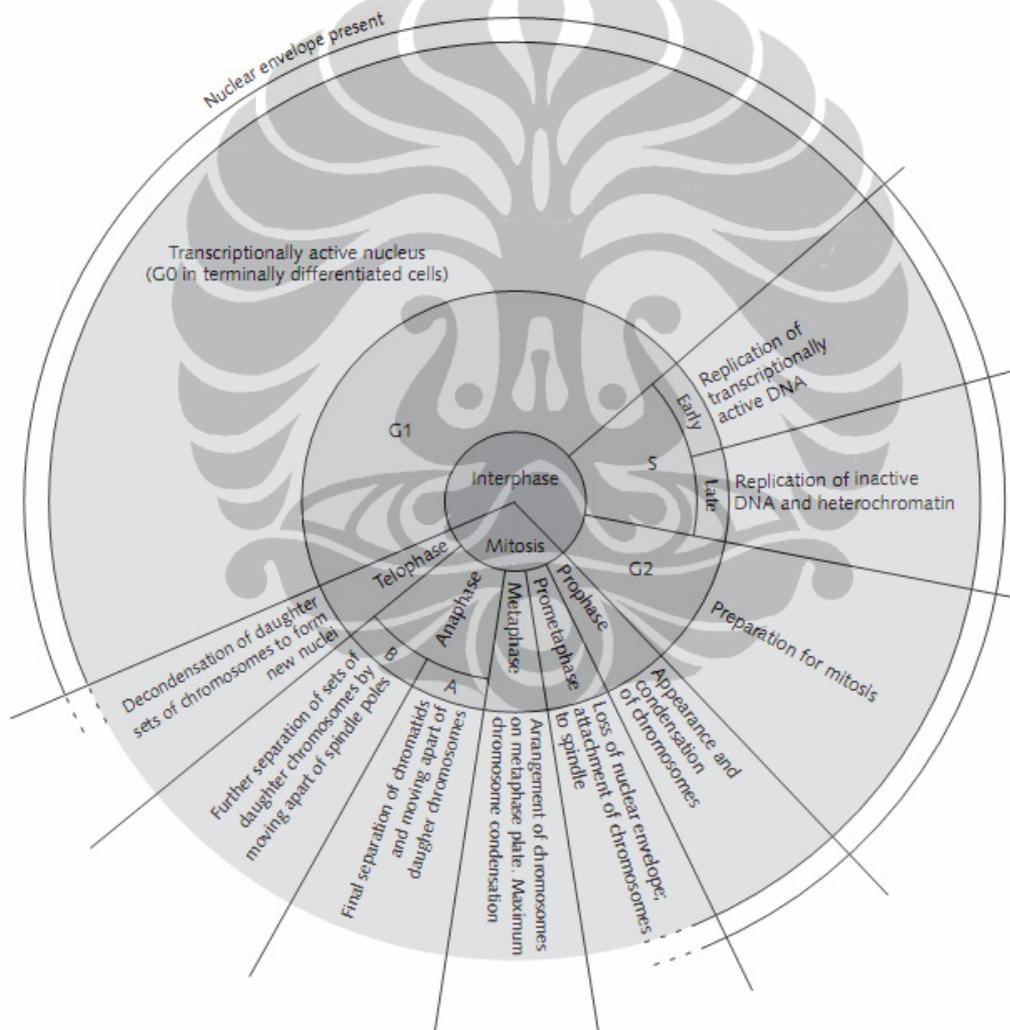


Gambar 2.13. Proses Replikasi DNA

alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:DNA_replication_en.svg> diakses pada tanggal 07 Mei 2011.

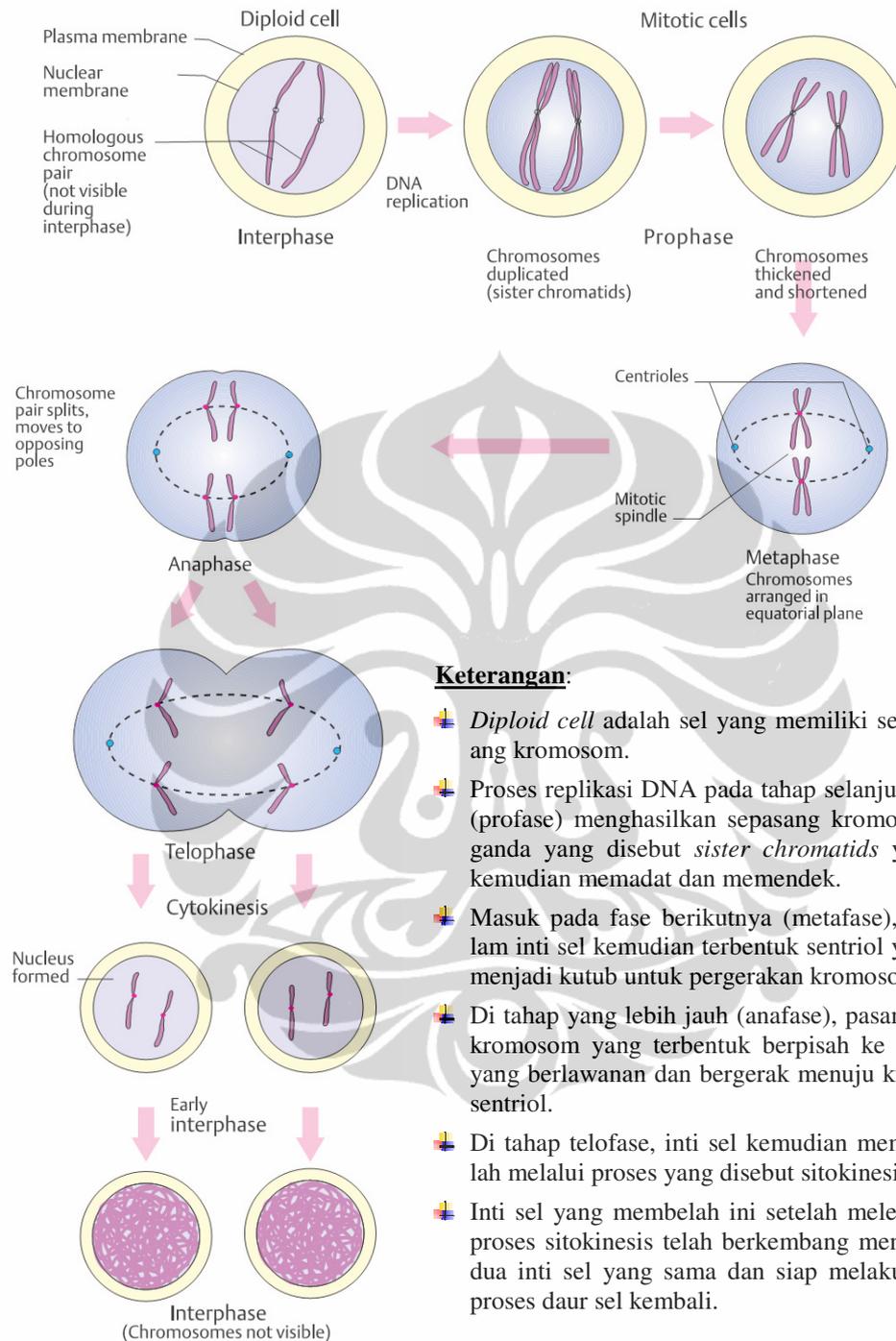
Berakhirnya proses replikasi DNA akan berarti akhir dari fase S dari daur sel. Setelah itu, proses daur sel akan masuk dalam fase G₂, yang artinya adalah fase jeda sebelum masuk dalam tahap selanjutnya dari proses daur sel setelah interfase. Fase daur sel setelah interfase adalah mitosis. Namun demikian, dalam tulisan ini, tidak akan dibahas secara lebih jauh mengingat pembahasan yang hendak diberikan titik tekannya adalah mekanisme operasional DNA di dalam sel. Penulis hanya akan meringkasnya dalam gambar yang disertai dengan keterangan. Berikut adalah gambar beserta keterangan yang dimaksud.⁶²

1. Bagan Umum Tahapan Proses Daur Sel



⁶² Gambar II.14.1 dikutip dari Adrian T. Sumner. *Chromosomes: Organization and Function*. Oxford: Blackwell Publishing, 2003, hal. 6 dan gambar II. 14.2 dikutip dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 115. Keterangan mengenai proses yang terjadi pada fase mitosis ini secara lebih jauh dapat dibaca dalam Pai. *Op.cit.*, hal. 23-32, Passarge. *Op.cit.*, hal. 112-5, Morgan. *Op.cit.*, bab 4-8, dan Sumner. *Op.cit.*, bab 2.

2. Rincian Proses Daur Sel yang terjadi dalam Fase Mitosis



Gambar 2.14. Proses Daur Sel

Dengan adanya dua gambar skematik mengenai daur sel secara umum dan fase mitosis secara khusus, kita dapat melihat betapa proses daur sel itu cukup kompleks dalam perjalanannya. Pada sisi ini, karena penulis sudah dapat menjelaskan secara sederhana apa yang dinamakan proses replikasi DNA sebagai

suatu penjelasan atas mekanisme operasional DNA di dalam sel, maka uraian mengenai proses daur sel pada fase mitosis tidak perlu diperjelas secara panjang lebar. Meskipun demikian, masih tetap ada pertanyaan yang cukup mengganjal. Ini berkaitan dengan proses replikasi DNA itu sendiri. Benarkah proses replikasi DNA itu berjalan dengan baik dan “sempurna”? Apakah ada masalah yang menyertai proses tersebut selain masuk kembali dalam fase G₀?

2.4. Kerusakan DNA dan Mutasi sebagai Masalah Genetika

Apa yang telah disampaikan dalam uraian mengenai proses replikasi DNA dapat membuat kita cukup takjub mengingat proses yang terjadi di dalamnya sangat kompleks. Mekanisme proses tersebut pun nampaknya jauh dari kata cacat. Ini karena kegagalan yang terjadi dalam proses replikasi DNA dapat menghasilkan sesuatu yang berakibat fatal. Meskipun demikian, para ahli biokimia dan biologi molekuler ternyata masih dapat mengenali adanya cacat atau kegagalan yang terjadi dalam proses replikasi DNA. Biasanya, hal ini ditandai dengan adanya proses replikasi yang masuk ke fase G₀. Walaupun demikian, pada sisi ini, meski tidak selalu masuk dalam fase G₀, kegagalan proses tersebut kemudian mengakibatkan struktur DNA itu berubah. Proses gagal yang mengakibatkan cacat genetik atau perubahan struktur DNA sekarang ini lazim disebut dengan **kerusakan DNA** (*DNA damage*) dan bila perubahannya tetap disebut dengan **mutasi** (*mutation*). Untuk struktur DNA yang mengalami kerusakan ini diberi nama **lesion** (*lesion*) dan struktur DNA yang dihasilkan dari proses mutasi, hal ini disebut dengan **mutan** (*mutant*)⁶³

Mutasi yang terjadi pada DNA dapat disebabkan oleh berbagai faktor. Faktor tersebut dapat berupa faktor eksternal maupun internal. Faktor eksternal adalah unsur penyebab mutasi dari luar DNA, sedangkan faktor internal adalah **kegalatan** (*erroriness*) yang muncul dalam proses replikasi DNA itu sendiri. Faktor penyebab mutasi ini disebut dengan **mutagen** (*mutagens*). Berkenaan dengan faktor eksternal, ada dua faktor utama yang menyebabkan terjadinya mutasi. Pertama, mutasi terjadi karena faktor fisikawi. Dalam konteks ini, mutasi disebabkan oleh adanya radiasi yang dihasilkan oleh proses ionisasi (radiasi α , β ,

⁶³ Passarge. *Op.cit.*, hal. 68 dan Nelson and Cox. *Op.cit.*, hal. 966.

dan γ , serta sinar X) dan juga oleh radiasi sinar ultraviolet (sinar UV atau sinar matahari). Kedua, mutasi dapat terjadi karena faktor kimiawi. Mutasi ini disebabkan oleh banyak senyawa kimia, di antaranya adalah senyawa **asam nitrus** (*nitrous acid*, dengan rumus kimia: (HNO_2)) yang berupa **garam nitrit** (*nitrite salt*). Selain asam nitrus, senyawa lainnya adalah **hidkrosilamine** (*hydroxylamine*, dengan rumus kimia: (NH_2OH)) dan **senyawa penyebab alkilasi** (*alkylating compounds*), yaitu senyawa **metilnitrosamine** (*methylnitrosamine*) dan senyawa penyebab kanker *benzo[a]pyrene*.⁶⁴

Radiasi yang disebabkan oleh proses ionisasi akan menghasilkan efek munculnya elemen **radikal bebas** (*free radical*) di dalam sel. Radikal bebas adalah molekul dengan elektron tanpa pasangan yang sangat reaktif dan dapat menyebabkan kerusakan pada DNA. Sinar UV dapat menyebabkan mutasi di sel kulit yang mengakibatkan terjadinya proses *thymine dimer* atau bergabungnya dua T yang berdekatan dalam satu **ikatan kovalen** (*covalent bond*). *Thymine dimer* ini bila terbentuk akan memblok proses replikasi DNA.⁶⁵

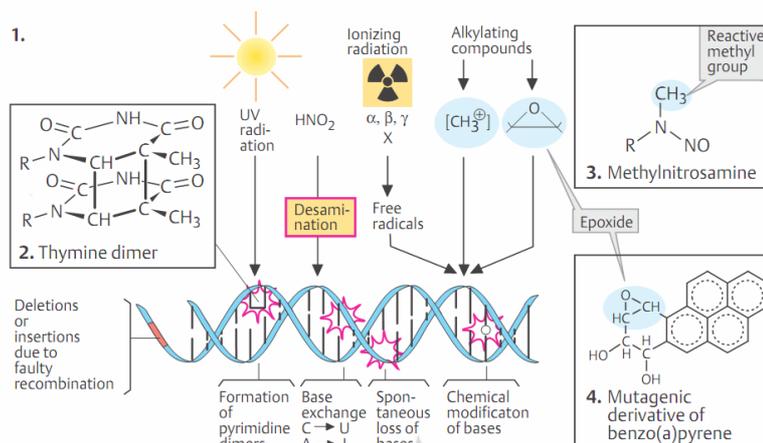
Asam nitrus dan hidrosilamine mengakibatkan terjadinya proses **pengubahan amino pada basa nitrogen** (*deamination*) dan mengubah C menjadi U dan A menjadi **inosine** (*inosine*, disingkat menjadi I) atau **hipokantine** (*hypoxanthine*, disingkat menjadi Hyp). Ini akan menghasilkan mutasi berupa pasangan basa yang keliru, yaitu G—U pada kasus perubahan C menjadi U dan I/Hyp—T pada kasus perubahan A menjadi I/Hyp. Sementara itu, metilnitrosamine akan menghasilkan proses **metilasi** (*methylase*, penambahan elemen CH_3) pada DNA yang akan mengakibatkan munculnya elemen radikal bebas pula. Ini akan menjadikan G berpasangan dengan T yang memiliki elemen CH_3 . Hal yang sama juga dilakukan oleh *benzo[a]pyrene* yang mengakibatkan elemen radikal bebas dan menumbuhkan sel kanker.⁶⁶ Bila hal ini diringkaskan, maka gambar berikut ini dapat memberikan ilustrasi tentang bagaimana mutagen mempengaruhi DNA dan mengakibatkan efek-efek yang telah disebutkan.⁶⁷

⁶⁴ Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 256.

⁶⁵ Koolman and Roehm. *Ibid.*

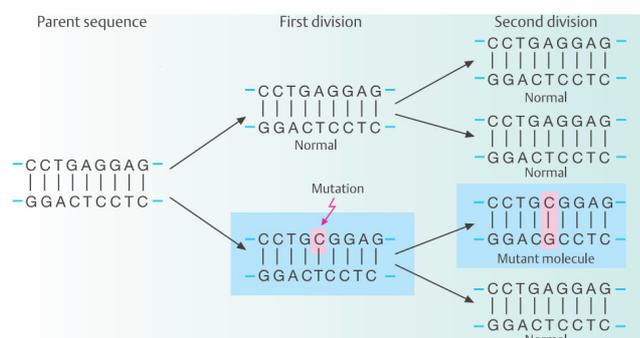
⁶⁶ Koolman and Roehm. *Ibid.* dan Passarge. *Op.cit.*, hal. 70.

⁶⁷ Gambar dikutip dari Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 257.



Gambar 2.15. Mutagen dan Efek yang dihasilkan pada DNA

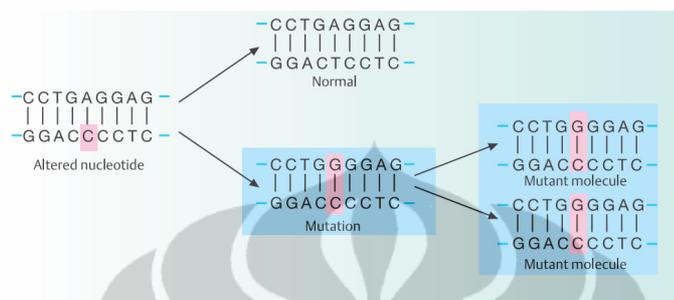
Berbeda dengan proses mutasi yang diakibatkan oleh adanya faktor eksternal yang telah disebutkan, mutasi karena faktor internal biasanya hanya menghasilkan **kesalahan perpasangan basa** (*mismatched base*). **Galat** (*error*) yang terjadi dalam proses replikasi DNA yang paling sederhana adalah perubahan salah satu komponen basa nitrogen. Misalnya rangkaian nukleotida baru yang dihasilkan oleh proses replikasi DNA memiliki untai pola –CCTGAGGAG– yang berpasangan dengan untai pola –GGACTCCTC–. Ini adalah untai pola pasangan yang normal. Namun, karena adanya galat dalam proses replikasi, maka urutan kelima dalam rangkaian awal berubah dari yang semula A menjadi C. Sehingga untai pola awal akan berubah menjadi –CCTG**C**GGAG–. Bila pasangan untai DNA ini bereplikasi kembali, maka akan menghasilkan mutan pada salah satu untai DNA hasil replikasi, tetapi tidak mengubah kembali C menjadi A. Agar lebih jelas dalam memahami hal ini, maka proses ini dapat diilustrasikan sebagai berikut.⁶⁸



Gambar 2.16. Mutasi yang terjadi karena Galat dalam Proses Replikasi DNA

⁶⁸ Sumner. *Op.cit.*, hal. 35 dan Passarge. *Op.cit.*, hal. 68. Gambar diambil dari Passarge. *Ibid.*, hal. 69.

Masih berkaitan dengan mutasi yang terjadi dalam proses replikasi DNA, bila DNA induknya mengalami mutasi, maka hal ini akan diwariskan sepenuhnya pada DNA turunannya secara sebagian pada pembelahan yang pertama dan keseluruhan pada pembelahan yang kedua. Apa yang dimaksud dengan hal ini, dapat dilihat secara jelas pada gambar berikut.⁶⁹

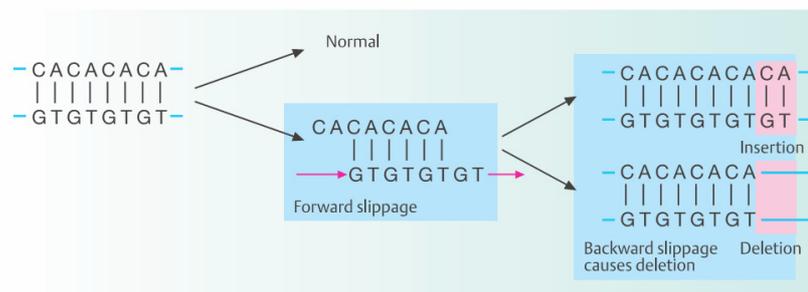


Gambar 2.17. Mutasi yang terjadi pada DNA Induk dalam Proses Replikasi DNA

Dalam suatu proses mutasi ini, sebenarnya dapat dibedakan menjadi beberapa jenis mutasi yang pokok. Pertama, mutasi yang berupa **penggantian** (*substitution*). Pada jenis mutasi ini, dibedakan menjadi dua, yaitu **transisi** (*transition*): pertukaran antara satu purin kepada purin lainnya atau antara pirimidin kepada pirimidin lainnya, dan **tranversi** (*tranversion*): pertukaran purin kepada pirimidin dan juga proses sebaliknya. Dalam mutasi jenis penggantian ini, ada perubahan dalam asam amino, namun tidak mengganggu proses pembacaan yang dilakukan dalam replikasi DNA. Hal yang serupa ini disebut dengan **mutasi salah-arti** (*missense mutation*). Jenis kedua dari mutasi adalah **penghapusan** (*deletion*). Dalam jenis mutasi ini, ada elemen basa nitrogen dalam rangkaian nukleotida DNA yang dihapus saat proses replikasi. Sedangkan jenis ketiga, ini adalah mutasi yang berupa **penyisipan** (*insertion*). Mutasi ini mengakibatkan penambahan elemen basa nitrogen pada rangkaian nukleotida DNA dalam proses replikasi. Dua jenis mutasi yang terakhir ini dapat terjadi pula karena adanya proses **selip replikasi** (*replication slippage*) dalam fase S, walaupun tidak selalu

⁶⁹ Gambar diambil dari Passarge. *Ibid.*

oleh proses ini. Gambar berikut ini menunjukkan bagaimana selip replikasi itu terjadi dan mengakibatkan adanya mutasi.⁷⁰



Gambar 2.18. Mutasi yang terjadi karena Selip Replikasi dalam Proses Replikasi DNA

Keterangan:

Pada pembelahan pertama, terjadi selip yang menggeser rangkaian nukleotida DNA ke depan (*forward slippage*). Oleh karena hal ini terjadi, maka ada dua jenis mutasi yang muncul pada pembelahan kedua. Pertama, ada proses penambahan untuk melengkapi pasangan untai –GT– yang kosong dengan untai –CA– (mutasi penyisipan). Kedua, terjadi proses kembali selip replikasi, namun mengarah ke belakang (*backward slippage*). Hal ini mengakibatkan penghapusan untai –GT– yang menonjol keluar karena ia digeser ke arah belakang.

Proses penghapusan dan penyisipan ini secara lebih jauh dapat mengakibatkan proses mutasi yang disebut dengan **mutasi pergeseran-kerangka** (*frameshift mutation*) dan **mutasi tiada-arti** (*nonsense mutation*).⁷¹ Kedua mutasi ini akan dijelaskan dengan contoh sebagai berikut ini.

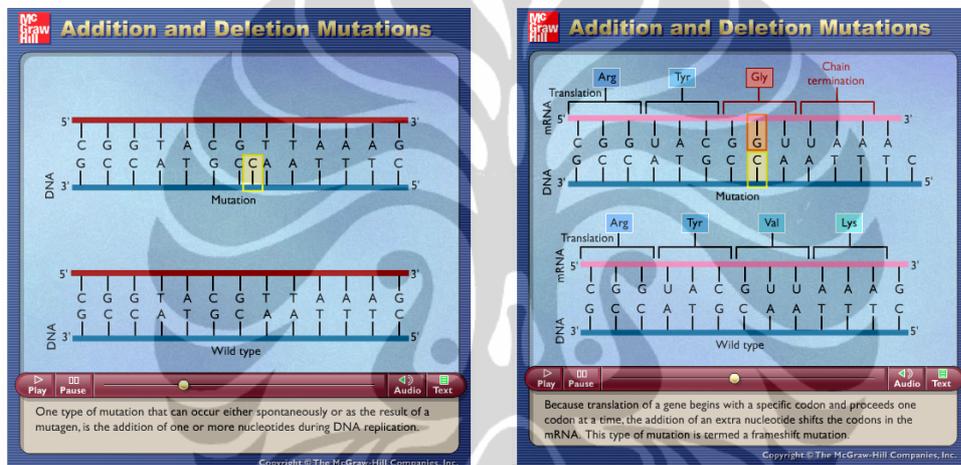
Misalnya, kita mempunyai pola untai –GCCATGCAATTTC–. Dalam pola untai ini, terjadi mutasi penyisipan pada urutan 8 dengan bertambahnya basa nitrogen C, sehingga pola untai menjadi –GCCATGCCAATTTC–. Dalam pembacaan pola untai ini, mRNA yang bertugas untuk melakukan proses **pembacaan dan merekam** (*transcription*) pola untai DNA tersebut akan melakukan **penerjemahan** (*translation*) ke dalam format kode untuk asam amino yang berbeda dari yang seharusnya dihasilkan. Pada konteks ini, kode untuk asam amino-nya akan berupa **tiga untai** (*triplet*) basa nitrogen yang disebut dengan **kodon** (*codon*). Ketika mRNA menerjemahkan pola untai DNA yang telah bermutasi di atas ini, maka ia akan menghasilkan pasangan untai berikut: –

⁷⁰ Passarge. *Ibid.*, hal. 46. Dalam konteks mutasi penggantian, gambar II.16 dan II.17 dapat membantu memahami proses tersebut. Untuk gambar mengenai selip replikasi, ini diambil dari Passarge. *Ibid.*, hal. 69.

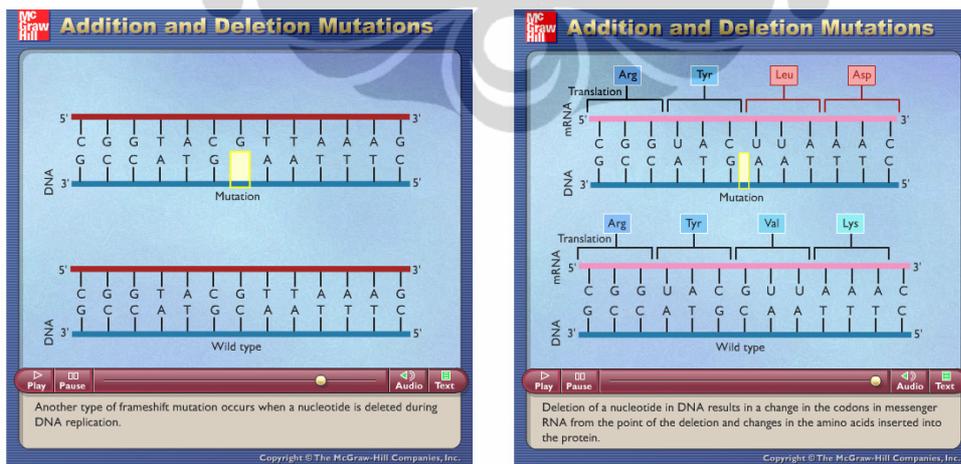
⁷¹ Passarge. *Ibid.*, hal. 46.

CGGUACGGUAAAAG-. Kalau untai ini dipisah dalam bentuk rangkaian 3 untai basa nitrogen, maka akan dihasilkan: -CGG- (*Arginine*, disingkat menjadi Arg), -UAC- (*Tyrosine*, disingkat menjadi Tyr), -GGU- (*Glycine*, disingkat menjadi Gly), -UAA- (Kodon Penghenti atau *Stop Codon*). Pada dua unsur basa nitrogen yang terakhir, ini tidak dapat dibaca sebagai kodon, karena hanya terdiri dari 2 untai. Ada kelebihan yang dihasilkan karena proses mutasi penyisipan. Inilah yang disebut dengan mutasi pergeseran-kerangka. Gambar di bawah ini akan menunjukkan bagaimana mutasi pergeseran-kerangka itu dapat dipahami dengan cara yang lebih baik.⁷²

1. Mutasi Pergeseran-Kerangka yang disebabkan oleh Mutasi Penyisipan



2. Mutasi Pergeseran-Kerangka yang disebabkan oleh Mutasi Penghapusan



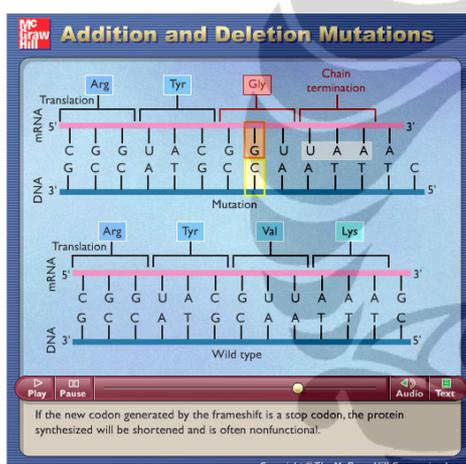
Gambar 2.19. Mutasi Pergeseran-Kerangka

⁷² Keterangan untuk contoh ini didasarkan pada animasi yang dibuat oleh Lansing M Prescott, et al. dalam situs McGraw-Hill yang ada pada alamat: <<http://highered.mcgraw-hill.com/sites/>

Untuk mutasi tiada-arti, prosesnya ini sebenarnya mirip dengan apa yang terjadi dalam mutasi pergeseran-kerangka dengan jenis mutasi penyisipan. Namun demikian, dalam mutasi tiada-arti, munculnya kodon penghenti bersifat prematur. Artinya, kodon penghenti (–UGA–) itu muncul di tengah-tengah rangkaian kode asam amino yang hendak diterjemahkan oleh mRNA. Sehingga, proses penerjemahannya ini menjadi terganggu dan berhenti di tengah jalan. Ini terjadi tanpa harus adanya proses mutasi penyisipan. Pada gambar di bawah ini, nampak dengan jelas kalau kodon penghenti muncul di rangkaian keempat dari seharusnya muncul di rangkaian terakhir. Ini berbeda dengan apa yang terjadi pada mutasi pergeseran-kerangka. Kemunculan kodon penghenti (–UAA–) dapat dikatakan muncul karena proses mutasi penyisipan.⁷³

1. Mutasi Pergeseran-Kerangka

2. Mutasi Tiada-Arti



Untai DNA Normal:

```
DNA: 5' - ATG ACT CAC CGA GCG CGA AGC TGA - 3' shut
      3' - TAC TGA GTG GCT CGC GCT TCG ACT - 5'
mRNA: 5' - AUG ACU CAC CGA GCG CGA AGC UGA - 3'
Protein: Met Thr His Arg Ala Arg Ser Stop
```

Untai DNA yang bermutasi:

```
DNA: 5' - ATG ACT CAC TGA GCG CGA AGC TGA - 3'
      3' - TAC TGA GTG ACT CGC GCT TCG ACT - 5'
mRNA: 5' - AUG ACU CAC UGA GCG CGA AGC UGA - 3'
Protein: Met Thr His Stop
```

Gambar 2.20. Perbandingan Mutasi Pergeseran-Kerangka dan Mutasi Tiada-Arti

Pada tingkatan yang lebih jauh, mutasi yang terjadi pada DNA ini sebagian besar mengakibatkan penyakit genetik yang sulit untuk disembuhkan. Selain penyakit kanker seperti telah disinggung dalam mutasi yang diakibatkan oleh senyawa *benzo[a]pyrene*, penyakit lainnya adalah *β-thalassemia* (kelainan genetik pada darah) yang disebabkan oleh mutasi tiada-arti, dan penyakit **kanker prostat**

0072556781/student_view0/chapter11/animation_quiz_4.html >, yang diakses pada tanggal 11 Mei 2011. Gambar berasal dari situs yang sama.

⁷³ Keterangan tentang mutasi tiada-arti ini didasarkan pada penjelasan dalam situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nonsense_mutation>, diakses pada tanggal 11 Mei 2011. Gambar untuk mutasi pergeseran-kerangka diambil dari animasi Lansing M Prescott, et al.,

(*prostate cancer*) yang disebabkan oleh mutasi salah-arti.⁷⁴ Pula, masih banyak contoh penyakit lainnya yang disebabkan oleh mutasi ini dan tidak akan disampaikan dalam pembahasan ini.

Walaupun terjadi proses mutasi dan efek lebih jauhnya akan menghasilkan penyakit-penyakit yang berbahaya, mekanisme internal yang ada pada DNA sebenarnya masih memungkinkan terjadinya perbaikan lesion maupun yang mutan. Adapun penyakit-penyakit yang telah disebutkan itu muncul karena mekanisme perbaikan (disebut dengan *DNA repair*) yang dilakukan oleh DNA itu sendiri tidaklah sempurna seperti halnya yang terjadi dalam proses replikasi. Sehingga, mutan itu dapat lolos dari mekanisme perbaikan DNA ini. Mekanisme perbaikan DNA ini—walaupun tidak sempurna—sebenarnya dapat mereduksi mutasi dengan rasio hingga $\sim 3\times$ atau $\sim 2.7\times 10^{-5}$ base/20 tahun generasi pada DNA mitokondria manusia. Sedangkan pada DNA-nya (*human genome*) sendiri, mutasi terjadi pada rasio $\sim 2.5\times 10^{-8}$ base/1 generasi. Suatu rasio yang cukup baik mengingat proses replikasi DNA itu sendiri pada manusia menghasilkan 50 base/detik.⁷⁵

Sehubungan dengan mekanisme perbaikan DNA ini, hal ini sebenarnya dapat diringkaskan dalam tiga tahapan proses. Tahap pertama disebut dengan mekanisme **tanggap segera** (*immediate-early response*). Pada tahap ini, DNA melakukan deteksi dini kerusakan DNA dengan mengaktifkan titik pengecekan yang sudah disinggung dalam proses replikasi DNA. Ini dilakukan baik dalam fase G1 maupun G2 dalam hitungan menit. Bila terdapat kerusakan pada DNA, proses dilanjutkan pada tahap kedua, yaitu mekanisme **tanggap awal** (*early response*). Pada tahap kedua ini, lesion lalu diproses secara lebih jauh. Perbaikan dilakukan pada lesion. Bila berhasil diperbaiki, maka ia akan masuk dalam fase

dalam situs McGraw-Hill dan gambar mutasi tiada-arti berasal dari situs Wikipedia tentang penjelasan mutasi tiada-arti.

⁷⁴ Keterangan tentang contoh penyakit yang diakibatkan oleh mutasi ini diambil dari situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Notable_mutations.svg> , yang diakses pada tanggal 12 Mei 2011.

⁷⁵ Untuk rasio mutasi ini, keterangan diambil dari situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mutation_rate> , yang diakses pada tanggal 12 Mei 2011 dan untuk kecepatan replikasi DNA pada manusia, keterangannya diambil dari situs: <<http://users.rcn.com/jkimball.ma.ultranet/BiologyPages/D/DNAReplication.html>>, diakses pada tanggal 12 Mei 2011.

selanjutnya dan akan lolos dari titik pengecekan. Peristiwa atau kejadian ini disebut dengan *clonogenic survival*. Sementara itu, bila proses perbaikannya sangat lambat dan memakan waktu yang cukup lama, proses perbaikannya disebut dengan **perbaikan berjalan** (*ongoing repair*) dan pengaktifan titik pengecekan pun diperpanjang. Sedangkan bila kerusakan DNA itu cukup parah, maka lesi ini akan mengalami kematian dan tidak akan dilakukan perbaikan (atau masuk ke fase G₀).⁷⁶

Setelah menjalani *clonogenic survival* di tahap ketiga, yaitu mekanisme **tanggap lanjutan** (*late response*), lesi yang telah berhasil diperbaiki dengan baik akan bergabung kembali ke fase selanjutnya (mitosis). Namun, lain halnya dengan lesi yang masih mengalami perbaikan berjalan, ia akan memiliki beberapa pilihan dalam tahapan ketiga ini. Bila lesi memiliki perpanjangan titik pengecekan yang tetap sehingga masuk ke fase mitosis, maka lesi ini akan ditahan oleh mekanisme perbaikan dan akan dimatikan dalam mekanisme yang disebut sebagai **kematian mitosis** (*mitotic death*). Namun, bila lesi ini masih dapat ditahan dan ditarik kembali dari fase mitosis, proses ini disebut dengan *premature senescence*.⁷⁷

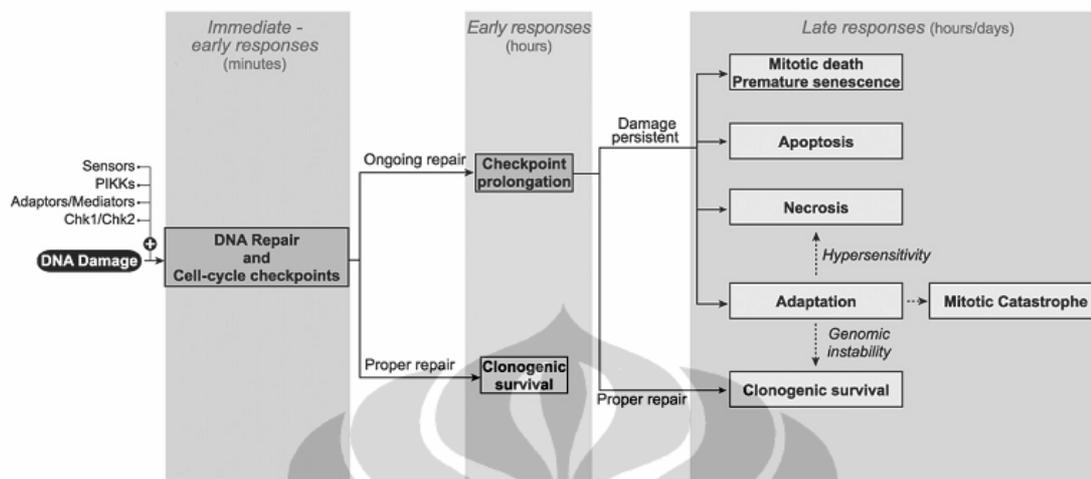
Proses lainnya yang terjadi dalam penanganan DNA yang rusak adalah **apoptosis** (*apoptosis*). Ini adalah mekanisme perbaikan DNA dengan jalan mematikan lesi dan kemudian menghilangkannya. Apoptosis akan berbeda dengan proses **nekrotis** (*necrotic*). Walaupun sama-sama merupakan mekanisme perbaikan DNA dengan jalan mematikan lesi, nekrotis tidak diiringi dengan proses menghilangkan lesi itu dan dapat memicu kerusakan pada DNA lainnya. Dalam konteks ini, meskipun sudah ada beberapa proses yang telah dilakukan oleh mekanisme perbaikan DNA seperti telah diuraikan, lesi ternyata masih ada yang dapat diadaptasi oleh sel. Namun, lesi yang telah diadaptasi ini mengandaikan bahwa DNA tersebut bersifat tidak stabil atau mutan sifatnya dan cenderung menumbuhkan sel tumor.⁷⁸

⁷⁶ Jean Y.J. Wang and Sarah K. Cho. "Coordination of Repair, Checkpoint, and Cell Death Responses to DNA Damage", dalam Wei Yang (Ed.). *DNA Repair and Replication*. California: Elsevier Academic Press, 2004, hal. 104-7.

⁷⁷ Wang and Cho. *Ibid.*, hal. 107-8.

⁷⁸ Wang and Cho. *Ibid.*, hal. 108-9.

Ketiga tahap perbaikan DNA ini, bila diilustrasikan, maka akan dapat dilihat dalam gambar berikut.⁷⁹



Gambar 2.21. Kerangka Kerja Tahapan Perbaikan DNA

Selain tahapan yang ada dalam mekanisme perbaikan DNA, hal yang perlu diketahui adalah bahwa mekanisme perbaikan DNA ini juga memiliki beberapa teknik perbaikan. Teknik perbaikan yang telah diketahui ada lima macam, yaitu: **perbaikan salah-pasang** (*mismatch repair*), **perbaikan penghilangan basa** (*base excision repair*), **perbaikan penghilangan nukleotida** (*nucleotide excision repair*), **perbaikan cahaya** (*photorepair*), dan **perbaikan untai-ganda yang pecah** (*double-strand breaks repair*, disingkat menjadi *DSBs repair*).⁸⁰

Teknik perbaikan salah-pasang ini digunakan untuk memperbaiki kerusakan yang diakibatkan dari galat semasa proses replikasi, yaitu kesalahan perpasangan basa nitrogen. Dengan menggunakan teknik ini, mekanisme perbaikan DNA diawali dengan pengikatan pasangan basa yang keliru oleh protein MSH (atau *melanocyte-stimulating hormone*). Kemudian, setelah diikat, untai DNA yang salah pasangan itu dipotong di untai akhir yang memiliki panjang ukuran 1-2 kilobase oleh enzim **endonuklease** (*endonuclease*) dari posisi basa nitrogen yang salah. Setelah dipotong, enzim **eksonuklease** (*exonuclease*) mem-

⁷⁹ Gambar dikutip dari Wang and Cho. *Ibid.*, hal. 105.

⁸⁰ Keterangan mengenai teknik perbaikan ini dapat disarikan dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 80, Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 256, dan Sumner. *Op.cit.*, seksi 3.6.

buang potongan untai DNA tersebut dan disintesis kembali oleh polimerase DNA dan ligase.⁸¹

Berbeda dengan perbaikan yang ada pada teknik perbaikan salah-pasang, perbaikan penghilangan basa langsung membuang lesion yang rusak basa nitrogennya dengan bantuan **glikosilase DNA** (*DNA glycosylase*). Kemudian, proses pembuangan fosfat deoksiribosa pada lokasi apurinik atau apirimidin (*AP site*) dilaksanakan oleh AP-endonuklease. Setelah proses pembuangan berhasil, pada lokasi yang kosong tersebut kembali diisi untai DNA pengganti oleh polimerase DNA dan ligase.⁸²

Hal yang cukup rumit justru terjadi dalam teknik perbaikan penghilangan nukleotida. Ini karena prosesnya melibatkan banyak enzim. Pertama-tama, dilakukan suatu proses pengenalan kerusakan pada lesion yang dilakukan oleh enzim **kompleks XPC-hHR23B** (*XPC-hHR23B complex*, XPC ini singkatan dari *xeroderma pigmentosum complementation group C*). Setelah pengenalan kerusakan dilakukan, mekanisme perbaikan DNA akan menyertakan enzim TFIIH (*transcription factor II H*) beserta XPA (*xeroderma pigmentosum group A*) dan RPA (*replication protein A*) untuk membuat ulang model kromatin. Setelah proses pembuatan ulang model kromatin selesai, enzim helikase yang disertai XPB (*xeroderma pigmentosum group B*) dan XPD (*xeroderma pigmentosum group D*) membantu memisahkan model untai DNA tersebut dari rangkaian nukleotida. Model untai DNA yang telah dipisah ini lalu dipotong secara berturut-turut dimulai dari posisi 3' oleh XPG (*xeroderma pigmentosum group G*) dan akhir 5' oleh XPF-ERCC1 (*xeroderma pigmentosum group F*) dan kemudian dibuang. Baru setelah potongan itu hilang, polimerase DNA dan ligase melengkapinya dengan untai DNA yang baru.⁸³

Sebaliknya dengan proses yang terjadi pada perbaikan penghilangan nukleotida, teknik perbaikan cahaya lebih sederhana dan singkat prosesnya. Walaupun sebenarnya dapat dilakukan perbaikan penghilangan nukleotida untuk

⁸¹ Sumner. *Op.cit.*, seksi 3.6.1 dan bdk. dengan keterangan dari Passarge. *Loc.cit.*

⁸² Sumner. *Op.cit.*, seksi 3.6.2 dan bdk. dengan keterangan dari Passarge. *Loc.cit.*, serta Koolman and Roehm. *Loc.cit.*

⁸³ Sumner. *Op.cit.*, seksi 3.6.3.

lesion tersebut, namun dalam beberapa organisme secara khusus malah menggunakan perbaikan cahaya. Proses perbaikannya pertama-tama adalah pelekatan enzim **fotoliase** (*photolyase*) pada lesion yang hendak diperbaiki. Kemudian, enzim fotoliase ini memperbaiki lesion dengan cara memotong dan menghilangkannya melalui bantuan energi yang berasal dari cahaya. Polimerase DNA dan ligase tidak diperlukan karena mutasi yang hendak diperbaiki adalah jenis *thymine dimer* dan hanya mengembalikan T agar tidak bersatu dalam ikatan kovalen.⁸⁴

Pada teknik yang kelima dari mekanisme perbaikan DNA ini, ada suatu dilema yang harus dihadapi. Dilema ini muncul karena bila dilakukan perbaikan atas lesion dan terjadi defisiensi akan mengakibatkan efek yang mengarah kepada tumbuhnya sel kanker. Namun, bila tidak diperbaiki, lesion ini akan mengakibatkan kematian pada sel karena rusaknya yang berupa pecahnya kedua untai ganda. Mekanisme perbaikan DNA di dalam sel ini kesulitan untuk membuat model untai DNA karena tiadanya pola contoh untai yang dapat ditiru. Meskipun demikian, walaupun ada dilema serupa ini, mekanisme perbaikan DNA tetap berusaha memperbaikinya dengan tiga macam cara.⁸⁵

Cara yang pertama disebut dengan **penggabungan akhir non-homologi** (*non-homologous end joining*, disingkat menjadi NHEJ). Kemudian, pada akhir untai DNA yang pecah itu, masing-masing akhirnya diberikan protein Ku70 dan Ku80 untuk menjaga dan mencegah untai DNA yang satu jatuh pada untai DNA yang lainnya (proses degradasi). Kemudian protein Ku ini mengaktifkan **kinase protein yang bergantung pada DNA** (*DNA-dependent protein kinase*) dan akan memfasilitasi penggabungan kedua untai ganda oleh ligase dan *XRCC4*.⁸⁶

Dalam cara kedua yang disebut dengan **rekombinasi** (atau *homologous recombination*), nuklease akan memotong satu untai DNA yang pecah hingga posisi 3' dan melakukan hal yang sama untuk untai DNA yang ada di seberang bawah. Kemudian, protein Rad51 dilekatkan pada ujung untai DNA yang tidak dipotong nuklease sehingga protein Rad51 akan berhadapan dengan masing-

⁸⁴ Sumner. *Ibid.*, seksi 3.6.4 dan Koolman and Roehm. *Loc.cit.* Bdk penjelasan ini dengan Passarge. *Loc.cit.*

⁸⁵ Sumner. *Op.cit.*, seksi 3.6.5.

⁸⁶ Sumner. *Ibid.*, hal. 41.

masing ujung untai DNA yang telah dipotong tersebut. Ketika hal ini telah selesai dilakukan, maka **filamen nukleoprotein** (*nucleoprotein filaments*) akan mencari ujung yang homolog dari untai DNA tersebut. Proses pertukaran yang dilakukan oleh dua untai DNA ini kemudian menghasilkan molekul gabungan yang berasal dari molekul untai DNA yang pecah dan untai DNA yang utuh. Kedua untai DNA yang utuh digunakan sebagai pola contoh untuk mensintesis segmen DNA yang hilang karena rusak. Akhirnya, dengan **persimpangan Holliday** (*Holliday junctions*), kedua pasangan untai ganda DNA yang telah berbaur dikembalikan hingga menjadi terpisah menjadi dua pasang untai ganda.⁸⁷

Mekanisme atau cara yang terakhir dari teknik kelima ini adalah **pendinginan untai-tunggal** (*single-strand annealing*). Prosesnya sama-sama menggunakan prinsip homologi. Namun, dalam cara yang ini, tidak digunakan rekombinasi antara untai DNA. Mekanisme perbaikan dengan cara ini menyertakan protein Rad50 dan Mre11 untuk mengikat masing-masing untai ganda DNA yang pecah hingga terbentuk posisi yang homolog seperti dilakukan oleh protein Rad51 pada cara rekombinasi. Setelah ini terbentuk, protein Mre11 melakukan aktivitas nuklease yang menjauhkan ujung ganda di sisi untai yang pecah dan di sebrang bawahnya sehingga akan terbuka. Ujung untai yang homolog kemudian akan mencari pasangannya dan kemudian bersatu kembali melalui proses pendinginan.⁸⁸

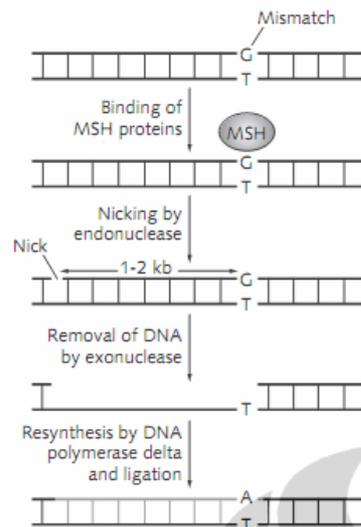
Kelima teknik perbaikan ini sebenarnya sangat sukar untuk dibayangkan prosesnya. Agar lebih mudah dalam memahaminya, kelima teknik ini diberikan ilustrasi yang dapat menggambarkan keseluruhan proses dan cara bekerjanya. Berikut adalah gambar-gambar yang dimaksud.⁸⁹

⁸⁷ Sumner. *Ibid.*, hal. 41-2 dan bdk. dengan keterangan yang diberikan oleh Passarge. *Loc.cit.*, serta Koolman and Roehm. *Loc.cit.*, untuk mekanisme rekombinasi DNA ini.

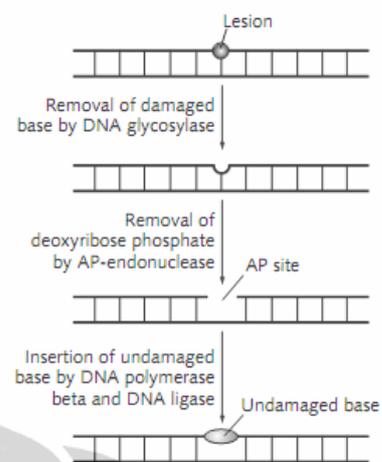
⁸⁸ Sumner. *Op.cit.*, hal. 42.

⁸⁹ Sumber gambar untuk 2.22.1, 2.22.2, 2.22.3, 2.22.5.1, 2.22.5.2., dan 2.22.5.3 berasal dari Sumner. *Ibid.*, hal. 38, 39, 40, 41, dan 42. Sedangkan untuk gambar 2.22.4 diambil dari Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 257

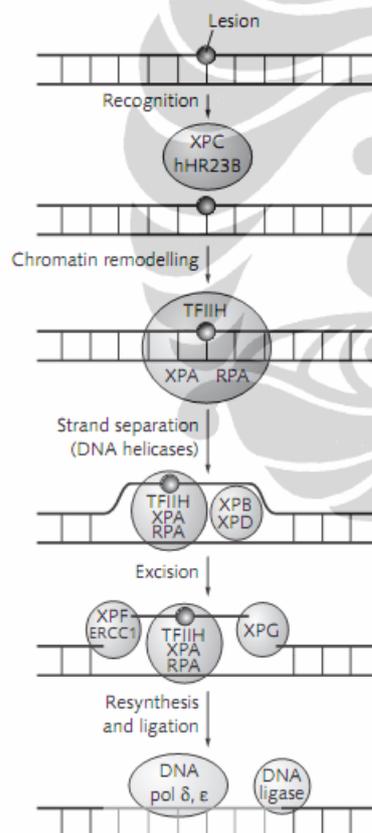
1. Teknik Perbaikan Salah-Pasang



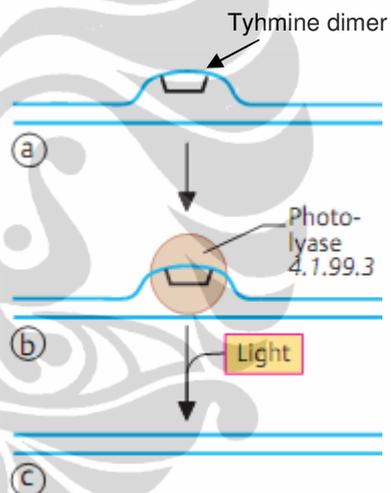
2. Teknik Perbaikan Penghilangan Basa



3. Teknik Perbaikan Penghilangan Nukleotida

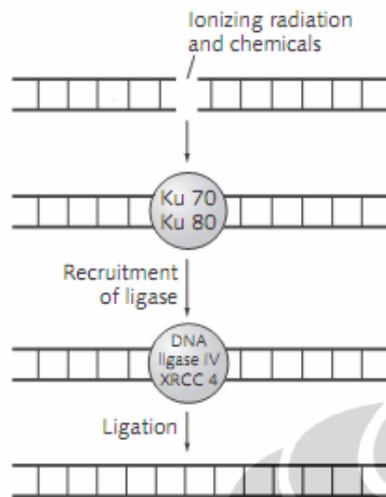


4. Teknik Perbaikan Cahaya

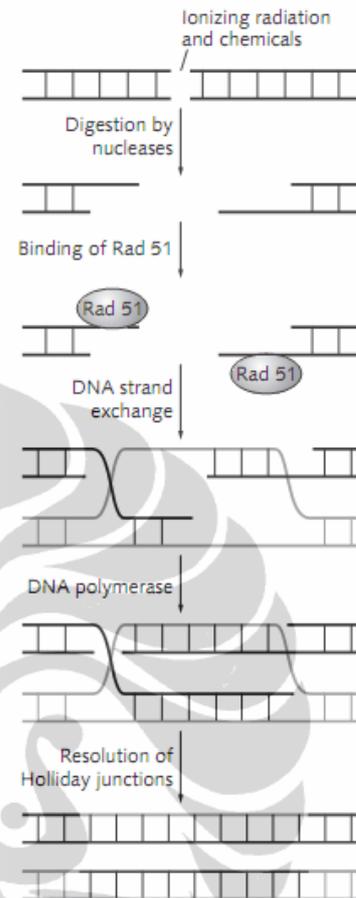


5. Teknik Perbaikan Untai Ganda yang Pecah

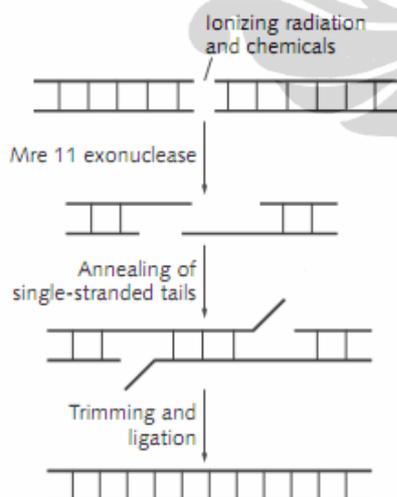
1. Penggabungan Akhir Non-Homologi



2. Rekombinasi



3. Pendinginan Untai-Tunggal



Gambar 2.22. Teknik dan Mekanisme Perbaikan DNA

Dengan ilustrasi yang disajikan, penjelasan atas kelima teknik perbaikan DNA agak lebih mudah dipahami meskipun sebenarnya cukup sulit mengingat

mekanisme perbaikan tersebut merupakan proses yang sangat kompleks. Namun demikian, penjelasan yang diberikan untuk sub 2.4 ini sudah dapat dianggap cukup dalam memberikan gambaran tentang apa yang disebut sebagai kerusakan DNA dan proses mutasi. Kedua hal ini memang menjadi masalah yang paling mendasar dalam proses daur sel itu sendiri maupun dalam kajian genetika. Jika ini adalah suatu masalah, maka tentunya akan ada solusi yang dapat diusahakan untuk mengatasinya. Uraian di sub bab selanjutnya akan menjajagi kemungkinan solusi yang dapat diusahakan untuk masalah genetika ini.

2.5. Metode dan Teknik Manipulasi DNA

Solusi yang diusahakan untuk mengatasi masalah genetika yang secara khusus terletak dalam kerusakan DNA dan mutasi yang terjadi pada DNA oleh para ahli biologi molekuler kini bertumpu pada suatu teknik yang digunakan untuk memanipulasi DNA itu sendiri. Teknik tersebut dinamakan **rekayasa genetika** (*genetic engineering*). Nama lain untuk teknik manipulasi DNA ini adalah **teknologi DNA rekombinan** (*recombinant DNA technology*).⁹⁰

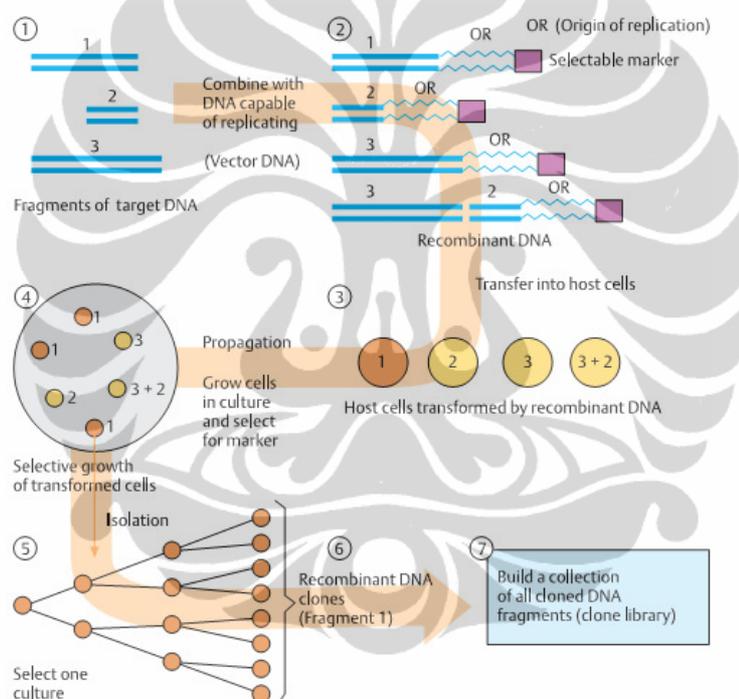
Pada konteks ini, rekayasa genetika pada intinya tidak lain daripada suatu teknik yang digunakan untuk memanipulasi DNA dalam rangka menghasilkan **klon** (*clone*) dari DNA itu sendiri. Klon DNA adalah hasil penggandaan DNA yang identik dengan DNA yang digandakan melalui proses yang disebut **kloning** (*cloning*).⁹¹ Proses kloning ini ibaratnya adalah proses fotokopi sebuah dokumen, namun dokumennya itu adalah DNA. Sehingga, kalau boleh disederhanakan, kloning adalah proses fotokopi DNA untuk menghasilkan klon DNA identik.

Dalam proses kloning ini, ada beberapa tahapan yang mesti dipenuhi dan dilaksanakan. Tahap pertama adalah “menggunting” DNA pada lokasi yang tepat dan dikehendaki dengan menggunakan enzim khusus yang disebut **enzim restriksi** (*restriction enzyme*). Selanjutnya, dalam proses tersebut dilaksanakan pemilihan molekul kecil DNA yang dapat melakukan proses replikasi mandiri. DNA yang seperti ini disebut dengan **vektor kloning** (*cloning vector*). Setelah

⁹⁰ Muladno. *Op.cit.*, hal. 1-2, Pai. *Op.cit.*, hal. 209, Nelson and Cox. *Op.cit.*, hal. 306-7 dan Koolman and Roehm. *Op.cit.*, hal. 258.

⁹¹ Nelson and Cox. *Op.cit.*, hal. 306.

pemilihan dilaksanakan, tahap berikutnya adalah menggabungkan dua fragmen DNA (kloning vektor dengan DNA yang akan dikloning) dalam ikatan kovalen dengan menggunakan ligase DNA setelah vektor kloning diberi **ciri** (*marker*) terlebih dahulu. Dalam hal ini, campuran DNA yang terdiri dari dua segmen atau lebih yang berikatan kovalen disebut dengan DNA rekombinan. Setelah proses gabungan selesai, DNA rekombinan dipindahkan dari tabung tes ke **sel inang** (*host cell*) untuk menjalankan proses replikasi. Kemudian, di tahap yang terakhir, diadakan penyeleksian kembali sel yang dihasilkan dari replikasi sel inang yang berisi DNA rekombinan tersebut untuk diisolasi. Gambar berikut mengilustrasikan tahapannya secara lebih rinci.⁹²



Gambar 2.23. Tahapan Proses Kloning DNA

Meskipun proses kloning nampak seperti tahapan proses yang sederhana sebagaimana telah disampaikan, namun hal ini ternyata membutuhkan beberapa metode dan teknik khusus. Ini karena proses kloning lebih rumit pelaksanaannya walaupun prosesnya terkesan hanya proses gunting dan tempel belaka. Dalam

⁹² Nelson and Cox. *Op.cit.*, hal. 307, Passarge. *Op.cit.*, hal. 56, dan Desmond S.T. Nicholl. *An Introduction to Genetic Engineering*. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 1-2. Gambar diambil dari Passarge. *Op.cit.*, hal. 57.

pekerjaan yang berkaitan dengan penanganan DNA misalnya, ini membutuhkan setidaknya 6 (enam) metode. Metode-metode tersebut adalah:⁹³

1. **Isolasi** (*isolation*) – Metode ini digunakan dalam pengambilan sampel DNA yang terdiri dari: (i) pembukaan sel untuk mengeluarkan asam nukleatnya; (ii) pemisahan asam nukleat dari komponen sel lainnya, dan (iii) pengambilan asam nukleat dalam bentuk yang sudah dimurnikan.
2. **Kuantifikasi** (*quantification*) – Dalam proses kloning, seringkali dibutuhkan DNA dengan ukuran tertentu. Metode kuantifikasi ini adalah cara yang digunakan untuk mendapat ukuran tersebut dengan alat *spectrophotometric* dan juga dengan menggunakan bantuan cahaya UV.
3. **Pelabelan radioaktif** (*radiolabelling*) – DNA yang dimasukkan dalam sel inang seringkali tidak nampak jejaknya. Oleh karena itu, pemberian ciri pada DNA tersebut wajib dilaksanakan. Ini untuk melacak jejak DNA yang dimasukkan dalam sel inang seperti dilakukan dalam eksperimen Hershey dan Chase. Dalam pemberian ciri ini, hal tersebut menggunakan molekul radioaktif.
4. **Hibridisasi** (*hybridisation*) – Rangkaian DNA yang dikehendaki kadangkala berada dalam suatu rantai nukelotida yang kompleks strukturnya. Hal ini menyulitkan bila rangkaian DNA itu hendak diambil sebagai sampel. Untuk itu, dikembangkan suatu metode pendeteksian dan pengambilan rangkaian DNA tersebut yang dinamakan dengan hibridisasi.
5. **Elektroforesis dengan gel** (*gel electrophoresis*) – Untuk keperluan visualisasi dan proses pemantauan apa yang terjadi pada DNA, digunakan suatu metode elektroforesis dengan gel. Ini berguna untuk mengukur panjang rangkaian DNA dan juga memantau proses

⁹³ Uraian mengenai metode-metode yang digunakan dalam penanganan DNA ini disarikan dari Nicholl. *Op.cit.*, seksi 3 tentang *Working with Nucleic Acids*.

denaturasi (*denaturation*, atau terpisahnya untai ganda heliks menjadi untai tunggal dengan cara pemanasan) pada DNA.⁹⁴

6. **Penguraian rangkaian** (*sequencing*) – Suatu rangkaian DNA seringkali dibutuhkan untuk melakukan pembacaan gen dan identifikasi genetik. Hal ini dimungkinkan dengan proses penguraian rangkaian yang diperoleh dengan dua teknik. Teknik pertama disebut dengan metode Maxam-Gilbert yang menggunakan pendekatan degradasi kimiawi dalam penguraian rangkaian DNA. Sedangkan teknik kedua disebut dengan Sanger-Coulson yang menggunakan pendekatan sintesis DNA untuk memperoleh uraian rangkaian DNA tersebut.⁹⁵

Bila dalam penanganan DNA ternyata dibutuhkan setidaknya 6 metode, pada rekayasa DNA itu sendiri, ada 4 (empat) metode yang dapat diterapkan. Metode pertama adalah **menggunting DNA** (*cutting DNA*). Hal ini dimungkinkan dengan adanya enzim restriksi seperti telah disebutkan dalam penjelasan proses kloning. Dalam konteks ini, enzim restriksi yang dimaksud adalah **endonuklease** (*endonuclease*). Salah satu contoh enzim restriksi endonuklease ini adalah enzim yang dihasilkan oleh bakteri *Escherichia coli* dan diberi nama *EcoRI*. Enzim *EcoRI* ini memotong DNA pada posisi antara G dengan A dan sebaliknya, semisal dalam rangkaian DNA: –G↓AATTC– yang berpasangan dengan –CTTAA↑G– (panah menunjukkan tempat pemotongan).⁹⁶

Selain metode pengguntingan, dapat diterapkan pula **modifikasi pada DNA** (*DNA modifying*). Proses modifikasi pada DNA ini meliputi **degradasi** (*degradation*), **sintesis** (*synthesis*) dan juga **pengubahan** (*alteration*). Dalam degradasi (atau proses penghancuran makromolekul menjadi molekul yang lebih kecil) ini dibutuhkan enzim yang disebut **eksonuklease** (*exonuclease*). Untuk proses sintesis, seperti telah disinggung dalam proses replikasi, hal ini membutuhkan enzim polimerase. Sedangkan dalam proses pengubahan, ini

⁹⁴ Penjelasan metode ini, selain bersumber dari Nicholl, juga didasarkan dari Muladno. *Op.cit.*, hal. 27-32.

⁹⁵ Penjelasan lebih jauh tentang dua metode penguraian rangkaian DNA ini dapat dibaca dalam Nicholl. *Op.cit.*, dalam seksi 3.6 dan Muladno. *Op.cit.*, di bab 11.

⁹⁶ Nicholl. *Op.cit.*, hal. 43-5 dan Muladno. *Op.cit.*, hal. 23-4.

memerlukan enzim *alkaline phosphatase*, *polynucleotide kinase*, and *terminal transferase* yang digunakan untuk mengubah ujung rangkaian DNA sesuai dengan apa yang dibutuhkan.⁹⁷

Metode ketiga dalam rekayasa DNA adalah **penggabungan DNA** (*joining DNA*) dengan menggunakan enzim ligase. Metode ini sebenarnya sudah sangat dikenal dalam proses replikasi DNA. Namun demikian, pada konteks perkerayaan, penggabungan DNA bukan hanya menggabungkan rangkaian DNA yang terdapat dalam satu sel. Ini dapat mencakup proses penggabungan rangkaian DNA yang berasal dari sel yang terdapat dalam dua makhluk hidup yang berbeda pada satu rangkaian DNA.⁹⁸

Dalam metode terakhir yang digunakan dalam perkerayaan DNA, ini menggunakan teknik yang disebut dengan **reaksi rantai polimerase** (*polymerase chain reaction*, disingkat menjadi PCR). Teknik yang ditemukan oleh Kary Mullis ini adalah cara yang efektif untuk mendapatkan sejumlah besar klon DNA karena mampu menghasilkan setidaknya 10^5 klon dari satu proses PCR. Satu kali proses PCR ini dapat terdiri dari ± 25 -35 proses daur replikasi DNA.⁹⁹ Lalu, bagaimana proses PCR ini dilaksanakan?

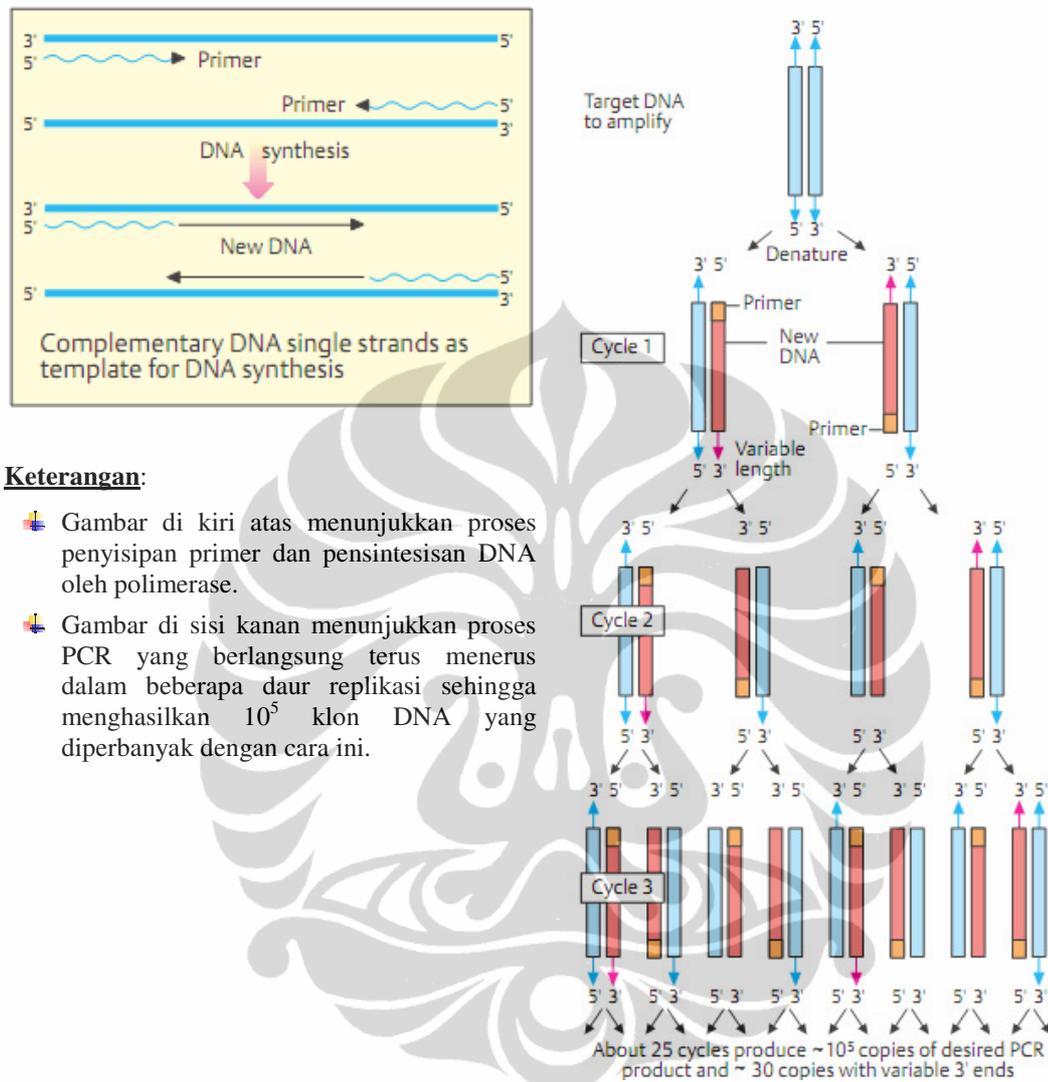
Pertama-tama, diberikan sepasang untai DNA yang akan dijadikan **target pengklonan DNA** (*DNA target*) secara *in vitro* (dalam laboratorium). Sepasang untai ini kemudian dipanaskan untuk membuatnya saling terpisah (denaturasi) dengan suhu 95°C . Lalu, pada target DNA ini, disisipkan primer yang akan menjadi pola contoh DNA dalam proses sintesis atau replikasi DNA. Setelah primer disisipkan dan berkomplemen dengan target DNA melalui proses pendinginan di kisaran suhu 50° - 60°C , enzim polimerase akan melakukan tugasnya mensintesis DNA sehingga menjadi dua pasang untai ganda yang lengkap setelah suhunya dinaikkan menjadi 72°C . Kemudian, proses denaturasi diulang kembali hingga proses sintesis DNA terjadi. Setiap untai tunggal DNA yang dipisahkan akan mendapatkan primer dan dilengkapi rangkaian DNA-nya oleh enzim polimerase. Seperti telah disebutkan, satu proses PCR dapat memiliki

⁹⁷ Nicholl. *Op.cit.*, dalam seksi 4.2.

⁹⁸ Nicholl. *Ibid.*, dalam seksi 4.3 dan Muladno. *Op.cit.*, hal. 25-6.

⁹⁹ Passarge. *Op.cit.*, hal. 66.

hingga 35 proses daur replikasi DNA. Untuk lebih memahami hal ini, berikut ini adalah gambar dari proses PCR yang dimaksud.¹⁰⁰



Keterangan:

- ✚ Gambar di kiri atas menunjukkan proses penyisipan primer dan pensintesisan DNA oleh polimerase.
- ✚ Gambar di sisi kanan menunjukkan proses PCR yang berlangsung terus menerus dalam beberapa daur replikasi sehingga menghasilkan 10⁵ klon DNA yang diperbanyak dengan cara ini.

Gambar 2.24. Proses Kloning DNA dengan menggunakan Teknik PCR

Setelah mengetahui metode dan teknik dasar yang digunakan dalam rekayasa genetika, tentunya muncul pertanyaan dalam benak kita seperti apakah penerapan metode dan teknik ini nantinya jika diaplikasikan dalam kasus-kasus yang lebih praktis? Misalnya, sebagaimana telah disinggung dalam bab I mengenai tanaman transgenik, bagaimana metode dan teknik dasar ini digunakan untuk membuat tanaman transgenik? Selain itu, dalam kaitannya dengan

¹⁰⁰ Muladno. *Op.cit.*, bab 10. Bdk. dengan keterangan yang diberikan dari Passarge. *Loc.cit.* Gambar diambil dari Passarge. *Ibid.*, hal. 67.

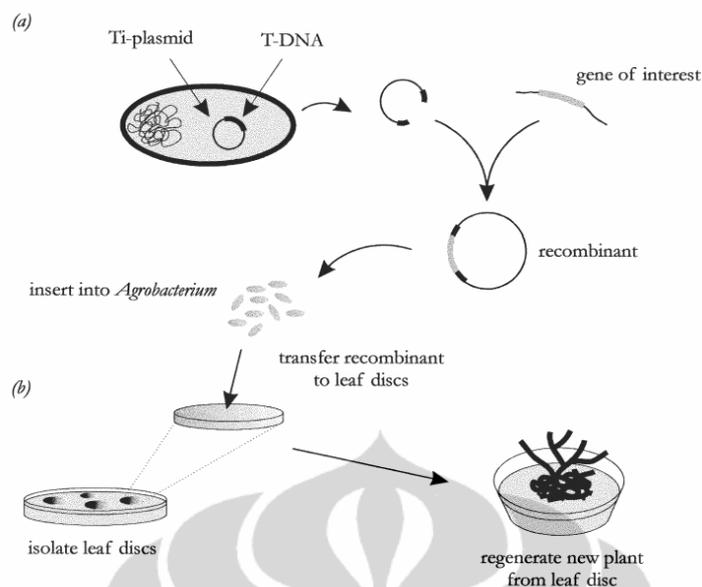
kerusakan DNA dan mutasi, bagaimana metode dan teknik ini dipakai untuk mengatasi masalah yang hadir dari adanya kerusakan DNA dan mutasi?

Tanaman transgenik ini biasanya dibuat dalam skala laboratorium terlebih dahulu sebelum disebarkan secara massal. Proses pembuatannya itu sendiri dilaksanakan dengan memanfaatkan apa yang disebut dengan *plasmid*. Plasmid ini adalah elemen ekstrakromosomal dari bakteri yang berbentuk bulat dan memiliki untai ganda DNA (*T-DNA*) yang dapat dijadikan inang pengantar atau vektor bagi untai DNA yang akan ditransplantasikan ke dalamnya. Dalam kasus tanaman transgenik, plasmid yang dipakai adalah *Ti-plasmid* atau *Tumor inducing plasmid* yang sudah direkayasa secara genetis. *Ti-plasmid* ini adalah bagian dari bakteri tanah yang dinamakan *Agrobacterium tumefaciens* dan bertanggung jawab dalam menyebabkan kanker mahkota tanaman. Ia digunakan sebagai vektor pembawa DNA yang hendak ditransplantasikan ke dalam tanaman yang hendak direkayasa karena kemampuannya dalam menginfeksi tanaman.¹⁰¹

Proses pembuatan tanaman transgenik mula-mula adalah mengeluarkan *Ti-plasmid* dari bakteri *Agrobacterium*. Kemudian, pada *Ti-plasmid* ini diberikan DNA yang telah direkayasa sehingga terjadilah proses rekombinan (atau proses penggabungan) antara *Ti-plasmid* dengan DNA tersebut. Setelah proses rekombinan selesai, *Ti-plasmid* yang telah berekombinan dengan DNA rekayasa lalu dimasukkan kembali ke dalam bakteri *Agrobacterium*. Bakteri *Agrobacterium* ini yang telah berisi rekombinan *Ti-plasmid* dengan DNA rekayasa ditransfer ke pelat berisikan tanaman (daun) yang hendak direkayasa. Setelah bakteri *Agrobacterium* ini masuk ke dalam tanaman tersebut, lalu tanaman ini ditumbuh-kembangkan dengan teknologi **kultur jaringan** (*tissue culture*) hingga menjadi tanaman yang siap dipindahkan ke lahan pertanian. Berikut ini adalah ilustrasi dari proses pembuatan tanaman transgenik sebagaimana telah diuraikan.¹⁰²

¹⁰¹ Nicholl. *Op.cit.*, dalam seksi 12.1.2.

¹⁰² Nicholl. *Ibid.*, 228-31. Gambar berasal dari Nicholl. *Ibid.*, hal. 231.



Gambar 2.25. Proses Pembuatan Tanaman Transgenik

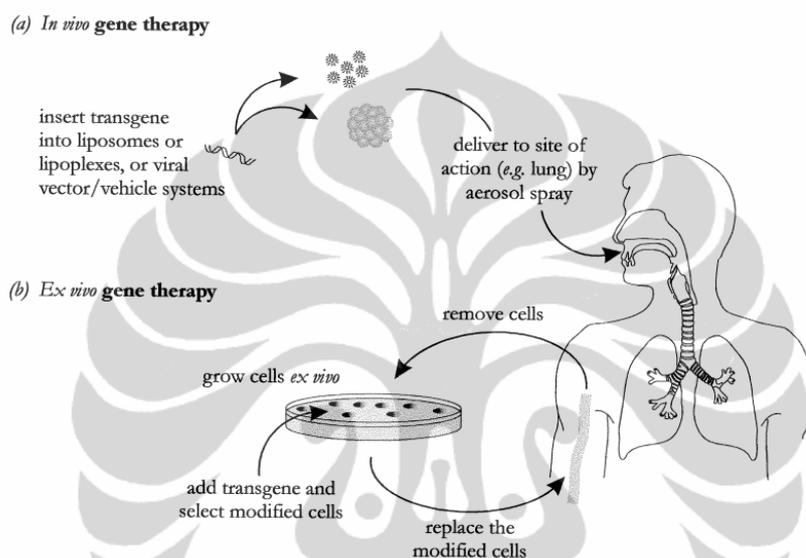
Hampir mirip dengan pembuatan tanaman transgenik, dalam penanganan masalah kerusakan DNA dan mutasi yang mengakibatkan penyakit pada manusia, pengobatannya itu menggunakan apa yang disebut dengan **transgen** (*transgene*). Transgen ini adalah hasil perbaikan genetis dari gen atau DNA yang rusak. Sehingga, bila transgen ini dimasukkan ke dalam tubuh manusia dan berhasil diimplantasikan melalui bantuan vektor pada untai DNA yang rusak dengan cara **menggantikannya** (*replacement*) atau **menyisipkannya** (*addition*), maka penyakit yang disebabkan oleh kerusakan DNA dan mutasi dapat dicegah kemunculannya. Pengobatan dengan cara ini disebut dengan **terapi gen** (*gene therapy*).¹⁰³

Terapi gen dengan mengganti atau menyisipkan ini tentu saja tidak akan dapat mengatasi semua masalah genetis atau penyakit genetis yang diakibatkan oleh kerusakan DNA dan mutasi. Bila kemudian gen atau DNA yang rusak itu kemudian memiliki fungsi dominan, maka penanganannya akan dilakukan dengan menggunakan teknologi yang disebut *antisense mRNA*. Teknik ini membolehkan fotokopi gen kebalikannya untuk digunakan dalam pembuatan mRNA sebagai pola contoh DNA sehingga gen yang rusak dapat digantikan oleh *antisense mRNA* tersebut.¹⁰⁴

¹⁰³ Nicholl. *Ibid.*, hal. 210-2.

¹⁰⁴ Nicholl. *Ibid.*, hal. 211.

Lebih jauh, penanganan gen atau DNA yang rusak dapat dilakukan juga di luar tubuh manusia bila sel itu dapat diangkat dan diambil dari tubuh si pasien. Terapi gen yang dilakukan di luar tubuh manusia disebut dengan *ex vivo gene therapy*. Jika proses penanganannya dilakukan dalam tubuh manusia seperti dilaksanakan dalam proses implantasi transgen, maka terapi gen ini disebut dengan *in vivo gene therapy*. Berikut ini adalah ilustrasi yang memudahkan kita untuk memahami jenis-jenis dari proses terapi gen yang dimaksud.¹⁰⁵



Gambar 2.26. Proses Pengobatan dengan menggunakan Terapi Gen

Demikian, kita telah dapat mengetahui bahwa proses pembuatan tanaman transgenik dan pengobatan gen atau DNA yang rusak dapat dilaksanakan dengan menggunakan teknik rekayasa genetika sebagaimana telah dipaparkan. Ini merupakan suatu terapan yang sangat maju dalam penggunaan metode dan teknik rekayasa genetis. Namun demikian, aplikasi praktisnya tidak berhenti sampai di sini. Rekayasa genetika ternyata dapat merambah ke bidang lainnya di luar bidang pertanian dan kesehatan, yaitu bidang teknologi informasi. Seperti apakah aplikasi praktis dari rekayasa genetika di bidang teknologi informasi? Pada bab selanjutnya, hal ini akan penulis bahas dengan seksama.

¹⁰⁵ Nicholl. *Ibid.*, hal. 211-2.

BAB III

KEMUNGKINAN PEMROGRAMAN DNA DAN KEGALATAN DALAM KOMPUTASI

Seperti telah disampaikan dalam akhir bab II, kini kita akan memasuki pembahasan mengenai apa yang disebut dengan aplikasi praktis rekayasa genetika dalam bidang teknologi informasi, yaitu komputasi DNA. Pada bab I pun hal ini telah penulis singgung dengan memberikan gambaran singkat melalui ilustrasi Neal Mendal yang dibuat oleh Amos dan juga eksperimentasi dari Shapiro dan Benenson. Namun, seperti apakah deskripsi yang lebih rinci mengenai komputasi DNA ini? Paragraf-paragraf berikutnya tentu saja akan mencari jawaban mengenai hal ini.

3.1. Dasar Teoretis dan Eksperimentasi Komputasi DNA

Di tahun 1959, Richard P. Feynman telah membicarakan suatu gambaran mengenai jenis komputasi di tingkat sub-mikroskopis. Hal inilah yang kemudian menginspirasi Leonard M. Adleman untuk bereksprimen dengan DNA sebagai wahana komputasi di tahun 1990-an. Pada saat itu, ketertarikan Adleman memang sangat besar karena ia sendiri pernah terlibat dalam kajian mengenai HIV AIDS dan mencoba untuk menyumbangkan solusinya pada para periset HIV AIDS tersebut. Namun, gagasan Adleman ternyata kurang mendapatkan sambutan karena ia “mungkin” adalah seorang matematikawan dan ahli komputer. Meski demikian, ia tidaklah putus asa. Sesudah “penolakan” itu, ia lalu bersikeras mempelajari biologi molekuler di bawah bimbingan Nickolas Chelyapov. Hingga akhirnya ia berhasil menerbitkan laporannya mengenai riset komputasi DNA yang mampu menyelesaikan **persoalan jalur Hamiltonian** (*Hamiltonian path problem*) melalui bantuan DNA dalam majalah *Science* di tahun 1994.¹⁰⁶

¹⁰⁶ Leonard M. Adleman. “Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems”, dalam *Science*. Vol. 266. 11 November 1994, hal. 1021-4 dan “Computing with DNA”, dalam *Scientific American*. Vol. 279. No. 2. Agustus 1998, hal. 54-61.

Apa yang dirintis Adleman ternyata membuka jalan bagi berkembangnya studi komputasi DNA secara lebih luas. Meskipun demikian, Adleman bukanlah satu-satunya perintis di bidang ini. Tentu saja, ada pendahulunya yang telah berusaha mempelajari aplikasi biomolekuler dalam kerangka komputasi, seperti dilakukan oleh Tom Head.¹⁰⁷ Namun, riset yang dilakukan Adleman menjadi penting adalah karena kesederhanaan metodenya dan juga sangat praktis dalam eksperimentasinya.

Bila penulis urai secara lebih jauh, eksperimen Adleman tersebut dilaksanakan dengan menyiapkan beberapa peralatan pokok, yaitu: (1) pasangan Watson-Crick, (2) polimerase, (3) ligase, (4) nuklease, dan (5) rangkaian DNA yang telah disintesis.¹⁰⁸ Kelima peralatan ini telah kita kenal dan ketahui masing-masing fungsinya sebagaimana telah diuraikan pada bab II. Pasangan Watson-Crick adalah pasangan basa A-T dan G-C, polimerase adalah enzim protein untuk mensintesis DNA, ligase adalah enzim protein untuk menyambung potongan untai DNA, nuklease adalah enzim protein untuk memotong atau menggunting untai DNA, dan sintesis DNA adalah proses perbanyakan atau penggandaan untai DNA.

Setelah kelima peralatan ini disediakan, maka Adleman lalu memilih model komputasi universal seperti yang telah diberikan penjelasannya pada tahun 1930-an oleh Alan M. Turing. Model komputasi universal ini sekarang disebut dengan **Mesin Turing** (*Turing Machine*, disingkat menjadi TM). Prinsip TM sangatlah sederhana. Ia hanya memerlukan dua hal, yaitu: (1) metode penyimpanan informasi yang akan diproses dan (2) operasi macam apa yang akan dilaksanakan untuk mengolah informasi tersebut. Inilah kenapa TM disebut dengan model komputasi universal.¹⁰⁹

Meskipun sangat sederhana dalam prinsipnya, TM bukanlah sesuatu yang mudah untuk ditangani. Ini karena ia merupakan suatu jenis pengolah informasi dengan cara yang sangat terbatas, tapi justru mampu melaksanakan proses pengolahan informasi yang tak terbatas. Bila ini dipraktikkan dalam sesuatu yang

¹⁰⁷ Nataša Jonoska. "Theoretical and Experimental DNA Computation", dalam *Genetic Programming and Evolvable Machines*. Vol. 7. No. 3. 2006, hal. 287.

¹⁰⁸ Adleman. 1998. *Op.cit.*, hal. 56-7.

¹⁰⁹ Adleman. *Ibid.*, hal. 57.

nyata, maka TM akan memiliki unsur-unsur peralatannya sebagai berikut ini: (1) **pengontrol otomatis operasi yang terbatas** (*finite automaton controller*), (2) **alat untuk baca-tulis** (*a read-write head*), dan (3) **memori berbentuk tape yang memiliki rangkaian media penulisan tak terbatas** (*an unbounded sequential tape memory*). Pada *tape* ini, pola pembacaan dan penulisan dalam medianya bersifat linier (bergerak horizontal) dan medianya memiliki sel yang dapat berisi simbol ataupun kosong.¹¹⁰

Lalu, di samping ketiga unsur peralatan seperti yang telah disebutkan, TM juga membutuhkan unsur-unsur proses yang dapat membuatnya bekerja dengan baik. Pertama adalah **keadaan** atau **kondisi mesin** (*state of the machine*). Keadaan ini dimaksudkan sebagai suatu posisi yang akan diambil oleh pengontrol otomatis dalam mesin untuk menjalankan aturan yang ada di dalamnya. Kedua, sistem baca-tulis (simbol) yang memungkinkan alat baca-tulisnya berfungsi dengan baik. Yang terakhir adalah sistem mekanis yang memungkinkan mesin bergerak ke kanan ataupun ke kiri sesuai dengan keadaan yang ditentukan untuk membaca simbol yang terdapat dalam *tape*. Bila mesin ini tidak menemukan keadaan yang ditentukan, maka prosesnya akan **terhenti** (*halt*).¹¹¹

Bila unsur peralatan dan unsur prosesnya sudah dapat dipenuhi, maka hal yang dilakukan untuk menjalankan TM adalah dengan membuat algoritma dan program. Algoritma adalah serangkaian aturan atau prosedur yang dibuat untuk memudahkan pelaksanaan komputasi. Sedangkan program, hal ini tidak lain daripada instruksi yang diberikan kepada mesin dengan menggunakan algoritma yang sudah dibuat tersebut. Misalnya, TM kita ini memiliki ketentuan algoritmis sebagai berikut:¹¹²

“Dalam keadaan n, jika alat membaca simbol x, tulislah simbol y ke tape, lalu bergeraklah ke arah kiri atau kanan sejumlah 1 sel pada tape, dan ubahlah keadaan menjadi m”.

¹¹⁰ Martyn Amos. *Theoretical and Experimental DNA Computation*. Berlin: Springer-Verlag, 2005, hal. 27.

¹¹¹ Amos. *Ibid.*

¹¹² Amos. *Ibid.*, hal 25-6 untuk keterangan algoritma dan program. Sedangkan untuk model algoritma yang dikutip dalam tulisan ini ada di hal. 28.

Berdasarkan algoritma ini, kita dapat membuat program untuk TM dengan pola sebagai berikut:

Keadaan (K) → Baca (B) → Tulis (T) → Gerak (G) → Keadaan Baru (KB)

Pola program ini kemudian diisi oleh nilai yang dianggap terbaik menurut kita sesuai dengan kemampuan TM. Untuk keadaan (K) misalnya, ini dapat terdiri dari beberapa kondisi yang mungkin bergantung pada proses yang ada di sistem baca-tulisnya. Untuk proses baca (B), hal ini bergantung pada simbol yang ada pada media *tape*. Sama halnya dengan proses baca, proses tulis (T) tidak dapat menuliskan jenis simbol di luar yang ada pada media *tape*. Proses gerak (G) dalam TM hanya memiliki 2 kemungkinan saja, yaitu ke kanan (kn) atau kiri (kr). Yang terakhir, keadaan baru (KB) akan sama persyaratannya dengan keadaan sebelumnya.

Program yang dapat dibuat dengan pola tersebut di atas dapat penulis rumuskan dalam tabel di bawah ini.¹¹³

Tabel 3.1. Contoh Program Mesin Turing

K	B	T	G	KB
1	0	0	kn	2
2	0	0	kn	3
2	1	1	kn	2
3	0	kosong (ko)	kr	5
3	1	0	kr	4
4	0	1	kn	2

Berdasarkan pada rumusan program di atas, maka instruksi program yang dapat diberikan kepada TM adalah:

- ✚ (1,0,0,kn,2) ini dibaca: dalam keadaan 1, bila simbol 0, maka tulis 0, lalu bergerak ke kanan, dan pindah ke keadaan 2.
- ✚ (2,0,0,kn,3) ini dibaca: dalam keadaan 2, bila simbol 0, maka tulis 0, lalu bergerak ke kanan, dan pindah ke keadaan 3.

¹¹³ Tabel dan contoh instruksi program dalam TM ini diadaptasi dari Amos. *Ibid.*, hal. 28.

- ✚ (2,1,1,kn,2) ini dibaca: dalam keadaan 2, bila simbol 1, maka tulis 1, lalu bergerak ke kanan, dan tetap ke keadaan 2.
- ✚ (3,0,ko,kr,5) ini dibaca: dalam keadaan 3, bila simbol 0, maka hapus 0, lalu bergerak ke kiri, dan berhenti.
- ✚ (3,1,0,kr,4) ini dibaca: dalam keadaan 3, bila simbol 1, maka tulis 0, lalu bergerak ke kiri, dan pindah ke keadaan 4.
- ✚ (4,0,1,kn,2) ini dibaca: dalam keadaan 4, bila simbol 0, maka tulis 1, lalu bergerak ke kanan, dan pindah ke keadaan 2.

Contoh program yang disampaikan ini sebenarnya merupakan program yang dibuat oleh Amos untuk perhitungan yang disebut *unary addition*. *Unary addition* ini adalah jenis perhitungan penjumlahan dalam matematika yang hanya menggunakan satu variabel nilai saja. Misalnya, jika kita punya nilai 8, maka proses *unary addition* yang dapat dilaksanakan adalah hanya pemberian nilai positif (+) atau negatif (-). Dalam TM ini, karena ada proses penyimpanan data, maka kita dapat melaksanakan proses *unary addition* yang merupakan proses penjumlahan dengan 2 tahapan. Bila kita ingin memperoleh nilai $(8 + 7)$, maka kita akan masukkan terlebih dahulu nilai 8. Berikutnya, baru kita masukkan nilai 7. Namun, dalam proses pemasukkan nilai 8 dan 7 ini harus dikonversi dulu ke dalam aturan simbol yang ada pada TM.¹¹⁴

Dalam proses konversi ini, Amos memberikan aturan bahwa untuk dua buah variabel yang akan diproses— $\{j,k\}$, hal ini dapat diberikan suatu ciri dalam TM dengan cara j -nya ini diberi simbol 1 untuk nilainya. Kemudian, hal yang sama diberlakukan untuk k dengan simbol 1 untuk nilainya. Namun, untuk pembedaan nilai yang diwakilinya, simbol 1 untuk j dan k diberikan sesuai jumlah nilai yang diwakilinya. Misalnya j dan k ini nilai variabelnya secara berturut-turut adalah 4 dan 7, maka simbol untuk $j \rightarrow 1111$ dan $k \rightarrow 1111111$. Bila ini hendak diolah dalam perhitungan penjumlahan $(j + k)$, maka konversi simbol dapat ditulis menjadi: 01111011111110. Simbol 0 paling depan dipergunakan untuk keadaan awal (mulai). Simbol 0 di antara 1 adalah pembatas. Sedangkan simbol 0 di akhir adalah untuk mengindikasikan ujung proses perhitungan. Bila rangkaian simbol 0 dan 1 ini diterapkan dalam TM dengan menggunakan program $K \rightarrow B \rightarrow T \rightarrow G$

¹¹⁴ Amos. *Ibid.*, hal. 29. keterangan mengenai unary addition disarikan dari situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/Unary_operation>, diakses pada tanggal: 27 Mei 2011.

→ KB di atas, untuk perhitungan nilai $(1 + 3)$ prosesnya dapat dilihat dalam tabel berikut ini.¹¹⁵

**Tabel 3.2. Contoh Perhitungan (1 + 3)
dengan menggunakan Program Mesin Turing**

Tape							Keadaan	Tindakan
0	1	0	1	1	1	0	1	Tulis 0, lalu ke keadaan 2
0	1	0	1	1	1	0	2	Tulis 1, lalu ke keadaan 2
0	1	0	1	1	1	0	2	Tulis 0, lalu ke keadaan 3
0	1	0	1	1	1	0	3	Ubah 1 jadi 0, mundur, lalu ke keadaan 4
0	1	0	0	1	1	0	4	Tulis 1, lalu ke keadaan 2
0	1	1	0	1	1	0	2	Tulis 0, lalu ke keadaan 3
0	1	1	0	1	1	0	3	Ubah 1 jadi 0, mundur, lalu ke keadaan 4
0	1	1	0	0	1	0	4	Tulis 1, lalu ke keadaan 2
0	1	1	1	0	1	0	2	Tulis 0, lalu ke keadaan 3
0	1	1	1	0	1	0	3	Ubah 1 jadi 0, mundur, lalu ke keadaan 4
0	1	1	1	0	0	0	4	Tulis 1, lalu ke keadaan 2
0	1	1	1	1	0	0	2	Tulis 0, lalu ke keadaan 3
0	1	1	1	1	0	0	3	Hapus 0, mundur, lalu berhenti
0	1	1	1	1	0		5	Proses berhenti sampai di sini

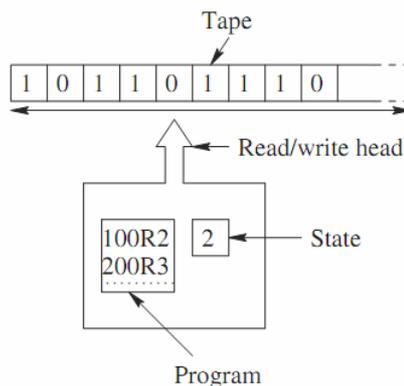
Keterangan:

Pada tabel ini, alur proses program bergerak ke arah kanan dan selnya yang berisi simbol diproses satu per satu. Proses yang diberi warna hijau dalam *tape*, ini menunjukkan tiadanya perubahan simbol. Proses berwarna kuning adalah proses perubahan 1 menjadi 0. Warna biru adalah proses perubahan dari 0 menjadi 1. Sedangkan warna merah, menunjukkan proses yang mengarah kepada penghentian program. Hasil akhir dari proses perhitungan ini sama dengan proses perhitungan manual yaitu: 011110. Sebab, bila deretan simbol ini dikonversi menjadi angka desimal, maka akan sama dengan 4.

Kalau kita melihat dan mengkaji tabel perhitungan ini, proses kerja TM sudah menjadi lebih jelas adanya. Namun demikian, untuk lebih memperjelas mekanisme dari TM ini, maka ilustrasi yang diberikan di bawah ini akan membantu kita membayangkan bentuk dari TM itu sendiri.¹¹⁶

¹¹⁵ Amos. 2005. *Loc.cit.* Dalam penjelasan Amos, ia menggunakan perhitungan $(2+3)$ sebagai contohnya.

¹¹⁶ Gambar dikutip dari Amos. *Ibid.*, hal. 28.



Gambar 3.1. Mekanisme Mesin Turing

Keterangan:

Dalam gambar ini, \leftrightarrow menunjukkan pergerakan horizontal dari tape. Sedangkan, 100R2 itu artinya sama dengan keadaan 1, baca 0, tulis 0, bergerak ke kanan ($R=Right$), lalu ke keadaan 2.

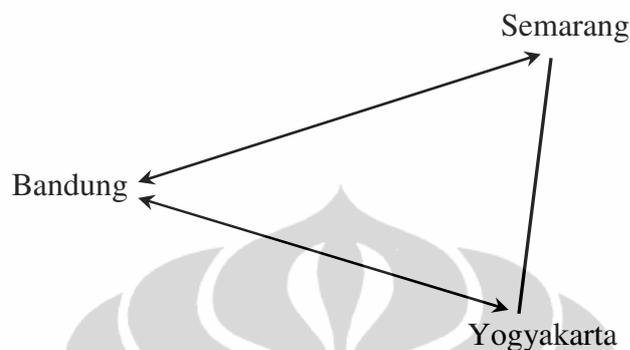
Setelah kita memahami TM ini, lalu muncul pertanyaan sehubungan dengan eksperimen Adleman yang menggunakan DNA sebagai TM, yaitu: “*bagaimanakah cara kerja TM bila itu dilangsungkan dengan menggunakan DNA?*”. Pada sisi ini, oleh karena masalah yang dipilih untuk dipecahkannya bukanlah suatu jenis *unary addition* seperti dibuat oleh Amos, maka tentunya proses kerjanya akan menjadi jauh berbeda. Penulis akan melihat sejauh mana perbedaan tersebut dan juga mengkaji apakah proses yang terjadi mirip dengan cara kerja TM dalam menyelesaikan masalah *unary addition* ini apa tidak.

Masalah yang dipilih oleh Adleman untuk dipecahkan dengan komputasi DNA adalah masalah jalur Hamiltonian. Masalah ini dinamakan dan berasal dari seorang astronom Irlandia yang hidup di pertengahan abad XIX bernama William Rowan Hamilton. Gagasan dari masalah ini sebenarnya sangat sederhana, yaitu bagaimana mengunjungi berbagai tempat dengan hanya menggunakan satu kali jalur perjalanan. Jadi, untuk mengunjungi satu tempat tidak boleh menggunakan jalur perjalanan yang sama untuk kedua kalinya.¹¹⁷

Sebagai contoh, misalnya, kita memiliki tempat tujuan: Bandung, Semarang, Yogyakarta, dan hendak ditempuh dengan jalur penerbangan. Dari Bandung ke Semarang, jalur penerbangannya dapat berlangsung dua arah. Begitu

¹¹⁷ Adleman. 1998. *Loc.cit.* Keterangan tambahan mengenai masalah jalur Hamiltonian ini diambil dari situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian_path>, yang diakses pada tanggal 28 Mei 2011.

pun dengan Bandung ke Yogyakarta. Sedangkan dari Semarang ke Yogya dan sebaliknya, ini malah tidak ada jalur penerbangannya. Kalau ini dibuat gambarnya, maka kita akan dapat melihat tiga tempat tujuan tersebut dalam jalur Hamiltonian sebagai berikut.¹¹⁸



Gambar 3.2. Jalur Hamiltonian untuk Penerbangan Bandung, Semarang, dan Yogyakarta

Keterangan:

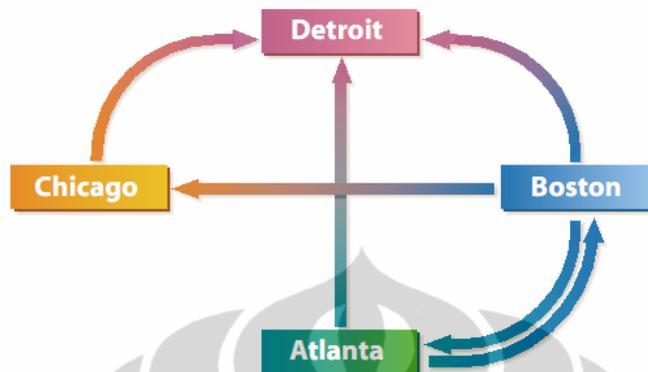
Dalam gambar ini, \leftrightarrow menunjukkan penerbangan dua arah. Sedangkan — menunjukkan bahwa tidak ada jalur penerbangan yang dapat ditempuh.

Setelah kita mengetahui jalur penerbangan yang mungkin, maka solusi untuk masalah jalur Hamiltonian-nya adalah: Yogyakarta \rightarrow Bandung \rightarrow Semarang atau Semarang \rightarrow Bandung \rightarrow Yogyakarta. Inilah yang disebut dengan jalur Hamiltonian. Tetapi tidak untuk jalur Yogyakarta \rightarrow Semarang \rightarrow Bandung atau Semarang \rightarrow Yogyakarta \rightarrow Bandung. Jalur Hamiltonian ini adalah sesuatu yang sederhana, namun menjadi lebih rumit bila tempat tujuannya semakin banyak dan jalur alternatifnya sedikit.

Dalam contoh yang diberikan Adleman, ia menggunakan jalur penerbangan dengan tempat tujuan: Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit. Jalur penerbangan Atlanta \rightarrow Boston ini terdiri dari dua arah perjalanan. Atlanta \rightarrow Detroit, Boston \rightarrow Chicago, Boston \rightarrow Detroit, dan Chicago \rightarrow Detroit hanya memiliki satu arah penerbangan. Sedangkan Detroit tidak memiliki penerbangan

¹¹⁸ Informasi jalur penerbangan Bandung, Semarang, Yogyakarta, diperoleh dari situs BdgYes dengan alamat: http://bdgyes.com/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=70, situs Pemerintah Kota Semarang: <http://www.semarang.go.id/info/k-udara.php>, dan situs YogYes dengan alamat: <http://www.yogyes.com/id/yogyakarta-tourism-article/getting-there-and-around/adisutjipto-airport/flight-schedule/>, semuanya diakses pada tanggal 28 Mei 2011.

keberangkatan atau hanya menjadi tempat tujuan untuk kedatangan. Gambar jalur Hamiltonian untuk masalah penerbangan 4 kota ini dapat dilihat sebagai berikut.¹¹⁹



Gambar 3.3. Jalur Hamiltonian untuk Penerbangan Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit

Jalur Hamiltonian untuk masalah ini sebenarnya mudah ditemukan, yaitu jalur penerbangan dengan menggunakan rute: Atlanta → Boston → Chicago → Detroit. Namun demikian, bagaimana hal ini ditangani secara komputasi? Lebih khusus, bila hal ini ditangani oleh mesin komputasi yang disebut DNA?

Adleman mencatat bahwa solusi masalah jalur Hamiltonian ini bukanlah hal yang mudah untuk diselesaikan bila dilaksanakan pada proses komputasi. Algoritma yang dapat disusun untuk menyelesaikan ini oleh karenanya tidaklah seefisien seperti algoritma yang dibuat Amos dalam perhitungan *unary addition* di TM. Namun, meskipun ada kendala yang seperti ini, algoritma yang dapat dibuat untuk masalah jalur Hamiltonian ini akan dapat dibaca sebagai berikut.¹²⁰

Berikan suatu *graf* (graph) dengan *simpul-ujung* (vertices) n .

1. Bangkitkan suatu himpunan jalur acak yang melewati graf.
2. Untuk masing-masing jalur dalam himpunan:
 - a. Cek apakah jalur tersebut dimulai dari *simpul-ujung awal* (start vertex) dan berakhir pada *simpul-ujung penghabisan* (end vertex). Jika tidak, hapus jalur itu dari himpunan.
 - b. Cek apakah jalur itu melewati simpul-ujung n dengan tepat. Jika tidak, hapus jalur itu dari himpunan.

¹¹⁹ Adleman. 1998. *Op.cit.*, hal. 57-8. Gambar berasal dari hal. 56.

¹²⁰ Adleman. *Ibid.*, hal. 58. Algoritma yang dikutip ini berasal dari Adleman.

- c. Untuk masing-masing simpul-ujung, cek apakah jalur itu melewati simpul-ujung-nya tersebut. Jika tidak, hapus jalur itu dari himpunan.
3. Jika himpunan itu tidak kosong, maka dapat dilaporkan bahwa di sana ada jalur Hamiltonian. Jika himpunan kosong, maka laporkan bahwa jalur Hamiltonian itu tidak ada.

Setelah mendapatkan algoritma yang diperlukan, langkah selanjutnya yang mesti ditempuh adalah melakukan konversi nama kota dan jalur penerbangan ke dalam “bahasa” DNA. Ini dilaksanakan dengan cara memilih rangkaian untai DNA yang berbeda-beda untuk dipasangkan dengan nama kota maupun dengan jalur penerbangan yang dimaksud. Dalam proses pemasangan ini, Adleman tidak memberikan kriteria khusus. Sehingga, boleh jadi kalau eksperimen ini dilakukan oleh orang lain yang ingin mencobanya, maka pola rangkaian untai DNA yang dipakai akan berbeda dengan yang dipakai oleh Adleman. Namun demikian, untuk penamaan jalur penerbangan, Adleman mengambil setengah bagian akhir dari rangkaian untai DNA nama kota asal untuk nama kota pemberangkatan dan setengah bagian pertama dari rangkaian untai DNA nama kota tujuan untuk nama kota kedatangan. Misalnya, Atlanta diberi pasangan rangkaian untai DNA: ACTTGCAG dan Boston diberi: TCGGACTG. Maka, jalur penerbangan Atlanta → Boston diberi pasangan rangkaian untai DNA: GCAGTCGG. Berikut ini adalah ringkasan hasil dari proses penerjemahan nama kota dan jalur penerbangan dalam “bahasa” DNA yang dilakukan Adleman.¹²¹

Tabel 3.3. Nama Kota Tujuan dan Jalur Penerbangan dalam Bahasa DNA

CITY	DNA NAME	COMPLEMENT
ATLANTA	ACTTGCAG	TGAACGTC
BOSTON	TCGGACTG	AGCCTGAC
CHICAGO	GGCTATGT	CCGATACA
DETROIT	CCGAGCAA	GGCTCGTT
FLIGHT	DNA FLIGHT NUMBER	
ATLANTA - BOSTON	GCAGTCGG	
ATLANTA - DETROIT	GCAGCCGA	
BOSTON - CHICAGO	ACTGGGCT	
BOSTON - DETROIT	ACTGCCGA	
BOSTON - ATLANTA	ACTGACTT	
CHICAGO - DETROIT	ATGTCCGA	

¹²¹ Adleman. *Ibid.*, hal. 56. Tabel berasal dari Adleman.

Keterangan:

Pada tabel ini, apa yang disebut *complement* adalah pasangan Watson-Crick atau pasangan basa dari nama kota.

Kemudian, untuk memenuhi langkah pertama dari algoritma yang telah dipersiapkan, Adleman memasukkan rangkaian untai DNA yang sudah dikodekan sebagai nama kota beserta pasangan Watson-Crick-nya dan jalur penerbangan ke dalam tabung untuk diproses dengan ligase (*ligation*). Proses penggabungannya ini sendiri akan berupa proses yang acak sifatnya. Namun, oleh karena ada beberapa rangkaian yang merupakan pasangan basa, maka hal ini akan bergabung secara otomatis mengikuti pola gabungan A-T dan G-C. sehingga, rangkaian untai DNA yang terpotong-potong ini akan bergabung dengan format kira-kira seperti berikut ini.¹²²

A t l a n t a					B o s t o n										
					Atlanta → Boston										
A	C	T	T	G	C	A	G	T	C	G	G	A	C	T	G
T	G	A	A	C	G	T	C	A	G	C	C	T	G	A	C
Pasangan Watson-Crick Atlanta								Pasangan Watson-Crick Boston							

Gambar 3.4. Formasi Nama Kota dan Jalur Penerbangan dalam *Ligation*

Dengan hanya berlangsung selama 1 detik saja, Adleman telah mendapatkan solusi untuk jalur Hamiltonian ini, yaitu: Atlanta → Boston → Chicago → Detroit. Dalam “bahasa” DNA, ini tertulis demikian:

GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA

Namun, ini hanya satu rangkaian untai DNA dari 100 trilyun molekul yang diproses dalam DNA dan itu bukan jalur Hamiltonian yang dimaksud. Oleh karenanya, algoritma langkah kedua harus diterapkan untuk menyisihkan rangkaian untai DNA yang tidak diharapkan ini.

Untuk menerapkan algoritma langkah kedua, Adleman lalu menggunakan teknik PCR. Ia lalu mengambil setengah bagian akhir nama kota tujuan awal sebagai simpul-ujung awal dan setengah bagian awal pasangan Watson-Crick nama kota tujuan penghabisan sebagai simpul-ujung penghabisan untuk

¹²² Adleman. *Ibid.*, hal. 59. Format yang diberikan merupakan hasil interpretasi penulis atas penjelasan Adleman.

diberlakukan sebagai primer. Oleh karena dalam jawaban jalur Hamiltonian ini nama kota tujuan awal adalah Atlanta dan nama kota tujuan penghabisan adalah Detroit, maka potongan untai DNA yang dipakai primer adalah GCAG dan GGCT. Ini dilakukan supaya rangkaian untai DNA yang tidak memiliki kriteria awal maupun kriteria akhir jalur Hamiltonian akan terhapus dari himpunan yang dikehendaki. Dalam gambar berikut ini, diberikan contoh dua rangkaian untai DNA yang akan diseleksi dengan disisipkannya primer yang sesuai dengan kriteria awal dan kriteria akhir jalur Hamiltonian.¹²³



Gambar 3.5. Contoh Penyeleksian Rangkaian Untai DNA yang tidak memenuhi Syarat Jalur Hamiltonian oleh Primer DNA

Proses penyeleksian dengan menggunakan primer dalam PCR ini ternyata hanya menyelesaikan algoritma langkah 2.a saja. Dalam rangka menyelesaikan algoritma langkah 2.b, Adleman lalu menggunakan teknik Elektroforesis dengan Gel untuk mengidentifikasi rangkaian untai DNA mana saja yang **panjang untainya benar** (*right length*). Sehingga, sisa dari rangkaian untai DNA yang tidak sesuai panjangnya dapat dibuang.¹²⁴

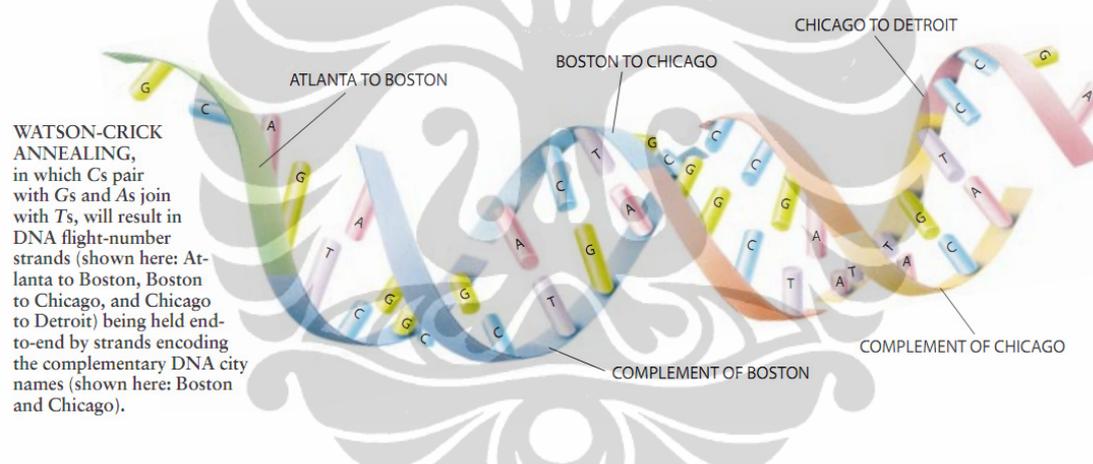
Namun demikian, langkah 2.c belum dapat dilaksanakan. Untuk memenuhi hal ini, diperlukan suatu teknik yang disebut dengan **pemisahan gaya-gabung** (*affinity separation*) dari proses **pendinginan Watson-Crick** (*Watson-Crick annealing*). Teknik ini menggunakan *probe* (molekul pembantu) yang tidak lain adalah pasangan Watson-Crick dari kota Boston (AGCCTGAC) dan kota Chicago (CCGATACA). *Probe* ini dimasukkan bersama bola magnetik dalam tabung yang berisi rangkaian untai DNA hasil seleksi di langkah 2.b. Setelah *probe* berisi AGCCTGAC masuk, ia akan menyeleksi nama kota Boston yang ada

¹²³ Adleman. *Ibid.*, hal. 60. Gambar yang berisi contoh rangkaian untai DNA yang akan diseleksi oleh primer GCAG dan GGCT dibuat oleh penulis. Lihat kembali uraian mengenai PCR dalam sub bab 2.5 untuk memahami ilustrasi ini.

¹²⁴ Adleman. *Ibid.*

pada rangkaian untai DNA dengan bantuan bola magnetik tersebut yang menunda proses penggabungan sebelumnya. Bila ada, rangkaian untai DNA ini akan bergabung dengan *probe* tersebut dan yang tidak memenuhi syarat akan dibuang. Begitupun dengan proses setelah dimasukkannya *probe* lainnya yang berisi CCGATACA. Ia akan melengkapi seleksi tambahan yang diperlukan untuk menghilangkan rangkaian untai DNA yang tidak mengandung nama kota Chicago.¹²⁵

Setelah proses pemisahan gaya-gabung ini selesai dilaksanakan, maka hasil yang diperoleh adalah hasil yang diinginkan, yaitu jalur Hamiltonian: GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA. Ini sekaligus menyelesaikan algoritma langkah ketiga dengan mendapatkan suatu himpunan yang berisi jalur Hamiltonian. Bila ini diilustrasikan dalam model heliks ganda DNA, maka hasil jalur Hamiltonian tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.¹²⁶



Gambar 3.6. Model Heliks Ganda DNA untuk Jalur Hamiltonian pada Kasus Penerbangan Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit

Demikian, ilustrasi yang disampaikan tentang model heliks ganda DNA untuk jalur Hamiltonian pada kasus penerbangan Atlanta, Boston, Chicago, dan Detroit menutup penjelasan sub bab 3.1 ini mengenai eksperimen Adleman. Apa yang dilakukan Adleman dengan eksperimentasinya ini pada akhirnya menjadi dasar teoretis dan sekaligus dasar eksperimentasi untuk komputasi DNA. Ini karena Adleman boleh dikata merupakan pelopor yang mencoba mewujudkan gagasan komputasi DNA pada tingkat yang paling praktis. Walaupun demikian,

¹²⁵ Adleman. *Ibid.*

¹²⁶ Adleman. *Ibid.* Gambar diambil dari hal. 56.

usaha Adleman ini juga tidak luput dari kritik. Selanjutnya, dalam uraian di sub bab 3.2., akan dipaparkan kritik atas eksperimen Adleman juga penjelasan mengenai model dan aplikasi komputasi DNA yang berkembang setelah eksperimen Adleman.

3.2. Model dan Aplikasi Komputasi DNA

Saat ini, boleh dikata bahwa perkembangan komputasi DNA begitu pesatnya. Walaupun perkembangan komputasi kuantum yang juga sama-sama bersumber dari gagasan Feynman juga tak kalah pesat, komputasi DNA memiliki lebih banyak pendukung. Sebab, kajian komputasi DNA merupakan riset antardisiplin yang melibatkan para ahli matematika, komputer, biologi molekuler, biokimia, kimia, kedokteran, hingga ahli fisika, elektronika, dan nanoteknologi. Hal ini mengakibatkan kompleksnya bidang kajian tersebut. Sebab, bukan cuma masalah komputasi saja yang menjadi sorotan, tetapi bagaimana memanipulasi DNA dengan baik juga harus ada dalam pengawasan yang seksama.

Para ahli memang sangat berkepentingan dengan terwujudnya komputasi DNA. Sebab, dengan eksperimen Adleman yang sederhana saja, masalah jalur Hamiltonian yang cukup rumit dapat diselesaikan oleh DNA dengan waktu hanya 1 detik. Padahal, masalah jalur Hamiltonian bila dikomputasi dengan menggunakan komputer berbasis semikonduktor sebagaimana dipakai sekarang ini akan membutuhkan waktu lebih dari 1 detik karena paralelitas dalam pemrograman belum dicapai secara efektif. Dalam konteks ini, para matematikawan dan ahli komputer tentulah yang paling bersemangat. Ini karena banyak persoalan matematis dan komputasi yang lebih kompleks daripada masalah jalur Hamiltonian.

Hal yang sama dirasakan oleh para ahli di bidang biologi molekuler, biokimia, kimia, dan kedokteran. Kepentingan mereka yang terutama adalah bagaimana mengatasi persoalan genetik dan penyakit yang ditimbulkannya. Sebab, dalam beberapa kasus, ada penyakit genetik yang tidak dapat disembuhkan dengan bantuan obat kimiawi ataupun obat tradisional, seperti penyakit Sindrom Lou-Gehrig. Mereka berharap bahwa dengan komputasi DNA dapat diciptakan suatu “gen penyembuh” yang menyembuhkan penyakit tersebut atau “gen imuni-

sator” yang dapat membuat manusia terlepas dari sel kanker dengan mekanisme proteksi mandiri.

Lain halnya dengan kepentingan para ahli fisika, elektronika, dan nanoteknologi. Selain memiliki alternatif dalam bidang komputasi dengan memakai komputasi kuantum, pilihan untuk mengembangkan komputasi DNA dapat mereka ambil. Ini karena ada beberapa aspek fisikawi yang tidak dapat mereka tangani. Misalnya, ahli elektronika saat ini terbentur pada pengembangan *chips* berbasis semikonduktor karena kapasitas *chips* untuk memuat transistor menjadi semakin terbatas. Selain itu, semakin banyak transistor yang tertanam dalam sebuah *chips*, maka ini akan menghasilkan panas yang lebih besar karena jarak kerenggangan antar transistor semakin pendek. Hal ini menjadi masalah karena panas yang dihasilkan dari proses komputasi dapat mengakibatkan komputer menjadi *hang* atau *deadlock*. Di sisi pengembangan komputasi kuantum, para ahli juga harus mengatasi masalah yang muncul dari Prinsip Ketidakpastian Heisenberg. Prinsip ini mengatakan bahwa dalam tingkat atomik, semakin kita presisi dalam mengobservasi partikel, maka perilaku partikel semakin tidak pasti dalam pengukurannya.

Partisipasi dari para ahli di berbagai bidang inilah yang kemudian melahirkan berbagai jenis model dalam komputasi DNA beserta aplikasinya. Meskipun demikian, model dan aplikasi komputasi DNA yang berkembang tidaklah semata-mata inisiatif para ahli ini. Hal tersebut terutama didasari oleh suatu kritik sekaligus perbaikan dari apa yang terkemuka dalam eksperimentasi Adleman. Ini karena eksperimentasi Adleman, walaupun dianggap pelopor, dirasa masih banyak kelemahan maupun kekurangannya. Lebih khusus, ini dialamatkan pada algoritma yang dipakai Adleman dan dianggap sebagai **algoritma yang keras-dan-memaksa** (*brute-force algorithm*). Oleh karenanya, algoritma ini perlu dievaluasi dan diperbaiki. Selain itu, komputasi DNA model Adleman hanya dapat mengatasi masalah jalur Hamiltonian secara efisien dengan jumlah titik-simpul maksimal 20. Sebab, bila titik-simpulnya sudah mencapai angka 200, maka

jumlah rangkaian untai DNA yang dibutuhkan akan melebihi jumlah rangkaian untai DNA yang ada di bumi.¹²⁷

Di sisi inilah kebutuhan untuk model dan aplikasi komputasi DNA yang baru dan berbeda itu muncul. Setelah berkembang selama 17 tahun semenjak eksperimentasi Adleman diumumkan, kini ada banyak model dan aplikasi komputasi DNA yang telah dibuat. Dalam pemilahan dan pengelompokan model komputasi DNA ini secara umum, Zoya Ignatova beserta para koleganya telah membuat rangkuman yang cukup baik, walaupun bukan yang terlengkap. Mereka membagi model komputasi DNA ke dalam dua jenis. Pertama, model komputasi DNA yang memiliki sifat **nir-otonom** (*non-autonomous*). Model nir-otonom ini terdiri dari beberapa macam, di antaranya adalah: **model penyaringan** (*filtering models*), **model pelekatan** (*sticker models*), dan **model pengawinan** (*splicing models*). Dalam model nir-otonom ini, Ignatova, dkk. juga memasukkan eksperimentasi Adleman dan teori dari Richard J. Lipton yang menyempurnakan algoritma dari Adleman.¹²⁸

Jenis model komputasi yang kedua, oleh Ignatova, dkk. disebut dengan model komputasi DNA dengan sifat **otonom** (*autonomous*). Pada kategori ini, model komputasi DNA yang termasuk di dalamnya adalah: model yang menggunakan **algoritma pemasangan-mandiri** (*algorithmic self-assembly*), **model otomata keadaan terbatas** (*finite state automaton models*), **model jepit-rambut DNA** (*DNA hairpin model*), dan **model komputasional** (*computational models*).¹²⁹

Walaupun model-model komputasi DNA dapat dipilah dan dikelompokkan menjadi dua jenis, Ignatova, dkk. juga menambahkan satu jenis komputasi DNA yang ada di luar dua jenis model itu. Komputasi DNA ini disebut dengan **komputasi DNA pada tingkat sel** (*cellular DNA computing*). Perbedaan yang paling signifikan antara komputasi DNA pada tingkat sel dengan dua jenis model komputasi DNA yang sebelumnya adalah terletak pada ruang kerjanya.

¹²⁷ Amos. 2005. *Op.cit.*, hal.112 untuk *brute-force algorithm*. Untuk kritik atas eksperimen Adleman ini, secara gamblang dapat dibaca pada seksi 5.5.

¹²⁸ Zoya Ignatova, Israel Martínez-Pérez, and Karl-Heinz Zimmermann. *DNA Computing Models*. New York: Springer, 2008, bab 5.

¹²⁹ Ignatova, et al. *Ibid.*, bab 6.

Bila dua jenis model komputasi DNA yang sebelumnya hanya dilaksanakan secara *in vitro* (skala laboratorium atau dalam tabung), komputasi DNA pada tingkat sel sudah masuk pada pelaksanaan komputasi DNA secara *in vivo* (menggunakan makhluk hidup).¹³⁰

Menambahkan apa yang disampaikan dalam kaitan dengan *in vitro* dan *in vivo* ini, pelaksanaan komputasi DNA dapat dilaksanakan pula dengan cara *in silico*. Dalam cara ini, komputasi DNA menggunakan wahana kombinatif dengan menggabungkan rangkaian untai DNA pada silikon secara terintegrasi. Rangkaian untai DNA dalam silikon ini berfungsi untuk menggantikan transistor yang dibuat dengan menggunakan teknologi semikonduktor. Hasilnya adalah *chips* berbasis DNA dan bukannya *chips* berbasis semikonduktor.¹³¹

Sehubungan dengan uraian mengenai model dan komputasi DNA ini, oleh karena pembahasannya terlalu luas, beragam, dan sangat teknis, maka dalam sub bab ini hanya akan diberikan ringkasannya saja. Berikut adalah ringkasan yang dimaksud dalam bentuk tabel berdasarkan pengelompokan Ignatova, dkk. beserta keterangan tambahan yang digabungkan dari referensi lainnya.¹³²

¹³⁰ Ignatova, et al. *Ibid.*, bab 7.

¹³¹ Untuk uraian mengenai *chips* DNA dapat dibaca dalam Akira Suyama. "DNA Chips: Integrated Chemical Circuits for DNA Diagnosis and DNA Computers", Makalah yang dibuat berdasarkan riset dengan hibah Menteri Pendidikan Jepang, diambil dari internet pada situs CiteSeerx dengan alamat: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.1877>>, diakses pada tahun 2010.

¹³² Semua uraian yang diberikan dalam tabel ini merupakan ringkasan dari bab 5, bab 6, dan bab 7 yang ada pada buku Ignatova, et al. *Op.cit.* Terkecuali bila ada catatan tambahan dari penulis, ini merupakan keterangan pelengkap untuk poin yang dimaksud. Dalam poin cara kerja, hal ini juga dapat berarti suatu algoritma untuk model yang dijelaskan.

Tabel 3.4. Model, Macam, Sifat, Aplikasi, dan Masalah beserta Cara Kerja beragam Komputasi DNA

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
1	Adleman	a. Eksperimen Pertama	Nir-Otonom	<i>In vitro</i>
		Masalah: Jalur Hamiltonian, Cara Kerja: Lihat dalam penjelasan sub bab 3.1 tentang algoritma yang digunakan oleh Adleman.		
		b. Penyaringan dengan Sedikit-Memori	Nir-Otonom	<i>In vitro</i>
		Masalah: Kombinasi 3 warna, Cara Kerja: ✚ <i>pisah</i> (T, T^+, T^-, x): Pertimbangkan tabung percobaan T dan suatu <i>string</i> x dan hasilkan dua tabung, T^+ dan T^- , di mana T berisi seluruh <i>string</i> dalam T yang berisi <i>string</i> x sebagai subsekuen-nya, sementara T^- mencakup seluruh <i>string</i> di dalam T yang tidak menetapkan <i>string</i> x sebagai subsekuen-nya.		
		c. Penyaringan berbasis Memori	Nir-Otonom	<i>In vitro</i>
Masalah: <i>n-bit Register</i> , Cara Kerja: ✚ <i>flip</i> (T, b_i): Ambil tabung percobaan T dan suatu karakter $b_i \in \Sigma$, dan hasilkan suatu tabung percobaan baru $T^{(b_i)} = \{x^{(b_i)} \mid x \in T\}$, di mana <i>string</i> $x^{(b_i)}$ yang bersamaan dengan x naik posisi ke- i , dalam mana hal itu berisi b_i yang telah memberikan x untuk menetapkan c_i . ✚ <i>flip</i> (T, c_i): Pilih tabung percobaan T dan suatu karakter $c_i \in \Sigma$, dan buat suatu tabung baru $T^{(c_i)} = \{x^{(c_i)} \mid x \in T\}$, di mana <i>string</i> $x^{(c_i)}$ yang bersamaan dengan x naik posisi ke- i , dalam mana hal itu menetapkan c_i yang memberikan x yang berisi b_i .				
2	Lipton	Satisfiabilitas	Nir-Otonom	<i>In vitro</i>
		Masalah: Satisfiabilitas dan <i>NP-complete</i> , Cara Kerja: ✚ <i>ekstrak</i> (T, i, b): Pertimbangkan tabung percobaan T , suatu bilangan integer i , dan suatu a yang bernilai $b \in \{0, 1\}$, dan hasilkan suatu tabung percobaan baru yang berisi seluruh <i>string</i> dalam T untuk mana bilangan yang masuk ke- i adalah sama dengan x_i^T (x_i^F) jika $b = 1$ ($b = 0$). Sisa dari ekstraksi ini ditandai dengan <i>tanda</i> (T, i, b). ✚ <i>gabung</i> (T_1, \dots, T_n): Ambil tabung percobaan T_1, \dots, T_n , hasilkan paduan antara $T_1 \sqcup \dots \sqcup T_n$, dan tempatkan hasilnya ke dalam tabung T_n (yang mungkin kosong).		
3	Penyaringan	a. Tandai-dan-hancurkan	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		Masalah: Permutasi, Cara Kerja: ✚ <i>hapus</i> ($T, \{x_1, \dots, x_m\}$): Ambil tabung percobaan T dan suatu himpunan <i>string</i> x_1, \dots, x_m dan hapus setiap <i>string</i> dalam T yang berisi setidaknya satu kejadian dari <i>string</i> x_i sebagai suatu <i>substring</i> , $1 \leq i \leq m$. ✚ <i>ganda</i> ($T, \{T_1, \dots, T_m\}$): Mulai dengan tabung percobaan T dan gandakan sejumlah m buah T_i dari T .		

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
3	Penyaringan (lanjutan)	b. Pecah-dan-gabung	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Kuda Catur pada Papan 3x3, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Desain untuk masing-masing variabel x_i dua untai tunggal DNA yang memiliki panjang l-nt, satu mewakili “benar”, x_i^T, dan yang lain mewakili “salah”, x_i^F. Tabung percobaan T yang awal berisi sekumpulan himpunan dari <i>string</i> RNA, $a_1 \dots a_m$, dengan mana m di sini adalah nomor kotak dan a_i menyandikan apakah kuda catur itu ada pada kotak ke-i, $a_i = x_i^T$, atau bukan, $a_i = x_i^F$. ✚ Untuk masing-masing kotak i, tabung percobaan itu secara sama dipecah menjadi dua tabung T_1 dan T_2. Operasi penghapusan subsekuen dihilangkan dari tabung percobaan T_1 yang semua untai memiliki kuda catur pada kotak i. ✚ Lebih jauh, dalam tabung percobaan T_2, semua untai dihilangkan yang membuat tiadanya kuda catur pada kotak i sekaligus untai itu memberikan kuda catur suatu posisi penyerangan. Kemudian, penggabungan dua tabung percobaan menyediakan konfigurasi yang sah untuk kotak ke-i. 		
		c. <i>Blocking</i>	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Satisfiabilitas, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Proses dimulai dengan tabung percobaan awal yang memiliki solusi potensial dan diberikan oleh untai tunggal DNA, untuk mana suatu himpunan yang berisi DNA yang memfalsifikasi secara komplementer (<i>blocker</i>) ditambahkan. Kepustakaan molekulnya tidak mewakili solusi yang akan berhibridisasi dengan <i>blocker</i> untuk membentuk untai-ganda DNA yang sempurna, sementara kepustakaan molekulnya berhubungan dengan suatu solusi yang akan mempertahankan untai-tunggal yang tersisa atau membentuk untai-ganda dengan pasangan basa yang keliru, bergantung pada proses penyandian dan kondisi-kondisi percobaannya. 		
d. Berbasis Permukaan	Nir-otonom	<i>In silico</i>		
<p>Masalah: Satisfiabilitas, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ <i>tandai(T,B)</i>: Mulai dengan tabung percobaan T dan suatu ungkapan Boolean B, serta tandai semua untai yang ada di dalam T yang memuaskan B. ✚ <i>lepas-tandai(T)</i>: Pertimbangkan tabung percobaan T dan lepas-tandai semua untai yang telah ditandai di dalam T. ✚ <i>hapus(T,C)</i>: Ambil tabung percobaan T dan suatu kondisi C, tertandai atau tak-tertandai, dan hilangkan semua untai dalam T dengan mengacu pada C. 				

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
4	Pelekatan	Mesin Pelekat	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: <i>Minimal Set Cover</i>, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ <i>gabung</i>(T_1, \dots, T_n): Ambil tabung percobaan T_1, \dots, T_n, hasilkan proses gabungan $T_1 \square \dots \square T_n$, dan tempatkan hasilnya ke dalam tabung percobaan T_n (yang mungkin kosong). ✚ <i>pisah</i>(T, T^+, T^-, i): Pertimbangkan tabung percobaan T dan suatu bilangan integer i dan buatlah 2 tabung baru T^+ dan T^-, di mana T^+ berisi semua kompleks memori dalam T yang mana sub-untai ke-i itu berkondisi <i>on</i>, sementara T^- itu terdiri dari semua kompleks memori dalam T dalam mana sub-untai ke-i itu berkondisi <i>off</i>. ✚ <i>himpun</i>(T, i): Mulai dengan tabung percobaan T dan suatu bilangan integer i dan bangkitkan suatu tabung percobaan dalam mana sub-untai ke-i dari masing-masing kompleks memori dalam T itu dikondisikan <i>on</i>. ✚ <i>bersih</i>(T, i): Pilih suatu tabung percobaan T dan suatu bilangan integer i dan hasilkan tabung percobaan dalam mana sub-untai ke-i dari masing-masing kompleks memori dalam T dikondisikan <i>off</i>. ✚ <i>buang</i>(T): Ambil tabung percobaan T dan kosongkan isinya. 		
5	Pengawinan	a. TM-like	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Semua Program TM, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Biarkan S dan T menjadi dua string yang mengatasi alfabet a. Kemudian, operasi pengawinan berisi guntingan S dan T pada posisi yang khusus dan menggabungkan prefiks yang dihasilkan S dengan sufiks yang dihasilkan T, serta menggabungkan prefiks yang dihasilkan T dengan sufiks yang dihasilkan S.¹³³ 		
		b. Sistem Rekombinan	Nir-otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Permutasi, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Suatu empat pasangan $R = (\Sigma, V, P, S)$ berisi himpunan terbatas dari simbol terminal Σ, suatu himpunan terbatas dari simbol non-terminal V dengan $\Sigma \cap V = \emptyset$, suatu himpunan terbatas dari aturan produksi P yang menyediakan pengintegrasian, pertukaran, dan penghapusan, serta suatu simbol mulai $S \square V$. 		
6	Algoritma Pemasangan Mandiri	a. Pemasangan Mandiri	Otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Model Matematika DNA, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Sintesis beberapa molekul DNA. ✚ Campur DNA bersama-sama dalam larutan. ✚ Panaskan larutan dan dinginkan pelan-pelan, yang mengizinkan kompleks dari untai-ganda DNA terbentuk. ✚ Ligasi untai-untai yang berdekatan. ✚ Denaturasi DNA kembali. ✚ Tentukan molekul untai-tunggal DNA apa yang ada pada larutan. 		

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
6	Algoritma Pemasangan Mandiri (lanjutan)	b. Graf DNA	Otonom	<i>In vitro</i>
<p>Masalah: Terapan Teori Graf pada DNA, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Pendinginan: Ambil dua graf DNA D_1 dan D_2, serta sediakan suatu paduan graf DNA $D_3 = D_1 + D_2$ dengan membentuk tepi pasangan basa yang berhubungan dengan simpul-ujung D_1 dengan simpul-ujung D_2. ✚ Ligasi: Pertimbangkan suatu graf DNA D dan hasilkan graf DNA $D' = -D$ dengan menambahkan batas tulang punggung yang menghubungkan berbagai simpul-ujung dalam D. ✚ Denaturasi: Pilih graf DNA D dan turunkan suatu himpunan dari graf DNA $D^d = \{D_i\}$, yang masing-masingnya menjadi komponen tulang punggung dari D tanpa tepian pasangan basa. 				
7	Otomata Keadaan Terbatas	a. Otomata Dua-Keadaan Dua-Symbol	Otonom	<i>In vitro</i>
<p>Masalah: Komputasi Paralel dan Kompleksitas, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Biarkan M menjadi otomata keadaan terbatas dengan alfabet masukan $\Sigma = \{a,b\}$ dan keadaan menetapkan $S = \{s_0,s_1\}$. Otomata ini dapat memiliki 8 aturan transisi yang mungkin dan pemrograman otomata sejumlah M untuk menyeleksi beberapa dari aturan transisi ini dan menentukan keadaan mana yang merupakan awal dan akhir. Di sana ada $2^8 = 256$ seleksi yang mungkin dari aturan transisi dan tiga seleksi yang mungkin untuk keadaan awal dan akhir (baik s_0 ataupun s_1, atau malah keduanya). 				
<p>b. Otomata Penyandian-Panjang</p> <p>Masalah: Pengolahan Keadaan secara Umum, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Biarkan $M = (\Sigma, S, \delta, s_0, F)$ menjadi suatu otomata keadaan terbatas dengan keadaan yang mengatur $S = \{s_0, \dots, s_m\}$. Asumsikan bahwa masing-masing simbol dalam Σ itu disandikan oleh suatu untai tunggal DNA $\sigma(a)$. Dengan cara ini, masing-masing <i>string</i> masukan $x = a_1 \dots a_n$ yang melampaui Σ akan disandikan oleh untai tunggal DNA berisi simbol yang bertukar penyandian dan pengatur jarak, $\sigma(x) = 5' - X_1 \dots X_m \sigma(a_1) X_1 \dots X_m \sigma(a_2) \dots X_1 \dots X_m \sigma(a_n) - 3'$ di mana $X_1 \dots X_m$ adalah pengatur jarak rangkaian (<i>spacer sequence</i>, <i>sp</i>) yang berisi nukleotida m. Lebih jauh, dua rangkaian pendukung telah ditambahkan pada kedua akhir molekul masukan sekaligus, satu <i>probe</i> untuk pemurnian gaya-gabung dengan bola magnetik pada akhir 3' dan rangkaian primer untuk PCR pada akhir keduanya. Kemudian, string masukan yang disandikan akan memiliki bentuk $5' - R_1 \dots R_u X_1 \dots X_m \sigma(a_1) X_1 \dots X_m \dots \sigma(a_n) Y_1 \dots Y_v Z_1 \dots Z_w - 3'$ di mana $Y_1 \dots Y_v$ itu adalah <i>probe</i>, dan $R_1 \dots R_u$ dan $Z_1 \dots Z_w$ adalah primer. ✚ Aturan transisi $\delta(s_i, a) = s_j, a \in \Sigma$, ini disandikan oleh untai tunggal $3' - X_{i+1} \dots X_m \sigma(a) X_1 \dots X_j - 5'$ di mana X menunjukkan pasangan Watson-Crick dari nucleotida X, dan $\sigma(a)$ mengacu pada pasangan Watson-Crick dari rangkaian DNA $\sigma(a)$. Selanjutnya, primer untuk PCR ini diletakkan di depan untai masukan, serta kedua primer PCR dan suatu untai pengikatan <i>streptavidin-biotin</i> ditempatkan pada akhir untai masukan. Kelemahan model ini adalah bahwa s_0 harusnya merupakan keadaan awal dan akhir yang menyandikan <i>string</i> masukan. 				

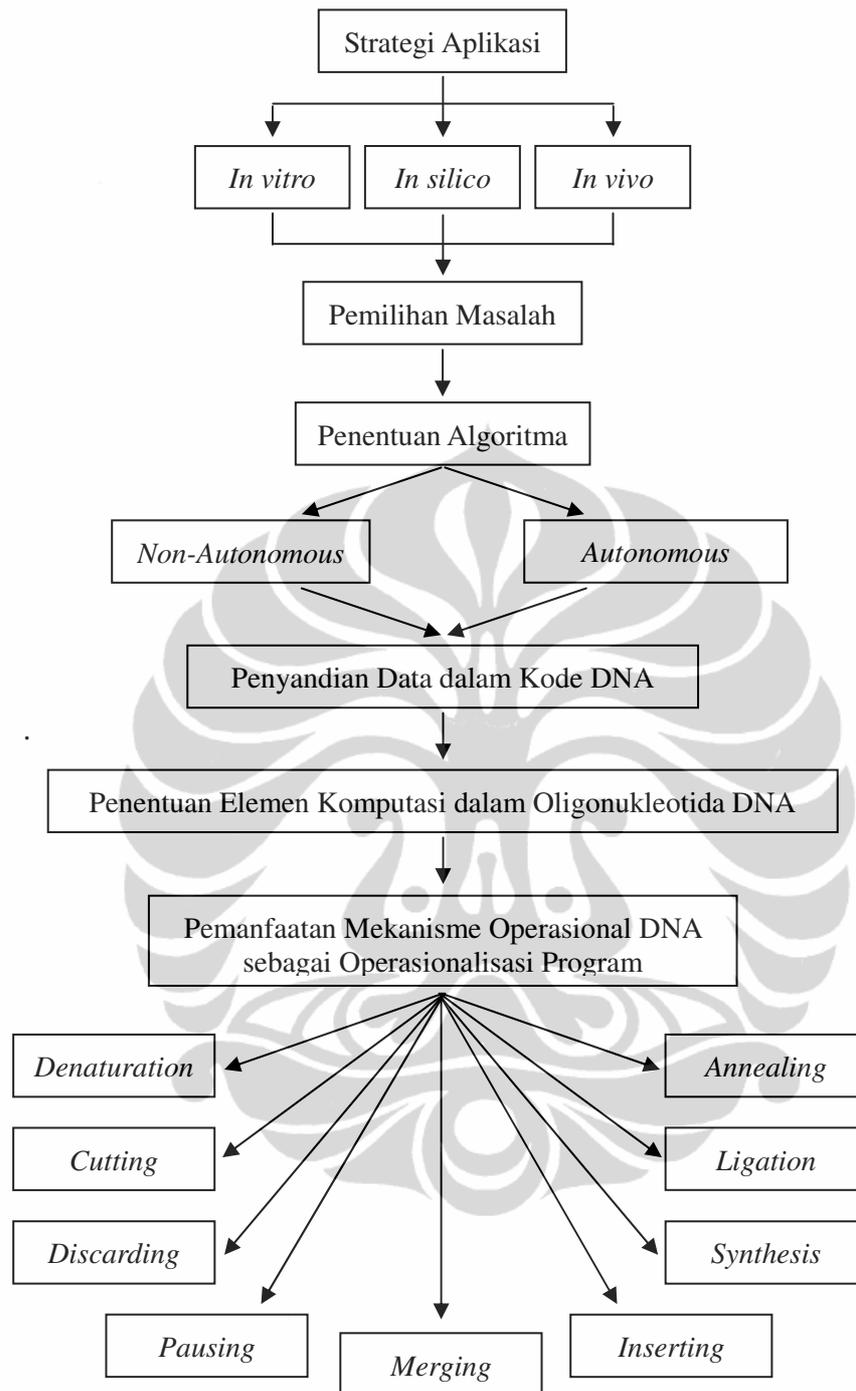
¹³³ Uraian masalah dan cara kerja ini berasal dari Amos. 2005. *Op.cit.*, hal. 60.

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
7	Otomata Keadaan Terbatas (lanjutan)	c. Otomata Stokastik	Otonom	<i>In vitro</i>
<p>Masalah: Varian Stokastik, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Pertimbangkan suatu model DNA untuk mesin keadaan yang ditentukan dan tidak-ditentukan yang berisi molekul DNA yang secara individual menyandikan keadaan awal, keadaan akhir, serta aturan transisi. Konsentrasi <i>molar</i> relatif dari molekul menyandikan keadaan awal dan akhir yang dapat dilihat sebagai kemungkinan keadaan awal dan akhir secara berturut-turut. Lebih jauh, konsentrasi <i>molar</i> relatif dari molekul yang menyandikan aturan transisi dapat dipertimbangkan sebagai kemungkinan kondisional dari aturan transisi. 				
8	Jepit-Rambut DNA	Cambuk PCR	Otonom	<i>In vitro</i>
<p>Masalah: Ungkapan Boolean Satu-Tembakan, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Suatu ungkapan Boolean satu-tembakan atau rumus-μ adalah ungkapan Boolean yang secara induktif didefinisikan sebagai berikut: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Masing-masing variabel Boolean adalah suatu rumus-μ. ▪ Jika f adalah rumus-μ, maka negasi f adalah suatu rumus-μ. ▪ Jika f dan g adalah rumus-μ, maka konjungsi mereka f g dan disjungsi $f + g$, ditetapkan bahwa f dan g tidak berbagi suatu variabel yang umum. ✚ Biarkan f menjadi suatu rumus-μ yang diberikan oleh suatu diagram keputusan biner, dan anggaplah di sana ada penetapan nilai kebenaran untuk variabel dari rumus-μ. Maksudnya adalah untuk menguji rumus-μ f menurut kebenaran yang ditetapkan oleh komputasi molekuler otonom. Untuk maksud seperti ini, penetapan kebenaran (bagian dari data), rumus-μ (bagian dari program), dan keadaan sekarang (<i>head</i>) itu disandikan oleh satu molekul untai tunggal DNA. Bagian dari data menyandikan penetapan kebenaran: Untuk masing-masing penetapan $x_i = X$, $X \in \{0,1\}$, ini disandikan oleh pasangan oligonukleotida (x_i^X, x_i). Bagian program menyandikan diagram keputusan biner secara bersamaan: Untuk masing-masing tepian $x_i \rightarrow x_j$, $X = 0,1$, ini disandikan oleh pasangan oligo-nukleotida (x_j, x_i^X), dan masing-masing tepian $x_i \rightarrow e_Y$, $X, Y \in \{0, 1\}$, ini disandikan oleh pasangan oligonukleotida (e_Y, x_i^X). Akhirnya, tepian $b \rightarrow x_i$ berhubungan dengan keadaan awal dan keadaan ini disandikan oleh pasangan Watson-Crick x_i dari oligonukleotida yang menyandikan variabel x_i. 				

No.	Jenis	Macam	Sifat	Aplikasi
9	Komputasional	Jaringan Syaraf atau Perceptron DNA	Otonom	<i>In vitro</i>
		<p>Masalah: Identifikasi Genetik, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Suatu jaringan syaraf dapat diimplementasikan dengan menggunakan sekumpulan oligonukleotida DNA. Dari sudut pandang <i>perceptron</i>, masing-masing sinyal masukan x_i dan sinyal keluaran h ini disandikan oleh oligonukleotida DNA, dan masing-masing bobot atau koneksi <i>axon</i> w_i ini disandikan oleh molekul untai ganda DNA secara parsial, $1 \leq i \leq n$. Suatu molekul yang mewakili-<i>axon</i> ini dibentuk dengan menggunakan oligonukleotida yang menyandikan sinyal masukan dan sinyal keluaran yang dikehendaki, serta secara temporer menambahkan mereka kepada masing-masing lainnya oleh suatu penghubung oligonukleotida tambahan sebagaimana dalam eksperimentasi Adleman yang pertama. Selanjutnya, dua oligonukleotida ini bergabung secara permanent oleh ligase. Akhirnya, akhir masukan dari oligonukleotida yang terhubung ini dilindungi dari proses hibridisasi pada akhir keluarannya dengan memperluas penghubung oligonukleotida sepanjang oligonukleotida keluaran via polimerase DNA. 		
10	Komputasi berbasis Sel	a. Komputasi Bakteri 1 Sel <i>Ciliate</i>	Otonom	<i>In vivo</i>
		<p>Masalah: Pemasangan Gen, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Rekombinasi Sirkular <i>String I</i>: Berikan suatu molekul DNA dalam mana suatu penunjuk p memiliki dua kejadian. Molekul membentuk suatu jepit-rambut sedemikian rupa sehingga penunjuk p diluruskan dengan kopian-nya, dan jepit-rambut mengawinkannya. ✚ Rekombinasi Sirkular <i>String II</i>: Ini adalah kebalikan dari operasi pertama. Dua molekul DNA, satu linier dan satu sirkular, serta masing-masingnya berisi satu kejadian dari penunjuk p, menjadi satu dan lurus dengan suatu cara yang molekul linier dihasilkan dalam mana molekul sirkular yang sebelumnya itu diapit oleh dua kejadian dari penunjuk p. ✚ Rekombinasi Paralel <i>String</i>: Dua molekul linier DNA, masing-masingnya berisi satu kejadian dari penunjuk p, menjadi satu dalam suatu cara yang seluruh datanya melampaui penunjuk p yang dipertukarkan antara dua molekul. 		
		b. <i>Expression Gene Anti-Switches</i>	Otonom	<i>In vivo</i>
		<p>Masalah: Terapi Genetis, Cara Kerja:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✚ Suatu regulator lintas-tindakan berbasis RNA yang diberi nama <i>anti-switch</i> telah didesain untuk mengatur ungkapan sasaran dalam hubungan-nya dengan suatu <i>ligand</i>. <i>Anti-switch</i> ini menggunakan ranah <i>anti-sense</i> untuk mengendalikan ungkapan gen dan suatu ranah <i>aptamer</i> untuk mengenali <i>ligand</i> efektor yang khusus. <i>Aptamer</i> adalah jenis DNA yang mengikat <i>ligand</i> khusus dan dibangkitkan dalam seleksi <i>in vitro</i> atau evolusi sistematis dari <i>ligand</i> oleh suatu pengayaan eksponensial (<i>SELEX</i>). <i>Ligand</i> yang mengikat ranah <i>aptamer</i> mendorong suatu perubahan konformasional yang membolehkan ranah <i>anti-sense</i> (15 nt) untuk berinteraksi dengan mRNA sasaran dalam rangka mempengaruhi proses penerjemahan. Dalam ketiadaan <i>ligand</i>, ranah anti-sense ini telah diasingkan dalam suatu inang anti-sense yang mencegah pengikatan sasaran. 		

Demikian, kita telah melihat begitu banyak model dan aplikasi komputasi yang telah dikembangkan. Walaupun begitu, masih ada beberapa model dan aplikasi komputasi DNA yang tidak dimasukkan dalam tabel di atas ini. Namun, hal tersebut tidak mengurangi keterwakilannya dalam beberapa model dan aplikasi komputasi DNA yang telah diuraikan dalam tabel. Misalnya, Ehud Shapiro dkk. sudah membuat beberapa model dan aplikasi komputasi DNA, yaitu: Otomata Dua-Kedaaan Dua-Simbol (2001), Otomata Stokastik (2004), dan Otomata Keadaan Terbatas *Anti-Sense* (2004). Namun, dalam ringkasan hanya diberikan dua model pertama. Ini mengingat model yang terakhir sangat teknis dalam hal algoritmanya dan sudah terwakili dalam model Komputasi DNA berbasis Sel bagian b, yaitu: *Expression Gene Anti-Switches*, karena model ketiga dari Shapiro adalah pengembangan model b ini.

Sehubungan dengan berbagai macam model dan aplikasi komputasi DNA ini pula, penulis akhirnya dapat menyusun suatu uraian mengenai proses umum yang dapat dipakai untuk memahami beragam model dan aplikasi komputasi DNA. Jika hal ini disusun dalam suatu bagan umum untuk proses yang terdapat dalam model dan aplikasi komputasi DNA dari apa-apa yang telah disampaikan, maka bagan untuk proses umum ini dapat dilihat dalam gambar berikut.



Gambar 3.7. Proses Umum Alur Komputasi DNA

Keterangan:

Pada gambar ini, proses mekanisme operasional DNA yang ada pada sisi sebelah kiri merupakan proses negatif (dalam arti proses yang banyak merusak DNA). Sedangkan untuk proses yang ada di sebelah kanan, ini adalah proses positif (prosesnya lebih banyak membentuk atau menggandakan DNA). Sedangkan untuk proses *merging*, ini merupakan proses penggabungan rangkaian untai DNA yang satu dengan yang lainnya.

Model proses umum alur komputasi DNA ini mungkin akan membantu kita lebih memahami apa yang sebenarnya dilaksanakan dalam suatu komputasi DNA bila dibandingkan dengan ringkasan berbagai algoritma yang ada pada uraian-uraian dalam tabel sebelumnya. Namun, model proses umum ini sebenarnya belum lengkap, karena kita belum mengetahui seluruh proses yang terjadi dalam komputasi DNA. Apa yang diutarakan sejak Adleman sampai pada apa yang disampaikan Ignatova, dkk. lebih banyak merupakan “kisah sukses” dalam riset komputasi DNA. Kita belum mengetahui seperti apakah “kisah duka” di balik semua riset komputasi DNA ini. Kisah ini tiada lain daripada bagaimana para pakar tersebut menanggulangi kesalahan atau kekeliruan yang terjadi saat mereka melakukan riset komputasi DNA. Bagaimanakah “kisah” ini terjadi? Hal ini akan kita temui dalam uraian di sub bab yang selanjutnya.

3.3. Galat dan *Debugging* dalam Proses Komputasi DNA

Kita telah mengetahui dalam sub bab 3.1. dalam pembahasan mengenai TM berkenaan dengan eksperimentasi Adleman, bahwa proses komputasi adalah proses penggunaan mesin untuk melaksanakan program yang dikehendaki. Wujud program itu adalah instruksi yang diberikan kepada mesin. Ketika kita menginginkan keluaran atau hasil dari proses penghitungan penjumlahan dalam TM misalnya, kita harus menyusun program yang berbentuk: $K \rightarrow B \rightarrow T \rightarrow G \rightarrow KB$. Ini bukanlah sesuatu yang mudah untuk dirumuskan mengingat keterbatasan dari TM. Lalu, apakah jika mesin komputasinya ini lebih canggih daripada TM, maka pembuatan program akan lebih mudah?

Jawabannya ternyata adalah tidak. Pembuatan program dalam komputer bukanlah suatu perkara mudah. Meskipun pembuatan programnya ini berbasis pada mesin komputer yang sangat canggih sekalipun seperti dalam mesin superkomputer, tetap bukanlah sesuatu yang sama seperti membuat puisi atau novel yang lebih banyak mengandalkan intuisi dan imajinasi. Ini mengingat bahwa suatu program harus dibuat dengan hati-hati dan penuh ketelitian. Selain itu, suatu program yang baik adalah serangkaian instruksi yang dapat dipahami dengan baik struktur logikanya oleh komputer. Bila si pembuat program atau *programmer* ini menerapkan atau menggunakan logika yang keliru dalam

programnya, maka hasil yang diperoleh tentunya tidak akan sesuai dengan keinginan.¹³⁴

Dalam konteks pemrograman, kesalahan yang terjadi dalam pembuatan program biasanya disebut **galat** (*error*). Sedangkan proses untuk mengatasi galat ini disebut dengan *debugging*. Istilah ini dipakai bukanlah karena keisengan para ahli komputer. Istilah ini justru diperkenalkan oleh Laksamana Grace Hooper pada tahun 1947 saat ia menemukan penyebab kesalahan dari lambatnya proses komputasi dalam komputer Mark II yang dimiliki Universitas Harvard. Penyebabnya ternyata adalah ngengat yang mati dalam suatu *relay* yang ada pada Mark II ini sehingga menghambat proses komputasi. *Bug* lalu diambil dari *relay* tersebut dan akhirnya Mark II dapat berjalan kembali secara normal. Inilah proses *debugging* (penghilangan kutu atau hama) yang pertama dalam sejarah komputasi.¹³⁵

Masalah galat ini kemudian menjadi suatu masalah yang sangat krusial dalam proses komputasi. Ini karena tiada seorang pakar pun yang dapat terhindar dari galat saat melakukan proses komputasi. Program sederhana untuk mencetak kalimat “*hello, world*” dalam komputer yang menjadi standar dasar pembuatan program apa saja juga adakalanya dapat terkena galat ini.¹³⁶ Sebabnya, ini karena galat bukanlah proses yang muncul secara linier, paralel, ataupun siklis. Ia muncul secara **acak** (*random*) berdasarkan interaksi antara program dengan komputer dan boleh jadi bersifat **tak-terperkirakan** (*unpredictable*). Boleh dikatakan pula bahwa galat terjadi secara dinamis, meski ada beberapa sebab yang secara umum terjadi. Misalnya, kesalahan pengetikan lokasi tempat file berada yang membuat program tidak dapat mengakses sistem *database*-nya merupakan suatu galat yang

¹³⁴ Dalam kaitannya dengan aspek pemrograman komputer, penulis telah menguraikan problematika, struktur, dan prosesnya secara panjang lebar dalam, Ahmad Ibrahim Badry. *Konstruksi Citra dan Tanda di Dunia Cyber: Analisis Semiotik atas Kasus Bahasa Pemrograman dan Cyberspeak*. Skripsi pada Fakultas Filsafat. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, 2003, sub bab 5.1. dan 5.2.

¹³⁵ Uraian mengenai sejarah *debugging* ini dapat dibaca dalam situs Wikipedia dengan alamat: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Debugging>>, diakses pada tanggal 2 Juni 2011.

¹³⁶ Thorsten Grötter, et al. *The Developer's Guide to Debugging*. New York: Springer, 2008, hal. 1.

umum terjadi (harusnya mengetik suatu alamat dalam sistem komputer: “c:\windows\temp\data.txt” malah mengetik: “c:\window\temp\data.txt”).¹³⁷

Namun, galat bukanlah sesuatu masalah yang tidak dapat diatasi sama sekali. Perkembangan **piranti lunak** (*software*) yang dibangun dalam rangka memprogram **piranti keras** (*hardware*) hingga saat ini telah berkembang dengan pesatnya. Mulai dari aplikasi matematis hingga aplikasi di bidang kedokteran dan ekonomi, ataupun aplikasi multimedia dan permainan hingga robotika, semuanya menggunakan program dalam pembuatannya. Hal yang memudahkan seseorang programmer untuk mengatasi galat ini kini telah ditunjang oleh mekanisme peringatan dalam piranti keras yang dibuat secara khusus, seperti misalnya daftar *exception interrupts* dalam prosesor,¹³⁸ maupun oleh program khusus yang dibuat untuk melakukan proses *debugging* dan program ini dinamakan *debugger*.

Jadi, komputasi berbasis *chips* semikonduktor boleh dibilang sudah dalam tahap lanjut pada proses pengembangan program dan penyelesaian masalah-masalah yang terjadi karena galat ini. Hal ini jauh berbeda dengan yang ada dalam komputasi DNA tentunya. Dalam bidang komputasi DNA, pekerjaan yang dilaksanakan masih dalam tahap pembuatan prototipe DNA sebagai “mesin komputasi” atau prosesor. Galat yang terjadi dalam komputasi DNA ini mungkin seibarat galat yang muncul dalam pembuatan *chips* semikonduktor pertama kalinya.

Pada proses komputasi DNA, hal-hal yang menjadi kendala utama dan dapat menyebabkan galat adalah: (1) ketidaktepatan penentuan suhu atau temperatur tabung percobaan yang dibutuhkan oleh DNA untuk melakukan proses hibridisasi atau *annealing*, (2) rangkaian untai DNA yang tidak sesuai untuk kebutuhan kode yang digunakan ataupun sebagai elemen mesin komputasi, (3) prosedur yang salah dalam laboratorium, (4) unsur kimia yang keliru dalam larutan yang dibutuhkan oleh DNA untuk melakukan proses komputasi, (5) proses hibridisasi yang tidak dikehendaki, (6) munculnya struktur sekunder akibat proses

¹³⁷ Andreas Zeller dalam kata pengantar buku Grötter, et al. ini mengatakan bahwa: “*Kamu tidak akan pernah tahu berapa lama untuk memperbaiki bug – dan apakah kamu akan dapat memperbaiki semuanya*”. Dikutip dari Grötter, et al. *Ibid.*, hal. v. Pembahasan mengenai acaknya galat ini juga ada dalam Eka Dharma Pranoto. *The Art of Debugging*. Yogyakarta: Andi, 2007, hal. 13.

¹³⁸ Lihat penjelasan mengenai *exception interrupts* ini dalam Pranoto. *Ibid.*, pada seksi 2.7.

hibridisasi yang dapat merusak jalannya proses komputasi, dan (7) terbatasnya rangkaian untai DNA yang dapat diproses dalam suatu tabung percobaan.¹³⁹

Masalah pertama hingga keempat ini sebenarnya dapat direduksi dan diminimalisir galatnya bila digunakan program yang dapat mensimulasikan keempat masalah ini. Dalam kaitannya dengan penentuan suhu yang sesuai, ada program simulasi yang bernama *BIND simulator* yang dapat dipakai untuk maksud ini. Berapa suhu yang dibutuhkan dikalkulasi berdasarkan mekanisme termodinamika DNA pada saat hibridisasi. Apa yang dicari tiada lain daripada *melting temperature* atau suhu pada saat DNA membelah dan merupakan kebalikan dari proses hibridisasi. Suhu ini perlu diketahui karena pada saat hibridisasi, sebagian untai DNA menyatu, sebagian untai DNA lainnya membelah.¹⁴⁰

Untuk masalah kedua, program simulasi yang digunakan adalah SCAN. Program ini dapat membantu menyediakan model-model rangkaian untai DNA yang dibutuhkan sebagai kode dan juga sebagai elemen komputasi. Rangkaian untai DNA yang sesuai dan pas untuk digunakan sebenarnya cukup sulit diupayakan mengingat kebutuhan komputasi yang berbeda-beda. Kebutuhan yang serupa ini mengandaikan bahwa harus ada pola contoh rangkaian untai DNA yang dapat dijadikan pegangan atau dibuat sebagai aturan yang menentukan jalannya program. Untuk maksud tersebut, program SCAN ini dapat membantu menyeleksi jutaan rangkaian untai DNA yang mungkin dan memilih yang terbaik. Inilah yang dilakukan oleh program SCAN.¹⁴¹

Prosedur yang salah di laboratorium dan kekeliruan larutan kimia dapat pula direduksi masalahnya dengan program simulasi. Program simulasi untuk kebutuhan ini bernama Edna. Edna merupakan program yang dapat mensimulasikan protokol yang harus ditempuh di laboratorium yang sesungguhnya dan juga

¹³⁹ Poin 1 sampai 6 tentang masalah-masalah yang dapat menyebabkan galat dalam proses komputasi DNA ini disarikan dari Lila Kari, Elena Losseva, and Petr Sosík. "DNA Computing and Errors: A Computer Science Perspective", dalam Marian Gheorghe, Ed. *Molecular Computation Models: Unconventional Approaches*. Hershey: Idea Group Publishing, 2005, bab 3. Sedangkan poin 7, ini mengacu pada kritik Amos pada eksperimen Adleman. Baca kembali dalam sub bab 3.2.

¹⁴⁰ Lila Kari, et al. *Ibid.*, hal. 60.

¹⁴¹ Lila Kari, et al. *Ibid.*, hal. 63-4.

dapat mensimulasikan tabung percobaan. Ibaratnya, dengan bantuan Edna, kita akan punya sebuah laboratorium maya yang dapat digunakan sebagaimana layaknya laboratorium sesungguhnya. Simulasi ini juga menghemat waktu percobaan di laboratorium yang kalau dilakukan secara manual akan memakan waktu berminggu-minggu hingga berbulan-bulan lamanya.¹⁴²

Sementara itu, masalah hadirnya proses hibridisasi yang tidak dikehendaki dan munculnya struktur sekunder akibat proses hibridisasi merupakan dua masalah yang bertautan. Ini agak sulit untuk ditangani dengan bantuan program simulasi karena para pakar biologi molekuler belum dapat mengetahui seluruh proses dan unsur-unsur berpengaruh yang ada dalam hibridisasi DNA. Oleh karena itu, dalam mengatasi masalah ini, Lila Kari beserta para koleganya mencoba untuk memberikan suatu solusi pada tingkat algoritmik. Algoritma yang dirumuskan didasarkan pada perhitungan energi bebas yang dimiliki struktur sekunder dan juga menggunakan parameter termodinamika yang ada pada struktur sekunder tersebut. Prosesnya ini mirip dengan teknik yang digunakan dalam memprediksi *melting temperature* pada saat hibridisasi DNA terjadi melalui simulasi BIND.¹⁴³

Hampir mirip dengan Lila Kari, dkk., solusi untuk masalah ketujuh diberikan Amos dan para koleganya dengan jalan memperbaiki algoritma yang akan digunakan dalam proses komputasi DNA. Mereka menyebut komputasi DNA ini dengan **model penyaringan paralel** (*parallel filtering model*) dan merupakan jenis lain dari model penyaringan yang sudah dikemukakan dalam tabel di sub bab 3.2. Elemen komputasi yang terdapat dalam model ini menyediakan operasi-operasi sebagai berikut:¹⁴⁴

- ✚ *buang*($U, \{S_i\}$). Operasi ini membuang dari himpunan U , secara paralel, setiap *string* yang berisi setidaknya kejadian dari setiap *substring* S_i .
- ✚ *gabung*($U, \{S_i\}$). Operasi ini, secara paralel, membuat suatu himpunan U yang merupakan himpunan gabungan dari himpunan-himpunan U_i .

¹⁴² Lila Kari, et al. *Ibid.*, hal. 64-5.

¹⁴³ Lila Kari, et al. *Ibid.*, hal. 66.

¹⁴⁴ Martyn Amos, Alan Gibbons, and David Hodgson. *Error-resistant Implementation of DNA Computations*, hal. 3, makalah yang didasarkan pada riset di Universitas Warwick, diambil dari internet pada situs CiteSeerx dengan alamat: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.38.6998>>, diakses pada tahun 2010 dan juga dalam Amos. 2005. *Op.cit.*, hal. 50.

- ✚ $ganda(U, \{U_i\})$. Secara paralel, operasi ini menghasilkan sejumlah hasil penggandaan, U_i , dari himpunan U .
- ✚ $pilih(U)$. Operasi ini memilih suatu elemen dari U yang seragam secara acak, jika U adalah himpunan kosong, maka *nilai kosong* itu akan dikembalikan.

Dalam paparannya atas model ini, Amos dkk. juga mengklaim bahwa mereka dapat menyelesaikan banyak persoalan komputasi dengan operasi algoritmik yang ada dalam model penyaringan paralelnya ini. Masalah yang dapat diatasi dengan model ini adalah: permutasi, kombinasi 3 warna, jalur Hamiltonian, *subgraph isomorphism*, dan *maximum clique*. Meskipun demikian, mereka juga mencatat bahwa secara praktik, model penyaringan paralel ini juga tidak terlepas sepenuhnya dari galat yang terjadi dalam proses komputasinya.¹⁴⁵

Apa yang telah dijelaskan ini kemudian memberikan kita suatu pengetahuan tentang proses *debugging* yang ada dalam komputasi DNA. Sesuatu yang mungkin terlihat mudah, namun sebenarnya menyimpan benih-benih kerumitan. Dalam perspektif penulis, kegalatan ini akan bertambah rumit bila sudah masuk dalam jenis komputasi DNA berbasis *in vivo*. Bila mempertimbangkan bahwa mekanisme operasional DNA ini sendiri di dalam sel dapat menyebabkan terjadinya mutasi dan kerusakan pada DNA, maka hal ini tentunya akan menambah daftar persoalan yang akan dihadapi dalam proses komputasi DNA berbasis sel.

Namun begitu, justru malah ada gagasan yang mencoba untuk memanfaatkan proses mutasi dalam rangkaian untai DNA ini sebagai elemen komputasi. Teknik ini disebut dengan **mutagenesis terprogram** (*programmed mutagenesis*). Caranya bukan dengan jalan membuat suatu proses mutasi dalam rangkaian untai DNA, tetapi menggunakan enzim polimerase dan ligase untuk menggandakan molekul pola contoh dengan proses mutasi yang telah direkayasa. Dalam hal ini, setiap reaksi yang ada dalam mutagenesis yang terprogram adalah siklus termal dari suatu **penulisan ulang kejadian** (*rewriting event*) yang ada pada rangkaian untai DNA.¹⁴⁶

¹⁴⁵ Amos, et al. *Error-resistant*, hal. 3-7 dan Amos. 2005. *Op.cit.*, hal. 50-5.

¹⁴⁶ Baca lebih jauh untuk masalah mutagenesis terprogram ini dalam artikel Julia Khodor and David K. Gifford. "Programmed Mutagenesis is a Universal Model of Computation", pada buku

Walaupun model yang terakhir ini sulit untuk dipahami oleh penulis, namun para pembuat model ini mengklaim bahwa model ini dapat menyelesaikan proses komputasi secara lebih luas dibandingkan dengan model Adleman ataupun Lipton lainnya Amos dkk. Malahan, model ini dapat dijadikan suatu model komputasi universal karena dapat menjalankan TM dengan baik.¹⁴⁷

Jikalau seandainya model ini dapat diterapkan dengan baik, ada suatu hal yang sebenarnya masih mengganjal dalam benak penulis. Model mutagenesis terprogram ini secara khusus dibuat *in vitro*, namun bila diterapkan secara *in vivo*, proses komputasinya akan berjalan seperti apakah? Jawaban untuk masalah tersebut bukanlah berada dalam ruang lingkup pembahasan tulisan ini sebenarnya. Namun, pertanyaan berikut ini akan memberikan suatu gambaran tentang masalah yang penulis sangsi dalam model mutagenesis terprogram, yaitu: *Apakah dengan model mutagenesis terprogram yang diterapkan secara in vivo dapat mengatasi masalah mutasi dan kerusakan DNA yang terjadi pada tingkat sel sebagaimana diusahakan oleh terapi genetik dalam teknik rekayasa genetik seperti disinggung dalam sub bab 2.5? Apakah model mutagenesis terprogram ini justru malah menambah “koleksi” jenis mutasi dan kerusakan DNA bila diterapkan secara in vivo?*

Lebih jauh, terlepas dari dua pertanyaan terakhir yang masih menunggu hasil riset eksperimental atas masalahnya ini, kita dapat meninjau dan mempertimbangkan banyak hal yang berhubungan dengan *debugging* dalam proses komputasi DNA. Salah satunya adalah saran atau tips dari Richard P. Feynman tentang *debugging*. Ia menyarankan sebuah metode *debugging* yang universal: “*write down the problem; think very hard; write down the answer*”.¹⁴⁸ Namun, metode *debugging* ini tidaklah “cukup adekuat” nampaknya. Dalam kaitannya dengan metode Feynman, mungkin penulis perlu ubah metodenya menjadi seperti ini, khusus untuk konteks komputasi DNA:

Nataša Jonoska and Nadrian C. Seeman, Ed. *DNA Computing: 7th International Workshop on DNA Based Computers, DNA 7, Tampa, FL, USA, June 10 - 13, 2001, Revised Papers*, Berlin: Springer-Verlag, 2002, hal. 300-7.

¹⁴⁷ Khodor and Gifford. *Ibid.*, hal. 303-4.

¹⁴⁸ Grötter, et al. *Op.cit.*, hal. 1.

- ✚ **Simulating** (*DNA computation process to reduce errors*).
[simulasikan (proses komputasi DNA untuk mengurangi galat)]
- ✚ **Found** (*problems which emerging in DNA computation process, note, and analysis*).
[temukan (masalah yang muncul dalam proses komputasi DNA, catat, dan analisis)]
- ✚ **Tracing** (*problems in: procedurs, protocols, temperatures, solutions, DNA sequences, and algorithms*).
[lacak (masalah dalam: prosedur, protocol, temperature, solusi, rangkaian DNA, dan algoritma)]
- ✚ **Remodelling** (*every steps in the DNA computation process until success*).
[modelkan ulang (setiap langkah dalam proses komputasi DNA hingga berhasil)]

Demikian, inilah ringkasan penulis atas proses *debugging* dalam komputasi DNA. Apa yang disampaikan di sini mungkin belum dapat dijadikan pegangan. Namun, paling tidak, kita sudah mengetahui bahwa proses komputasi DNA masih jauh dari angan untuk sampai dalam tahap pemrograman DNA selainya pemrograman dalam konteks komputasi berbasis *chips* semikonduktor. Berikutnya, dalam bab IV dan V, penulis akan mencoba merefleksikan kasus komputasi DNA ini. Hal tersebut dilaksanakan untuk mendapatkan perspektif yang lebih bernas mengingat kontroversi di seputar komputasi DNA cukup menimbulkan suatu masalah bagi para etikawan dan juga kaum humanis.

BAB IV

PEMROGRAMAN DNA SEBAGAI MODUS PERLUASAN KEKUASAAN

Bidang komputasi DNA mungkin masih terus akan berkembang secara pasti menuju pemrograman DNA dan perlahan akan menjadi bagian yang tak terpisahkan dalam kehidupan manusia saat ini dan yang akan datang. Namun, hal ini akan mengandaikan bahwa kita tidak hanya akan berhadapan dengan suatu prospek seperti yang diangankan para pakar komputasi DNA. Komputasi DNA tentu saja akan mengandaikan efek yang mungkin harus benar-benar kita cermati bersama. Meskipun hasil dari pencermatan ini akan bersifat *debatable* di satu sisi, di sisi lainnya paling tidak sudah memberikan gambaran yang cukup komprehensif sekaligus kritis untuk kita pertimbangkan dengan baik segala sesuatunya ini. Dalam paragraf-paragraf berikutnya, hal inilah yang akan menjadi fokus pembahasan.

4.1. Ekstensivitas Kekuasaan *qua* Model Komputasi DNA

Sebelum pembahasan sub bab ini dimulai, mungkin masih ada orang yang bertanya-tanya kenapa tema kekuasaan muncul dan masuk dalam pembahasan mengenai komputasi DNA. Bukankah pembahasan mengenai tema kekuasaan itu ada dalam ranah politik? Pertanyaan ini bukanlah sesuatu yang tidak relevan sebenarnya. Namun demikian, hal ini memang akan lazim dimunculkan mengingat pembahasan mengenai implikasi atas dikembangkannya teknologi komputasi DNA lebih condong diarahkan dalam pembahasan etis seperti juga akan dilaksanakan dalam bab 5.

Tema kekuasaan muncul dalam pembahasan komputasi DNA adalah karena karakteristik dari teknologi rekayasa itu sendiri. Teknologi rekayasa pada dasarnya adalah manipulatif dan mengandaikan para perekayasa akan mampu “mendapatkan sesuatu” dari hasil rekayasannya itu. Inilah paradigma kekuasaan yang umum seperti telah disinggung oleh Stanley I. Benn dalam esainya yang membahas masalah kekuasaan. Menurut Benn, paradigma kekuasaan itu adalah “A, dengan kekuasaannya atas B, telah mencapai hasil yang diinginkan r dengan

*sukses; ia melakukannya sedemikian untuk membuat B melakukan b, dengan mana B tidak dapat berbuat apa-apa kecuali apa yang diinginkan A untuk dilakukannya; lebih jauh, meskipun B segan, A memiliki cara untuk mengatasi hal ini.”*¹⁴⁹

Bila paradigma ini kita isikan nilai A dengan pakar komputasi atau *developer* dan B dengan DNA, maka tesis paradigma ini jelas akan sesuai dengan apa yang terjadi dalam proses komputasi DNA. Meskipun demikian, sekali lagi mungkin akan ada yang berkilah bahwa motif utama dari dikembangkannya komputasi DNA adalah bersifat terapis untuk kebutuhan pengobatan penyakit genetik atau bersifat pragmatis karena *chips* semikonduktor sudah tidak dapat memenuhi ekspektasi para ahli komputasi. Jadi, pengembangan teknologi komputasi DNA adalah hal yang linier dari perkembangan ilmu dan teknologi, serta bukannya pemenuhan hasrat ilmuwan dan teknolog semata-mata untuk kekuasaan.

Bila motif yang ada memang demikian halnya, tetap saja dapat dikatakan bahwa pengembangan teknologi komputasi DNA ada dalam jalur kekuasaan seperti dirumuskan Benn. Lalu, persoalannya yang kemudian bukan lagi debat tentang apakah paradigma kekuasaan itu hadir dalam komputasi DNA atau tidak, melainkan apakah motif kekuasaan ini disadari atau tidak disadari akan melahirkan masalah seperti telah diingatkan Benn pada konteks ini. Ia mengingatkan bahwa akan ada **konflik kepentingan** (*conflict of interest*) yang terjadi di antara A dan B. Konflik kepentingan yang terjadi antara A dan B ini dapat mengakibatkan resistensi atau perlawanan dari B kepada A dan sangat mungkin bagi B untuk dapat melampaui A.¹⁵⁰

Meskipun ini adalah asumsi yang menganggap bahwa A dan B itu sama-sama manusia, tetapi kasus ini sebenarnya sudah mulai mendekati ke arah sana meski B bukanlah manusia. Dalam kasus pengembangan tanaman transgenik misalnya, apa yang diandaikan oleh Benn sudah menemukan sedikit pembenaran analogis. Ketika Monsanto (sebuah perusahaan transnasional di bidang bioteknologi) mengembangkan tanaman kapas transgenik yang dinamakan *Bollgard*,

¹⁴⁹ Stanley I. Benn. “Power”. 1967, dalam Donald M. Borchert, Ed. *Encyclopedia of Philosophy*, 2nd Ed. Vol. VII. Detroit: Thomson Gale, 2006, hal. 731.

¹⁵⁰ Benn. *Ibid.*

mereka terpaksa harus gigit jari karena produk mereka ini gagal mengatasi hama **ulat kumbang** (*bollworm*). Padahal, *Bollgard* dibuat secara khusus melalui teknologi rekayasa genetik untuk bertahan dari serangan hama ulat kumbang.¹⁵¹ Inilah salah satu jenis resistensi atas paradigma kekuasaan yang diprediksi oleh Benn, walaupun terjadi tidak secara langsung.

Pada sisi ini, analisis kekuasaan model Bennian akan berhenti, tetapi tidak dengan model Foucauldian yang menjadi dasar metodis penelitian ini. Bagi Foucault, analisis kekuasaan tidak cukup dijelaskan “hanya” dalam term konflik kepentingan belaka. Suatu kekuasaan perlu dianalisis dengan memperhatikan lima poin sebagaimana telah disampaikan dalam sub bab 1.3.1. Oleh karenanya, marilah kita analisis kekuasaan yang ada pada wilayah komputasi DNA seperti diharapkan Foucault ini.

Dalam poin pertama, Foucault mengingatkan bahwa kita seharusnya tidak berkonsentrasi pada suatu jenis penjelasan atas pusat kekuasaan, cara kerjanya secara umum, dan efek lanjutan yang dihasilkan dari ini. Namun, kita dianjurkan untuk menganalisis kekuasaan pada tingkat paling ekstrim, yang kekuasaannya ini akan menjadi seperti pembuluh darah, membangun sistemnya sendiri, menjadi satu dengan teknik dan peralatan yang dibuat untuknya, dan bahkan menghasilkan kekerasan bila kekuasaan itu coba diganggu.¹⁵²

Bila kita membaca poin tersebut, pertanyaan yang muncul mungkin akan seperti ini: “*Apakah ada jenis kekuasaan ekstrim serupa ini dalam suatu komputasi DNA?*”. Dalam menjawab pertanyaan ini, kita harus merujuk kembali pada model komputasi DNA yang sudah dikembangkan. Kombinasi yang ada dalam model komputasi DNA yang memungkinkan kekuasaan jenis ini terjadi adalah gabungan (1) cara kerja yang minimal terdiri dari: **pemasangan mandiri** (*self-assembly*), **jaringan syaraf** (*neural networks*), **otomata terbatas** (*automata*), **untai logika** (*logic circuits*), dan fungsi seperti TM (*Turing Machine like*). Model komputasi DNA yang memiliki minimal lima gabungan cara kerja ini akan

¹⁵¹ Vandana Shiva. “Ambisi Perusahaan Transnasional: Kuasai Sistem Pangan Dunia”. 1997, dalam Hesti Widayanti dan Ika N. Krishnayanti, Ed. *Bioteknologi: Imperialisme Modal dan Kejahatan Globalisasi*. Yogyakarta: INSIST Press dan Konphalindo, 2003, hal. 40.

¹⁵² Lihat pada poin 1 tentang pertimbangan metodologis yang disebutkan Foucault dalam sub bab 1.3.1 atau pada Foucault. Two Lectures, dalam *PK*, hal. 96.

seperti suatu “makhluk” berintelegeni. “Makhluk” ini untuk lebih mudahnya dapat penulis beri nama **AIC** (*Autonomous Intelligent Creature*).

Dengan cara kerja pemasangan mandiri, AIC ini akan memiliki kekuasaan untuk membangun **sistem pengembangan diri** (*self development system*) dengan bantuan mekanisme otomata terbatas. Cara kerja jaringan syaraf yang dimiliki AIC ini akan memungkinkan ia untuk meluaskan sistem pengembangan diri yang dikendalikan oleh untai logika dan TM. Untai logika di sini dapat berlaku untuk menyeleksi atau mengidentifikasi informasi dan diolah secara penuh dalam TM. Bila sistem pengembangan diri ini terus diperluas, AIC juga memiliki kemungkinan untuk membangun **sistem belajar mandiri** (*self learning system*) berdasarkan interaksi cara kerja otomata terbatas, untai logika, dan TM.

Selanjutnya, dengan berbasis pada dua sistem ini, AIC akan dapat pula memiliki **sistem pertahanan mandiri** (*self defence system*). Ini dilaksanakan berkat (2) sifat otonom yang ada dalam dirinya. “Kekerasan” pun dapat dihasilkan dari sistem pertahanan sebagai suatu bentuk resistensi atau perlawanan atau pembelaan diri. Pada konteks ini, penulis belum tahu atau belum dapat memperkirakan kekerasan macam yang akan dihasilkan. Namun demikian, ada kemungkinan bahwa kekerasan ini akan terjadi bila strategi aplikasi komputasi DNA-nya adalah (3) *in vivo*. Kekerasan yang dapat dihasilkan makhluk ini dalam *in vivo* secara lebih jauh adalah pengambilalihan kendali sistem hidup inang itu sendiri.

Jika membaca deskripsi tentang AIC ini sebagai suatu model komputasi DNA yang mungkin dapat tercipta, maka keterangannya ini mungkin akan terbaca sebagai khayalan saja atau imajinasi belaka. Ini agak mirip dengan cerita *Frankenstein* dari Mary Shelley ataupun suatu dongeng tentang monster lucu bernama *Pokemon* yang dibuat Satoshi Tajiri. Namun tidak demikian halnya dalam konsep teoretis yang terdapat pada bidang **kecerdasan buatan** (*artificial intelligence*). Dua sistem pertama yang mungkin dapat dikembangkan oleh AIC ini adalah syarat dasar untuk suatu sistem agar dapat disebut **sistem informasi yang cerdas** (*intelligent information system*).¹⁵³ Sehingga, penulis dapat membuat suatu pers-

¹⁵³ John Fulcher. “Intelligent Information Systems”, dalam Mehdi Khosrow-Pour Ed. *Encyclopedia of Information Science and Technology*. Vol. IV. New York: Information Science Reference, 2009, hal. 2119.

pektif bahwa AIC ini adalah suatu model teoretis berbasis kecerdasan buatan mengenai model komputasi DNA yang kriterianya mendekati jenis kekuasaan seperti dibayangkan oleh Foucault dalam pertimbangan metodologis pertama.

Lalu, bila penjelasan ini dapat diterima, masih ada pertimbangan metodologis kedua yang harus diujikan pada AIC ini. Pertimbangan metodologis kedua Foucault didasarkan pada suatu analisis yang mempersyaratkan bahwa kekuasaan yang dianalisis itu berada pada **level yang tidak disadari** (*unconscious level*) dan terlepas dari analisis mengenai subjek yang memiliki kekuasaan (agen, atau pada konteks komputasi DNA ini adalah *developer*). Kemudian, Foucault menambahkan bahwa hal itu dapat disebut objek yang dapat memasang dirinya sendiri dan menghasilkan efek yang riil.¹⁵⁴

Sebelum masuk pada pengujian AIC ini, penulis perlu memperjelas dulu apa yang dimaksud Foucault dengan istilah *unconscious*. Istilah ini memang khas istilah Freudian. Namun, pada konteks analisis Foucault, *unconscious* ini mengacu pada suatu pengertian yang berhubungan dengan dua wilayah kajian, yaitu pada wilayah pengetahuan dan pada wilayah budaya. Ia ingin mengungkap **hukum dan ketetapan** (*laws and determinations*) yang ada di balik pengetahuan, serta **batasan dan larangan** (*limits and exclusions*) yang ada pada suatu budaya. Di sini, apa yang disebut *unconscious* pengertiannya berbeda sesuai dengan konteks wilayah kajiannya. Dalam kata-kata Clare O'Farrell, bila ini menyangkut arkeologi, maka boleh jadi *unconscious* ini berelasi dengan “*conditions of possibility*” (kondisi-kondisi yang mungkin). Sedangkan bila ini menyangkut genealogi, maka *unconscious* akan berelasi dengan “*constraints*” (batasan-batasan).¹⁵⁵

Kalau memang maksud Foucault adalah demikian halnya, maka penulis hanya akan berfokus pada hukum dan ketetapan meski ini bersifat arkeologis pada satu sisi. Sebab, komputasi DNA itu berada pada wilayah sains dan bukannya pada wilayah kultural. Meskipun demikian, dalam komputasi DNA ini ada suatu hal yang disebut dengan *exercise of power*. Sehingga, aspek genealogis justru

¹⁵⁴ Lihat pada poin 2 tentang pertimbangan metodologis yang disebutkan Foucault dalam sub bab 1.3.1 atau pada Foucault. *Two Lectures*, dalam *PK*, hal. 97.

¹⁵⁵ Istilah hukum dan ketetapan, serta batasan dan larangan berasal dari Foucault sendiri seperti dikutip oleh O'Farrell. Dua pasangan istilah inilah yang Foucault dengan *unconscious*. Lihat pembahasan mengenai hal ini dalam O'Farrell. *Op.cit.*, hal. 69.

malah hadir di sisi ini. Apa yang penulis sedang kaji di sisi ini ibaratnya adalah suatu genealogi sains dan bukannya arkeologi sains.

Namun, bila ini menyangkut hukum dan ketetapan, apa yang mengatur dan menjadi dasar regularitas komputasi DNA tiada lain daripada mekanisme operasional DNA, teknik rekayasa genetika, teori komputasi, serta protokol dan prosedur operasional di laboratorium untuk keperluan komputasi DNA. Sesuatu yang secara khusus telah penulis bahas dalam bab 2 dan bab 3, minus protokol dan prosedur operasional di laboratorium. Pada sisi ini, pembahasannya belum diarahkan langsung untuk mendeskripsikannya dalam kerangka analisis kekuasaan karena sifatnya yang teknis. Meskipun begitu, untuk melengkapi pembahasan bab 2 dan bab 3 berikut pertimbangan metodologis kedua dari Foucault, penulis secara khusus akan menempatkan pembahasan mengenai genealogi sains di sub bab 4.2.

Demikian, yang berkaitan dengan hukum dan ketetapan. Pembahasannya pun tidak diarahkan pada sisi agen seperti diingatkan Foucault. Sedangkan untuk poin terakhir dalam pertimbangan metodologis kedua, hal ini dapat diterapkan pada AIC. Ini karena AIC bersifat otonom dan memiliki tiga sistem seperti yang telah dijelaskan. Selain itu, jika benar pengandaian yang diberikan O'Farrell, maka AIC dapat pula dikategorikan sebagai *conditions of possibility*.

Masuk dalam pertimbangan metodologis ketiga dari Foucault, kekuasaan pada sisi ini diandaikan bersifat sirkular atau menyebar, menyerupai rantai, dan tidak terlokalisasi. Kekuasaan tidak menjadi milik seseorang ataupun bersifat hegemonis seperti dikatakan Gramsci. Individu bahkan hanya menjadi sarana kekuasaan. Kekuasaan ini di-*exercise* melalui suatu jaringan terorganisir. Artinya, Foucault sedang membayangkan kekuasaan sebagai suatu sistem yang dapat berdiri sendiri.¹⁵⁶

Tentang kekuasaan yang serupa ini, kalau penulis perhatikan dengan seksama dan dibandingkan dengan AIC, maka apa yang dibayangkan Foucault ini justru mendekati kenyataannya pada AIC tersebut. Ini karena AIC mempunyai sistem mandiri dan dapat menyebar seperti suatu mata rantai. Ia dapat berpindah

¹⁵⁶ Lihat pada poin 3 tentang pertimbangan metodologis yang disebutkan Foucault dalam sub bab 1.3.1 atau pada Foucault. Two Lectures, dalam *PK*, hal. 98.

dari satu inang ke inang lainnya karena dikembangkan secara *in vivo*. AIC juga bukan makhluk hidup atau bersifat individual karena ia tidak lain dari sistem intelegensi itu sendiri. Sehingga, individu atau makhluk hidup apa pun dapat menjadi sarana atau inang bagi AIC ini.

Kemudian, masih dalam kerangka kekuasaan yang menyebar, Foucault menambahkan pertimbangan metodologis yang keempat. Hal ini berkenaan dengan bahwa kekuasaan itu harus dianalisis mulai dari **mekanisme terkecil** (*infinitesimal mechanism*) yang memiliki sejarahnya sendiri, lintasannya sendiri, teknik dan taktiknya sendiri. Selain itu, perlu dilihat bagaimana mekanisme ini dapat diteruskan oleh mekanisme lebih umum dan berbentuk dominasi global.¹⁵⁷

Pada sisi ini, mekanisme terkecil yang dimaksud Foucault adalah suatu mekanisme dari jenis kekuasaan yang disebut dengan **kekuasaan mikro-fisik** (*micro-physics of power*). Dalam bahasa Foucault, ketika ia membahas soal tubuh, hal ini dikatakan demikian: “*mikro-fisik mengandaikan bahwa kekuasaan diujikan pada tubuh yang telah dimengerti tidak sebagai properti, tetapi sebagai suatu strategi, yang efek dominasinya ini dipertalikan tidak pada ‘ketepatan’ (appropriation), tetapi pada sesuatu yang difungsikan sebagai teknik, taktik, manuver, penempatan; bahwa seseorang seorang seharusnya menguraikannya dalam suatu jaringan hubungan, yang konstan dalam tegangannya, dalam aktivitasnya, lebih daripada keistimewaan yang mungkin orang miliki.*”¹⁵⁸

Jika ini yang dimaksud Foucault sebagai mekanisme terkecil, maka kita dapat mengatakan bahwa kekuasaan mikro-fisik adalah sesuatu yang sangat abstrak bentuknya. Ia mungkin mirip dengan anggapan yang penulis buat untuk pertimbangan metodologis ketiga, yaitu sistem yang dapat berdiri sendiri. Ini karena kekuasaan mikro-fisik lebih berupa strategi dengan tambahan atributif lainnya, yaitu: disposisi, manuver, taktik, teknik, dan fungsi.

Apa yang diurai dalam kekuasaan mikro-fisik sebagai suatu strategi sebenarnya terdapat pula dalam AIC. Sistem pertahanan diri mengandaikan adanya

¹⁵⁷ Lihat pada poin 4 tentang pertimbangan metodologis yang disebutkan Foucault dalam sub bab 1.3.1 atau pada Foucault. *Two Lectures*, dalam *PK*, hal. 99.

¹⁵⁸ Michel Foucault. *Discipline and Punish: The Birth of Prison*. Trans. Alan Sheridan. Middlesex: Penguin Books, 1982, hal. 26. Karya Foucault ini selanjutnya disingkat menjadi *DP*.

hal itu. Sebab, tanpa adanya strategi, mekanisme pertahanan diri tidak akan pernah berhasil dilaksanakan. Begitupun dengan atribut lainnya, ini terkandung dalam sistem yang dimiliki AIC. AIC ini pun, sebagai suatu sistem, merupakan bagian dari sistem kekuasaan yang lebih luas. Yang memungkinkan AIC dapat terwujud adalah bagian dari sistem dominasi global yang terkait erat dengan sistem ekonomi kapitalistik. AIC merupakan salah satu roda penggerak yang akan menjadi pengganti bagi sistem informasi yang telah dikembangkan sebelumnya dengan basis pada teknologi semi-konduktor.

Namun demikian, perlu diingat, bahwa ketika AIC dianggap sebagai produk dari formasi sistem ekonomi kapitalistik, bukan berarti ia adalah sesuatu yang bersifat ideologis. AIC—seperti telah dijelaskan di muka—secara teoretis dapat berkembang menjadi sistem yang mandiri, terlepas dari *developer* yang menciptakannya, maupun dari sistem ekonomi kapitalistik yang memungkinkan riset dan eksperimentasi mengenai AIC dilaksanakan. Oleh karenanya, AIC bukan sesuatu yang dapat dimasukkan dalam kerangka analitis model Marxian.

Selain itu, pada titik ini, Foucault juga telah mengingatkan dalam pertimbangan metodologis kelima bahwa kita tidak boleh terjebak dalam analisis mekanisme kekuasaan yang terkait dengan sejenis ideologi tertentu. Ia harus diarahkan pada analisis yang objeknya ini lebih daripada sekedar ideologi. Sebab, mekanisme kekuasaan pada sisi ini telah menghasilkan sesuatu yang lebih jauh, yaitu *apparatuses of control*. Kekuasaan yang telah menghasilkan *apparatuses of control* ini justru malah disebarkan melalui pengetahuan, melalui metode observasi, teknik registrasi, dan prosedur investigasi dan riset.¹⁵⁹

Lalu, pertanyaan berikutnya adalah apakah AIC ini bagian dari *apparatus of control*? Menilik dari segi pembuatan dan penciptaannya, penulis dapat mengatakan bahwa AIC memang bagian dari *apparatus of control*. Sebab, salah satu fungsi yang terkandung dalam AIC adalah mekanisme identifikasi yang dilakukan oleh sirkuit logika. Ia dapat memproses data melalui mekanisme

¹⁵⁹ Lihat pada poin 5 tentang pertimbangan metodologis yang disebutkan Foucault dalam sub bab 1.3.1 atau pada Foucault. Two Lectures, dalam *PK*, hal. 102.

identifikasi tersebut untuk kemudian diolah dalam fungsi TM. Ini adalah bagian dari “pengawasan” yang ada dalam sistem pertahanan mandiri.

Bila mempertimbangkan keterangan ini semua dalam kerangka pengujian pertimbangan metodologis yang diberikan Foucault untuk diterapkan pada AIC, maka sebenarnya penulis dapat mengatakan bahwa *AIC adalah suatu model ideal kekuasaan* yang ingin ditelaah dalam analisis genealogis. AIC dapat dikatakan pula memenuhi semua syarat yang diajukan oleh Foucault. AIC adalah model ekstensivitas kekuasaan itu sendiri pada tingkat yang maksimal dengan semua kemungkinan atributifnya.

Meskipun demikian, tentu ada yang tidak setuju mengenai hal ini. Ketidaksetujuan ini memang beralasan karena AIC memang “hanya” berupa model. Akan tetapi, oleh karena ini konteksnya adalah komputasi DNA, maka sebuah model adalah sesuatu yang dapat diterima. Sebab, seperti telah dijelaskan dalam sub bab 3.2., jenis komputasi DNA yang ada pun lebih banyak berupa model teoretis dan lebih sedikit yang bersifat praktis.

Inilah hasil dari penerapan analisis model Foucauldian dalam konteks komputasi DNA. Namun, oleh karena masih bersifat umum, penulis akan masih menambahkan analisis Foucauldian yang lainnya pada dua sub bab berikutnya. Dua analisis Foucauldian lainnya merupakan perluasan dari analisis Foucauldian yang ada di sub bab ini. Pertama akan diberikan suatu analisis Foucauldian yang tiada lain daripada genealogi sains. Sedangkan yang kedua, analisis Foucauldian-nya akan menitikberatkan diri pada kekuasaan mikro-fisik dan bagaimana kekuasaan model pendisiplinan itu juga hadir dalam konteks komputasi DNA.

4.2. Genealogi Komputasi dan Problematika Subversivitas Epistemologis

Sub bab ini, seperti telah disampaikan, akan membahas genealogi sains. Namun demikian, perlu dicatat bahwa genealogi sains yang dimaksud bukanlah genealogi sains secara umum yang akan membahas sejarah sains itu sendiri. Apa yang akan diuraikan di sini adalah genealogi sains dalam konteks komputasi. Ini karena fokus pembahasan penelitian ini adalah komputasi DNA. Dengan pertim-

bangan ini, penulis akan menyebut genealogi pada konteks ini sebagai genealogi sains komputasi atau genealogi komputasi.

Bila kita menilik dalam sejarah komputasi, hal tersebut dapat dilacak hingga ke sejarah pembuatan angka itu sendiri. Ini karena komputasi tiada lain daripada proses perhitungan dan komputer adalah alat yang digunakan untuk membantu perhitungan. Namun demikian, dari perkembangan selama hampir 6.000 tahun semenjak sistem angka pertama dikembangkan di Sumeria,¹⁶⁰ teknologi komputasi hanya melahirkan 3 teknologi yang utama. Pertama, ada teknologi komputasi yang disebut dengan **analog** (*analogue*). Kata analog berasal dari bahasa Yunani, *ana+logos*. *Ana* berarti “mengacu pada” dan *logos* berarti “pikiran”.¹⁶¹ Teknologi komputasi yang kedua disebut *digital*. Kata digital berasal dari bahasa Latin, *digitus*. *Digitus* ini artinya adalah “jari”.¹⁶² Dan yang terakhir, penulis dapat menyebutnya sebagai **nanolog** (*nanologue*). Kata *nano* ini berasal dari bahasa Latin, *nanus*, yang berakar dalam kata Yunani Kuno, *nanos*. Arti dari kata *nano* ini adalah “katai”. Sementara *logue* berasal dari kata *logos*, sama seperti yang digunakan dalam kata *analogue*.¹⁶³

Teknologi komputasi model analog (disingkat menjadi komputasi analog) ini adalah suatu komputasi yang menggunakan prinsip-prinsip mekanika di dalam proses komputasinya itu. Komputasi analog mampu menghadirkan suatu model bagi sistem yang ingin ditiru atau diadaptasi. Pada sisi ini, mekanisme peralatan

¹⁶⁰ Untuk referensi sejarah komputasi ini, penulis menggunakan 4 buku pokok, yaitu: (1) Michael R. Williams. *A History of Computing Technology*. 2nd Ed. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1997; (2) Georges Ifrah. *The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer*. Trans. E.F. Harding. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001; (3) Paul E. Ceruzzi. *A History of Modern Computing*. 2nd Ed. Cambridge: The MIT Press, 2003; dan (4) Charles Care. *Technology for Modelling: Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing*. London: Springer-Verlag, 2010. Keterangan mengenai perkembangan yang dimulai di Sumeria dapat dibaca pada Ifrah pada hal. 10.

¹⁶¹ Lihat asal terminologi ini dalam Ifrah. *Op.cit.*, hal. 154.

¹⁶² Arti digital dalam bahasa Latin ini diambil dari situs Wikipedia dengan alamat: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Digital>>, diakses pada tanggal 17 Juni 2011.

¹⁶³ Istilah ini berasal dari penulis sendiri yang dibuat untuk teknologi komputasi yang berbasis pada gabungan teknologi yang menangani komputasi di tingkat molekuler, seperti komputasi kuantum dan komputasi DNA. Keterangan mengenai *nano* berasal dari situs Wiktionary dengan alamat: <<http://en.wiktionary.org/wiki/nano->>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011. Istilah ini terinspirasi dari tulisan Bainbridge yang berisi kemungkinan-kemungkinan teknologi yang dapat dikembangkan dari 4 gabungan teknologi, yaitu: *Nanoscience*, *Biotechnology*, *Information Technology*, dan *Cognitive Science*. Tulisan ini dapat dibaca dalam William Sims Bainbridge. *Nanoconvergence: The Unity of Nanoscience, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

dan perhitungan atas data yang dijalankannya bersifat *kontinyu* (**continuous**). Dengan kata lain, ia tidak menghasilkan suatu jeda dalam proses komputasinya ini.¹⁶⁴ Contoh riil yang pertama dari mesin komputasi analog yang pernah dibuat adalah *astrolabe*. Ini adalah mesin yang digunakan untuk proses perhitungan astronomis dan dibuat pada masa Yunani Kuno oleh Hipparchus dari Bithynia.¹⁶⁵ Dalam gambar di bawah ini, kita dapat melihat sebuah bentuk *astrolabe* yang pernah dibuat oleh Georg Hartmann pada tahun 1537 di Nuremberg, Jerman.¹⁶⁶



Gambar 4.1. Astrolabe sebagai Contoh Mesin Komputasi Analog Pertama

Pada tahap yang lebih lanjut, komputasi analog ini dibuat untuk keperluan yang beragam. Namun demikian, pengembangannya tetap dalam kerangka **pengukuran** (*measurement*) dan **pemodelan** (*modelling*). Misalnya, pada tahun 1949, seorang ekonom dari Selandia Baru yang bernama Bill Phillips telah membuat suatu mesin komputasi analog untuk memodelkan ekonomi Inggris dengan menggunakan aliran air yang diberi warna dalam tabung-tabung yang telah ditentukan fungsinya. Mesin yang diberi nama *Moniac* ini kemudian dikritik mekanismenya oleh Allan McRobie. Ia mengatakan bahwa *Moniac* ini tidak dapat menggambarkan sistem ekonomi sebagaimana mestinya. Di bawah ini, kita dapat melihat gambar *Moniac* yang telah dibuat oleh Phillips tersebut.¹⁶⁷

¹⁶⁴ Bdk. dengan keterangan yang disampaikan dalam Care. *Op.cit.*, khususnya dalam sub bab 1.1. dan 1.2. dan juga dengan Ifrah. *Op.cit.*, dalam sub bab 5.6.

¹⁶⁵ Keterangan mengenai *astrolabe* ini dapat dibaca pada Williams. *Op.cit.*, dalam sub bab 5.2.

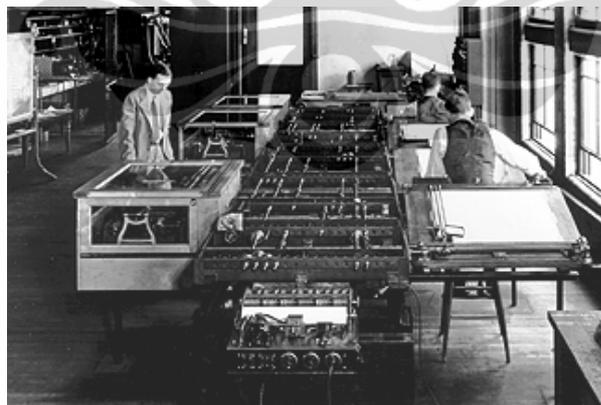
¹⁶⁶ Sumber gambar dan keterangan berasal dari situs Wikipedia, dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Yale%27s_Hartmann_astrolabe.jpg>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

¹⁶⁷ Keterangan dan gambar tentang mesin Phillips ini diambil dari situs Guardian yang berada di alamat: <<http://www.guardian.co.uk/business/2008/may/08/bankofenglandgovernor.economics>>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011. Untuk simulasi cara kerjanya, animasinya ada dalam situs YouTube: <<http://www.youtube.com/watch?v=XqPtW40wIno&feature=related>>, diakses pada



Gambar 4.2. Mesin *Moniac* buatan Bill Phillips

Contoh lain dari jenis komputasi analog modern lainnya adalah mesin yang dikembangkan oleh Vannevar Bush pada tahun 1931 di Amerika Serikat. Mesin ini diberi nama *Differential Analyzer*. Cara kerja mesin ini agak berbeda dengan yang dibuat Phillips. Sebab, *Differential Analyzer* merupakan rangkaian mekanik tanpa aliran air. Ia lebih mirip dengan mesin pental modern atau mesin permainan sepak bola yang biasa ada di tempat permainan bilyar. Fungsi dari mesin ini ditujukan untuk pemahaman proses perhitungan diferensial melalui cara kerja mekanis. Agar lebih mudah membayangkan seperti apa cara kerja dari *Differential Analyzer*, gambar berikut ini akan memperlihatkan bentuk riil dari mesin yang dimaksud.¹⁶⁸



Gambar 4.3. Mesin *Differential Analyzer* buatan Vannevar Bush

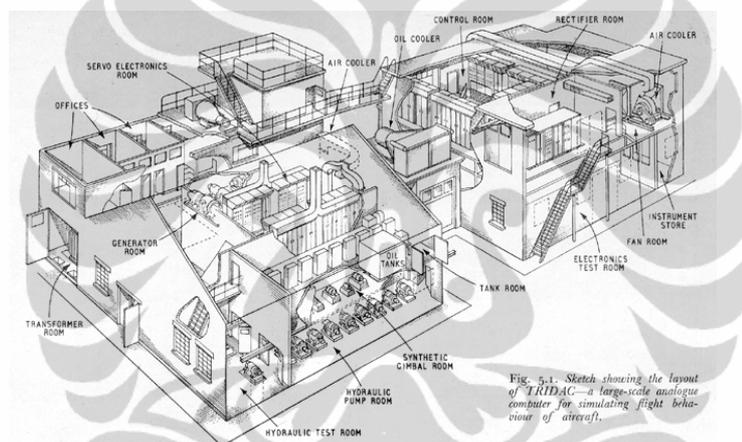
tanggal: 17 Juni 2011. Lihat keterangan mengenai *Moniac* sebagai contoh mesin komputasi analog dalam Care. *Op.cit.*, hal. 5.

¹⁶⁸ Keterangan cara kerja mesin ini berasal dari situs MIT:

<<http://web.mit.edu/klund/www/analyzer/>>, sedangkan gambar berasal dari situs Ibiblio:

<<http://www.ibiblio.org/pioneers/bush.html>>. Kedua situs ini diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

Selain menggunakan material fisikawi dan juga prinsip mekanika, mesin komputasi analog dapat dibuat dengan menggunakan sistem elektrik atau elektronik. Meskipun demikian, dalam perakitannya, mesin tersebut tetap menggunakan rangkaian mekanis. Sehingga, gabungan sistemnya ini disebut elektromekanis. Model mesin seperti ini telah diwujudkan dalam pembangunan mesin komputasi analog elektromekanik besar yang diberi nama TRIDAC (*three-dimensional analogue computer*). Dikembangkan oleh *Royal Aircraft Establishment* (RAE) di Farnborough, Inggris, pada tahun 1950-an, TRIDAC difungsikan untuk kebutuhan simulasi penerbangan. Ia memberikan *model* bagi para ahli aeronautika untuk menguji hal-hal yang berkaitan dengan penerbangan sebelum sebuah mesin pesawat dapat diujiterbangkan. Berikut adalah gambar dari mesin TRIDAC itu.¹⁶⁹



Gambar 4.4. Mesin Komputasi Analog Elektromekanis TRIDAC

Setelah sempat bertahan beberapa tahun, komputasi analog pun mulai pudar penggunaannya seiring berkembangnya komputasi digital (baca: teknologi komputasi model digital). Walaupun demikian, sebenarnya masih sempat dibuat beberapa mesin komputasi analog yang digabung dengan teknologi digital, seperti misalnya mesin *Digital Differential Analyzer*. Namun, hal ini tidak bertahan lama. Pudarnya komputasi analog ini dimulai sejak munculnya mesin komputasi digital yang dapat diprogram di tahun 1940-an. Mesin tersebut diberi nama ENIAC

Keterangan tentang *Differential Analyzer* sebagai mesin komputasi analog juga dapat dibaca dalam Williams. *Op.cit.*, sub bab 5.5. dan Care. *Loc.cit.*

¹⁶⁹ Keterangan tentang TRIDAC dapat dibaca pada Care. *Op.cit.*, di sub bab 7.1. Sumber gambar berasal dari: <<http://www.science.uva.nl/museum/biganalogue.php>>, diakses pada tanggal 17 Juni 2011.

(*Electronic Numerical Integrator and Computer*), dibuat di Amerika Serikat, berbasis elektronik, dan berprinsip digital. Berikut adalah gambar dari ENIAC.¹⁷⁰



Gambar 4.5. Mesin Komputasi Digital Terprogram ENIAC

Pada sisi historis, komputasi digital ini sendiri dapat dikatakan memiliki sejarah yang lebih jauh hingga ke masa lampau bila dibandingkan dengan komputasi analog. Mesin komputasi digital yang pertama diciptakan manusia adalah *abacus* yang berasal dari Sumeria pada kurun waktu 2.000-an tahun SM.¹⁷¹ *Abacus* kemudian berevolusi menjadi mesin hitung lainnya yang lebih canggih pada abad XVI melalui mesin hitung yang diciptakan oleh Wilhelm Schickard, Blaise Pascal, Gottfried Wilhelm Leibniz, Samuel Morland, dan Rene Grillet.¹⁷²

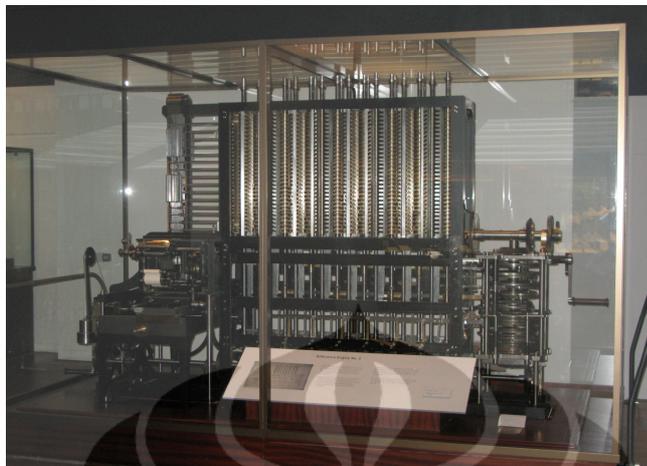
Mesin-mesin hitung yang muncul pada abad XVI ini kemudian menjadi dasar bagi pembuatan komputasi analog dan komputasi digital. Pada konteks komputasi digital, pengembangan signifikan dari mesin-mesin ini dilakukan oleh Charles Babbage yang berasal dari Inggris. Mesin komputasi digital ini diberi nama *Different Engine* dan berfungsi untuk menghitung tabel matematika dan astronomi. Pada sisi ini, *Different Engine* yang dibuat oleh Babbage baru berupa desain dan bukan mesin yang riil. Desain *Different Engine* Babbage baru terealisasi wu-

¹⁷⁰ Baca mengenai proses pergantian komputasi analog menuju komputasi digital dalam Care. *Op.cit.*, pada sub bab 2.5.2.1. hingga sub bab 2.5.3. Keterangan mengenai ENIAC dapat dibaca dalam Williams. *Op.cit.* sub bab 7.3. dan Ifrah. *Op.cit.*, hal. 220-2. Gambar berasal dari situs Wikipedia: <<http://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

¹⁷¹ Ifrah. *Op.cit.*, hal. 11.

¹⁷² Lihat dalam Williams. *Op.cit.*, pada bab 3 untuk penemuan dan penciptaan mesin dari para tokoh yang disebutkan.

judnya ketika *London Science Museum* memutuskan untuk membuat mesin itu pada tahun 1989-1991. Berikut adalah gambar mesin rekonstruksi Babbage.¹⁷³



Gambar 4.6. Mesin *Differential Engine* Babbage

Melalui dua contoh yang ditampilkan dalam mesin komputasi digital ini, ENIAC dan *Differential Engine*, sebenarnya kita sudah dapat melacak perbedaan penting antara komputasi analog dengan komputasi digital. Pada dua mesin komputasi digital ini, aspek pemodelan dan pengukuran boleh dikatakan tidak muncul. Sedangkan aspek prinsip digital dan pemrograman justru muncul dalam komputasi digital. Prinsip digital ini tiada lain daripada sistem perhitungan biner yang hanya menggunakan dua angka, 0 (tanda dari *off*) dan 1 (tanda dari *on*).¹⁷⁴ Namun demikian, seiring dengan perkembangan teknologi baru di bidang elektronika dan pengembangan piranti lunak (program), komputasi digital mulai dapat menggabungkan aspek fungsional yang dimiliki oleh komputasi analog, yaitu pemodelan maupun pengukuran.

Fungsi pemodelan yang dapat diterapkan dalam komputasi digital pertama kali adalah dalam fungsi simulasi. Mesin komputasi digital yang mampu menjalankan simulasi ini dikembangkan oleh perusahaan *Bell Telephone Laboratories*, Amerika Serikat. Mesin yang bernama *Model II Relay Calculator* ini diciptakan oleh George Stibitz atas permintaan *National Defense Research*

¹⁷³ Untuk uraian mengenai Babbage dan mesin *Differential Engine* ini dapat dibaca dalam Williams. *Ibid.*, pada bab 4 dan Ifrah. *Op.cit.*, pada sub bab 5.9. Keterangan tambahan mengenai rekonstruksi mesin Babbage ini dan gambarnya berasal dari situs Wikipedia dengan alamat: <http://en.wikipedia.org/wiki/Difference_engine>, yang diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

¹⁷⁴ Untuk pembahasan prinsip digital ini dapat dibaca dalam Badry. *Op.cit.*, hal. 25-6.

Council dan resmi digunakan pada tahun 1943. Cara kerja mesin ini dimaksudkan sebagai simulasi perhitungan pergerakan pesawat tempur dan cara pengantisi-pasiannya melalui penembakan rudal.¹⁷⁵

Untuk penerapan jenis simulasi lainnya, hal ini mulai dikembangkan pertama kali dalam mesin *Whirlwind I* yang dibuat oleh *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) atas pesanan *U.S. Navy* berdasarkan konsep yang telah dibuat oleh John von Neumann. Konsep von Neumann ini sangat mendasar dan menjadi bagian integral dalam komputasi digital dewasa ini. Von Neumann telah mencatat bahwa setiap mesin komputasi digital haruslah memiliki lima hal, yaitu: (1) *the arithmetical unit*; (2) *the control unit*; (3) *the memory, to record the numerical data and instructions*; (4) *input devices*; dan (5) *output devices*.¹⁷⁶

Adapun simulasi yang diterapkan dalam *Whirlwind I*, simulasinya ini bersifat *real-time*. Maksudnya, kita dapat melihat prosesnya secara langsung karena hasilnya dapat kita pantau saat kita menggunakan mesin tersebut. Simulasi secara *real-time* ini dibuat untuk keperluan pelatihan para pembom dalam pengantispasian manuver pesawat tempur. Berikut adalah gambar dari mesin *Whirlwind I* ini.¹⁷⁷



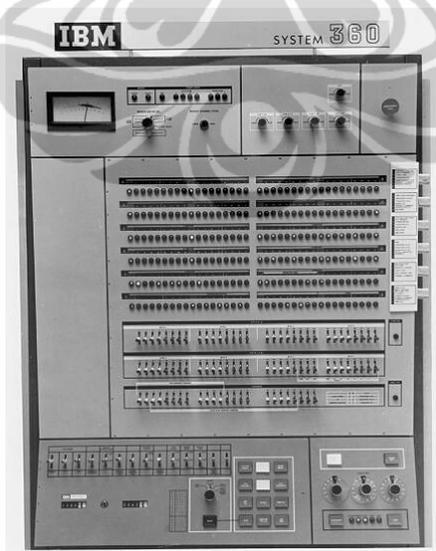
Gambar 4.7. Mesin *Whirlwind I* MIT

¹⁷⁵ Williams. *Op.cit.*, dalam sub bab. 6.3.3.

¹⁷⁶ Keterangan mengenai *Whirlwind I* ini dan elemen komputasi von Neumann yang dikutip dari penjelasan R. Ligonnière berasal dari Ifrah. *Op.cit.*, hal. 294 dan 287.

¹⁷⁷ Ifrah. *Ibid.*, hal. 294, Ceruzzi. *Op.cit.*, hal. 140, dan dalam situs Wikipedia dengan alamat: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Whirlwind_\(computer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Whirlwind_(computer))>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011. Gambar berasal dari situs Wikipedia ini.

Masih berkenaan dengan simulasi, varian lain dari simulasi telah dikembangkan oleh IBM (*International Business Machine*) di tahun 1960-an pada mesin komputasi *System/360 Model 65* dan *30*. Simulasi ini dinamakan **emulasi** (*emulation*) oleh Larry Moss. Secara sederhana, pengertian emulasi adalah “*as good as*”. Namun, kalau ini dipahami secara lebih jauh, emulasi adalah suatu teknologi yang memungkinkan suatu mesin komputasi mensimulasikan cara kerja mesin komputasi lainnya. Emulasi ini dimungkinkan dengan teknologi yang disebut *microprogramming*. *Microprogramming* ini adalah penerapan teknis dari apa yang disarankan Maurice Wilkes dalam kuliah komputer digital yang diberikannya pada *Manchester University* tahun 1951. Ia berpendapat bahwa: “‘*cara terbaik untuk mendesain mesin yang dapat meng-hitung secara otomatis*’ adalah dengan membangun bagian pengendali sebagai program kecil yang dapat disimpan dalam komputer itu sendiri, di mana masing-masing operasi pengendalian (katakanlah, perintah untuk menambah 2 angka) itu dipecah menjadi serangkaian ‘*operasi-mikro*’ yang diarahkan oleh suatu kompo-nen matriks yang disimpan sebagai ‘*program-mikro*’ ”. Melalui prinsip ini, mesin *System/360 Model 65* dapat mensimulasikan mesin 7070 yang telah dibuat sebelumnya oleh IBM. Berikut adalah gambar dari *System/360 Model 65*.¹⁷⁸



Gambar 4.8. Mesin System/360 Model 65 IBM

¹⁷⁸ Ceruzzi. *Op.cit.*, hal. 148-9. Gambar berasal dari situs IBM dengan alamat: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/mainframe/mainframe_2423PH2065C.html>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

Teknologi simulasi dan emulasi kini telah berkembang sepenuhnya dengan berkembangnya teknologi komputasi digital yang semakin kecil mesinnya tetapi memiliki kapasitas yang besar. Bila kita lihat secara sekilas saja, mesin *System/360 Model 65* sudah lebih kecil bila dibandingkan *Whirlwind I*. Namun, dua teknologi *modelling* ini masih harus menunggu munculnya mesin komputasi digital yang kita kenal sekarang ini hingga dapat dijalankan dengan baik.

Apa yang kita kenal sekarang sebagai desktop, laptop atau netbook pertama kali muncul sebagai mesin *Personal Computer* (PC) yang juga diciptakan oleh IBM di tahun 1981. Mesin yang dapat disebut PC pertama adalah *IBM 5150*. Mesin ini telah memiliki CPU (*Central Processing Unit*) dengan mikroprosesor di dalamnya, disket, *keyboard*, monitor, printer, dan yang paling penting sistem operasi berikut program yang mengendalikan mesin PC ini.¹⁷⁹ Suatu temuan yang sangat revolusioner dan mengubah takdir mesin komputasi digital hingga sekarang ini. Berikut adalah gambar dari IBM PC yang dimaksud.¹⁸⁰



Gambar 4.9. Mesin IBM PC 5150

Mesin IBM PC 5150 ini kini dapat kita jalankan dalam setiap mesin komputasi digital kontemporer melalui teknologi simulasi dan emulasi yang telah disempurnakan, yaitu **virtualisasi** (*virtualization*). Teknologi virtualisasi adalah suatu teknik yang dapat mensimulasikan mesin komputasi digital maupun sistem operasi yang dapat dijalankan di dalamnya melalui satu program yang dibuat khusus untuk kepentingan tersebut. Salah satu program yang dimaksud adalah

¹⁷⁹ Ceruzzi. *Op.cit.*, hal. 268-9.

¹⁸⁰ Gambar berasal dari situs IBM yang ada di alamat: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/pc25/pc25_intro.html>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

VirtualBox yang dapat digunakan secara gratis. Dengan menjalankan *VirtualBox* pada PC yang kita pakai, kita dapat mensimulasikan penggunaan 3 sistem operasi utama PC dewasa ini secara bersamaan dan sekaligus. Sistem operasi ini tiada lain daripada *Macintosh* buatan Apple, *Windows* buatan Microsoft, dan *Linux* buatan Linus Torvald. Dua sistem operasi pertama adalah jenis piranti lunak *proprietary* atau komersil, sedangkan yang terakhir adalah jenis piranti lunak *open source* atau gratis. Pada di gambar di bawah ini, kita dapat melihat proses virtualisasi yang dimaksud pada tampilan layar monitor.¹⁸¹



Keterangan:

1. Virtualisasi sistem operasi *Windows* oleh *Macintosh*.
2. Virtualisasi sistem operasi *Linux* oleh *Windows*.
3. Virtualisasi sistem operasi *Windows* oleh *Linux*

Gambar 4.10. Virtualisasi 3 Sistem Operasi via VirtualBox

Pada konteks ini, mesin komputasi digital yang dapat menjalankan virtualisasi sebenarnya adalah mesin PC dengan prosesor yang handal. Garda depan teknologi prosesor ini kini dipegang oleh Intel. Prosesor tercanggih yang dibuat Intel dengan teknologi virtualisasi di dalamnya adalah *Xeon E7-8870* yang memiliki 10 keping prosesor 64-bit di dalamnya dengan kapasitas *cache* sebesar 30 MB. Jauh berbeda dengan *IBM PC 5150* yang hanya terdiri dari 1 keping prosesor 8-bit dengan *cache* sebesar 40K. Maksud dari 30 MB ini adalah 30 x

¹⁸¹ Sumber gambar berasal dari situs *VirtualBox*: <<http://www.virtualbox.org/wiki/Screenshots>>.

1.000.000 *Byte*, sedangkan 40 K adalah 40 x 1.000 *Byte*. Bila ini dilihat secara sekilas saja, kapasitas mesin komputasi digital *Xeon E7-8870* sudah beda 1.000 x lipat dari kapasitas *IBM PC 5150*.¹⁸²

Namun demikian, mesin komputasi digital secanggih mesin Intel *Xeon E7-8870* ini justru malah dianggap bagian dari jenis komputasi klasik oleh para fisikawan. Sebabnya adalah karena mesin komputasi digital memiliki batasan dalam kapasitas komputasi untuk kebutuhan simulasi. Para fisikawan menghadapi kendala yang serius karena mesin komputasi digital tidak dapat membuat simulasi perilaku sistem mekanika kuantum. Oleh karena masalah ini, Richard Feynman kemudian menjawabnya dengan menggunakan logika terbalik atas situasi tersebut. Bila mesin komputasi digital tidak dapat mensimulasikan perilaku sistem mekanika kuantum, kenapa kita tidak membuat mesin komputasi dari prinsip mekanika kuantum itu sendiri.¹⁸³

Teknologi komputasi generasi ketiga pun lahir seiring dikembangkannya gagasan Feynman ini semenjak tahun 1982. Namun demikian, Paul Benioff sebenarnya telah mendahului Feynman dengan mendesain suatu komputer kuantum di tahun 1980. Namun, desain komputer kuantum Benioff mendapat kritik yang pedas dari David Deutsch dengan mengatakan bahwa desain komputer kuantum itu juga dapat dibuat simulasinya oleh mesin komputasi digital. Deutsch lalu membuat alternatif baru bagi model komputasi kuantum dengan merumuskan suatu komputer kuantum universal berbasis pada TM di tahun 1985. Berikutnya, giliran Peter W. Shor merumuskan suatu algoritma kuantum pada tahun 1994.¹⁸⁴

Meskipun kemudian ada pengembangan teori yang lebih jauh dari komputasi kuantum ini, namun belum ada yang berhasil hingga sekarang ini menciptakan wujud riil dari mesin komputasi kuantum. Ini karena para fisikawan dan para ahli komputasi mengalami kendala utama yang disebut dengan

diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

¹⁸² Keterangan dan spesifikasi dari Intel *Xeon E7-8870* ini dapat dibaca pada situs Intel di alamat: <<http://ark.intel.com/Product.aspx?id=53580>>, diakses pada tanggal: 17 Juni 2011.

¹⁸³ Kent A. Peacock. *The Quantum Revolution: A Historical Perspective*. London: Greenwood Press, 2008, hal. 149.

¹⁸⁴ Mika Hirvensalo. "An Introduction to Quantum Computing", dalam Gheorghe Paun, Grzegorz Rozenberg, and Arto Salomaa, Ed. *Current Trends in Theoretical Computer Science: Entering the 21st Century*. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001, hal. 644.

dekoherensi (*decoherence*) ketika mereka hendak membuat **memori komputer kuantum** (*quantum computer memory*). Sebab, dekoherensi ini adalah suatu keadaan di mana: “*pandangan bahwa sistem kuantum yang realistik itu tidak pernah terisolasi, tetapi terbenam dalam lingkungan yang melingkupinya dan berinteraksi secara sinambung dengannya*”. Padahal, memori komputer kuantum hanya dapat tercipta jika ia terisolasi. Di sisi ini, penulis dapat mengatakan bahwa dekoherensi adalah konsekuensi langsung dari prinsip ketidakpastian Heisenberg yang mengandaikan bahwa “pengukuran” (apalagi pengisolasian) adalah sesuatu yang sulit dilaksanakan dalam tingkat partikel sub atomik. Selain dekoherensi, masalah lainnya yang harus dihadapi adalah **unit pemrosesan kuantum** (*quantum processing unit*) justru tidak boleh diisolasi sepenuhnya. Sesuatu yang menjadi kebalikan dari proses yang dikehendaki dalam memori komputer kuantum. Belum lagi selesai kedua masalah ini, masalah lain sudah muncul. Ini bersangkutan dengan apa yang disebut sebagai **galat tak-dapat-terkendali** (*non-controllable errors*). Sesuatu masalah yang menjadi bagian integral dari pemrograman seperti telah dibahas dalam sub bab 3.3.¹⁸⁵

Atas masalah-masalah yang serupa inilah komputasi DNA kemudian mendapat sokongan dari banyak pihak karena wujud riilnya sudah hadir dengan eksperimentasi yang dibuat Adleman pada tahun 1994 seperti diuraikan di sub bab 3.1. Dalam konteks ini, penulis dapat mencatat bahwa pada satu sisi, gagasan Feynman telah melahirkan pengembangan komputasi kuantum. Namun, di sisi lain, gagasan Feynman juga menginspirasi kelahiran komputasi DNA. Selanjutnya, meski komputasi kuantum masih dalam proses perealisasi, namun beberapa pihak sudah optimis dengan memprediksi bahwa kedua jenis teknologi komputasi yang sangat berlainan ini kini berkemungkinan untuk dapat disatukan oleh teknologi yang dilahirkan dari nanosains (*nanoscience*), yaitu: **nanoteknologi** (*nano-technology*).¹⁸⁶ Ini karena komputasi kuantum dan komputasi DNA sama-

¹⁸⁵ Hirvensalo dalam Paun, *Ibid*. Kutipan mengenai dekoherensi ini berasal dari tulisan Maximilian Schlosshauer. *Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics*, 28 Juni 2005, hal. 1, suatu artikel yang diterbitkan di Internet pada situs Cornell University Library yang ada di alamat: <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0312059>>, diakses pada tanggal: 18 Juni 2011.

¹⁸⁶ Selain tulisan Bainbridge, penulis juga membaca kecenderungan yang sama dalam tulisan dari Fritz Allhoff, et al., mengenai kemungkinan ini. Tulisan mereka tersebut dapat dibaca dalam Fritz

sama beroperasi pada tingkat molekuler. Inilah yang penulis sebut dengan nanolog.¹⁸⁷

Dari apa yang telah disampaikan dalam sub bab ini dan juga dalam bab 3, berikut keterangan yang ada dari bahan bacaan yang tersedia, penulis akan mencoba meringkaskan uraian mengenai tiga jenis komputasi yang telah dikembangkan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.1. Komparasi Komputasi Analog, Digital, dan Nanolog

<i>Models</i> (Model)	<i>Features</i> (Ciri-ciri)	<i>Medium</i> (Media)	<i>Interactivity</i> (Interaktivitas)	<i>Technologies</i> (Teknologi)
<i>Analogue</i> (Analog)	<i>Function: Modelling</i> (Fungsi: Pemodelan) <i>Data: Continuous</i> (Data: Sinambung) <i>Method: Measure</i> (Metode: Pengukuran)	<i>Physical</i> (Fisikawi)	<i>Involve</i> (Terlibat penuh)	<i>Mechanics</i> (Mekanika) <i>Electromechanics</i> (Elektromekanika)
<i>Digital</i> (Digital)	<i>Function: Simulating</i> (Fungsi: Pensimulasian) <i>Data: Discrete</i> (Data: Tidak sinambung) <i>Method: Count</i> (Metode: Perhitungan)	<i>Electrical</i> (Elektris)	<i>Automatic</i> (Otomatis)	<i>Mechanics</i> (Mekanika) <i>Electromechanics</i> (Elektromekanika) <i>Electronics</i> (Elektronika)
<i>Nanologue</i> (Nanolog)	<i>Function: Rebuilding</i> (Fungsi: Pembangunan Ulang) <i>Data: Simultaneous</i> (Data: Serentak) <i>Method: Convergence</i> (Metode: Gabungan)	<i>Molecular</i> (Molekuler)	<i>Autonomous</i> (Otonom)	<i>Quantum Mechanics</i> (Mekanika Kuantum) <i>Biotechnology</i> (Bioteknologi) <i>Nanotechnology</i> (Nanoteknologi)

Keterangan:

Khusus untuk *features* yang terdapat dalam nanolog, *rebuilding* disarikan dari fungsi yang dapat dilaksanakan dalam penerapan nanoteknologi, yaitu pembentukan material baru, serta dari fungsi yang dapat dilakukan dalam komputasi DNA, yaitu penggantian DNA yang rusak. Untuk data yang bersifat *simultaneous*, ini dipertimbangkan dari pengolahan data yang dapat ditangani komputasi kuantum dalam prinsip yang disebut *qubit*. Seperti halnya *bit* dalam komputasi digital, *qubit* terdiri dari nilai 0 dan 1. Namun, pada *qubit*, nilai 0 dan 1 tidak diwakili oleh elemen yang berbeda. Jadi, nilai 0 dan 1 dapat diwakili secara bersamaan dan serentak (*simultaneously*) oleh

Allhoff, Patrick Lin, and Daniel Moore. *What is Nanotechnology and Why Does It Matter? From Science to Ethics*. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2010, pada bab 4.

¹⁸⁷ Istilah yang sama juga muncul untuk sebuah nama proyek yang disusun oleh *Wuppertal Institute* di Jerman, *Forum of the Future* di Inggris, EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*), dan *triple innova of Germany*. Proyek ini bertujuan untuk mengkaji implikasi sosial, etika, dan hukum yang berasal dari penerapan nanoteknologi dalam kehidupan manusia. Lihat selengkapnya dalam situs proyek ini dengan alamat: <<http://www.nanologue.net>>, diakses pada tanggal: 18 Juni 2011.

qubit. Hal yang serupa juga ada dalam komputasi DNA, di mana proses replikasi DNA dilaksanakan secara paralel. Sedangkan untuk *convergence*, ini disebut demikian karena nanolog merupakan gabungan teknologi yang berbeda-beda.

Jika melihat tabel yang telah disampaikan ini, kita dapat memperhatikan secara jelas bahwa genealogi komputasi telah menghadirkan tiga paradigma mendasar, yaitu: *modelling*, *simulating*, dan *rebuilding*. Tiga paradigma mendasar ini, bila bukan suatu kebetulan, ternyata memiliki kesejajaran dengan 3 *episteme* yang diungkap Foucault ketika menganalisis sains kemanusiaan. Pertama, paradigma *modelling* akan bersanding dengan yang disebut Foucault sebagai ***episteme keserupaan*** (*resemblance episteme*). *Episteme keserupaan* yang menjadi ciri utama pemikiran dari abad Renaisans ini dalam analisis Foucault dipahami lebih jauh pengertiannya dalam beberapa istilah perluasan, yaitu: *convenientia*, *aemulatio*, *analogy*, dan *sympathy*.¹⁸⁸

Tentang istilah *convenientia*, pengertiannya ini berkenaan dengan soal ruang. Sesuatu menjadi serupa karena *kedekatan* yang membuat dua hal saling berinteraksi. Misalnya, antara tubuh dan jiwa, di sana terdapat hubungan interaktif yang boleh dikatakan serupa karena *kedekatan* meski tampak sebagai sesuatu yang hampir tidak berjarak. Dalam bahasa Foucault yang lebih teknis, *convenientia* adalah “suatu kemiripan yang berhubungan dengan ruang dalam bentuk skala bertahap dari proximity”.¹⁸⁹

Berbeda dengan istilah *convenientia*, istilah *aemulatio* memiliki pengertian keserupaan yang tidak terkait dengan kedekatan ruangan ataupun berhubungan dengan interaktivitas. Bahwa sesuatu itu serupa, itu karena yang satu diandaikan *bagai tiruan* bagi yang lainnya. Wajah manusia bila dilihat jauh *bagai serupa* dengan langit misalnya. “Hubungan emulasi memungkinkan sesuatu untuk meniru yang lainnya dari satu tujuan semesta kepada yang lainnya tanpa hubungan atau proximity: dengan menggandakan dirinya dalam suatu cermin, dunia meniadakan

¹⁸⁸ Michel Foucault. *The Order of Things: An Archaeology of the Human Sciences*. Trans. Alan M. Sheridan. London: Routledge, 2002, dalam bab 2. Untuk selanjutnya, karya Foucault ini disingkat menjadi *OT*.

¹⁸⁹ Foucault. *OT*, hal. 21.

*kan jarak yang tepat untuknya; dengan cara ini, hal tersebut dapat mengatasi tempat yang telah dibagi-bagikan untuk masing-masing sesuatunya itu.*¹⁹⁰

Untuk istilah *analogy*, pengertiannya merupakan sesuatu yang melampaui dua istilah sebelumnya. Keserupaan yang ada pun tidak selalu berdasarkan pada hubungan yang dekat atau karena ia tiruan bagi yang lainnya. Ia serupa karena *hubungan yang dipertautkan* antara satu dengan yang lainnya. “*Kekuasaannya itu besar sekali, karena keberbandingan yang diperlakukan atasnya tidak nampak, salah satu yang substansial di antara sesuatunya itu sendiri; mereka membutuhkan hubungan kemiripan yang lebih halus lagi. Melepaskan ini semua, hal ini dapat memperluas, dari titik tunggal yang diberikan, kepada sejumlah hubungan tanpa akhir.*” Contoh dari *analogy* ini adalah keserupaan yang ada pada *hubungan antara bintang dan langit dengan hubungan antara tanaman dan tanah.*¹⁹¹

Yang terakhir adalah istilah *sympathy*. Sebenarnya, istilah ini tidak secara langsung memiliki pengertian keserupaan. Ini karena istilah *sympathy* tidak berhubungan dengan kedekatan, tiada pengandaian yang berupa tiruan, ataupun hubungan yang dapat dipertautkan. Ini adalah suatu *permainan pengertian* yang dibuat oleh manusia dalam melihat sesuatu yang sebenarnya tidak berhubungan menjadi sesuatu yang dapat berkaitan satu sama lain. Misalnya, api adalah sesuatu yang hangat dan bercahaya. Ia akan naik dan menyala-nyala dengan tanpa henti. Namun, oleh karena menyala-nyala, api kehilangan sifat keringnya (yang berelasi dengan tanah) dan malah memperoleh sifat lembab (yang berelasi dengan air atau udara). Pada akhirnya, ia akan menghilang menjadi uap putih/asap biru menuju awan. Api telah menjadi udara. Dalam contoh penjelasan api ini, terdapat sifat permainan pengertian dari *sympathy*. Ini dikatakan Foucault sebagai berikut:¹⁹²

“Sympathy adalah suatu contoh dari yang Sama sedemikian kuat dan terus-menerus, yang hal itu tidak akan disandarkan pada isi yang semata-mata hanya merupakan salah satu dari bentuk keserupaan; ini memiliki kekuasaan asimilasi yang berbahaya, yang membawakan sesuatu menjadi identik dengan sesuatu yang lainnya, yang mencampurnya, dan menyebabkan individualitasnya ini menghilang – dan kemudian membawanya terasing dari apa yang sebelumnya dialaminya. Sympathy mengubah bentuk. Ia mengubah, tetapi dalam arah identitas, sedemikian rupa yang jika kekuasaannya itu

¹⁹⁰ Foucault. *OT*, hal. 22.

¹⁹¹ Foucault. *OT*, hal.24.

¹⁹² Foucault. *OT*, hal. 26-7.

tidak diimbangi akan mereduksi dunia kepada satu titik, kepada suatu massa yang homogen, kepada bentuk tanpa ciri dari Kesamaan: semua bagiannya itu akan beriringan bersama dan berkomunikasi dengan yang lainnya tanpa suatu jeda, dengan tiadanya jarak di antara mereka, seperti rantai logam yang disatu-gantungkan oleh sympathy kepada daya tarik suatu magnet yang tunggal.”

Namun demikian, *permainan pengertian* yang dikandung *sympathy* tidak akan lengkap tanpa *antipathy*. Pada *antipathy*, kita akan menemukan pengertian: “*mempertahankan isolasi sesuatu dan mencegah asimilasinya; hal ini menutup setiap spesies yang ada dalam perbedaan yang tak dapat dinetralkan dan kecondongannya untuk melanjutkan keber-ada-an sebagaimana adanya itu.*” Pada sisi ini, dicontohkan oleh Foucault dengan suatu kutipan bahwa tanaman itu memiliki “kebencian” atas tanaman lainnya, semisal mentimun dengan buah zaitun yang tidak dapat hidup berdampingan satu sama lain.¹⁹³

Demikian, kita telah melihat *episteme* keserupaan yang dijelaskan Foucault dengan 4 istilah perluasan. Berkenaan dengan paradigma *modelling*, keempat pengertian istilah tersebut telah tercakup dalam hal ini. Sebab, *modelling* tiada lain daripada *rekayasa untuk membuat sesuatu yang serupa*, baik dengan memperhitungkan aspek jarak dan ruang, sifat tiruan, kebertautan hubungan, hingga prinsip asimilasi yang ada pada permainan *sympathy*. Aspek jarak dan ruang ditangani dalam proses pengukuran atau *measurement*, sifat tiruan dan kebertautan hubungan diwujudkan dalam sistem fisikawi yang dibentuk untuk model, dan prinsip asimilasi diterapkan dalam fungsionalitas mesin yang hendak dibuat. Dalam *modelling* ini, diterapkan juga prinsip isolasi yang ada dalam permainan *antipathy*. Sebuah mesin komputasi analog itu adalah sistem yang terisolir dari kenyataan yang melingkunginya. Sehingga, penulis dapat mengatakan bahwa *modelling* adalah aplikasi teknologis dari *episteme* keserupaan.

Episteme kedua yang telah ditemukan dan diidentifikasi oleh Foucault dalam sains kemanusiaan adalah ***episteme kehadiran*** (*representation episteme*). *Episteme* kehadiran ini berkaitan dengan dua hal penting yang menjadi perhatian di abad Klasik, yaitu **identitas dan perbedaan** (*identities and differences*).¹⁹⁴ Apa yang disebut identitas dan perbedaan ini ditangani oleh suatu

¹⁹³ Foucault. *OT*, hal. 27.

¹⁹⁴ Foucault. *OT*, hal. 55.

cara yang disebut dengan **pengukuran** (*measurement*). Sebabnya adalah karena para pemikir abad Klasik ingin memahami segala sesuatu berdasarkan pada suatu **tatanan** (*order*) dan bukannya pada suatu **keserupaan** (*resemblance*) seperti yang telah dilakukan pada masa Renaisans. Dengan melakukan pengukuran, mereka akan dapat mengkonstitusi tatanan yang diinginkan melalui formulasi matematis. Inilah usaha untuk mewujudkan *mathesis* atau “*sains universal untuk pengukuran dan tatanan*”.¹⁹⁵ Namun demikian, usaha mereka ini menghadapi kendala ketika dihadapkan pada fenomena alam yang kompleks. Oleh karena itu, pencarian tatanan tidak hanya diformulasi dalam kerangka matematis melainkan juga dalam kerangka **tanda** (*sign*). Bagi para pemikir Klasik, tanda juga berarti: “keberhadiran *dari kehadiran itu ada sejauh hal itu dapat dihadirkan*.”¹⁹⁶

Dengan membangun sistem tanda ini, para pemikir Klasik mendapatkan kembali kemungkinan untuk memahami segala sesuatu dalam perspektif tatanan. *Taxinomia* pun lahir dalam rangka usaha ini. Selain *taxinomia*, para pemikir klasik juga memunculkan suatu ilmu yang akan melengkapi *mathesis* dan *taxinomia*. Ini disebut dengan *genesis* atau “*analisis dari susunan tatanan berdasarkan pada serangkaian hal yang empiris*”.¹⁹⁷

Pada semangat yang seperti inilah *episteme* kehadiran menemukan wujudnya. Ini karena *episteme* kehadiran tiada lain daripada pengetahuan atas sesuatu yang dihadirkan kembali melalui tanda atau sistem tanda. Dalam bahasa Foucault, hal ini dinyatakan demikian: “*Semua kehadiran itu dihubungkan sebagai tanda-tanda; semuanya bersama, kemudian membentuk, sebagaimana adanya itu, suatu jaringan yang lebih besar; masing-masingnya menempatkan dirinya sendiri dalam transparensinya sebagai tanda dari apa yang dihadirkan; dan tentu saja – atau lebih baik, dengan fakta yang seperti ini – tiada aktivitas khusus dari kesadaran yang bahkan dapat mengkonstitusi suatu penandaan*.”¹⁹⁸

Semangat *episteme* kehadiran yang serupa ini boleh dikatakan sejalan dengan paradigma *simulating*. Ini karena *simulating* adalah pelaksanaan dari

¹⁹⁵ Foucault. *OT*, hal. 62.

¹⁹⁶ Foucault. *OT*, hal. 72.

¹⁹⁷ Foucault. *OT*, hal. 80.

¹⁹⁸ Foucault. *OT*, hal. 72.

mathesis itu sendiri. Dunia digital yang merupakan tempat di mana paradigma *simulating* ini berada adalah dunia di mana segala sesuatu dapat dikonversi ke dalam tanda dan angka (0 dan 1 dalam dunia digital mewakili tanda dan angka itu sendiri). Bila segala sesuatunya telah dikonversi (digitalisasi), barulah simulasi dapat diwujudkan dan dihadirkan melalui mesin komputasi digital. Simulasi adalah *penghadiran* dari kenyataan itu sendiri sebagaimana diinginkan oleh para pemikir abad Klasik. Dengan demikian, *simulating* juga dapat dikata merupakan aplikasi teknologis dari *episteme* kehadiran.

Dalam *episteme* yang terakhir, oleh Foucault ini disebutnya dengan ***episteme penandaan*** (*signification episteme*). Sebab, pada abad Modern, bahasa telah menjadi sentral dalam pengkajian sains kemanusiaan. Meskipun begitu, sebelum bahasa menjadi sentral, dalam kajian sains kemanusiaan ada tiga model disiplin yang menjadi acuan untuk sains kemanusiaan. Pertama adalah ekonomi, kedua adalah biologi, dan yang ketiga adalah linguistik. Dalam ekonomi, apa yang dikaji terletak pada masalah **pekerja** (*labour*) dengan dua fokus utama, yaitu **konflik dan aturan** (*conflict and rule*). Biologi mengkaji masalah **kehidupan** (*life*) yang berfokus pada **fungsi dan norma** (*function and norm*). Sedangkan linguistik, kajian ini adalah kajian mengenai **bahasa** (*language*) dengan fokus pada **penandaan dan sistem** (*signification and system*).¹⁹⁹

Bahasa menjadi sentral dalam kajian sains kemanusiaan terutama disebabkan oleh karena kajian bahasa menyajikan sesuatu yang dibutuhkan dalam sains kemanusiaan. Ia menghadirkan konsep umum yang dapat diterima oleh sains kemanusiaan yang lain, yaitu: **struktur** (*structure*). Pada sisi ini, dengan hadirnya konsep struktur pada analisis bahasa dan juga dalam sains kemanusiaan secara umum, hubungan antara sains kemanusiaan dengan matematika terbuka kembali.²⁰⁰ Boleh dikatakan bahwa dengan terbukanya hubungan ini, suatu proyek *mathesis* yang pada awal abad XIX telah mengalami keretakan karena berpisah-nya sains analitis dengan sains empiris²⁰¹ menemukan jalan untuk terus bertahan.

¹⁹⁹ Foucault. *OT*, hal. 389-90.

²⁰⁰ Foucault. *OT*, hal. 416.

²⁰¹ Foucault. *OT*, hal. 268.

Selain apa yang dikatakan oleh Foucault ini, kita juga dapat melihat bahwa filsafat Barat pada awal abad XX memang berorientasi ke arah kajian bahasa. Di Inggris, kajian bahasa dimulai dari Bertrand Russell dalam kerangka formalisme bahasa menuju logika dan matematika. Di Jerman, kebutuhan untuk menjelaskan sang Ada membuat Martin Heidegger sangat fokus dan intensif dalam mengkaji bahasa. Di Perancis, gelombang kajian bahasa dimulai oleh kuliah-kuliah Ferdinand de Saussure yang menemukan kembali formulasi semiotis abad Klasik setelah lama dilupakan. Di Amerika, kajian bahasa menjadi sesuatu yang sangat penting kontribusinya ketika Noam Chomsky merumuskan teori bahasa Cartesianis.

Dalam kontribusi yang terakhir, takdir bahasa untuk berhubungan dengan proses komputasi diwujudkan. Sebab, Chomsky telah menyediakan jalan bagi para ahli komputasi untuk menyusun teorema komputasi berbasis bahasa formal. Ini digunakan dalam banyak konsep pemrograman, karena pemrograman tiada lain daripada suatu bentuk **rekayasa bahasa** (*language engineering*).²⁰² Sehingga, sekali lagi penulis dapat menemukan korelasi yang terutama antara *episteme* penandaan dengan paradigma *rebuilding* dalam genealogi komputasi.

Proses *rebuilding* ini tentu saja mengandaikan penandaan pada tingkat yang paling jauh. Suatu bentuk perluasan dari *taxinomia* itu sendiri. Misalnya ketika konsep *qubit* lahir dalam komputasi kuantum ataupun penggunaan kode genetik DNA, ATGC, sebagai modul penyimpanan data maupun sebagai elemen komputasi itu sendiri. Di sisi ini, penulis boleh mengatakan bahwa *rebuilding* adalah aplikasi teknologis dari *episteme* penandaan.

Setelah kita memahami bahwa paradigma komputasi ternyata berkorelasi secara penuh dengan tiga *episteme* pemikiran yang ada pada sains kemanusiaan seperti diungkap oleh Foucault, pertanyaannya yang kemudian adalah apakah dari korelasi ini akan menghasilkan suatu pembacaan mengenai kemungkinan paradigma atau *episteme* pemikiran baru? Nampaknya, bila pertanyaan ini yang diajukan, jawabannya akan menjadi sulit karena paradigma komputasi terakhir baru saja dilahirkan dan *episteme* penandaan baru meningkat “remaja”. Penulis

²⁰² Untuk pembahasan mengenai kontribusi Chomsky dalam komputasi, lihat dalam Badry. *Op.cit.*, hal. 515, terutama dalam kaitannya dengan **pohon sintaksis** (*syntax tree*).

tidak punya cukup data yang dapat diolah sebagaimana Foucault telah mengolah hal ini untuk episteme di abad Renaisans, Klasik, hingga Modern.

Akan tetapi, walaupun penulis tidak dapat memprediksi seperti apa kemungkinan hal ini, ada pertanyaan lain yang cukup penting untuk diajukan. Hal ini berkenaan dengan karakter subversif dari pengetahuan itu sendiri. Sebab, seperti telah disinggung pada sub bab 1.2., pengetahuan manusia dapat bersifat subversif sejauh itu dikorupsi oleh kekuasaan atau karena pengetahuan menjadi ranah permainan kekuasaan bagi manusia. Dalam konteks ini, pertanyaan yang diajukan akan terumuskan demikian: *Seperti apakah karakter subversif pengetahuan itu? Apakah ia merupakan karakter yang internal dari pengetahuan itu sendiri atautkah merupakan karakter eksternal yang masuk dalam ranah pengetahuan ketika bersinggungan dengan kekuasaan?*

Pertanyaan yang terakhir sebenarnya akan membawa kita pada suatu pemahaman yang lebih jauh mengenai hubungan antara pengetahuan dengan kekuasaan itu sendiri. Dalam kaitannya dengan masalah ini, penulis akan mengkaji bagaimana kekuasaan itu dipahami oleh manusia terlebih dahulu sebelum mengkaji hubungan pengetahuan dengan kekuasaan.

Semenjak Thomas Hobbes, kekuasaan dipahami sebagai sesuatu yang berada di luar diri manusia. Ia adalah sesuatu yang berada di ranah politik, sebuah lahan bagi manusia untuk memperebutkan kekuasaan itu sendiri. Artinya, kekuasaan adalah sesuatu yang seharusnya direbut dan diambil. Adagium *homo homini lupus* dari Hobbes telah menggambarkan pengertian ini.

Namun demikian, bukan perspektif kekuasaan seperti ini yang sebenarnya sedang penulis cari di sini. Penulis ingin mengkaji kekuasaan dalam kerangka *antroposentris* yang paling mendasar. *Antroposentris* di sini menunjukkan bahwa kekuasaan itu adalah sesuatu yang mendasar dalam diri manusia. Pada sisi inilah penulis bertemu dengan pandangan Friedrich Nietzsche tentang kekuasaan. Sebab, bagi Nietzsche, kekuasaan itu ada pada relung tersembunyi dalam diri manusia. Dalam hasratnya sebagai manusia, kekuasaan itu dimunculkan.

Nietzsche, di tahun 1888, mengatakan bahwa:²⁰³

“... kehendak berkuasa adalah bentuk primitif dari pengaruh, bahwa semua pengaruh yang lain adalah semata-mata perkembangan darinya;

bahwa hal ini perlu dicatat dengan jelas untuk menempatkan kekuasaan dalam konteks ‘kebahagiaan’ individual (setelah semua yang hidup diandaikan berjuang): ‘di sana ada perjuangan untuk kekuasaan, untuk meningkatkan kekuasaan’;—kesenangan itu hanya suatu gejala dari perasaan kekuasaan yang diperoleh, kesadaran akan perbedaan (—di sana tiada perjuangan untuk kesenangan: namun kesenangan terjadi ketika hal yang diperjuangkannya itu diperoleh: kesenangan itu adalah suatu pelengkap, kesenangan bukanlah motif—);

bahwa semua tenaga pendorong adalah kehendak berkuasa, bahwa di sana tiada tenaga psikis, dinamis, atau fisikawi kecuali hal ini.”

Menjadi jelas dengan apa yang dikatakan Nietzsche di atas ini bahwa setiap orang, setiap manusia memiliki **kehendak berkuasa** (*the will to power*) tanpa terkecuali.

Dalam kaitannya dengan hal ini, pengetahuan bagi Nietzsche adalah **sarana kekuasaan** (*tool of power*). Ia berkata: “pengetahuan bekerja sebagai sarana kekuasaan. Oleh karenanya, pengetahuan akan bertambah seiring dengan meningkatnya kekuasaan.” Pola pikir Nietzsche ini sekaligus mengandung *mathesis*. Sebab, ia mengatakan lebih jauh bahwa:²⁰⁴

“dalam rangka mempertahankan diri dan meningkatkan kekuasaan bagi spesies yang khusus ini, konsepsi atas kenyataan seharusnya cukup meliputi hal yang konstan dan dapat diperhitungkan karena hal ini akan menjadi dasar skema perilaku. Kegunaan pemeliharaan—bukannya kebutuhan teoretis abstrak, bukannya suatu penipuan belaka—berdiri sebagai motif di balik pengembangan organ-organ pengetahuan—mereka berkembang dalam suatu cara bahwa pengamatan mereka akan mencukupi untuk pemeliharaan kita. Dengan kata lain: pengukuran hasrat untuk pengetahuan bergantung pada pengukuran tumbuhnya kehendak berkuasa dalam suatu spesies: suatu spesies mendapatkan sejumlah pasti dari kenyataan dalam rangka menjadi penguasa atasnya, dalam rangka menekannya ke dalam pelayanan.”

Berdasarkan pada uraian Nietzsche ini, penulis dapat mengatakan bahwa kekuasaan ternyata merupakan bagian yang alamiah dalam diri manusia. Sebab, hasrat manusia pun berkecenderungan pada kekuasaan. Oleh karenanya, pengetahuan manusia juga dilaksanakan dalam terang kekuasaan.

²⁰³ Friedrich Nietzsche. *The Will to Power*. Trans. Walter Kaufmann and R. J. Hollingdale. New York: Vintage Books, 1968, hal. 366.

²⁰⁴ Nietzsche. *Ibid.*, hal. 266-7.

Namun, tidak demikian halnya Francis Bacon berpendapat dalam kaitannya dengan hubungan antara pengetahuan dan kekuasaan. Bagi Bacon yang mendahului Nietzsche, “*Ipsa scientia potestas est*”.²⁰⁵ Ini adalah sebuah adagium yang memiliki arti: “pengetahuan itu sendiri adalah kekuasaan”. Posisi Bacon justru memandang bahwa pengetahuan itu adalah wujud dari kekuasaan, atau pengetahuan = kekuasaan. Dengan posisi ini, Bacon mempengaruhi jalannya perkembangan sains di kemudian hari. Sebab, adagium ini dan karya-karya Bacon selanjutnya menjadi dasar bagi perkembangan sains modern. Ini karena Bacon juga telah meletakkan dasar-dasar metode ilmiah yang berbasis pada observasi, eksperimentasi, induksi, dan sikap kritis atas prasangka yang mungkin mempengaruhi penyimpulan ilmiah,²⁰⁶ seperti telah diakui pula oleh Nietzsche.²⁰⁷

Demikian, sains modern berpijak pada prinsip Baconian ini dan bukannya berpijak pada prinsip Aristotelian. Sehingga, sains modern dapat berkembang menjadi sains kontemporer seperti sekarang berikut teknologi yang juga menyertainya.²⁰⁸ Ini termasuk pula perkembangan yang terjadi pada komputasi DNA. Komputasi DNA adalah *cicit* langsung dari prinsip Baconian. Di sisi lain, bidang komputasi DNA ini juga dapat dikata merupakan warisan dari prinsip Pythagorean ataupun Platonian yang mengandaikan bahwa di balik segala sesuatu yang material terdapat gagasan dan kaidah matematis.²⁰⁹ Komputasi DNA adalah sebuah proyek baru dari *mathesis*.

Bila Bacon mengatakan hal yang serupa ini, Foucault pun memiliki gagasan senada dalam konteks ini walaupun agak berbeda titik tekannya. Ia tidak

²⁰⁵ Francis Bacon dikutip via Jon R. Stone. *The Routledge Dictionary of Latin Quotations: The Illiterati's Guide to Latin Maxims, Mottoes, Proverbs and Sayings*. New York: Routledge, 2005, hal. 49.

²⁰⁶ Christ Verhaak. “Francis Bacon: Perintis Filsafat Ilmu Pengetahuan”, 1990, dalam Tim Redaksi Driyarkara. *Hakikat Pengetahuan dan Cara Kerja Ilmu-Ilmu*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1993, hal. 13-9.

²⁰⁷ Nietzsche. *Op.cit.*, hal. 261.

²⁰⁸ Antonio Pérez-Ramos telah mencatat hal ini dalam bahasanya mengenai apa yang diwariskan Bacon pada kita. Warisan ini terletak dalam pepaduan antara kekuasaan teknologis dengan pengendalian teknokratis atas alam. Lihat pada Antonio Pérez-Ramos. “Bacon’s Legacy”, dalam Markku Peltonen, Ed. *The Cambridge Companion to Bacon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, hal. 312.

²⁰⁹ Lila Kari telah mengatakan hal yang berhubungan dengan prinsip Platonian ini secara jelas ketika ia diwawancarai tentang prospek pekerjaan yang berbasis pada komputasi DNA. Lihat wawancara Lila Kari ini dalam situs *Science Careers* yang ada di alamat:

mengatakan pengetahuan itu sama dengan kekuasaan. Ia lebih suka menyandingkan kekuasaan dengan pengetahuan yang ditulisnya sebagai **kekuasaan-pengetahuan** (*power-knowledge*). Relasi model ini, Foucault jelaskan demikian:²¹⁰

“Hipotesis yang bekerja adalah seperti ini: hubungan kekuasaan (bersama dengan perjuangan yang melewatinya atau lembaga yang mempertahankannya) tidaklah dengan sederhana memainkan suatu pemberian fasilitas atau menghalangi peranan yang berkesesuaian dengan pengetahuan; mereka tidak hanya menganjurkan atau mendorong hal tersebut, menyimpangkannya atau membatasinya; kekuasaan dan pengetahuan tidak diikat satu sama lain semata-mata melalui tindakan dari kepentingan dan ideologi; masalahnya lalu bukan pada penentuan bagaimana kekuasaan meng-subordinasi pengetahuan dan membuatnya melayani tujuannya atau bagaimana hal ini melupakan dirinya pada hal tersebut, mengesankan suatu pembatasan dan isi ideologis. Tiada pengetahuan yang dibentuk tanpa sistem komunikasi, registrasi, akumulasi, dan pemindahan yang juga merupakan bentuk kekuasaan dalam dirinya itu, terhubung dengan keberadaannya dan bagaimana hal itu difungsikan kepada bentuk lain dari kekuasaan. Tiada kekuasaan, pada sisi lain, yang diuji-coba tanpa dikeluarkan, ketepatan, penyebaran, atau pengeangan dari suatu pengetahuan.”

Apa yang coba Foucault jelaskan ini lebih mudahnya akan dipahami kalau hubungan kekuasaan-pengetahuan itu diibaratkan hubungan dua sisi dalam satu koin. Antara sisi yang satu dengan sisi yang lainnya tidak dapat dipisahkan. Sedangkan bila penulis menganalogikan konsep Bacon tentang pengetahuan = kekuasaan dalam contoh yang sederhana, ini dapat diibaratkan sebagai wajah seseorang yang memakai topeng. Sebab, bila *topeng* pengetahuan itu kita buka, maka kita akan melihat *wajah* kekuasaan itu di dalamnya.

Pada sisi ini kita dapat lebih mudah memahami gagasan Bacon dan Foucault. Keduanya sama-sama menegaskan bahwa pengetahuan itu akan mengandaikan kekuasaan meski dengan relasi yang berbeda. Bacon berada pada posisi seseorang yang mengedepankan *will to power*-nya, kalau penulis meminjam istilah Nietzschean. Sedangkan Foucault, ia justru mempertanyakan dan bersikap kritis atas *will to power*-nya ini. Namun begitu, seperti apakah rumusan *will to power* yang sebenarnya dapat kita baca pada gagasan Bacon di sisi ini?

<http://sciencecareers.sciencemag.org/career_magazine/previous_issues/articles/2001_02_02/noD0I.2886004746400048675>, diakses pada tanggal: 8 Juni 2011.

²¹⁰ Foucault. “Penal Theories and Institutions”, dalam Michel Foucault. *Ethics: Subjectivity and Truth. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Vol. I. Ed. Paul Rabinow. New York: The New Press, 1997, hal. 17. Selanjutnya disingkat menjadi *EWI*.

Gagasan Bacon pada konteks *will to power* ini muncul secara jelas dalam pernyataan yang dirumuskannya demikian:²¹¹

“Oleh karena manusia adalah penafsir dan agen alam; ia memahami dan melakukan sesuatu hanya sebanyak yang telah ia amati tatanan Alamnya dalam suatu pekerjaan atau dengan penyimpulan; ia tidak mengetahui dan tidak dapat melakukan yang lebih. Tiada kekuatan yang ada yang dapat menyela atau memecah matarantai sebab; dan alam itu ditaklukkan hanya dengan kepatuhan (nature is conquered only by obedience). Oleh karenanya, dua tujuan manusia ini, pengetahuan dan kekuasaan, suatu pasangan kembar, yang benar-benar datang untuk hal yang sama, dan pekerjaan-pekerjaan itu dipandu oleh ketidaktahuan sebab yang dapat membuat frustrasi Therefore those two goals of man, knowledge and power, a pair of twins, are really come to the same thing, and works are chiefly frustrated by ignorance of causes.

Perhatikan kata-kata Bacon dalam *“nature is conquered only by obedience”*. Ini jelas merupakan suatu pernyataan mengenai *will to power*.

Dengan memperhatikan gagasan Nietzsche, Bacon, dan Foucault, kini kita telah memahami secara lebih jauh hubungan antara pengetahuan dan kekuasaan. Namun demikian, apa relevansinya dalam memahami subversivitas dalam kerangka pengetahuan itu sendiri? Terutama, bila hal ini dihubungkan dengan gagasan Mark G. E. Kelly yang mengatakan bahwa sains dapat bersifat subversif oleh karena dikorupsi kekuasaan dan gagasan penulis sendiri yang menyatakan bahwa pengetahuan itu menjadi subversif bila permainan kekuasaan itu hadir dalam pengetahuan.

Pertama-tama, penulis harus menguji gagasan Kelly dalam kaitannya dengan pendapat Nietzsche, Bacon, dan Foucault (pendapat ketiganya bila disebutkan secara bersamaan akan disingkat menjadi pendapat NBF). Pendapat Kelly ini bila dilihat secara seksama akan nampak sebagai suatu pemisahan hubungan antara pengetahuan dan kekuasaan. Hal ini justru bertolak belakang dengan pendapat NBF. Sebab, ketiganya memandang pengetahuan dan kekuasaan sebagai sesuatu yang tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Oleh karenanya, penulis dapat mengatakan bahwa bukan dalam kerangka gagasan Kelly subversivitas epistemologis menemukan rumusannya.

²¹¹ Francis Bacon. *The New Organon*. Ed. Lisa Jardine and Michael Silverthorne. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, hal. 24. Penekanan berasal dari penulis.

Berikutnya, berkenaan dengan gagasan penulis yang menyatakan bahwa permainan kekuasaan itu dapat mengakibatkan subversivitas epistemologis, hal ini juga serupa dengan pandangan Kelly yang mengandaikan pengetahuan dan kekuasaan itu terpisah. Oleh karenanya, sehubungan dengan pendapat NBF, penulis dapat menolak rumusan yang demikian ini.

Lalu, seperti apakah rumusan subversivitas epistemologis yang tepat dalam kerangka pendapat NBF? Dalam konteks ini, penulis rupanya masih perlu belajar dari Bacon. Ini terutama berkaitan dengan konsep Bacon mengenai *idola* atau ilusi atau berhala. *Idola* ini menurut Bacon adalah sesuatu yang dapat menyesatkan kita dalam suatu pertimbangan ilmiah. Oleh karenanya, penulis perlu memperhatikan ini juga sekaligus mewaspadainya.

Pertama, *idola tribus*, yang diidentifikasi Bacon sebagai kesalahan yang bersumber pada manusia itu sendiri. Bahwa manusia itu adalah ukuran segala sesuatu, ini adalah sesuatu kekeliruan yang sangat. Sebab, semua persepsi bagi Bacon bersifat relatif. Pemahaman manusia itu ibaratnya adalah sebuah cermin tak rata yang menerima pantulan sinar dari sesuatu hal. Oleh karenanya, apa yang dipahami manusia dapat saja menyimpang atau terkorupsi oleh diri manusianya itu sendiri.²¹²

Idola specus adalah *idola* kedua yang menjadi perhatian Bacon. Pada konteks ini, Bacon mencatat bahwa setiap manusia memiliki *specus* atau gua-nya sendiri. Ini dapat menfragmentasi dan mengubah cahaya yang masuk dari alam. Artinya, pada sisi ini, manusia dapat terpengaruh oleh karakter yang unik pada dirinya, lingkungan, bacaan, otoritas yang ia hormati, atau karena impresi yang diterimanya. Selain ini, Bacon juga mencatat bahwa jiwa manusia dapat saja berbeda-beda di antara satu yang lainnya. Sehingga, pengetahuan yang dimiliki manusia itu tidak sempurna seperti dikatakan Herakleitos.²¹³

Jenis *idola* ketiga adalah *idola fori*. Ini berkaitan dengan persetujuan dan juga sekelompok orang. Misalnya, kita berhadapan dengan seorang tukang obat yang sedang menggelar dagangannya di *fori* (pasar). Ia meyakinkan kita bahwa

²¹² Bacon. *Ibid.*, Buku I. XLI, hal. 41.

²¹³ Bacon. *Ibid.*, Buku I. XLII.

obat yang dibuatnya ini manjur dengan kata-kata yang diucapkan dan bukan dengan pembuktian di laboratorium. Persuasi melalui kata-kata oleh tukang obat inilah yang oleh Bacon disebut bagian dari *idola fori*. Kata-kata yang disampaikan akan berpengaruh besar dalam pemahaman. Bila kita menggunakan kata-kata yang tidak tepat, tentunya ia akan menghalangi pemahaman itu sendiri. Kata-kata dapat melakukan “kekerasan” pada pemahaman dan mengaburkan segala sesuatunya.²¹⁴

Akhirnya, kita sampai pada *idola* terakhir yang dikemukakan Bacon. Ini disebutnya dengan *idola theatri*. Maksud Bacon dengan *idola theatri* ini adalah untuk mengkritik dogma filosofis ataupun aturan-aturan yang dianggapnya keliru. Bagi Bacon, dogma filsafat sebelumnya itu hanya mengajarkan suatu permainan dan hanya menampilkan pemahaman yang salah dan fiktional mengenai dunia ini. Kritik ini juga berlaku atas dogma yang dikembangkan dalam sekte-sekte religius. Ia melihat banyak kesalahan di sini karena prinsip dan aksioma sains pun dipertanyakannya. Bila semuanya (dogma filosofis, dogma religius, maupun prinsip serta aksioma sains) ini berasal dari tradisi ataupun kepercayaan semata, bagi Bacon hal ini dapat menjadi masalah dalam pemahaman dan pengetahuan manusia.²¹⁵

Dengan apa yang disampaikan oleh Bacon, terutama pada *idola theatri*, sebenarnya kita mendapati bahwa Bacon sedang melakukan sesuatu yang *subvert* atau *destroy authority*.²¹⁶ Bahwa dalam rangka untuk memperoleh pemahaman yang baik atau pengetahuan yang benar, pengetahuan dapat melakukan proses subversi tanpa henti. Sesuatu hal yang dilakukan oleh Nietzsche, Foucault, ataupun para pemikir lainnya dengan model pemikiran kritis. Inilah yang dinamakan subversivitas epistemologis atau proses kritik internal pengetahuan tanpa jeda. Ini pula yang membuat pengetahuan berkembang hingga sekarang ini.

Penulis dapat mengatakan pula bahwa subversivitas epistemologis adalah modus kekuasaan dari pengetahuan yang oleh Foucault disebut dengan strategi

²¹⁴ Bacon. *Ibid.*, Buku I. XLIII, hal. 41-2.

²¹⁵ Bacon. *Ibid.*, Buku I. XLIV, hal. 42.

²¹⁶ Pengertian *subvert* serupa ini diambil dari G. N. Garmonsway. *The Penguin English Dictionary*. Middlesex: Penguin Books, 1969, hal. 702.

kekuasaan. Pemahaman atas subversivitas epistemologis adalah pemahaman atas mekanisme kekuasaan yang bersifat sirkular. Inilah kenapa kekuasaan tidak bergantung pada agen seperti telah diingatkan Foucault dan juga oleh Bacon dengan *idola tribus*-nya.

Pemahaman subversivitas epistemologis dalam kerangka ini tentu saja mendatangkan masalah. Sebab, penulis seakan-akan bersebrangan dengan para humanis yang gencar melaksanakan kritik atas perkembangan sains dewasa ini yang cenderung akan merugikan alam dan manusia itu sendiri. Namun demikian, pada konteks ini, sebenarnya penulis boleh mengatakan bahwa kritik dari para humanis tiada lain dari bentuk subversivitas epistemologis itu sendiri. Ini karena kita memang tidak dapat mengatasi atau memegang kekuasaan itu sendiri. Kita hanya dapat ber-*exercise* dengan kekuasaan sebagaimana dibilang Foucault. Dalam kerangka *exercise* inilah, subversivitas epistemologis mendapat sokongan dari kita untuk bergerak ke arah kekuasaan yang seperti apa. Ibaratnya kita sedang memegang pisau dan terserah pada kita untuk melakukan apa dengan pisau itu. Inilah jenis dari *exercise* atas kekuasaan-pengetahuan.

Dalam sub bab selanjutnya, kita akan melihat suatu *exercise* kekuasaan-pengetahuan sebagaimana dilaksanakan pada komputasi DNA. Kajiannya ini akan mirip dengan apa yang telah dilakukan Foucault dalam mengkaji tubuh sebagai tempat untuk *exercise* kekuasaan. Ini dapat dibaca pada riset Foucault yang bertema kegilaan, seksualitas, kepenjaraan, hingga klinik.

4.3. Dari Normalisasi hingga Kemungkinan Model *Panopticon* Molekuler

Bila kita membaca judul sub bab ini, mungkin ada dua gagasan yang timbul. Pertama, hal ini berkaitan dengan pertanyaan mengenai apakah yang dimaksudkan normalisasi itu. Yang kedua, selain bertanya-tanya mengenai *Panopticon* itu apa, kita mungkin akan bertanya seperti apakah hubungan antara normalisasi dengan *Panopticon* bila keduanya ini harus dipahami dalam konteks kajian komputasi DNA. Jawaban atas hal ini akan menjadi uraian dalam paragraf-paragraf selanjutnya.

Normalisasi mudahnya dipahami sebagai proses pembuatan sesuatu menjadi normal. Dalam pengertian ini, istilah normal tentu akan dipahami sebagai

suatu keadaan ideal. Sesuatu keadaan yang berisi nilai atau norma. Jika ini yang dipahami, biasanya konteks asosiasi pembicaraannya ini akan terkait dengan permasalahan hukum. Meskipun masih ada keterkaitan, bukan ini yang menjadi fokus perhatian penulis di sini. Fokus perhatian penulis dalam pembicaraan mengenai normalisasi ini adalah dalam kerangka **kesehatan** (*health*) dan **pengobatan** (*medicine*).

Istilah normal dalam bidang kesehatan dan pengobatan sebagaimana telah dikatakan oleh Georges Canguilhem adalah “*istilah yang telah digunakan oleh abad XIX untuk menunjukkan prototipe skolastik dan keadaan yang sehat dari suatu yang organis*”.²¹⁷ Istilah normal ini oleh karenanya menjadi dasar bagi penentuan seseorang itu sehat atau tidak. Dalam perspektif ini, seorang yang sehat akan dikatakan berada dalam kondisi normal, sedangkan seorang yang tidak sehat akan dikatakan ia ada dalam kondisi **tidak normal** atau **abnormal**.

Padahal, sesuatu yang disebut normal itu tidak ada kalau tidak ada yang dinamakan sakit atau penyakit. Sakit atau penyakit itu mendahului normalitas itu sendiri. Oleh karena itu, manusia mencoba untuk mengatasinya dengan suatu teori dan akhirnya suatu sains. Sebagaimana dikatakan Canguilhem, “*untuk mengatur penyakit itu berarti mempelajarinya berkenaan dengan keadaan yang normal, dalam mana manusia yang hidup—yang mencintai kehidupan—ingin mendapatkannya kembali. Oleh karena itu, hal yang teoretis dibutuhkan, tetapi tetap menggunakan teknik yang lalu, untuk menyusun suatu patologi ilmiah dengan mengkaitkannya kepada fisiologi.*”²¹⁸

Apa yang dikatakan Canguilhem di sini membuat semuanya menjadi lebih jelas. Sebab, persis dalam kerangka inilah kepentingan komputasi DNA dilaksanakan. “*Kita seharusnya menyokong ilmuwan muda untuk berpikir secara konstruktif dan membangun lingkungan yang akan berbagi sumberdaya biologis, dengan suatu penekanan pada keselamatan (safety), sebagaimana telah dilakukan*

²¹⁷ Georges Canguilhem. *On the Normal and the Pathological*. Trans. Carolyn R. Fawcett. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1978, hal. 145.

²¹⁸ Canguilhem. *Ibid.*, hal. 12-3.

dalam program *International Genetically Engineered Machine (iGEM)*”, demikian kata-kata George Church dalam kutipan yang diberikan oleh Amos.²¹⁹

Bahwa komputasi DNA muncul karena kebutuhan untuk mengatasi masalah yang disebabkan oleh penyakit. Masalah ini adalah yang kita kenal sebagai **galat** atau **mutasi genetik** sebagaimana disampaikan dalam sub bab 2.4. iGEM atau lebih jauhnya adalah AIC adalah teknik atau cara yang dibuat oleh para saintis untuk mengatasi galat atau mutasi genetik tersebut. Boleh dikatakan pula bahwa iGEM atau AIC ini adalah proses *normalisasi* yang ada dalam konteks komputasi DNA. Ini karena sesuatu yang *abnormal* (galat atau mutasi) tidak dapat diterima oleh manusia yang pada dasarnya memang **mencintai kehidupan** (*loving life*).

Walaupun pada satu sisi kita dapat melihat bahwa maksud dari para saintis ini cukup “mulia” karena ingin menyelamatkan kehidupan, namun di sisi lain kita harus ingat pula bahwa ketika kita berada dalam wilayah pengetahuan, *exercise of power* adalah sesuatu yang harus kita perhatikan dengan seksama. Sebab, bagaimanapun juga, komputasi DNA merupakan jenis lainnya dari *exercise of power*.

Pada konteks ini, Foucault telah mengingatkan kita bahwa *exercise of power* pada tubuh bisa sangat berbahaya pula. *Exercise of power* ini dapat menghasilkan “kekerasan” yang berakibat fatal bagi manusia itu sendiri. Dalam kata-kata Foucault, ini dijelaskan sebagai berikut:²²⁰

“Para sejarawan pada masa yang lalu telah mulai menulis sejarah tubuh. Mereka mempelajari tubuh dalam lapangan patologi atau demografi; mereka telah mempertimbangkannya sebagai pusat nafsu dan kebutuhan, sebagai lokus dari metabolisme dan proses fisiologis, sebagai suatu sasaran dari serangan virus atau kuman; mereka menunjukkan proses historis nan luas yang terlibat dalam apa yang dilihat semata sebagai basis biologis dari keberadaan; dan apa yang seharusnya ditempatkan dalam sejarah masyarakat untuk ‘peristiwa-peristiwa’ biologis seperti peredaran dari basil, atau perluasan dari rentang-kehidupan. Namun, tubuh juga secara langsung terlibat dalam suatu lapangan politik; hubungan kekuasaan memiliki cengkraman tak langsung atasnya; mereka menginvestasikannya, menandainya, melatihnnya, menyiksanya, memaksanya untuk melakukan tugas, untuk pelaksanaan upacara, untuk memancarkan tanda-tanda. Investasi politis atas tubuh itu kemudian keluar batas, dalam kaitannya dengan hubungan yang timbal-balik; dengan suatu penggunaan ekonomis; hal itu diperluas sebagai tenaga

²¹⁹ Amos. 2006, *Op.cit.*, hal. 304. Penekanan kata “*safety*” berasal dari penulis.

²²⁰ Foucault. *DP*, hal. 25-6.

produksi yang dengannya tubuh diinvestasikan dalam hubungan kekuasaan dan dominasi.”

Perspektif ini dibuat Foucault ketika memahami abnormalitas pada konteks kepenjaraan. Dalam sisi ini, mereka yang “bersalah” karena sesuatu hal, harus dihukum. Ini karena pelanggaran adalah sesuatu yang *abnormal* dalam konteks bersosial. Penghukuman ini kemudian dilaksanakan pada tubuh dengan berbagai cara, yang salah satu di antaranya adalah **penyiksaan** (*torture*). Inilah bentuk kekerasan atas tubuh sebagai konsekuensi langsung dari *exercise of power* yang diterapkan pada tubuh.

Lalu, kalau begitu, seperti apakah “kekerasan” yang dapat dihasilkan oleh normalisasi pada konteks komputasi DNA? Sebenarnya, dengan pertanyaan ini, penulis cukup sulit menemukan jawaban yang tepat mengingat komputasi DNA beroperasi pada tingkat mikro atau molekuler. Ini berbeda dengan kasus tubuh di mana kita dapat mengatakan sesuatu yang dilakukan atas tubuh, seperti misalnya pada kasus **pembedahan** (*surgery*) ataupun **pemotongan** (*amputation*) yang dilaksanakan dalam bidang kesehatan dan pengobatan, adalah salah satu wujud “kekerasan” atas tubuh. Walaupun demikian, “kekerasan” ini boleh dikata merupakan sesuatu yang perlu dan diizinkan untuk dilaksanakan mengingat keselamatan pasien bergantung pada kedua proses tersebut.

Di tingkat molekuler, operasi yang dilakukan pada DNA seperti proses **belah** (*denaturation*), **potong** (*cutting*), **buang** (*discarding*), dan **tunda** (*pausing*), hal ini agak sulit untuk dapat dikatakan “kekerasan” semodel penyiksaan meskipun jenis operasinya adalah menghadirkan sesuatu yang negatif pada DNA itu sendiri. Sebab, DNA boleh dikategorikan “tidak hidup” karena ia merupakan jenis lain dari partikel atomik atau suatu susunan kimiawi. Kalaupun dapat dikatakan operasi ini adalah jenis lain “kekerasan”, maka apa yang dilaksanakan oleh komputasi DNA itu sudah melakukan “kekerasan” pada alam dan bukannya pada tubuh meski DNA adalah bagian tubuh pada tingkatan mikro. “Kekerasan” dalam komputasi DNA sebenarnya akan sebanding dengan yang disebutkan Foucault sebagai **pendisiplinan** (*discipline*).

Saat menganalisis teks dari P. Pinel yang menceritakan pengobatan raja George III dari Inggris yang mengalami kegilaan, Foucault melihat bahwa di sana

telah terjadi pergeseran kekuasaan dari semula **berdaulat** (*sovereign*) menjadi **terdisiplinkan** (*disciplined*). Raja George III harus *patuh dan tunduk* pada dokternya, dan bukan sebaliknya. Oleh karena itu, bagi Foucault, pendisiplinan itu adalah “*suatu kekuasaan yang fungsinya ini melalui jaringan kerja dan ketampakkannya atas mana hal ini ditemukan dalam kepatuhan dan ketundukannya pada seseorang yang menguji-cobanya secara diam-diam*”.²²¹ Inilah bentuk lain dari “kekerasan” atas tubuh.

Rumusan Foucault lainnya yang berkenaan dengan pendisiplinan diungkapkan dalam frase “politik teknologis atas tubuh”. Ia menjelaskannya demikian:²²²

“Di sana mungkin ada suatu ‘pengetahuan’ mengenai tubuh yang secara pasti bukanlah sains dari pemberlakuan suatu fungsi, dan suatu penguasaan atas tenaganya yang hal ini lebih daripada kemampuan untuk menundukkan mereka: pengetahuan ini dan penguasaan ini menyusun apa yang mungkin disebut dengan teknologi politis atas tubuh. Tentu saja, teknologi ini menyebar, jarang dirumuskan secara sinambung, suatu wacana yang sistematis; hal ini seringkali dibuat menjadi kecil-kecil dan terpotong-potong; hal ini mengimplementasikan sekumpulan metode dan peralatan yang tidak sama. Dipandang dari koherensi hasilnya, hal ini tidak lebih daripada suatu instrumentasi dengan berbagai bentuk. Lebih jauh, hal ini tidak dapat dilokalisasi dalam suatu tipe yang khusus dari aparat negara atau lembaga. Oleh karena mereka memiliki jalan lain untuknya; mereka menggunakan, memilih, atau memaksakan kepastian atas metodenya. Tetapi, dalam efek dan mekanismenya ini, hal itu disituasikan pada tahap yang benar-benar berbeda. Apa yang lembaga dan aparat operasikan adalah, dalam satu pengertian, suatu kekuasaan mikro-fisik, yang lapangan dari validitasnya ini disituasikan dalam pengertian antara pemberlakuan fungsi yang sangat dan tubuh mereka sendiri dengan tenaga mereka dan materialitasnya.”

Nampaknya, istilah ini dan rumusannya lebih sesuai dengan konteks komputasi DNA. Ini karena dalam konteks komputasi DNA, “teknologi” memainkan peranan sepenuhnya untuk memanipulasi dan merekayasa DNA. Penulis dapat mengatakan pula bahwa normalisasi yang ada dalam konteks komputasi DNA adalah politik teknologis yang diterapkan pada DNA yang tiada lain dari suatu *exercise* kekuasaan-pengetahuan secara penuh.

²²¹ Michel Foucault. *Psychiatric Power: Lectures at the College de France, 1973-74*. New York: Palgrave MacMillan, 2006, hal. 20-2. Penekanan berasal dari penulis. Karya ini selanjutnya disingkat menjadi *PP*.

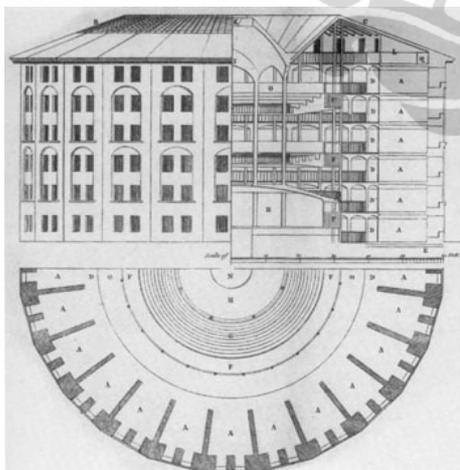
²²² Foucault. *DP*, hal. 26.

Bila normalisasi kini telah dipahami, pertanyaan yang berikutnya adalah: Apakah *Panopticon* itu? Hubungan seperti apakah yang dapat kita pahami antara normalisasi dengan *Panopticon*? Bagaimanakah semuanya ini dipahami dalam kerangka komputasi DNA?

Panopticon adalah istilah yang dipinjam Foucault dari Jeremy Bentham saat ia mendiskusikan bentuk penjara. Ini karena Bentham-lah yang menemukan konsep/model penjara yang sekarang ini banyak diadaptasi oleh penjara modern. Model penjara *Panopticon* dijelaskan Bentham demikian: “Suatu Bangunan yang Melingkar, atau bersisi banyak, dengan sel pada masing-masing tingkatnya yang membundar; di tengahnya, ada menara untuk pemeriksa, dari mana ia dapat melihat semua narapidana, tanpa dirinya itu terlihat, dan dari mana ia mungkin mengeluarkan semua arahannya ini, tanpa keharusan berhenti dari posnya ini.”²²³

Jadi, gambaran *Panopticon* adalah penjara yang bentuknya melingkar atau bersisi banyak. Di tengahnya, ada menara pengawas. Sel untuk para narapidana dibuat memutar dan menghadap ke menara. Agar lebih jelas, model penjara *Panopticon* yang dirancang Bentham ini dapat dilihat wujudnya pada gambar di bawah ini.²²⁴

1. Rancangan Penjara Panopticon



2. Penjara Presidio Modelo di Kuba



Gambar 4.11. Rancangan dan Bentuk Riil Penjara *Panopticon*

²²³ Jeremy Bentham. “Principles of Penal Law”, dalam John Bowring, Ed. *The Works of Jeremy Bentham*. Vol. I. New York: Russell & Russell Inc., 1962, hal. 496.

²²⁴ Sumber gambar berasal dari situs Wikipedia: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Panopticon>>, diakses pada tanggal 21 Juni 2011.

Berdasarkan pada model penjara *Panopticon* Bentham ini, Foucault kemudian merumuskan pengertian baru atas *Panopticon*. *Panopticon* adalah “suatu mesin yang mengagumkan, apa pun penggunaannya orang mungkin ingin menempatkan dirinya di sana, yang menghasilkan efek homogen dari kekuasaan.” Ia dapat menghasilkan efek: “untuk mempengaruhi si penghuni dalam keadaan yang sadar dan ketampakan permanen yang menegaskan pemberlakuan fungsi otomatis dari kekuasaan.”²²⁵

Selain merumuskan pengertian *Panopticon* yang baru dalam kerangka perspektif kekuasaan, ia juga mengetengahkan istilah lain yang berhubungan, yaitu: *Panoptism*. Dalam sebuah wawancara yang dilakukan oleh penyunting jurnal *Herodote* tentang geografi, ia menjelaskan *Panoptism* ini demikian:²²⁶

“Dengan istilah ‘*Panoptisme*’, saya berpikir suatu rakitan mekanisme yang dibawa ke dalam permainan dalam keseluruhan kelompok prosedur yang digunakan oleh kekuasaan. *Panoptisme* adalah penemuan teknologis untuk menghasilkan kekuasaan, yang dapat dibandingkan dengan mesin uap yang menghasilkan produksi. Penemuan ini memiliki kepelikan dari sesuatu yang dipergunakan mulanya pada tingkat lokal, dalam sekolah-sekolah, barak-barak, dan rumah sakit. Inilah di mana percobaan pengawasan yang terpadu diterapkan. Masyarakat belajar bagaimana menyusun suatu catatan atas sesuatu, sistem pengklasifikasian dan penandaan, suatu akuntansi yang terpadu dari rekaman individual. Kepastian prosedur tentu saja telah dimanfaatkan dalam ekonomi dan perpajakan. Namun, pengawasan yang tetap dari suatu kelompok atau murid-murid atau pasien adalah hal yang berbeda. Dan, pada satu momen yang pasti, metode ini akan digeneralisasi.”

Dengan penjelasan istilah *Panoptism* ini, bertambah lagi pemahaman kita akan suatu jenis lain dari *exercise of power*. Ini terdapat dalam pengertian istilah **pengawasan** (*surveillance*). *Panopticon* boleh dikatakan adalah suatu bentuk teknologi pengawasan ideal yang telah ditemukan dan dapat diwujudkan di abad XVIII. Dalam abad XX atau masa kontemporer ini, apa yang dirumuskan oleh Foucault ini nyatanya dapat diperluas dengan teknologi baru. Ini yang nantinya disebut dengan *e-Panopticon* (*electronic Panopticon*). *e-Panopticon* ini adalah perluasan teknologi pengawasan melalui bantuan media elektronik (khususnya komputer dan internet) dengan cara melakukan digitalisasi identitas segala sesuatu, baik itu benda hingga manusia. Kode bar dalam barang yang kita beli,

²²⁵ Foucault. *DP*, hal.201-2.

²²⁶ Foucault. “Questions on Geography”, dalam *PK*, hal. 71.

nomor register penduduk atau paspor yang kita miliki, juga kartu tabungan atau kartu kredit yang biasa kita gunakan untuk mengambil uang dan berbelanja adalah salah beberapa modus dari *e-Panopticon* ini.²²⁷

Selanjutnya, oleh karena *e-Panopticon* sudah dilaksanakan melalui proses digitalisasi, kemungkinan untuk pengembangan model *Panopticon* molekuler dapat dilakukan pula melalui komputasi DNA. Bibit yang serupa ini sebenarnya sudah dilakukan oleh MIT ketika mereka mengeluarkan produk yang disebut *biobrick*. *Biobrick* adalah paket rangkaian untai DNA yang telah ditentukan struktur dan fungsinya. Dalam *biobrick* ini terdapat “kode bar” selayaknya sebuah produk yang dijual di supermarket atau mall. Sehingga, identitas pengguna *biobrick* dapat dilacak dan diketahui jika terdapat masalah karena identitasnya ini telah teregister saat mereka membelinya dari MIT. Pihak MIT tinggal mencocokkan kode bar DNA yang bermasalah ini dengan nomor register yang sudah didaftarkan untuk mengetahui hal tersebut.²²⁸

Model *Panopticon* molekuler ini tentu saja dapat berupa iGEM atau AIC seperti yang telah dibicarakan ataupun bentuk yang lainnya. iGEM atau AIC ini hanya tinggal di-*implant* atau ditanamkan dalam organisme apa pun yang ingin diawasi, termasuk juga pada diri manusia. Dalam hal ini, proses implantasinya dapat saja dilaksanakan tanpa kita sadari saat tubuh kita sedang ada dalam *pendisiplinan* yang dilakukan oleh dokter atau siapa pun yang dapat melakukannya.

Namun demikian, meski ada kemungkinan-kemungkinan serupa ini, model *Panopticon* molekuler belum dapat secara efektif dibuat. Ini karena pada kasus politik teknologis atas DNA, walaupun sudah dilakukan, DNA dan elemen yang berkaitan dengannya belum dapat sepenuhnya dibuat patuh dan tunduk. Para pakar komputasi DNA baru dapat menghasilkan model komputasi DNA dan belum berhasil sepenuhnya mendisiplinkan DNA. Akan tetapi, bila mereka

²²⁷ Tentang kemungkinan *e-Panopticon* ini telah penulis rumuskan dalam Badry. *Op.cit.*, pada sub bab 2.1. Dengan uraian yang lebih luas dan mendalam, David Lyon telah pula membahas kemungkinan ini pada buku yang ditulisnya. Lihat dalam David Lyon. *The Electronic Eye: The Rise of Surveillance Society*. Minnesota: University of Minnesota Press, 1994, khususnya di bab 3 dan 4.

²²⁸ Lihat penjelasan mengenai *biobrick* ini dalam Amos. 2006. *Loc.cit.* dan dalam situs Wikipedia di alamat: <<http://en.wikipedia.org/wiki/BioBrick>>, diakses pada tanggal: 21 Juni 2011.

berhasil mengembangkan teknik pemrograman DNA seperti yang ada pada komputasi digital, maka pemrograman DNA akan menjadi modus baru dari perluasan kekuasaan yang dapat dicapai oleh manusia. Penulis tidak sedang berandai-andai ataupun bermimpi pada konteks ini. Sebab, nun jauh di laboratorium sana, mereka memang sedang bekerja keras untuk mewujudkan semuanya ini. Foucault pun hanya akan geleng-geleng kepala melihat semuanya ini terwujud kalau dia masih hidup. Betapa manusia sedemikian gigihnya dalam memenuhi semua *will to power*-nya ini.



BAB V

ETIKA *BIOTECHNE* MODEL *PARRHESIASTIC* DALAM KONTEKS RE-NURTURASI ALAM

Uraian-uraian terakhir di bab 4 mungkin terasa seperti dongeng. Oleh karena itu, para humanis dan etikawan nampaknya belum banyak menyadari hal ini. Selain itu, kajian komputasi DNA juga adalah bidang antardisiplin yang baru. Sehingga, walaupun para humanis dan etikawan ini memiliki *concern* pada etika rekayasa dan teknologi, kebanyakan di antara para humanis dan etikawan lebih berkonsentrasi pada persoalan etika yang ada di seputar pengobatan ataupun pada masalah bioteknologis (ranah *bioethics*). Sedangkan yang berkonsentrasi pada masalah-masalah etis dalam ranah komputasi lebih banyak bergulat dengan soal privasi atau hak cipta dan juga masalah keamanan (ranah *computer ethics*).

Untuk mengetahui bagaimana pendapat mereka mengenai komputasi DNA beserta kemungkinan-kemungkinan implikasi etisnya, jelas bukan hal yang mudah. Ini karena mereka tidak berbicara langsung mengenai hal ini. Meskipun demikian, usaha tersebut akan penulis coba dalam uraian yang meliputi hampir keseluruhan bab ini. Sebab, bagaimanapun juga, komputasi DNA akan mempengaruhi masa depan manusia itu sendiri dan juga alam. Seperti apakah kiranya formulasi pendapat etis yang akan didapatkan untuk kajian komputasi DNA, inilah yang akan penulis bahas dalam paragraf-paragraf selanjutnya.

5.1. Komputasi DNA dalam Perspektif Bioetika

Ketika menelusuri berbagai kepustakaan di bidang etika, penulis cukup kesulitan untuk menemukan pembahasan yang berkaitan dengan etika komputasi DNA. Namun demikian, akhirnya ada dua buku etika yang penulis temukan dan cukup relevan dengan konteks komputasi DNA. Kedua buku yang dimaksud ini

berjudul *Ethics, Computing, and Medicine* yang terbit pada tahun 1998 dan buku *Ethics, Computing, and Genomics* yang terbit pada tahun 2006.²²⁹

Setelah membaca sekilas kedua buku ini, penulis memutuskan untuk membagi dua perspektif etis yang ingin diuraikan oleh karena mempertimbangkan disiplin lain yang relevan dalam etika, yaitu etika informasi. Dua perspektif etika ini sama pentingnya karena komputasi DNA adalah konvergensi antara bidang biologi molekuler di satu sisi, dengan bidang teknologi informasi di sisi lainnya. Perspektif pertama dalam uraian sub bab ini adalah melihat kemungkinan implikasi etis komputasi DNA dalam kaitannya dengan bioetika. Sedangkan di sub bab berikutnya, penulis akan menguraikan implikasi etis komputasi DNA dalam hubungannya dengan etika informasi. Berikut adalah uraian yang dimaksud.

Bioetika adalah bidang kajian etis yang lahir dari kebutuhan praktis. Ia dibutuhkan sebagai panduan para akademisi atau praktisi dalam melakukan riset yang berkaitan dengan bidang **pengobatan** (*medical*). Oleh karenanya, rumusan etis yang dibuat tidak akan seketat dalam formasi etika Kantian, walaupun banyak dikembangkan dari formulasi ini. Rumusan paling sederhana dari prinsip etis yang dikembangkan dalam kajian bioetika adalah yang terdapat dalam *Belmont Report* yang dibuat oleh *National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research* di Amerika pada tahun 1978. Ini dirumuskan dalam kerangka kerja seperti dapat dilihat di bawah ini.²³⁰

Tabel 5.1. Prinsip dan Kerangka Kerja Bioetika Model *Belmont Report*

<i>Principle of</i> (prinsip dari)	<i>Applies to</i> (diterapkan pada)
<i>Respect for persons</i> (penghormatan untuk pribadi-pribadi)	<i>Informed consent</i> (persetujuan informatif)
<i>Beneficence</i> (kesamauntungan)	<i>Risk-benefit assessment</i> (perkiraan resiko-keuntungan)
<i>Justice</i> (keadilan)	<i>Selection of research subjects</i> (pemilihan subjek penelitian)

²²⁹ Buku yang dimaksud adalah buku dari Kenneth W. Goodman, Ed. *Ethics, Computing, and Medicine*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, dan Herman T. Tavani, Ed. *Ethics, Computing, and Genomics*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2006.

²³⁰ Dikutip dari Tom L. Beauchamp. *Standing on Principles: Collected Essays*, New York: Oxford University Press, Inc., 2010, hal. 21.

Secara sederhana, prinsip pertama dibuat untuk menghargai seseorang yang akan dilibatkan dalam suatu riset pengobatan dengan cara meminta persetujuan pada yang bersangkutan (*respect for persons*). Tanpa adanya persetujuan, riset pengobatan tersebut tidak dapat dilaksanakan. Dalam konteks ini, harus dipahami pula bahwa orang yang diminta persetujuan adalah orang yang memiliki kompetensi dalam memberikan persetujuannya ini. Bila orang ini tidak memiliki kompetensi dalam memberikan persetujuannya itu, maka prinsip ini akan mencegah secara langsung keterlibatan orang tersebut dalam riset yang dimaksud. Selain itu, orang yang akan dilibatkan ini harus mendapatkan informasi mengenai riset yang akan dilaksanakan secara transparan (*informed consent*). Dalam kaitannya dengan teori etika, prinsip pertama ini adalah suatu masalah yang disebut dengan **otonomi dan martabat pribadi** (*autonomy and personal dignity*).²³¹

Prinsip kedua, ini dipenuhi dengan adanya **keuntungan** (*benefit*) yang dapat diperoleh bagi orang yang terlibat dalam riset, maupun bagi kepentingan riset itu sendiri (*beneficence*). Caranya adalah dengan meminimalkan resiko yang mungkin terjadi dan tidak melakukan sesuatu yang dapat menyebabkan orang tersebut mengalami luka, cedera, atau kecelakaan (*harms*) pada saat riset dilaksanakan (*risk-benefit assessment*).²³²

Sedangkan prinsip yang terakhir, walaupun cukup abstrak, hal ini mengandaikan bahwa ada *fairness* yang memungkinkan orang yang dilibatkan dalam riset akan sama-sama mendapatkan keuntungan sekaligus menanggung beban yang terdapat dalam riset tersebut. Prinsip ini mengharuskan pula adanya pemilihan yang tepat bagi orang yang akan dilibatkan dalam menanggung beban ini (*selection of research subjects*). Sebab, dalam benak para penyusunnya ini, riset adalah suatu **usaha sosial** (*social enterprise*) yang dapat melibatkan banyak orang sekaligus dapat memberikan keuntungan bagi banyak orang.²³³

Namun demikian, ketiga prinsip ini masih dirasa kurang memadai dalam pandangan salah satu penyusunnya, Tom L. Beauchamp. Ia kemudian merefor-

²³¹ Beauchamp. *Ibid.*, hal. 21-2.

²³² Beauchamp. *Ibid.*, hal. 22.

²³³ Beauchamp. *Ibid.*, hal. 22-3.

mulasi tiga prinsip *Belmont Report* ini bersama James F. Childress menjadi demikian:²³⁴

- (1) *penghormatan atas otonomi* (suatu prinsip yang meminta penghormatan bagi kemampuan untuk pembuatan-keputusan dari pribadi yang otonom,
- (2) *nir-malapraktik* (nonmaleficence) (suatu prinsip yang meminta untuk tidak menyebabkan sesuatu yang mencelakakan orang lain),
- (3) *kesamauntungan* (beneficence) (sekelompok prinsip yang meminta bahwa kita akan mencegah sesuatu yang dapat mencelakai, menyediakan keuntungan-keuntungan, dan keseimbangan keuntungan yang akan mengurangi resiko-resiko dan biaya-biaya), dan
- (4) *keadilan* (sekelompok prinsip yang meminta penyebaran yang tepat atas keuntungan-keuntungan, resiko-resiko, dan biaya-biaya secara pas dan sesuai).

Keempat prinsip yang dikemukakan Beauchamp dan Childress memang terlihat lebih jelas dan lebih praktis bila dibandingkan dengan prinsip yang ada dalam *Belmont Report*. Ini mereka sebut dengan *prima facie binding* karena menggabungkan beberapa aspek etika Utilitarian (*beneficence*) dan Kantian (*autonomy, justice*).²³⁵

Dalam kaitannya dengan komputasi DNA, bila keempat prinsip bioetis ini diterapkan sebagai suatu perspektif, maka ada beberapa masalah yang muncul. Pertama, konteks penerapan *prima facie binding* ini adalah pada manusia, sedangkan DNA adalah partikel atau susunan kimia. Kedua, dari segi aspek otonomi terhadap *developer*, DNA boleh dikatakan tidak otonom. *Nonmaleficence* juga tidak dapat diterapkan pada kasus komputasi DNA mengingat proses **buang** (*discarding*) dilaksanakan begitu saja. Kalaupun boleh dikatakan ada *beneficence* yang didapatkan, itu berkenaan dengan proses perbaikan DNA yang rusak dan mutasi. Sedangkan yang terakhir, *justice*, ini tidak akan dapat diterapkan mengingat otonomi saja tidak ada.

Kesulitan ini kemudian bukan hanya terletak dalam penerapan *prima facie binding* dalam konteks komputasi DNA. Saat penulis membaca argumentasi yang diberikan Dan L. Burk tentang etika pemrograman kode biologis, yang justru muncul sebagai *concern* di sini apakah kode biologis itu dapat dipatenkan atau tidak, serta menjadi milik dari penemunya ini atau tidak. Dalam tulisannya ini,

²³⁴ Beauchamp. *Ibid.*, hal. 36.

²³⁵ Childress dalam Steinbock. *Op.cit.*, hal. 22.

Burk tidak berfokus pada etika pemrograman itu sendiri. Dalam kata-kata Burk, hal ini ditulisnya demikian: “*perkembangan yang menggunakan kendali teknologis seperti itu, apakah dalam piranti lunak atau jagung transgenik, telah membangkitkan perhatian oleh karena hal akan mengganti aturan-aturan privat yang teknologis dengan aturan-aturan yang ditetapkan undang-undang secara publik yang akan diumumkan oleh Kongres daripada dengan Copyright Act atau dengan Plant Variety Protection Act.*”²³⁶ Meski dapat dipahami bahwa Burk memang lebih mengarah pada persoalan hukum, namun kita sekali lagi kehilangan kesempatan untuk mendapatkan perspektif bioetis yang relevan untuk komputasi DNA.

Pada akhirnya, berdasarkan pada apa yang telah disampaikan, dapat dimunculkan suatu pertanyaan yang relevan: “*bagaimanakah status DNA dalam perspektif moral? Apakah DNA ini dapat dianggap sebagai subjek moralitas?*”. Ini karena perspektif bioetis yang ada dalam *prima facie binding* gagal diterapkan pada konteks komputasi DNA. Selain itu, kita juga gagal mendapatkan perspektif bioetis lain yang cukup relevan dalam konteks komputasi DNA ini.

Berkenaan dengan pertanyaan ini, penulis mungkin perlu meminjam perspektif lain yang lebih memadai. Salah satu kemungkinan yang dapat mengisi kekosongan perspektif ini berasal dari bidang *genethics*. Ini adalah bidang baru yang mengkaji genetika dalam kaitannya dengan etika. Pada konteks ini, *genethics* sebenarnya dapat disebutkan sebagai sub kajian dari bioetika karena ia masih merupakan kajian etis dalam ranah biologi dan pengobatan dengan fokus pada genetika.

Dalam kajian *genethics*, terdapat berbagai macam analisis. Namun, yang paling sesuai dengan pertanyaan yang dimiliki adalah kajian mengenai persoalan status moral gen yang ditulis oleh Mary Anne Warren. Dalam studi ini, Warren menelusuri apakah gen atau DNA itu dapat memiliki status sebagai subjek moral atau tidak. Ia mencatat beberapa pandangan etis yang berkaitan dalam menjawab

²³⁶ Dan L. Burk. “Lex Genetica: The Law and Ethics of Programming Biological Code”, dalam Tavani. *Op.cit.*, hal. 62. Argumen yang dimunculkan dalam karangan-karangan yang tersebar dalam buku suntingan Tavani ini juga dapat dikatakan belum menyentuh ranah komputasi DNA. Walaupun ada artikel dari John Weckert. yang berjudul “The Control of Scientific Research: The Case of Nanotechnology”, ia lebih membicarakan segi *policy* daripada etika. Lihat dalam Tavani. *Ibid.*, hal. 323-37.

pertanyaan ini. Ada empat teori utama, yaitu: (1) teori etis dari Albert Schweitzer yang mempertahankan pandangan bahwa semua organisme, dari mulai organisme satu sel hingga organisme kompleks, memiliki status sebagai subjek moral; (2) pandangan sebaliknya dianut oleh Immanuel Kant yang justru mengatakan bahwa hanya agen yang memiliki nalar moral dan bukannya organisme lainnya yang dapat menjadi subjek moral; (3) teori dari Peter Singer yang mengatakan bahwa yang dapat dikatakan sebagai subjek moral adalah yang memiliki kemampuan untuk *sentience* atau kemampuan untuk merasakan kesenangan dan sakit; serta yang terakhir adalah (4) teori Tom Regan yang menambahkan kriteria baru pada apa yang telah disampaikan Singer dengan ketentuan bahwa *sentience* itu dapat diperluas hingga kemampuan untuk dapat menggunakan aktivitas mental sebagai memori, antisipasi pada masa depan, dan tindakan yang mengarah pada pencarian tujuan yang disadari.²³⁷

Namun demikian, setelah panjang lebar dan mencoba untuk mengelaborasi jawaban dari empat teori tersebut berikut kemungkinan-kemungkinannya, Warren malah sampai pada kesimpulan bahwa DNA itu tidak dapat memiliki status subjek moral. Ini karena pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut.²³⁸

“Seperti halnya bagian tubuh yang lain, kromosom kita dapat tidak berfungsi dalam cara-cara yang membahayakan keberlangsungan dan kesehatan kita. Ketika hal ini terjadi, mengubah hal ini menjadi suatu pilihan moral yang sah—asalkan pengetahuan yang ada dapat melaksanakan ini secara aman, dan tanpa menyebabkan resiko kesehatan pribadi yang sekarang ini dan yang akan datang. Dengan cara yang sama, tanaman panen yang diubah genetiknya mungkin secara signifikan memberi keuntungan bagi pembiak dan konsumen. Di sana tiada alasan a priori untuk tidak mengizinkan pengubahan yang serupa itu—asalkan kita cukup mengetahui cara untuk menghindari resiko-resiko yang berhubungan dengan hal tersebut, seperti resiko terjadinya kontaminasi genetik pada spesies liar, atau timbulnya tahap yang membahayakan dari ketergantungan manusia atas tanaman panen yang telah diseragamkan secara genetik.

Sayangnya, kita jauh dari pengetahuan yang serupa ini. Apa yang kita butuhkan sekarang adalah bukan status moral yang baru untuk gen, tetapi apresiasi yang lebih luas atas sifat-mudah-luka (vulnerability) dari manusia dan organisme bukan manusia di masa yang akan datang, dan ekosistem alamiah, untuk pengembangan dan penggunaan teknologi genetika yang tak bijaksana.”

²³⁷ Mary Anne Warren. “The Moral Status of Gene”, dalam Justine Burley and John Harris, Ed. *A Companion to Genethics*. Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2004, hal. 148.

²³⁸ Warren dalam Burley and Harris. *Ibid.*, hal. 156-7.

Pada sisi ini, penulis dapat memahami argumentasi Warren bahwa status moral DNA bukanlah sesuatu yang perlu untuk ditetapkan. Namun, yang lebih penting adalah mengetahui *vulnerability* dari manusia dan organisme lainnya, beserta lingkungan sekitarnya. Ini dimaksudkan untuk menghindari pengembangan teknologi genetik yang tidak perlu atau tidak bijaksana.

Dari pembicaraan yang sudah disampaikan Beauchamp, Childress, Burk, hingga Warren, kita dapat melihat bahwa apa yang telah disampaikan pada pembahasan di bab 4, terutama di sub bab 4.3., belumlah menjadi kesadaran buat mereka ini. Begitupun hal yang senada ada dalam pembahasan buku *Ethics, Computing, and Medicine* yang disunting Kenneth W. Goodman. Bila dilihat dari tahun terbitnya ini di tahun 1998, kita akan menyadari kalau komputasi DNA yang pertama kali dipelopori Adleman di tahun 1994 belumlah menjadi sorotan yang cukup menarik dalam buku tersebut.

Lalu, apakah ada perspektif bioetis lainnya yang dapat dijadikan alternatif? Dalam pembahasan mengenai latar belakang di sub bab 1.1., penulis telah menyinggung suatu perspektif bioetis yang dirangkum dalam istilah “*playing God*”. Istilah ini bukan berasal dari Dyson dan Harris sebenarnya. Akan tetapi, istilah ini berasal dari Ruth Chadwick. Ia menulis masalah ini dalam suatu artikel yang diberi judul sama dalam jurnal *Cogito* 3, yang terbit pada tahun 1989.²³⁹

Menurut uraian dari Matti Häyry, argumen Chadwick dapat diringkaskan menjadi demikian:²⁴⁰

“Menurut analisisnya, keberatan bahwa suatu tindakan itu salah adalah karena itu adalah contoh dari permainan menjadi Tuhan yang memiliki dua makna berbeda dalam dua jenis setingan yang berbeda. Dalam konteks pengambilan-keputusan pengobatan yang sensitive, poin keberatannya adalah manusia itu tiada dalam posisi untuk menentukan secara sah mengenai masing-masing takdir orang lain pada dasar dari pertimbangan-pertimbangan kualitas-kehidupan. Dalam konteks teknologi pengobatan yang baru, sekali lagi, pokok inti persoalan argumentasinya adalah bahwa tindakan-tindakan itu dapat dijelaskan sebagai permainan menjadi Tuhan yang

²³⁹ Matti Häyry. “Categorical Objections to Genetic Engineering: A Critique”, dalam Dyson and Harris. *Op.cit.*, hal. 205. Dalam kaitannya dengan artikel Chadwick ini, oleh karena penulis tidak mendapatkan artikelnya langsung, maka penjelasannya bergantung dari ringkasan Häyry ini dan juga dari artikel pelengkap yang ditulis oleh William Grey. “Playing God”, dalam Ruth Chadwick, Ed. *The Concise Encyclopedia of the Ethics of New Technologies*. San Diego: Academic Press, 2001, hal. 336-41.

²⁴⁰ Häyry dalam Dyson and Harris. *Loc.cit.*

dapat mengarahkan kepada konsekuensi-konsekuensi yang tak terperkirakan dan membawa malapetaka. Dua aspek ini hadir dalam bentuk-bentuk yang pasti dari rekayasa genetis ...”

Kemudian, selain mengemukakan dua konteks yang ingin dicakup oleh analisis model “*playing God*”, ada tiga asumsi mendasar dalam mana analisis model ini bersandar. Pertama, hak prerogatif itu hanya dimiliki oleh Tuhan dalam memberikan kehidupan dan mengambilnya kembali. Kedua, manusia tidak berhak untuk campur tangan dalam suatu peristiwa alamiah, seperti misalnya dokter tidak diperbolehkan untuk turut campur dalam memutuskan kematian si pasien. Yang terakhir, dalam kasus yang berkenaan dengan hidup dan kematian, manusia tidak memiliki kualifikasi untuk menentukan kematian bagi manusia lainnya walaupun hidup kita dianggap lebih berharga.²⁴¹

Tiga asumsi dasar ini kemudian menghasilkan tiga kemungkinan yang dapat diandaikan. Pertama, adanya suatu pelanggaran batas tak nampak yang telah memisahkan dewa-dewa abadi dengan manusia yang fana. Dalam tradisi Yunani Kuno, orang yang melanggar ini disebut dengan *hubris*. Selanjutnya, alam lingkungan sekitar seharusnya menjadi batas-batas yang pasti untuk semua tindakan yang dilakukan manusia. Sedangkan yang ketiga, tindakan “*playing God*” ini dengan bantuan teknologi akan dapat menghasilkan konsekuensi-konsekuensi yang tak dapat diduga, tidak menyenangkan, dan tak dapat diperkirakan.²⁴²

Kemudian, bila analisis “*playing God*” memang seperti ini asumsi dan pengandaiannya, maka sebenarnya akan ada kesulitan bagi seseorang dalam mengaplikasikannya pada konteks komputasi DNA. Lalu, apa yang menjadi kesulitannya ini? Jawaban atas ini dapat dijelaskan dalam ilustrasi sederhana sebagai berikut.

Misalnya ada seorang ibu yang sedang hamil. Usia kandungannya sudah berjalan 9 bulan. Namun, oleh karena sesuatu hal, ibu yang hamil tersebut mengalami masalah dengan kandungannya ini. Si ibu berikut suami bergegas mendatangi dokter untuk mendapatkan solusi atas masalahnya ini. Berdasarkan pada analisis dokter, si ibu harus segera ditangani secara segera dan harus dirawat

²⁴¹ Häyry dalam Dyson and Harris. *Ibid.*, hal. 205-6.

²⁴² Häyry dalam Dyson and Harris. *Ibid.*, hal. 206-7.

di rumah sakit. Dalam masa perawatannya di rumah sakit ini, ternyata masalah dalam kandungannya itu semakin parah sehingga harus dioperasi. Dokter pun melakukan operasi dan terpaksa mengeluarkan si bayi sebelum waktunya tiba atau lahir prematur. Si ibu dan suami merasa lega karena akhirnya mereka dapat melihat si bayi diselamatkan.

Bagi kebanyakan orang pada masa ini, ilustrasi di atas tidak akan mengundang masalah. Namun, akan lain kiranya kalau digunakan analisis model “*playing God*”. Si dokter akan dikenai vonis sebagai *hubris* dengan cara apa pun tanpa memandang dia berjasa karena sudah menyelamatkan bayi dan ibunya. Ini karena si dokter telah melanggar asumsi pertama dan kedua dari analisis model “*playing God*” dengan turut campur untuk memutuskan operasi dan tidak membiarkan masalahnya itu terjadi secara alamiah. Dengan memperhatikan hal tersebut, bila analisis model “*playing God*” ini sudah bermasalah pada kasus yang dianggap bukan masalah, bagaimana bisa ia diterapkan dalam kasus seperti komputasi DNA?

Asumsi ketiga yang ada dalam analisis “*playing God*” mungkin masih dapat diterima dengan lebih baik. Namun tidak demikian halnya dengan asumsi pertama dan kedua. Asumsi pertama itu akan benar dalam perspektif religius. Namun, apakah manusia tidak boleh turut campur menyelamatkan jiwa sesamanya ketika mereka sedang ada dalam masalah yang berhubungan dengan hidup atau mati? Asumsi kedua justru menafikan hal ini dan membuat analisis “*playing God*” menjadi tidak berdasar karena mengingkari hal-hal paling fundamental dalam hubungan kemanusiaan. Sebab, walaupun ini bersumber dari agama, perbuatan tolong-menolong antara sesama dalam agama justru tidak pernah dilarang sebagaimana diandaikan dalam asumsi kedua. Analisis “*playing God*” akan merendahkan nilai agama itu sendiri dengan hadirnya asumsi pertama dan kedua bila tanpa dilengkapi asumsi lainnya seperti dicontohkan dalam perbuatan tolong-menolong yang dianjurkan oleh agama.²⁴³

²⁴³ Keberatan atas analisis “*playing God*” ini juga menjadi tema pokok dari dua tulisan yang telah dikutip. Lihat pada argumen Häyry dalam Dyson and Harris. *Ibid.* hal. 205-7 dan William Grey dalam Chadwick. *Op.cit.*, hal. 336-9.

Demikian, uraian analisis model “*playing God*” kembali gagal menjadi acuan dalam mengembangkan perspektif bioetis yang sesuai pada konteks komputasi DNA. Walaupun begitu, sebenarnya penulis masih dapat mencatat beberapa poin pokok dari berbagai perspektif bioetis yang telah disampaikan. Ini terkait dengan beberapa aspek dasar, yaitu: *harms*, *risks*, *consequences*, dan *playing*. Sebab, dengan pertimbangan bahwa komputasi DNA adalah jenis dari *exercise* kekuasaan-pengetahuan, empat aspek dasar ini cukup relevan untuk dipertimbangkan sebagai bagian dari elemen formulasi etis yang akan dikembangkan untuk perspektif etis komputasi DNA. Sebelum formulasi ini dilaksanakan, marilah kita tinjau terlebih dahulu perspektif etika informasi dalam kaitannya dengan komputasi DNA.

5.2. Komputasi DNA dalam Perspektif Etika Informasi

Etika informasi merupakan cabang etika yang sudah cukup lama dikembangkan. Namun, etika informasi ini baru mendapatkan perhatian yang terutama semenjak penggunaan komputer mendatangkan masalah-masalah yang berhubungan dengan persoalan etis. Adapun sang pionir, Norbert Wiener, ia tidak mengetahui bahwa ia sedang merumuskan suatu bidang etika baru yang disebut etika informasi pada saat ini. Wiener dianggap sebagai pionir dengan tulisannya yang berjudul *The Human Use of Human Beings* yang terbit pertama kali pada tahun 1950. Dalam buku ini, ia mencoba menguraikan implikasi sosial dari dikembangkannya disiplin baru, yang ia beserta koleganya merupakan para pelopor. Disiplin ini disebut dengan *cybernetics*.²⁴⁴

Dalam bukunya ini ia menjelaskan visi *cybernetics* itu sebagai berikut:²⁴⁵

“Cybernetics melihat bahwa struktur dari mesin atau organisme adalah suatu **indeks dari performa** (*index of performance*) yang mungkin dapat diharapkan dari hal tersebut. *Fakta bahwa keketatan mekanis dari serangga sedemikian rupa membatasi kecerdasannya sementara keberaliran mekanis dari manusia menyediakan perluasan kecerdasan yang hampir tidak terbatas itu benar-benar sangat relevan untuk pandangan buku ini. Secara teoretis,*

²⁴⁴ Argumentasi mengapa Wiener ini dapat disebut pionir dalam kajian etika informasi dapat dibaca pada tulisan Terrell Ward Bynum. “Milestones in the History of Information and Computer Ethics”, dalam Kenneth Einar Himma and Herman T. Tavani, Ed. *The Handbook of Information and Computer Ethics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008, hal. 26.

²⁴⁵ Norbert Wiener. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989, hal. 57. Penekanan berasal dari Wiener sendiri.

jika kita dapat membuat suatu mesin yang struktur mekanisnya meniru fisiologi manusia, maka kita akan dapat memiliki mesin yang kemampuan kecerdasannya ini akan meniru manusia juga.”

Dalam visi *cybernetics* ini, nampak dengan jelas bahwa Wiener memandang organisme itu identik dengan mesin. Keduanya dapat dipandang sebagai “*index of performance*”, dalam mana pandangan ini adalah suatu jenis dari kuantifikasi atau pengukuran yang dijelaskan Foucault sebagai *mathesis*. Selain itu, ia juga mengungkapkan kemungkinan pengembangan mesin yang akan dapat meniru kecerdasan manusia. Sesuatu yang boleh disebut dengan AIC kalau mengacu pada pembahasan sebelumnya di sub bab 4.1., walaupun perspektif Wiener lebih sederhana.

Namun demikian, selain memiliki perspektif di atas, ia juga menyadari bahwa pengembangan teknologi yang baru dapat menghasilkan **bahaya** (*danger*) yang dapat menghancurkan kemanusiaan. Ini dilihatnya dalam kerangka sosial dan juga spiritual. Ia menjelaskan hal ini demikian:²⁴⁶

“Kemudian, revolusi industri yang baru ini bagai pedang bersisi dua. Hal ini mungkin dapat digunakan untuk keuntungan kemanusiaan, tetapi hanya jika kemanusiaan cukup lama bertahan untuk masuk pada suatu periode dalam mana keuntungan yang seperti ini dimungkinkan. Hal itu juga dapat digunakan untuk menghancurkan kemanusiaan, dan jika hal ini tidak digunakan dengan cerdas, hal tersebut akan beranjak jauh dalam arah serupa itu. Di sana ada, bagaimana pun juga, tanda-tanda yang memberikan pada horizonnya. Semenjak terbitnya edisi pertama buku ini, saya telah ikut serta dalam dua pertemuan besar bersama para manager yang cukup mewakili, dan saya senang melihat bahwa sebagian besar menyadari hadirnya bahaya sosial dari teknologi kita yang baru dan kewajiban sosial dari para manager yang bertanggung jawab untuk melihat bahwa modalitas yang baru dapat dimanfaatkan untuk keuntungan manusia, untuk meningkatkan waktu luangnya dan memperkaya kehidupan spiritualnya, lebih daripada semata-mata untuk profit dan pemujaan atas mesin sebagai anak sapi perahan yang baru. Di sana masih banyak bahaya yang menanti, tetapi akar-akar kebaikan akan ada di sana juga, dan saya tidak merasakan sedemikian pesimisnya sebagaimana telah saya lakukan pada saat terbitnya edisi pertama buku ini.”

Bila kita membaca kutipan Wiener di atas ini, ia dengan jelas mengkhawatirkan kalau kehadiran mesin akan banyak menggantikan pekerjaan manusia. Sehingga, secara sosial, hal ini akan berakibat fatal karena manusia akan kehilangan pekerjaannya. Kekhawatirannya ini memang terbukti karena banyak pekerja pab-

²⁴⁶ Wiener. *Ibid.*, hal. 162. Penekanan dalam kutipan ini berasal dari penulis.

rik kini sudah diganti fungsinya oleh mesin dengan dikembangkannya teknologi *computer numerical control* (CNC) yang menjadi basis untuk penerapan mesin dalam industri manufaktur. Namun, harapannya bahwa mesin akan memberikan manusia **waktu luang** (*leisure*) dan **memperkaya kehidupan spiritual** (*enriching spiritual life*) justru malah tidak terwujud. Sebab, manusia kini menjadi lebih tambah sibuk dengan persaingan industri yang semakin kompetitif.

Meskipun harapan Wiener itu tidak terwujud, apa yang diwariskannya cukup penting untuk diperhatikan. Terutama, ketika ia membahas **keadilan** (*justice*) sebagai suatu kode moral. Dengan meminjam semangat Renaissance, yaitu: *liberté*, *egalité*, dan *fraternité*, ia merumuskan konsep keadilan sebagai: “*kemerdekaan dari masing-masing manusia untuk mengembangkan ukuran yang penuh atas kemungkinan-kemungkinan kemanusiaannya yang terwujud dalam dirinya ada dalam kebebasannya (liberté); kesejajaran dengan mana apa yang pantas bagi A akan juga pantas bagi B ketika posisi A dan B itu dapat dipertukarkan (egalité); dan suatu kehendak baik antara manusia dengan manusia yang mengetahui tiadanya batas-batas dari kemanusiaannya itu sendiri (fraternité)*”.²⁴⁷ Pada basis seperti ini, Wiener kemudian menambahkan penekanan bahwa: “*apa yang kemudian memaksa kehadiran yang sangat dari komunitas dan negara mungkin mempersyaratkan bahwa hal itu harus diuji dalam suatu cara yang tidak menghasilkan pelanggaran yang tak dibutuhkan atas kebebasan.*”²⁴⁸ Dengan empat penjelasan ini, ia ingin agar prinsip kebebasan sebagai prinsip dasar kemanusiaan menjadi motor utama dalam kehidupan bermasyarakat.

Dalam analisis Terrell Ward Bynum, apa yang disampaikan Wiener ini merupakan empat prinsip dasar untuk etika informasi. Prinsip *liberté* disebutnya sebagai **prinsip kebebasan** (*the principle of freedom*), *egalité* disebut sebagai **prinsip persamaan** (*the principle of equality*), *fraternité* disebut sebagai **prinsip kebajikan** (*the principle of benevolence*), dan penekanan Wiener yang terakhir disebut **prinsip pelanggaran minimum kebebasan** (*the principle of minimum infringement of freedom*).²⁴⁹ Dalam pandangan Bynum, keempat prinsip Wiener

²⁴⁷ Wiener. *Ibid.*, hal. 105-6. Penambahan poin dalam kurung diberikan oleh penulis.

²⁴⁸ Wiener. *Ibid.*, hal. 106.

²⁴⁹ Bynum dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 28-9.

ini dapat menjadi dasar bagi etika lintas budaya. Ia mengatakan hal tersebut demikian:²⁵⁰

“Wiener dapat menanggapi bahwa pertimbangannya atas hakikat manusia dan maksud dari kehidupan dapat mencakup dan terbuka pada suatu macam praktek-praktek dan budaya-budaya yang kaya sementara masih menyokong kesetiaan pada ‘prinsip keadilan yang terbaik’. Prinsip ini menawarkan suatu pendasaran bagi etika lintas budaya; dan mereka masih menyisakan ruangan—tentu saja, terbuka—bagi keberanekaragaman budaya yang sangat luas sekali.”

Lebih jauh, Bynum telah merumuskan metode analisis bagi etika informasi dalam kerangka pandangan Wiener ini. Ia menguraikan hal tersebut dalam 4 poin di bawah ini.²⁵¹

- (1) Kenali suatu pertanyaan etis atau kasus yang berkenaan dengan penyatuan teknologi informasi kepada masyarakat. Secara khas, hal ini akan difokuskan pada kemungkinan-kemungkinan yang dibangkitkan teknologi yang dapat secara signifikan mempengaruhi (atau sudah mempengaruhi) kehidupan, kesehatan, keamanan, kebahagiaan, kebebasan, pengetahuan, kesempatan, atau nilai-nilai kunci kemanusiaan.
- (2) Jelaskan setiap prinsip-prinsip atau gagasan-gagasan yang taksa atau samar yang mungkin dapat diterapkan untuk kasus atau isu yang dipertanyakan.
- (3) Jika mungkin, terapkan praktek-praktek, aturan-turan, dan prinsip-prinsip yang sudah ada dan dapat diterima secara etis (*‘kumpulan kebijakan yang telah diterima’*) yang mengatur tingkah laku manusia dalam masyarakat yang terberi.
- (4) Jika kebijakan-kebijakan, tradisi-tradisi, dan teladan-teladan yang dapat diterima secara etis tidak cukup untuk membereskan permasalahan atau menanggulangi kasusnya, gunakan maksud dari hidup kemanusiaan ditambah prinsip keadilan yang terbaik untuk menemukan jawaban yang sesuai dan paling mungkin dimasukkan ke dalam tradisi etik dari masyarakat yang terberi.

Dalam artikelnya yang lain, keempat poin ini ternyata dirumuskan dengan cara yang berbeda. Ia menguraikan metode analisis etika informasi Wiener ini dengan 1 poin tambahan dan membandingkannya dengan teori dari James Moor mengenai etika komputer. Berikut adalah uraian yang telah dikembangkan Bynum.²⁵²

²⁵⁰ Bynum dalam Himma and Tavani. *Ibid.*, hal. 29.

²⁵¹ Bynum dalam Himma and Tavani. *Ibid.*, hal. 30. Penekanan dari penulis.

²⁵² Bynum. “Norbert Wiener and the Rise of Information Ethics”, dalam Jeroen van Den Hoven and John Weckert, Ed. *Information Technology and Moral Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, hal. 22-3. Penekanan berasal dari Bynum. Penulis hanya menambahkan cetak tebal.

Langkah Pertama: Kenali suatu problem etis atau kesempatan yang positif berkenaan dengan penyatuan teknologi informasi ke dalam masyarakat. Jika suatu problem atau kesempatan itu dapat dilihat sebelum itu terjadi, kita seharusnya mengembangkan suatu cara untuk menyelesaikan problem atau mengambil keuntungan dari kesempatan sebelum dikejutkan—dan oleh karenanya tidak siap—oleh kemunculannya itu.

Langkah kedua: Jika mungkin, terapkan ‘kebijakan’ yang ada (yang Moor akan menyebutnya sebagai praktek-praktek, aturan-aturan, hukum-hukum, dan prinsip-prinsip), menggunakan penafsiran tradisional dan teladan untuk memecahkan problem atau untuk mengambil keuntungan dari kesempatan yang ada.

Langkah Ketiga: Jika kebijakan-kebijakan yang ada atau konsep-konsep relevan nampak taksa dan samar ketika diterapkan pada kesempatan atau problem baru, perjelas ketaksaan atau kesamarannya itu. (dalam bahasa Moor: kenali dan hilangkan ‘*lumpu-lumpur konseptual*’ (conceptual muddles).)

Langkah Keempat: Jika penafsiran dan teladan yang ada, termasuk penjelasan-penjelasan baru itu tidak mencukupi untuk memecahkan problem atau untuk mengambil keuntungan dari kesempatan, seseorang seharusnya memperbaiki kebijakan-kebijakan yang lama atau membuat yang baru, satu hal yang dibenarkan secara etis. (dalam bahasa Moor, seseorang seharusnya mengenali ‘kehampaan kebijakan’ (policy vacuums) dan kemudian merumuskan dan kebijakan-kebijakan yang dibenarkan secara etis untuk mengisi kehampaan tersebut.)

Langkah Kelima: Terapkan kebijakan-kebijakan yang sudah diperbaiki atau yang baru itu untuk memecahkan problem atau untuk mengambil keuntungan dari kesempatan yang ada.

Revisi elaborasi yang dilakukan oleh Bynum untuk metode analisis etika informasi Wienerian ini menunjukkan pandangan Bynum yang mengalami pergeseran secara signifikan. Dalam poin pertama, perbandingan atas kedua poin ini memperlihatkan bahwa aspek positif dari penerapan teknologi informasi dalam kehidupan masyarakat juga dipertimbangkan dari sebelumnya yang tidak menjadi perhatian. Poin kedua dalam rumusan pertama ditukar posisinya dengan poin ketiga dalam rumusan kedua dan poin ketiga dalam rumusan pertama justru naik menjadi poin kedua dalam rumusan kedua. Sedangkan rumusan keempat, ini diubah secara dramatis dengan menghilangkan pendasaran pada “prinsip keadilan” Wiener dan menggantikannya dengan “revisi kebijakan yang lama”, serta memecahnya ke dalam dua poin pengganti.

Pergeseran pandangan yang signifikan ini nampaknya mendapat pengaruh yang cukup besar dari Moor serta dari Luciano Floridi. Sebab, hanya dua teori dari mereka inilah yang benar-benar dipertimbangkan oleh Bynum dalam

artikelnnya yang kedua. Sedangkan pada artikel pertama mengenai sejarah etika informasi, Bynum menguraikan lebih banyak teori etika informasi yang muncul. Hal ini mungkin karena Bynum dapat melihat benang merah antara teori etika komputer Moor dan etika informasi Floridi dalam terang perspektif Wienerian.²⁵³

Untuk memahami teori Bynum ini juga sekaligus mengaplikasikannya pada konteks komputasi DNA, penulis akan menguraikan seperti apakah teori etika komputer dari Moor dan juga teori etika informasi dari Floridi terlebih dahulu. Pertama-tama, pada uraian awal akan dikemukakan penjelasan yang terutama berkaitan dengan istilah *conceptual muddles* dan *policy vacuums* dari Moor berikut uraiannya mengenai revolusi teknologi sehubungan dengan etika. Yang kedua, penjelasan akan difokuskan pada teori etika informasi dari Floridi.

Istilah *conceptual muddles* dan *policy vacuums* dari Moor adalah dua istilah yang saling melengkapi. Namun, dalam penggunaan istilah ini, Moor memaksudkan bahwa istilah pertama akan diandaikan oleh istilah kedua. Sebab, konteks penggunaan istilah *conceptual muddles* adalah dalam kerangka merumuskan **kebijakan** (*policy*). Dalam kata-kata Moor, istilah ini digunakan sebagai berikut: “*kita menemukan diri kita dalam suatu lumpur konseptual (conceptual muddle) dalam memahami materi yang dapat dimengerti dalam merumuskan dan membenarkan suatu kebijakan.*” Rumusan yang demikian ini muncul oleh adanya *policy vacuums*, yang ia jelaskan terjadi karena: “*teknologi baru membolehkan kita untuk menyelenggarakan kegiatan-kegiatan dalam cara-cara yang baru, situasi-situasi yang mungkin muncul dalam mana kita tidak memiliki kebijakan-kebijakan yang memadai yang dapat ditempatkan untuk memandu kita semua.*”²⁵⁴

“*New technology*” yang diidentifikasi Moor ternyata mirip dengan yang dicakup dalam nanolog, meski memiliki elemen yang berbeda, yaitu: teknologi informasi, teknologi genetika, nanoteknologi dan teknologi syaraf. Dalam merespon munculnya keempat teknologi ini, Moor merumuskan konsep yang disebutnya sebagai **revolusi teknologis** (*technological revolutions*). Dalam kaitannya dengan konsep ini, Moor juga telah mengidentifikasi elemen-elemen pembentuk-

²⁵³ Bynum dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 20-1.

²⁵⁴ James H. Moor. “Why We Need Better Ethics for Emerging Technologies”. 2005, dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 32-3.

nya, yaitu: (1) “paradigma teknologis adalah sekumpulan konsep, teori, dan metode yang memberi ciri pada suatu jenis teknologi”; (2) “perlengkapan teknologis adalah suatu bagian yang khusus dari teknologi”, dan (3) “pengembangan teknologis terjadi ketika paradigma teknologis ini dielaborasi dalam sudut pandangan konsep, teori, dan metode yang telah diperbaharui, atau contoh-contoh paradigma itu diperbaharui dalam sudut pandangan efisiensi, keefektifan, keamanan, dan yang sejenisnya”.²⁵⁵

Ketika ketiga elemen pembentuk ini menjadi satu, maka lahirlah yang disebut revolusi teknologis. Revolusi teknologis ini terjadi secara gradual atau bertahap. Dalam penjelasan Moor, ada tiga tahapan yang terjadi dalam revolusi teknologis. Tahapan itu adalah **tahapan pengenalan** (*introduction stage*), **tahapan penyebaran** (*permeation stage*), dan **tahapan penguasaan** (*power stage*). Ketiga karakteristik tahapan ini, bila diringkaskan dalam tabel, maka akan dapat dilihat sebagai berikut.²⁵⁶

Tabel 5.2. Tahapan Revolusi Teknologis Terbuka Moor

	Perkenalan	Penyebaran	Penguasaan
Perlengkapan	Langka	Terstandarisasi	Sangat Berpengaruh
Pengguna/pewaris	Sedikit	Terpilih	Banyak
Pemahaman	Elit	Terlatih	Biasa
Biaya penggunaan	Tinggi	Menengah	Rendah
Kebermanfaatan	Terbatas	Cukup	Tinggi
Penyatuan dalam Masyarakat	Kecil	Cukup	Besar
Dampak Sosial	Pinggiran	Tercatat	Signifikan

Keterangan:

Pada tabel ini, revolusi teknologis yang dimaksud adalah yang memiliki model terbuka (pengembangan ke arah teknologi massal). Namun, akan berbeda jika pengembangan teknologinya memiliki model tertutup (pengembangan ke arah teknologi privat).

Bila dilihat sepintas, mungkin karakteristik dari tahapan revolusi teknologis Moor ini sulit dipahami. Namun, agar lebih mudah memahaminya, hal ini akan diterap-

²⁵⁵ Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 27.

²⁵⁶ Untuk penjelasan ketiga tahapan revolusi teknologis ini, lihat pada Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 27-8, sedangkan tabel diambil dari hal. 28.

kan pada contoh yang dipinjam dari teknologi informasi (komputasi digital).²⁵⁷

Tabel 5.3. Tahapan Revolusi Teknologis Terbuka Moor untuk Komputasi Digital

	Perkenalan	Penyebaran	Penguasaan
Perlengkapan	ENIAC	IBM <i>PC 5150</i>	PC Prosesor Intel
Pengguna	Pakar	Pakar dan Mahasiswa	Masyarakat Awam
Pemahaman	Elit	Terlatih	Biasa
Biaya (Harga)	\$ 6 Million	\$ 1,600	\$ 200
Kebermanfaatan	Terbatas	Cukup	Tinggi
Penyatuan dalam Masyarakat	Kecil	Cukup	Besar
Dampak Sosial	Pinggiran	Tercatat	Signifikan

Dengan contoh di atas ini, kita sekarang dapat lebih mudah memahami tahapan revolusi teknologis Moor melalui contoh yang diambil dari komputasi digital. Lalu, bagaimanakah tahapan revolusi teknologis dari 3 bidang teknologi lainnya yang telah disebutkan Moor? Menurut Moor sendiri, teknologi genetika baru sampai pada tahapan penyebaran, belum sampai pada tahapan penguasaan. Begitupun juga dengan nanoteknologi dan neuroteknologi, kedua teknologi ini baru akan masuk pada tahapan penyebaran.²⁵⁸

Moor juga menambahkan bahwa keempat teknologi ini memiliki apa yang disebut dengan *malleability* dan *convergence*. Dua sifat ini merupakan benih yang pokok sebagai landasan bagi elemen-elemen pembentuk revolusi teknologisnya untuk berkembang. *Malleability* ini adalah kemampuan untuk melaksanakan suatu fungsi yang ditugaskan padanya dengan baik dan memaksimalkan rekayasa atas fungsi tersebut sesuai dengan apa yang diinginkan manusia. Misalnya, komputer memiliki *malleability* untuk menerapkan fungsi logika (*logic malleability*). Sedangkan 3 teknologi lainnya, ini akan memiliki *malleability* secara berturut-turut: *life malleability* (teknologi genetika), *material malleability* (nanoteknologi), dan *mind malleability* (neuroteknologi). Dalam hal nanoteknologi, *material malleability* di sini maksudnya adalah dengan nanoteknologi, kita dapat memiliki

²⁵⁷ Untuk harga komputer ENIAC, penulis mengambil datanya dari situs Wikipedia: <<http://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>>, dan untuk harga IBM *PC 5150* berasal dari situs IBM: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/pc25/pc25_intro.html>, keduanya diakses pada tanggal: 24 Juni 2011. Sedangkan harga PC berbasis prosesor Intel adalah kisaran harga minimal netbook.

²⁵⁸ Moor dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 34-5.

kemampuan untuk membentuk material apa saja yang kita inginkan pun dengan sifat-sifat yang kita kehendaki.²⁵⁹

Sedangkan *convergence*, pengertiannya ini sama dengan yang sudah penulis bahas dalam bab 5.2. Bahwa keempat teknologi yang disebutkan Moor ini akan dapat saling melengkapi satu sama lain dan bergabung menjadi satu. Sehingga, dengan dua karakter ini, ketiga teknologi yang sedang berkembang dengan pesat ini dapat dikata merupakan calon bagi revolusi teknologis berikutnya.²⁶⁰

Pada konteks inilah Moor kemudian memandang perlu untuk memikirkan perspektif etis yang lebih baik seperti diandaikan dalam penelitian ini. Sebagai langkah pertama, Moor kemudian menyusun suatu hukum yang diberi namanya sendiri sebagai berikut:²⁶¹

“Sebagaimana revolusi teknologi meningkatkan dampak sosial, problem etis juga akan bertambah”.

Kemudian, ia menyusun empat langkah strategis yang menurutnya perlu dilaksanakan dalam konteks ini. Berikut adalah langkah strategis yang telah disusun Moor.²⁶²

“Pertama, kita membutuhkan secara realistis untuk mengambil pertimbangan bahwa etika adalah usaha yang berproses dan dinamis.

Pembaharuan kedua yang akan membuat etika lebih baik akan disusun dengan kolaborasi yang baik di antara para teknolog, ilmuwan sosial, saintis, dan etikawan. Kita membutuhkan suatu pendekatan antardisiplin.

Pembaharuan ketiga yang akan membuat etika menjadi lebih baik akan dikembangkan dengan analisis etis yang lebih canggih. Teori etis itu sendiri seringkali terlalu sederhana dan tidak memberikan panduan lebih jauh untuk situasi-situasi yang khusus. Seringkali alternatif yang ada adalah melakukan pembantuan teknologis dalam sudut pandang analisis biaya-untung.

Yang terakhir, kita butuh untuk melakukan sesuatu yang lebih proaktif dan tidak reaktif dalam melaksanakan etika ini. Kita butuh untuk mempelajari tentang teknologi yang sedang berkembang dan diproyekkan, serta menaksir konsekuensi-konsekuensi yang mungkin dari berbagai penerapannya.”

²⁵⁹ Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 35-6.

²⁶⁰ Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 36-7.

²⁶¹ Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 37.

²⁶² Moor dalam Hoven and Weckert. *Ibid.*, hal. 38-9.

Demikian, langkah strategis ini merupakan penutup teori etika teknologis Moor dan bukan lagi suatu teori etika komputer. Perspektif teori etika komputer rupanya sudah dilepaskan dari pandangan Moor. Namun, berbeda dengan Moor yang sudah menyusun aspek strategis dalam teori etika teknologisnya ini, kita justru akan melihat yang jauh lebih abstrak dalam teori etika informasi dari Floridi. Sebab, Floridi ingin membuat teori etika informasinya dapat diterima sebagai suatu perspektif makroetis. Seperti apakah kiranya uraian Floridi ini? Dalam paragraf-paragraf selanjutnya, penulis akan membedahnya secara tuntas.

Sebelum masuk pada penjelasan mengenai teori etika informasi Floridi yang disingkatnya menjadi IE (*information ethics*), penulis akan menguraikan terlebih dahulu apa yang dimaksud Floridi sebagai *homo faber*, *homo sapiens*, *homo ludens*, dan *homo poieticus*. Keempat konsep manusia ini menjadi penting sebab IE dari Floridi mendasarkan pembahasannya pada konsep manusia yang terakhir.

Homo faber (manusia pekerja) adalah konsep yang sebenarnya berasal dari Karl Marx. Sebab, Marx memandang bahwa manusia itu memiliki eksistensinya dengan bekerja. Dengan bekerja pula, ia memiliki kemungkinan kebebasan untuk dirinya. Perspektif seperti ini, dalam kacamata Floridi, ditafsirkan sebagai usaha manusia untuk membebaskan dirinya dari waktu. Ini diupayakan dengan teknologi yang memaksimalkan penggunaan unsur-unsur fisik seperti nampak dalam teknologi penggilingan gandum. Teknologi penggilingan gandum yang memakai kincir air mereduksi waktu lebih cepat daripada harus mengolah gandum dengan menggilingnya menggunakan tangan karena tenaga yang dihasilkannya lebih besar. Teknologi seperti ini dinamakan Floridi dengan teknologi energi.²⁶³

Berbeda dengan *homo faber*, karakter *homo sapiens* (manusia cerdas) lebih banyak memaksimalkan penggunaan mental daripada fisik. Waktu ditanggulangi-nya dengan menggunakan efisiensi dalam mengelola pekerjaannya seperti dalam bidang manajemen atau melalui perhitungan yang akurat dan matang dengan ban-

²⁶³ Luciano Floridi. *Philosophy and Computing: An Introduction*. London: Routledge, 1999, hal. 219.

tuan mesin hitung. Dengan begitu, semua keterarahan pembebasan dirinya dari waktu terutama dikembangkan dengan teknologi informasi.²⁶⁴

Namun demikian, selain karakter *homo faber* dan *homo sapiens*, dalam diri manusia terdapat karakter lainnya, yaitu *homo ludens* (manusia main-main). Manusia adalah makhluk yang suka bermain-main seperti diungkapkan oleh Johan Huizinga. Dengan meminjam istilah Huizinga ini, Floridi kemudian menegaskan bahwa ketika ia ingin membebaskan dirinya dari waktu, manusia sedang berperan sebagai *homo ludens*. Sebab, keterarahan *homo ludens* adalah **waktu luang** (*leisure*). Ini dirumuskan sejak dulu secara mitis dalam kebudayaan dan agama. Surga, dalam tafsiran Floridi, adalah proyeksi dari keinginan manusia untuk menjadi *homo ludens* sepenuhnya. *Homo faber* dan *homo sapiens* adalah dua pilihan yang dapat diambil manusia untuk menjadi *homo ludens*.²⁶⁵

Kedua pilihan yang telah dirumuskan sebelumnya, yaitu menjadi *homo faber* atau *homo sapiens*, pada saat ini bukanlah pilihan yang menjanjikan. Ini karena perkembangan yang dibuat oleh teknologi modern. *Homo faber* terancam oleh proses otomatisasi dengan bantuan mesin seperti diandaikan Wiener. Sedangkan *homo sapiens* terancam oleh kemungkinan adanya *artificial intelligent* yang dibuat oleh manusia itu sendiri. Persis dalam konteks ini, manusia harus beranjak maju. Pilihan lain yang dimilikinya kini adalah menjadi *homo poieticus* (manusia kreatif). Sebab, tanpa kreativitas, ia tidak akan bisa menjadi *homo ludens* seperti yang sejak dahulu dicita-citakannya.²⁶⁶

Dalam kerangka *homo poieticus* inilah Floridi bergerak maju. Ia, seakan-akan sedang “membentengi diri”-nya dengan sekumpulan argumen dan gagasan dalam menghadapi segala kemungkinan terburuk. Sebab, dalam bayangan Floridi, di masa depan, *artificial agents* (agen buatan) atau AIC bukanlah sesuatu yang mustahil untuk dihadapi. Ia memang harus dihadapi karena manusia “akan” menciptakannya. Oleh karena itu, IE adalah “jalan keluar” dari “mimpi buruk” ini.

²⁶⁴ Floridi. *Ibid.*

²⁶⁵ Floridi. *Ibid.*, hal. 221.

²⁶⁶ Penjelasan ini berasal dari tafsiran penulis. Lihat dan bdk. dengan keterangan dari Floridi sendiri dalam Floridi. *Ibid.*, hal. 222-3.

Pada kutipan yang agak panjang dari Floridi di bawah ini, IE ini dipahami sebagai suatu **etika untuk segala sesuatu** (*ethics for everything*).²⁶⁷

“Dalam IE, wacana etis memusatkan perhatiannya pada setiap entitas, yang dapat dimengerti secara informasional, yaitu, bukan hanya seluruh pribadi, olahan-olahannya, kehidupan yang ada, dan interaksi sosial, bukan hanya hewan, tumbuhan, kehidupan alamiah yang sesuai untuknya, tetapi juga segala sesuatu yang ada, dari lukisan dan buku, hingga ke bintang dan batu; segala sesuatu yang mungkin atau aka nada, seperti generasi yang akan datang; dan segala sesuatu yang telah hadir tetapi tidak lagi ada, seperti para pendahulu atau peradaban masa lalu. IE itu imparisial dan universal karena hal ini membawa pelengkapan yang mendasar proses perluasan konsep yang mungkin dapat dipertimbangkan sebagai suatu pusat bagi klaim moral (tidak masalah betapa pun minimalnya), yang sekarang ini mencakup setiap contoh **ada** (being) yang dapat dimengerti secara informasional, tidak masalah apakah hal tersebut telah diimplementasikan apa tidak. Dalam semangat ini, IE menjaga setiap entitas, sebagai suatu ungkapan **ada** (being) memiliki martabat, yang disusun oleh modus keadaan dan esensinya (kumpulan dari semua kepemilikan mendasar yang menyusun hal itu untuk apa hal itu berada), yang berhak untuk dihormati (seidaknya dalam suatu pengertian yang tak dapat dikesampingkan atau minimal) dan oleh karenanya menempatkan klaim moral pada agen yang berinteraksi dan seharusnya menyumbang batasan dan pedoman dari perilaku dan keputusan etisnya. **Prinsip kesejajaran ontologis** (ontological equality principle) ini berarti bahwa setiap bentuk dari kenyataan (setiap contoh dari informasi/**ada** (being)), sederhananya fakta **keber-ada-an apanya itu** (being what it is), menikmati sesuatu hak yang sejajar, tak terkesampingkan, inisial, dan minimal untuk ada dan berkembang dalam suatu cara yang tepat dalam hakikatnya itu. Pengakuan yang sadar dari prinsip kesejajaran ontologis mengandaikan pertimbangan tanpa kepentingan atas situasi moral dari perspektif yang objektif, artinya, suatu perspektif yang sangat mungkin bersifat non-antroposentris. Perilaku moral rasanya kurang tanpa kebajikan epistemis ini. Penerapan prinsip kesejajaran ontologis ini dicapai bilamana tindakan-tindakan itu imparisial, universal, dan ‘merawat’ (caring).”

Proyek ambisius ini disusun oleh karena *bioethics*, *environmental ethics*, serta *land ethics* dianggap gagal untuk menjadi *impartial* dan universal. Apa yang tidak dapat dicakup oleh ketiga etika ini, kini dicakup sepenuhnya oleh IE dengan **prinsip kesejajaran ontologis** (*ontological equality principle*).

Setelah merumuskan IE yang serupa ini, pertanyaannya yang kemudian adalah bagaimanakah IE dapat dikatakan etis? Jawaban yang diberikan Floridi untuk ini sangat sederhana sekali. Ia mengatakan bahwa IE akan menjadi etis

²⁶⁷ Floridi. “Foundations of Information Ethics”, dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 12-3. Dengan penekanan yang sama, argumen ini diberikan pula pada Floridi. “Information Ethics: Its Nature and Scope”, dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 48 dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 85.

dengan memberikan pengertian “*morally qualifiable action*” (tindakan yang dapat dikualifikasikan sebagai moral) dalam kerangka analitisnya. Apa yang disebut “*morally qualifiable action*” adalah “*suatu tindakan yang dikualifikasikan sebagai moral jika hal ini dapat menyebabkan kebaikan moral atau kejahatan*”. Tindakan ini terdapat pada diri agen, baik manusia sebagai agen yang khusus, atau agen di luar manusia, termasuk *artificial agents*. *Artificial agents* bagi Floridi adalah: “*bukan hanya agen digital, tetapi juga agen sosial, termasuk perusahaan, partai, atau sistem campuran yang dibentuk oleh manusia dan mesin, atau manusia yang dapat diperbanyak secara teknologis*”, atau “*yang terinformasikan dengan cukup, ‘cerdas’, otonom, dan dapat melaksanakan tindakan-tindakan relevan secara moral dan terpisah secara independen dari manusia yang dapat membuatnya, yang menyebabkan ‘kebaikan buatan’ dan ‘kejahatan buatan’*”. Ini karena agen adalah **sesuatu yang dapat dimengerti secara informasional** (*being understood informationally*).²⁶⁸

Pada konteks ini, manusia menjadi agen khusus dengan tanggung jawab *ecopoietic*. Ini karena manusia adalah *homo poieticus*. Namun demikian, dalam kerangka IE, *homo poieticus* dirumuskan secara berbeda oleh Floridi. Sebab, bagi Floridi, *homo poieticus* kini menjadi: “*makhluk setengah dewa (demiurge) yang merawat kenyataan untuk melindunginya dan membuatnya berlangsung lebih baik*” dengan pertimbangan bahwa: “*kekuasaan ontik dari homo poieticus sudah semakin bertambah dengan mantap. Kini, homo poieticus dapat dengan berbagai cara mengujinya (dalam pengertian mengendalikan, membuat, atau memodelnya) melebihi dirinya sendiri (maksudnya, secara genetis, fisiologis, neurology, dan naratif), melampaui masyarakatnya (maksudnya, secara budaya, politik, sosial, dan ekonomi), dan melampaui lingkungan buatan atau alamiahnya (maksudnya, secara fisikawi dan komputasional)*”. IE oleh karenanya adalah suatu “*ethics of creative stewardship*” (etika mengurus secara kreatif).²⁶⁹

Floridi kemudian merumuskan secara lebih jauh lagi berkenaan dengan prinsip-prinsip moral yang akan menjadi landasan untuk IE. Rumusan prinsip

²⁶⁸ Floridi dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 14-5, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 52-4, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 86-7.

²⁶⁹ Floridi dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 16, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 58, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 91-2.

moralnya ini bertumpu pada dua istilah teknis, yaitu *entropy* dan *infosphere*. *Entropy* adalah “setiap jenis dari penghancuran, korupsi, polusi, dan menghabiskan objek informasional (pikiran, bukannya informasi), artinya, segala bentuk dari pemiskinan ada. Hal ini dapat diperbandingkan dengan konsep ketiadaan yang metafisis”.²⁷⁰ Sedangkan *infosphere* adalah “lingkungan informasional yang disusun oleh segala entitas informasional (termasuk agen informasional tentunya), miliknya, interaksinya, prosesnya, dan hubungan mutualnya”.²⁷¹ Oleh Floridi, *infosphere* kemudian dibagi menjadi 3 kategori, yaitu: **informasi-sebagai-sumber-daya** (*information-as-resource*) dan disingkat menjadi R, **informasi-sebagai-produk** (*information-as-product*) dan disingkat menjadi P, serta **informasi-sebagai-sasaran** (*information-as-target*) dan disingkat menjadi T. Sehingga, *infosphere* dapat disebut pula sebagai model R-P-T.²⁷²

Adapun prinsip moral yang dirumuskan Floridi dengan 2 istilah teknis ini adalah:²⁷³

- (1) *Entropy seharusnya tidak disebabkan dalam infosphere (hukum kekosongan);*
- (2) *Entropy seharusnya dicegah keberadaannya di dalam infosphere;*
- (3) *Entropy seharusnya dihilangkan dari infosphere;*
- (4) *Penyempurnaan entitas informasional begitu pun dengan keseluruhan infosphere seharusnya disokong oleh pemeliharaan, penumbuhan, dan pemerayaan apa yang dimilikinya.*

Dalam kaitannya dengan 4 prinsip moral dasar ini, suatu tindakan agen akan dapat dinilai dengan cara:²⁷⁴

- (a) *suatu tindakan yang patut dipuji tanpa syarat hanya jika hal tersebut tidak pernah membangkitkan entropy apa pun dalam proses pengimplementasiannya; dan*
- (b) *tindakan moral yang terbaik adalah tindakan yang berhasil memenuhi empat hukum yang ada pada saat yang bersamaan.*

²⁷⁰ Floridi dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 12, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 47, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 84.

²⁷¹ Floridi dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 3, pada catatan kaki no. 2.

²⁷² Lihat penjelasan lebih lengkap soal *infosphere* ini pada Floridi dalam Himma and Tavani. *Ibid.*, hal. 5-11, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 41-6, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 78-83.

²⁷³ Floridi dalam Himma and Tavani. *Op.cit.*, hal. 17, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 58-9, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 92.

²⁷⁴ Floridi dalam Himma and Tavani. *Loc.cit.*, Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 59, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 93.

Inilah teori IE dari Floridi, yang menurut hemat penulis, bukan lagi sebuah etika informasi tapi sudah berubah menjadi informatisasi etika. Walaupun Floridi menyanggah bahwa IE ini bukan reduksionisme tetapi adalah suatu bentuk minimalisme,²⁷⁵ namun kita dapat melihat betapa *being* diandaikan sebagai “sesuatu yang berharga” jika mereka dapat menjadi “informasi”. Informasi adalah sesuatu yang sangat abstrak dan hanya bersifat konseptual belaka sebenarnya. Ini karena informasi adalah hasil dari dua proses abstraksi manusia, yaitu kuantifikasi dan kualifikasi. Meskipun begitu, penulis akan melihat sejauh mana “keberhasilan” IE ini dalam menganalisis persoalan etis yang ada pada konteks komputasi DNA bersama dengan analisis teori etika informasi Wienerian dari Bynum dan etika teknologis dari Moor.

Analisis teori etika informasi Wienerian dari Bynum ini boleh dikatakan sangat praktis. Ini mengingatkan penulis pada perspektif bioetis sebagaimana telah dirumuskan oleh Beauchamp dan Childress, meski memiliki asumsi etis yang berbeda tentunya. Kemudian, sama halnya dengan apa yang telah penulis lakukan dalam menguji perspektif bioetis Beauchamp dan Childress, dalam paragraf-paragraf selanjutnya, penulis akan mencoba untuk menerapkan analisis etika informasi Wienerian pada kasus yang dihadapi saat ini, yaitu komputasi DNA.

Langkah pertama yang pokok dari analisis etika informasi Wienerian dari Bynum berbunyi: “*kenali suatu problem etis atau kesempatan yang positif berkenaan dengan penyatuan teknologi informasi ke dalam masyarakat*”. Pada poin ini, mungkin akan terasa sulit untuk diterapkan dengan hadirnya frase “*penyatuan teknologi informasi ke dalam masyarakat*”. Sebab, komputasi DNA bukanlah teknologi informasi. Ia merupakan gabungan teknologi informasi dengan bioteknologi dan juga nanoteknologi. Ada sesuatu yang “hilang” di sini dengan apa yang disampaikan dalam poin pertama.

Berikutnya, langkah kedua yang telah dirumuskan Bynum adalah: “*jika mungkin, terapkan ‘kebijakan’ yang ada*”. Dalam sub bab 5.1., apa yang disebut *Belmont Report* adalah suatu *policy*. Penulis telah mencoba menerapkannya

²⁷⁵ Lihat apologi untuk IE ini sebagai bentuk dari minimalisme pada Floridi dalam Hoven and Weckert. *Op.cit.*, hal. 60, dan dalam Floridi. 2010. *Op.cit.*, hal. 94.

dengan menggunakan perspektif bioetis Beauchamp dan Childress yang merupakan perluasan dari *policy* tersebut. Akan tetapi, usaha ini gagal karena cakupannya adalah manusia dan bukannya DNA. Ini mirip dengan langkah pertama usulan Bynum yang hanya mencakup efek dari teknologi informasi dan bukan gabungannya. Selain itu, perspektif tradisional atas ini tentu saja boleh dikatakan tidak ada. Ini karena komputasi DNA adalah teknologi baru. Walaupun analisis model “*playing God*” dapat dianggap sebagai perspektif tradisional, maka ini juga gagal untuk diterapkan.

Klarifikasi atas *policy* yang mendua dan kabur sudah penulis terapkan dalam menganalisis *Belmont Report* sebagai realisasi langkah ketiga seperti dirumuskan oleh Bynum. Sedangkan langkah empat, ini berkaitan dengan apa yang penulis lakukan sekarang. Langkah terakhir baru akan penulis lakukan setelah pengujian atas teori IE dari Floridi selesai dilaksanakan. Dengan selesainya langkah terakhir ini, penulis kemudian dapat mencatat bahwa dalam pengujian analisis yang diberikan Bynum untuk komputasi DNA boleh dikatakan bermasalah hanya pada langkah pertama saja. Sedangkan untuk empat langkah berikutnya boleh disebut *applicable*.

Analisis yang akan diuji selanjutnya beralih pada etika teknologis Moor. Tentang langkah pertama dan kedua, penulis mungkin akan sepakat dengan Moor bahwa perspektif etis merupakan suatu proses yang dapat diwujudkan dengan kerja sama antar para ahli dengan melakukan riset antardisiplin. Langkah ketiga Moor, ini sama dengan langkah keempat dari Bynum. Jadi, aplikasinya akan sama bahwa penulis sedang menyusun hal ini. Sedangkan langkah yang terakhir, bahwa kita harus proaktif, itu diwujudkan dalam riset komputasi DNA ini tentunya.

Pada sisi ini, apa yang disarankan Moor lebih kepada pendudukan atas dilakukannya analisis etis pada konteks komputasi DNA, karena Moor menyadari pula kemungkinan perkembangan yang akan terjadi dengan rumusan konvergensi teknologis yang disampaikannya. Sehingga, dalam menerapkan langkah strategis Moor, hal ini tidak akan banyak mengalami kendala. Berbeda dengan analisis dari Bynum yang cakupannya lebih sempit.

Akhirnya, penulis sampai pada pengujian yang terakhir, yaitu pengujian teori IE dari Floridi. Hal pertama yang mesti dilaksanakan adalah menguji apakah DNA itu dapat dimengerti secara informasional apa tidak. Pada konteks ini, seperti penulis sudah bahas dalam sub bab 2.2. dan sub bab 3.1., DNA terdiri 2 pasangan asam basa A-T, G-C, yang menyimpan kode informasi genetik makhluk hidup dan dipakai sebagai database informasi dalam percobaan yang dilakukan oleh Adleman. Oleh karena itu, DNA masuk dalam kriteria *being* yang ditetapkan Floridi.

Setelah kita mengetahui bahwa DNA dapat ditetapkan sebagai *being* dalam teori IE, berikutnya adalah penempatan DNA dan elemen-elemen komputasi DNA ini dalam 3 kategori yang telah dibuat Floridi dalam *infosphere*. Jika penulis melihat karakteristiknya dan unsur penggunaannya, DNA ini dapat ditempatkan pada kategori informasi-sebagai-sumber-daya. Sedangkan model komputasi DNA atau mesin komputasi DNA (yang dapat dibuat) ada pada kategori informasi-sebagai-produk. Adapun sistem informasi berbasis DNA atau AIC (yang dapat dibuat), ini masuk dalam kategori informasi-sebagai-target.

Dalam konteks DNA sebagai *being*, ia akan dilindungi oleh 4 prinsip dasar moral IE. Bila DNA diperlakukan dengan perbuatan yang dapat dianggap melanggar 4 prinsip dasar moral IE oleh agen yang memperlakukannya sebagai sumber-daya ataupun produk, maka agen yang memperlakukannya akan dikenai sanksi sesuai 4 prinsip dasar moral IE, yaitu *remove*. Pada konteks yang lebih jauh, penulis dapat mengklasifikasikan pula AIC sebagai *artificial agents*. Oleh karenanya, pada AIC ini akan dapat diterapkan 4 prinsip dasar moral IE. Bila tindakan AIC tidak terbukti menyalahi 4 prinsip dasar moral IE ini, maka AIC tidak akan dikenai sanksi *remove*. Namun, bila terbukti, maka akan dikenai sanksi *remove* secara total atau *remove* secara sebagian. Ini karena *entropy* hanya berkepentingan dengan tindakan yang dapat merusak atau menghancurkan *being* dan agen lainnya. Atau, dengan kata lain, penulis dapat *me-remove* bagian dari AIC yang mengakibatkan *entropy* selayaknya proses amputasi bagian tubuh manusia yang rusak karena kecelakaan.

Seperti inilah kira-kira penerapan dari teori IE dari Floridi pada konteks komputasi DNA. Kalau penulis nilai secara umum, teori IE Floridi “berhasil” menyelesaikan persoalan etis yang ada konteks komputasi DNA. Meskipun demikian, ada beberapa persoalan yang dapat penulis catat dan kritik. Pertama, bila agen yang memperlakukan DNA sebagai sumber-daya ataupun produk itu melanggar 4 prinsip dasar moral IE dan agennya ini adalah manusia, maka *remove* (menghilangkan) seperti apa yang akan dilakukan? Sebab, kita tidak dapat *remove* manusia seperti dapat diterapkan pada AIC misalnya. Kedua, apakah manusia sebagai *homo poieticus* dapat benar-benar melaksanakan tanggung jawabnya untuk *creative stewardship*? Bagaimana bila AIC itu “menggambil alih” diri manusia tanpa dapat diketahui oleh manusia lainnya? Catatan yang terakhir yang dapat penulis buat atas IE ini, skala *evil* macam apa yang dapat dibuat untuk mengakomodasi teori IE agar menjadi lebih praktis?

Demikian, secara umum, penulis telah menerapkan perspektif teori etika informasi pada konteks komputasi DNA yang diwakili oleh 3 teori yang sudah dibahas. Dalam penerapannya ini, perspektif teori etika informasi terlihat lebih *applicable* bila dibandingkan dengan perspektif bioetis dalam menangani problema etis yang ada pada konteks komputasi DNA. Meskipun begitu, sifat dari perspektif etika informasi ini mengandaikan bahwa dirinya lebih teoretis dan tidak praktis seperti ditunjukkan pada teori IE dari Floridi. Kalaupun ada langkah praktis yang diberikan dalam teori etika informasi seperti dikemukakan Bynum dan Moor, ini lebih pada langkah taktis dan tidak mencerminkan perspektif etis yang cukup kuat dan relevan. Oleh karenanya, dengan memahami kekurangan yang ada pada dua perspektif etis yang telah dibahas, penulis akan mencoba mereformulasi dua perspektif etis tersebut dalam terang analisis Foucauldian.

5.3. Genealogi Etik, Hasrat Re-Nurturasi Alam, dan Dua Pertanyaan Etis dari *Parrhesiastes* tentang Kehidupan

Apa yang disampaikan dalam dua sub bab sebelumnya dapat membawa penulis pada 3 aspek mendasar yang perlu dikaji dalam merumuskan perspektif etis untuk konteks komputasi DNA. Tiga aspek mendasar ini adalah (1) status moral DNA, (2) perspektif Foucauldian itu sendiri untuk konteks komputasi DNA

seperti telah disampaikan dalam bab 4 serta perspektif Foucauldian yang relevan, di antaranya konsep *Parrhesia*, dan (3) elemen teoretis apa saja yang dapat dielaborasi untuk perspektif etis dalam konteks komputasi DNA.

Seperti telah disampaikan dalam sub bab 5.1. sebelumnya, kajian Warren mengenai status moral gen boleh dikatakan gagal memberikan jawaban yang memadai untuk penulis pertimbangkan. Sebab, ia sampai pada kesimpulan bahwa gen itu tidak dapat memiliki status sebagai subjek moral. Atas usahanya ini, mungkin penulis dapat melengkapinya dengan kajian yang dilakukan oleh Johnny Hartz Søraker tentang status moral informasi dan teknologinya. Dalam kajiannya ini, menurut hemat penulis, Søraker cukup berhasil mengatasi kegagalan Warren dan menjadi alternatif perspektif etis yang lebih baik daripada meminjam teori IE dari Floridi yang hanya memandang bahwa *being* itu dimengerti secara informasional.²⁷⁶

Pertama-tama, kajian teoretis yang dilakukan Søraker adalah mengelaborasi pemikiran Jon Wetlesen (*biocentric*, biosentris), Christine M. Korsgaard (*practical identity*, identitas praktis), dan pemikiran yang berasal dari tradisi filsafat Cina. Dari Wetlesen, ia mengambil 4 elemen gradual untuk status moral makhluk hidup yang merupakan revisi dari gabungan 3 perspektif, yaitu: Kant, Regan, dan Singer, seperti telah diutarakan oleh Warren sebelumnya. Empat elemen gradual untuk status moral makhluk hidup yang dirumuskan Wetlesen dapat dibaca sebagai berikut.²⁷⁷

1. *Pribadi bermoral (singkatnya, saya kadang-kadang akan mengacu pada hal ini sebagai pribadi; dalam prakteknya, mereka ini hanya mencakup manusia saja)*
2. *Ada yang hanya setengah-sadar semata (misalnya, anjing)*
3. *Ada yang merupakan sentient semata (misalnya, ikan)*
4. *Entitas yang berjuang (hidup) semata (misalnya, mikroorganisme)*

Dari perspektif Wetlesen ini, Søraker lalu beranjak pada konsep *practical identity* sebagaimana dirumuskan Korsgaard. Istilah ini berarti: “*suatu penjelasan*

²⁷⁶ Johnny Hartz Søraker. “The Moral Status of Information and Information Technologies: A Relational Theory of Moral Status”, dalam Soraj Hongladaram and Charles Ess, Ed. *Information Technology Ethics: Cultural Perspectives*. Hershey: Idea Group Reference, 2007, hal. 1-19.

²⁷⁷ Dikutip *via* Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 3.

yang ada di bawah penilaian dirimu sendiri, suatu penjelasan yang ada di bawah penemuanmu atas kehidupan untuk mencapai kehidupan yang lebih berharga, dan tindakan-tindakanmu untuk mewujudkan sesuatu yang berharga”.²⁷⁸ Pencarian yang dilakukan Søraker dalam konsep Korsgaard ini disebabkan karena poin keempat yang diberikan Wetlesen hanya berlaku untuk makhluk biosentris dan bukan untuk benda. Sementara itu, dari Korsgaard, Søraker memahami bahwa dalam konsep *practical identity* ini terkandung elemen penting yang dapat melengkapi teori Wetlesen tersebut. Persoalan yang kemudian dihadapi Søraker adalah mencari properti etis yang dapat menjembatani agar sesuatu yang dianggap benda akan dapat berelasi secara etis dengan manusia dari sudut pandang konsep Korsgaard ini.

Setelah kembali pada bahasan atas gagasan Wetlesen mengenai *conation* sebagai fondasi untuk poin 4 di atas, Søraker melihat ada masalah di sini. *Conation* telah dirumuskan oleh Wetlesen sebagai “suatu perjuangan entitas untuk mempertahankan kehadirannya itu sendiri”.²⁷⁹ Dalam pengertian yang serupa ini, *conation* mengandung suatu unsur *capability*. Pada aspek ini, selain sependapat dengan Wetlesen bahwa *capability* dapat dijadikan ukuran bagi *degree of moral status* (tingkat status moral) dengan beberapa catatan, Søraker menolak untuk bersepakat dengan konsep *conation* yang dikemukakan oleh Wetlesen. Berdasar pada ini, Søraker mencoba untuk merumuskan kembali 3 poin yang diadopsi dari Wetlesen dengan perkecualian pada *conation*. Sebab, *conation* belum ia rumuskan secara lebih jauh. Berikut ini adalah reformulasi ulang 3 poin yang dibuat oleh Søraker.²⁸⁰

1. ***Pribadi Bermoral***: (memiliki kemampuan yang memuaskan untuk kehendak bebas, nalar, dan kompetensi linguistic) menikmati semua status moral yang sejajar dan penuh; tiada pribadi bermoral yang memiliki status moral lebih tinggi daripada yang dimiliki pribadi bermoral lainnya.
2. ***Ada yang hanya setengah-sadar semata***: (dengan tujuan dan rencana masa depan yang didasarkan pada pengalaman dan kepercayaan, serta dengan kemampuan untuk melihat dirinya sendiri sebagai agen sementara) memiliki status moral tetapi kurang jika dibandingkan dengan pribadi bermoral.

²⁷⁸ Dikutip via Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*

²⁷⁹ Dikutip via Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 4.

²⁸⁰ Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 4-5.

3. *Ada yang sentient semata: (dengan kemampuan untuk mengalami kesenangan dan sakit) memiliki status moral dengan baik, meskipun kurang jika dibandingkan dengan ada yang setengah-sadar dan lebih kurang lagi dari pribadi bermoral.*

Oleh karena perumusan *conation* masih dirasakan kurang sesuai bila berdasarkan diri pada perspektif filsafat Barat, Søraker lalu mencari inspirasi dalam tradisi filsafat Cina. Dalam tradisi filsafat Cina ini, ia menemukan rumusan Roger T. Ames yang mengatakan bahwa filsafat Cina itu memandang dunia ini sebagai “*di sana hanya ada satu dan inilah dunia yang konkrit dan sinambung*”. Oleh karena itu, pertanyaan yang muncul bukanlah mengenai “apakah sesuatu itu” sebagaimana lazimnya dalam filsafat Barat, namun bertanya: “*bagaimana objek-objek yang berbeda dalam dunia sinambung ini saling terhubung, dilihat dari tempat kita yang khusus di dunia ini*”.²⁸¹

Melalui perspektif filsafat Cina ini ia belajar bahwa ternyata “*banyak dari pertimbangan Barat mengenai status moral mewarisi metafisika kehadiran dengan kriteria yang non-kontingen dan objektif. Demikian pula, komponen intrinsik status moral dianggap berasal dan didasarkan pada properti intrinsik itu sendiri*”. Atas suatu pandangan yang serupa ini, ia kemudian bertanya: “*apakah di sana ada alasan yang cukup untuk mendasarkan status moral hanya pada properti intrinsik belaka?*”. Dari pertanyaan ini, Søraker kemudian memahami bahwa properti etis yang ia cari melalui konsep Korsgaard adalah berkaitan dengan *extrinsic properties*. Untuk memahami ini, ia memberi contoh bahwa lukisan Monalisa yang asli atau jasad dari orang yang kita cintai juga memiliki nilai. Pada lukisan Monalisa yang asli, tentu orang akan menilainya lebih berharga dari kita sendiri hingga sanggup merawatnya dengan hati-hati dan seksama. Kalau perlu, bila ada orang yang ingin merusaknya, maka orang ini akan dihukum dan dipenjarakan. Perspektif atas lukisan Monalisa juga dapat diterapkan pada jasad yang orang kita cintai. Sebab, kita tentu saja akan marah dan sedih bila ada orang yang membongkar makam orang yang kita cintai itu. Kita akan berusaha menghukum seberat-beratnya orang yang telah merusak dan membongkar makam

²⁸¹ Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 6.

orang yang kita cintai. Ini adalah **nilai relasional** (*relational value*), seperti Søraker katakan.²⁸²

Søraker akhirnya memperoleh 3 komponen nilai yang harus ia padukan, yaitu: **nilai intrinsik** (*intrinsic value*), **nilai relasional** (*relational value*), dan **nilai instrumental** (*instrumental value*). Tugas ini dilaksanakan dengan meminjam konsep *organic unity* (kesatuan organis) dari George E. Moore yang dimasukkan dalam konsep Korsgaard. Konsep *organic unity* yang dipinjam dari Moore terletak pada perumusan: “*nilai intrinsik dari suatu kesatuan organis (suatu keseluruhan) dapat berbeda dari nilai intrinsik bagiannya itu*”. Dengan memparafrasekan Korsgaard, ia merumuskan bahwa “*jika entitas yang telah terhubung itu tersusun untuk melihat hidup seseorang sebagai kehidupan yang berharga dan tindakan seseorang sebagai perwujudan yang berharga, maka kesatuan organis dari pribadi dan entitas yang terhubung memiliki nilai intrinsik yang lebih besar daripada pribadi itu sendiri*”. Sebagai *organic unity* dari seseorang, tentunya sesuatu dapat menjadi **tidak tergantikan** (*irreplaceable*). Misalnya, Otto mengalami kesulitan untuk mengingat sesuatu karena penyakit yang dideritanya. Ia lalu menggunakan *notebook* (laptop) untuk mencatat segala hal yang perlu ia ingat. Bagi Otto, *notebook* ini kini menggantikan fungsi memorinya dan tidak tergantikan, serta menjadi bagian yang integral dari identitas praktisnya.²⁸³

Pada posisi inilah ia akhirnya merumuskan teorinya mengenai status moral yang disebut dengan **teori relasional status moral** (*the relational theory of moral status*). Sehingga, ia dapat melengkapi 3 poin yang sudah dirumuskannya menjadi 4 poin pokok, yaitu:²⁸⁴

1. **Pribadi Bermoral:** (*memiliki kemampuan yang memuaskan untuk kehendak bebas, nalar, dan kompetensi linguistic*) menikmati semua kedudukan moral yang sejajar dan penuh; maka, status moral dari pribadi tidak dapat diperbesar oleh properti yang berhubungan.
2. **Ada yang hanya setengah-sadar semata:** (*dengan tujuan dan rencana masa depan yang didasarkan pada pengalaman dan kepercayaan, serta dengan kemampuan untuk melihat dirinya sendiri sebagai agen sementara*) memiliki kedudukan moral tetapi kurang jika dibandingkan dengan pribadi bermoral. Status moralnya ini dapat diperluas dengan properti

²⁸² Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 7-8.

²⁸³ Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 9-14.

²⁸⁴ Søraker dalam Hongladaram and Ess. *Ibid.*, hal. 15.

yang berhubungan, tetapi hanya secara minimal (misalnya, anjing yang dicintai dan punya majikan memiliki status moral yang lebih tinggi daripada anjing gelandangan).

3. **Ada yang sentient semata:** (dengan kemampuan untuk mengalami kesenangan dan sakit) memiliki kedudukan moral dengan baik, meskipun kurang jika dibandingkan dengan ada yang setengah-sadar dan lebih kurang lagi dari pribadi bermoral. Status moralnya ini dapat ditingkatkan secara signifikan dengan properti yang berhubungan (ikan yang dicintai dan punya majikan dapat memiliki status moral yang lebih tinggi dan signifikan daripada ikan liar).
4. **Entitas non-sentient:** tidak memiliki kedudukan moral tetapi dapat memiliki status moral dengan menjadi bagian yang tersusun dan tak tergantikan dari identitas praktis seseorang (misalnya, notebook Otto).

Demikian, kita melihat pada Søraker bahwa benda yang tidak memiliki ciri biologis pun dapat memiliki status moral. Bila hal ini dianalogikan dan penulis juga mengambil asumsi yang sama dengan Søraker, maka DNA pun akan memiliki status moral. Akan tetapi, penulis masih dapat mengidentifikasi bahwa pandangan Søraker ini cenderung Kantian. Ini karena benda yang dapat dianggap memiliki status moral itu menjadi demikian adanya dalam relasi dengan manusia itu sendiri (antroposentris). Selain itu, dalam pandangan Søraker, penulis juga dapat melihat bahwa mikroorganisme yang dipertimbangkan Wetlesen malah dianggap tidak lebih berharga daripada benda yang menjadi kesayangan atau memiliki fungsi pengganti dalam identitas praktis manusia. Catatan atas teori Søraker ini akan penulis pakai dalam mengelaborasi elemen teori etis yang akan dilakukan setelah penulis mempertimbangkan uraian dari Foucault.

Ketika penulis membaca Foucault, sebenarnya agak sulit untuk merumuskan keseluruhan perspektifnya atas persoalan etis. Meskipun demikian, dari berbagai tema yang ia kaji, satu-satunya frase yang dapat menghimpun semuanya ini adalah “*care of the self*” (merawat diri sendiri). Sebab, bagi Foucault, kegilaan, seksualitas, penjara, klinik, dan sains adalah berpusat pada *caring*, atau cara merawat/menangani. Empat konsep yang pertama adalah cara penanganan atas tubuh dan yang terakhir (sains) adalah cara penanganan yang ditujukan pada alam. Dalam kaitannya dengan ini, yaitu masalah *caring*, penulis akan memulai suatu problematisasi *caring* dalam perspektif etis. Maksudnya, sebagaimana Foucault memahami problematisasi ini, adalah pertanyaan kenapa *caring* ini menjadi

masalah. Problematisasi adalah bagaimana kita dapat memahami kenapa *caring* ini menjadi suatu hal yang dianggap masalah.²⁸⁵

Dalam sebuah wawancara mengenai “*care of the self*”, Foucault mengatakan bahwa: “*merawat diri sendiri itu adalah etis dengan sendirinya; tetapi hal itu mengandaikan hubungan yang kompleks dengan yang lainnya sejauh ethos kebebasan ini juga merupakan suatu cara untuk merawat orang lain. Inilah mengapa hal tersebut sangat penting bagi manusia yang bebas yang memimpin dirinya sendiri sebagaimana ia seharusnya dapat mengatur istrinya, anak-anaknya, dan rumah tangganya; ini juga merupakan seni mengatur. Ethos juga mengandaikan hubungan dengan yang lainnya.*”²⁸⁶

Pada kutipan di atas ini, kita dapat melihat bahwa etis bagi Foucault dikembalikan pada muasal katanya dalam bahasa Yunani, yaitu sebagai *ethos* atau “*suatu cara berada dan tingkah laku*”. Ini juga mengandaikan bahwa *ethos* harus berpijak pada prinsip **kebebasan** (*freedom*). Sebab, dalam konteks masyarakat Yunani Kuno, dia tidak akan bisa melakukan “*care for the self*” jika ia tidak bebas (menjadi budak) dan akan lebih banyak melakukan “*serve for the others*” (bentuk dominasi). Dengan kata lain, ia tidak memiliki pilihan untuk menjalankan *ethos*.²⁸⁷

Inilah *concern* Foucault yang sebenarnya, sekaligus menjelaskan kenapa ia sangat peduli pada segala bentuk relasi kekuasaan dan sekaligus mengkritiknya. Sebab, kekuasaan hanya akan mendatangkan dominasi pada prinsip kebebasan yang dipegangnya. Bagi Foucault, “*kebebasan itu kondisi ontologis untuk etika. Namun, etika adalah bentuk yang mempertimbangkan bahwa kebebasan akan diambil ketika hal itu diinformasikan melalui refleksi.*”²⁸⁸

Dengan arahan yang serupa ini, genealogi etik dari Foucault bersumber. Ia menjelaskan ada 4 aspek analitis yang mendasar untuk melakukan kajian

²⁸⁵ Problematisasi bagi Foucault adalah “*bagaimana dan mengapa sesuatu yang pasti (tingkah laku, fenomena, dan proses) itu menjadi suatu masalah*”. Pengertian ini diambil dari Foucault. *FS*, hal. 171.

²⁸⁶ Foucault. “The Ethics of the Concern for Self as a Practice of Freedom”, dalam Foucault. *EW1*, hal. 287.

²⁸⁷ Foucault. *Ibid.*, hal. 286.

²⁸⁸ Foucault. *Ibid.*, hal. 284.

genealogi etik. Aspek-aspek ini adalah: (1) *substance éthique*, yang diberi pengertian Foucault sebagai problem etis apa yang akan menjadi *concern*; (2) *mode d'assujettissement*, yang berarti suatu cara dalam mana masyarakat itu diundang atau didorong untuk mengakui kewajiban moralnya; (3) *l'ascétisme* atau *pratique de soi*, yang berkenaan dengan cara-cara apa supaya kita dapat mengubah diri kita menjadi subjek etis atau aktivitas pembentukan-diri; dan (4) *teleologie*, dalam mana hal ini merupakan pilihan macam apa yang akan kita perankan dalam suatu jalan moral.²⁸⁹

Sehubungan dengan 4 aspek analitis genealogi etik ini, Foucault memberi contohnya dengan menggunakan kajiannya atas seksualitas. Dalam masa Yunani Kuno, *substance éthique* adalah *aphrodisia* (terutama berkaitan dengan kesenangan dan hasrat), *mode d'assujettissement* adalah pilihan *politicoaesthetical* (maksudnya pilihan rasional yang dapat dilakukan terbagi 2, yaitu dengan politik dan juga estetik), *l'ascétisme* adalah *techne* (dalam konteks ini dimengerti sebagai *art* dan bukan *means*), dan *teleologie*-nya adalah menjadi tuan untuk dirinya sendiri.²⁹⁰

Dengan *concern* yang seperti inilah, Foucault akhirnya berlabuh pada konsep *parrhesia* atau persoalan tentang bagaimana seseorang itu berbicara mengenai kebenaran (*truth-telling*). Sebab, *parrhesia* ini dipahami Foucault sebagai praktek juga sekaligus *art* atau lebih tepatnya *askesis* dari “*care of the self*”. Dalam analisis Foucault, ada 3 *askesis* dalam mana *parrhesia* dapat dipraktikkan sebagai “*care of the self*”. Pertama, *parrhesia* sebagai *self-examination*. Dengan mengambil kasus teks *De Ira* (Tentang Kemarahan) dari Seneca sebagai model, Foucault menjelaskan bahwa Seneca telah melakukan suatu introspeksi atas kesalahan-kesalahan yang dilakukannya tiap hari sebelum ia berangkat tidur. Ini adalah jalan Pythagorean untuk memurnikan jiwa. Caranya adalah menggunakan metode **pengadilan** (*judiciary*) atas diri pribadi atau *speculator sui*. Namun demikian, walaupun ini adalah suatu pengadilan atas diri pribadi, Seneca tidak

²⁸⁹ Foucault. “On the Genealogy of Ethics”, dalam Foucault. *Ibid.*, hal. 263-5.

²⁹⁰ Foucault. *Ibid.*, hal. 266-7.

menghukum dirinya. Ia hanya berjanji dalam hati supaya esok hari perbuatannya yang salah itu tidak diulanginya kembali.²⁹¹

Kasus kedua yang diambil sebagai model *parrhesia* sebagai *self-diagnosis* masih berasal dari teks Seneca dengan judul *De tranquillitate animi* (Kedamaian atau Stabilitas Jiwa). Dalam teks ini, giliran Annaeus Serenus, sepupu muda Seneca, yang angkat bicara. Serenus datang kepada Seneca untuk berkonsultasi dan mendapatkan nasihat moral. Ini karena Serenus, sebagai seorang Stoic, masih mengalami ketidakstabilan jiwa. Dalam konsultasinya ini, Serenus telah membuat *verum fatear* (pengakuan kebenaran) pada Seneca. Ia berkata pada Seneca:²⁹²

“Meskipun demikian, keadaan dalam mana saya menemukan diri saya sendiri hampir seluruhnya—untuk kenapa saya tidak mengakui kebenaran kepadamu sebagai dokter?—adalah bahwa saya tidak dapat berterus terang dengan bebas dari sesuatu, yang saya benci dan takuti, pun tidak, pada sisi lain, apakah saya diperbudaknya; sementara kondisi dalam mana saya ditempatkan tidaklah buruk, meski saya mengeluh dan cerewet—saya tidaklah sakit ataupun merasa baik.”

Setelah membuat pernyataan yang demikian ini, Serenus kemudian menjelaskan kalau dirinya ini menjadi seperti yang dialaminya saat itu dengan panjang lebar pada Seneca. Artinya, Serenus boleh dikatakan sedang melakukan diagnosis dirinya pribadi di hadapan Seneca.

Parrhesia sebagai *self-testing* adalah *askesis* “*care of the self*” yang terakhir. Pada *parrhesia* ini, kasus yang diambil sebagai model adalah teks *Discourse* dari Epictetus. Apa yang dilakukan Epictetus sebenarnya sama dengan yang ada dalam kedua jenis *parrhesia* sebelumnya. Hanya, pada kasus Epictetus, aspek pengujiannya ini dilakukan dengan cara yang lebih intens. Sebab, ia menguji semua representasi yang dapat dihadirkan pada jiwa.

Bagi Epictetus masalahnya terletak pada bagaimana kita dapat mengetahui cara untuk membedakan representasi yang dapat seorang kendalikan dari representasi yang tidak dapat dikendalikannya, yang juga mendorong emosi, perasaan, atau perilaku yang tidak diinginkan, serta hal ini harus dikeluarkan dari jiwanya ini. Dalam kasus Epictetus, ia menggunakan dua metafor untuk

²⁹¹ Foucault. *FS*, hal. 145-9.

²⁹² Foucault. *FS*, hal. 150-2. Penekanan dari penulis.

menggambarkan apa yang sedang ia lakukan. Pertama, dengan menggunakan metafor penjaga malam. Sebagaimana penjaga malam lakukan, ia akan memeriksa identitas setiap orang yang masuk ke rumah dengan cara yang seksama. Kedua, tukang tukar-uang. Dalam metafor ini, Epictetus menguraikan bahwa ia akan memeriksa secara detil koin yang akan ditukarkan bila koinnya itu tidak dapat dibaca. Ia akan menimbanginya, meneliti kandungannya, memeriksa kadarnya, dan segala cara yang perlu diusahakan untuk mendapatkan nilai konversi koin tersebut.²⁹³

Demikian, tiga jenis *parrhesia* sebagaimana diungkapkan oleh Foucault sebagai suatu bentuk “*care of the self*”. Sehubungan dengan ini, mungkin perlu dikutipkan apa yang dimaksud *askesis* oleh Foucault ini agar lebih jelas bagi kita untuk memahaminya. Dalam penjelasan Foucault di bawah ini terlihat jelas bahwa *askesis* itu tiada lain daripada *techne tou biou* atau *art of living*.²⁹⁴

“... jenis baru dari permainan parrhesiastic—di mana problem itu dilawankan dengan kebenaran tentang dirimu sendiri—meminta apa orang Yunani sebut askesis [ασκησις]. Meskipun kata asketisisme diturunkan dari kata Yunani askesis (karena makna kata itu berubah sebagaimana telah diasosiasikan dengan berbagai praktek Kristiani), bagi orang Yunani kata ini tidak berarti ‘asketik’, tetapi memiliki makna lebih luas yang menunjuk pada setiap jenis ujian atau latihan praktis. Misalnya, hal itu telah menjadi biasa untuk mengatakan bahwa setiap jenis teknik atau seni telah dipelajari melalui *mathesis* dan *askesis*—pengetahuan teoretis dan latihan praktis. Dan, sebagai contoh, ketika Musonius Rufus berkata bahwa seni hidup, *techne tou biou*, itu serupa dengan seni lainnya, maksudnya, suatu seni yang tidak dapat dipelajari hanya melalui pengajaran teoretis, ia sedang mengulang ajaran tradisional. *Techne tou biou* ini, seni hidup ini, membutuhkan latihan dan praktek: askesis.”

Jadi, secara keseluruhan, etik bagi Foucault dapat penulis simpulkan sebagai *askesis* atau *techne tou biou* yang dilaksanakan dengan model *parrhesiastic*.

Berdasar pada apa yang telah disampaikan sebelumnya, dari mulai perspektif bioetis hingga perspektif Foucauldian ini, membuat kita mungkin lebih menyadari bahwa perspektif etis adalah multitafsir. Ini bergantung pada pemahaman dan pengetahuan orang yang menyampaikannya, selain bergantung pada konteks yang menjadi pusat perhatiannya. Dalam kaitannya dengan

²⁹³ Foucault. *FS*, hal. 160-1.

²⁹⁴ Foucault. *FS*, hal. 143.

kemultitafsiran ini, penulis akan melakukan beberapa pilihan reformulatif yang dianggap relevan sesuai dengan maksud diuraikannya sub bab ini. Namun demikian, sebelum melakukan itu, perlu diberikan dahulu genealogi etik atas komputasi DNA agar masalahnya menjadi lebih jelas.

Dalam uraian mengenai Foucault, penulis sebenarnya telah menetapkan *substance éthique* melalui problematisasi *caring*. Sebab, apa yang dilakukan dalam komputasi DNA, ini juga berhubungan dengan masalah *caring*. Komputasi DNA, sebagaimana telah disampaikan dalam bab 3 dengan jelas, boleh dianggap sebagai proses yang dilakukan untuk *menangani* DNA sebagai mesin komputasi. Namun demikian, kenapa hal ini dapat ditafsirkan demikian dan juga dapat dikatakan berhubungan?

Ini karena manusia modern terutama terobsesi dengan teknik. Sebab, kini teknik dimengerti sebagai *tools*. Dalam pengertian serupa ini, *tools* yang dimaksud dibuat sebagai perpanjangan dari tubuh manusia itu sendiri. Dalam teknologi yang paling sederhana misalnya, palu adalah perpanjangan dari tangan, roda adalah perpanjangan dari kaki, dan teleskop adalah perpanjangan dari mata. Semua *tools* ini membantu manusia untuk mengembangkan kapasitas dirinya. Persis seperti yang diungkapkan oleh Søraker dengan contoh Otto dan *notebook*-nya. *Notebook* di sini juga berlaku sebagai perpanjangan dari otak manusia.

Ketika teknik ditafsirkan sebagai *tools*, maka *tools* sebagai bagian dari perpanjangan tubuh manusia, juga turut digunakan sebagai bagian dari “*care of the self*”. Sebab, tanpa palu beserta *tools* perpanjangan tangan lainnya, kita tidak akan dapat memaku lebih baik dan menggabungkan kayu, batu, tanah, dan pasir untuk membuat rumah serta menjaga diri kita dari marabahaya.

Inilah kerangka perspektif *tekhne* model Aristotelian. Pada Foucault, penulis menemukan *tekhne* dengan perspektif Platonian. Oleh karena itu, “*care of the self*” dalam asal sejarahnya di Yunani Kuno ditakdirkan untuk bercabang menjadi *askesis* di satu sisi, tetapi menjadi *poietic* di sisi lain. Di sisi terakhir inilah, Wiener, Bynum, Moor, Floridi, dan Søraker mengambil jalannya.

Begitupun dengan mereka yang ada dalam perspektif bioetis, mereka adalah Aristotelian.²⁹⁵

Dari penafsiran yang serupa ini, *mode d'assujettissement* yang diterapkan pun akan bergantung pada perspektif *tekhné* model apa yang akan diambil. Bila model Platonian seperti Foucault, maka tentu saja akan berada pada anjuran moral yang bersifat individual. Sedangkan bila model Aristotelian yang diambil, maka anjuran moral akan bersifat prosedural dan institusional.

Oleh karena dalam paham Aristotelian yang menjadi anjuran moralnya adalah prosedural dan institusional, secara otomatis, *l'ascétisme* tidak dibutuhkan. Ini karena sifat prosedural dan institusional akan mencakup semua pedoman apa saja yang akan boleh dan tidak boleh dilaksanakan. Persis seperti dirumuskan dalam perspektif bioetis dan juga teori IE Floridi. Sedangkan untuk paham Platonian, beberapa pilihan dapat ditempuh. Salah satunya adalah yang dianjurkan oleh Foucault sendiri, yaitu dengan melakukan praktek *askesis* dari *parrhesia*.

Untuk yang terakhir, *teleologie*, ini dirumuskan secara jelas dalam teori IE Floridi bahwa model Aristotelian akan mengambil peran sebagai *homo poieticus*. Sedangkan bila mengambil jalan Platonian ala Foucault, ini akan dapat dirumuskan dalam konsep *homo kritikus*.

Dengan genealogi etik seperti yang telah disampaikan ini, maka menjadi lebih jelas masing-masing posisi dari para teoretisi. Dalam beberapa segi, penulis tidak sepakat dengan perspektis bioetis yang telah disampaikan, begitu pun dengan perspektif etika informasi. Kita tidak dapat menyelesaikan masalah moral hanya dengan merumuskan sebuah kebijakan yang sifatnya partikular dan bersifat antroposentris. Selain itu, penulis juga tidak menerima bila *beings* direduksi hanya menjadi informasional belaka. Ini adalah proyeksi dari *mathesis universalis* yang akan cenderung mempertahankan dominasi kekuasaan. Sebab, kalau kita lihat pada kasus tanaman transgenik, kepentingan yang ada bukan “*care*” tetapi “*carry*”.²⁹⁶ Ini persis seperti dikatakan oleh Arnold I. Davidson, bahwa: “*problem*

²⁹⁵ Perspektif seperti ini dibuat dengan mendasarkan pada sejarah teknologi sebagaimana disampaikan oleh penulis dalam Badry. *Op.cit.*, sub bab 1.2.1.

²⁹⁶ Dalam artikel yang disampaikan oleh Chakravarthi Raghavan, jelas dikemukakan bahwa teknologi transgenik telah digunakan dan dimanfaatkan untuk kepentingan perusahaan

*etis tidak dapat dipecahkan hanya dengan menghasilkan daftar tindakan yang dilarang, dibutuhkan, atau dibolehkan, tetapi dipusatkan pada sikap seseorang pada dirinya, dan juga yang lainnya dan dunia – suatu gaya hidup seseorang.”*²⁹⁷

Pada sisi lain penulis juga tidak dapat menafikan bahwa kita telah banyak dibantu oleh mereka, sang *homo poieticus* ini. Merekalah yang membawa kita dalam hidup teknologis seperti sekarang ini. Ada rasa nyaman yang mereka ciptakan untuk kita karena kita dapat pergi kemana pun dan kapan pun (menggunakan sepeda, motor, mobil, kereta, hingga pesawat udara), menghubungi siapa yang diinginkan di mana pun jua adanya dan kapan pun (menggunakan telepon, telepon seluler, dan internet), dan hidup dengan sehat tanpa khawatir (dengan bantuan ahli gizi, perawat, bidan, farmakolog, psikiater, dan dokter). Semua capaian ini telah membantu manusia untuk, sebagian besarnya, menjadi *homo ludens* kembali seperti dicita-citakan Wiener.

Namun demikian, dilematika yang serupa ini tidak membuat kita undur seharusnya. Sebagai seorang *parrhesiastes*, penulis mungkin akan bertanya, apakah hidup dengan semua perpanjangan tubuh ini adalah hidup yang sebenarnya? Jangan-jangan itu semua hanya ilusi kekuasaan belaka? Bahwa manusia sedang berilusi karena merasa bahwa *exercise* mereka atas pengetahuan-kekuasaan itu berhasil. Bacon telah mengingatkan kita di sini untuk mempertanyakan semua ilusi yang mungkin muncul. Atau, penulis dapat menambahkan satu poin *idola* dalam rumusan Bacon dengan *idola potest* (ilusi kekuasaan) untuk mengingatkan hal ini.

Lebih jauh, memandang apa yang sedang mereka lakukan sebagai *homo poieticus*, walaupun ini “*care of the self*” pula, penulis dapat menyebutnya sebagai realisasi atas hasrat untuk re-nurturasi. Sebab, setelah sekian lama bergulat dengan alam untuk menundukkan dan membuatnya patuh, baru kali ini manusia sebagai *homo poieticus* mengatakan “*makhluk setengah dewa* (demiurge) yang

transnasional dalam memonopoli benih dari para petani. Ini dicakup dalam dua cara, yaitu Terminator (manipulasi melalui kebijakan) dan Traitor (penggunaan teknologi transgenik). Lihat selengkapnya pada Chakravarthi Raghavan. “Benih Transgenik: Dari ‘Terminator’ ke ‘Traitor’”, dalam Widayanti dan Krishnayanti. *Op.cit.*, hal. 43-51.

²⁹⁷ Arnold I. Davidson. “Ethics as Ascetics: Foucault, the History of Ethics, and Ancient Thought”. 1994, dalam Gary Gutting, Ed. *The Cambridge Companion to Foucault*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, hal. 142.

merawat kenyataan untuk melindunginya dan membuatnya berlangsung lebih baik”, dalam bahasa Florida seperti telah dikutipkan di awal. Kepercayaan diri untuk melakukan re-nurturasi atas alam diperoleh dengan kemajuan 4 teknologi baru yang dikembangkan, terutama seperti dibicarakan dalam konvergensi teknologi. Baik itu dalam komputasi nanolog, atau konversi teknologis yang diberikan Moore.

Hasrat re-nurturasi *homo poieticus* adalah **kembali untuk merawat alam** yang dianggapnya tidak sempurna, banyak mengandung bahaya untuk manusia, sehingga perlu di re-kreasi. Untuk mere-kreasi alam ini, mereka memiliki nanoteknologi dalam mengolah material yang diinginkan, memiliki teknologi genetik untuk merekayasa kehidupan sesuai angsan, dan neuroteknologi untuk mengembangkan kapasitas otak. Semuanya dikendalikan melalui pikiran melalui teknologi informasi. Namun, penulis juga dapat mengatakan bahwa nanoteknologi adalah alat untuk menguasai benda-benda, teknologi genetik untuk menguasai makhluk hidup, dan neuroteknologi untuk menguasai sesamanya. Inilah model re-nurturasi yang dihasilkan dari proses “*care of the self*” *homo poieticus*.

Atas konteks seperti ini, *homo kritikus* sebagai seorang *parrhesiastes* akan kembali mengingatkan *homo poieticus* dengan dua pertanyaan etis saja tanpa harus merumuskan status moral DNA, tanpa harus menyusun kodifikasi moral informasional, tanpa harus menyusun kebijakan-kebijakan praktis. Pertanyaan ini adalah: “Apakah yang engkau (*homo poieticus*) lakukan ini benar-benar untuk hidup dan kehidupan? Apakah *harms, risks, consequences*, dan aspek *playing* dari *exercise* kekuasaan-pengetahuan itu semua sudah dipertimbangkan apa belum ketika merealisasikan hasrat re-nurturasi ini?”. Inilah intisari etika *biotechne* model *parrhesiastic*.

Secara lebih jauh, dua pertanyaan ini dapat diturunkan hingga aplikasi etis yang praktis, yaitu:

1. Segala aspek yang berkenaan dengan pengembangan komputasi DNA, harus dikritisi dalam terang dua pertanyaan etis *biotechne* model *parrhesiastic*.
2. Reformulasi etis *biotechne* model *parrhesiastic* ini memiliki cara preventif, dengan melangsungkan instropeksi atas apa saja yang sudah

dan akan kita kembangkan melalui relasi kekuasaan-pengetahuan dalam terang seorang *parrhesiastes*.

Sebagai catatan, bila ada yang harus diperhatikan secara seksama, ini adalah pengembangan AIC dalam konteks komputasi DNA. Sedapat mungkin, pengembangan AIC harus benar-benar dipertimbangkan kembali mengingat bahwa AIC mengandaikan problematika yang cukup kompleks seperti telah diuraikan dalam sub bab 4.1. Demikian, rumusan baru etika yang dapat diterapkan pada konteks komputasi DNA dalam terang perspektif Foucauldian.



BAB VI

PENUTUP

Setelah penjelasan atas permasalahan diberikan secara panjang lebar dan juga uraian telah disampaikan untuk jawaban-jawaban atas permasalahan ini, ada baiknya dicatat pula beberapa poin penting sebagai ringkasan, kesimpulan dan juga saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini. Berikut adalah ringkasan, kesimpulan, dan saran yang dimaksud.

6.1. Kesimpulan

Mengenai uraian yang telah disampaikan dalam lima bab sebelumnya, penulis sebenarnya dapat kembali sepakat dengan satu pendapat Foucault yang masih cukup relevan tentang hal ini. Ia berkata bahwa jantung dari permasalahan yang dihadapi adalah **galat** (*error*) dan **kesalahan** (*mistake*). Sebab, meskipun hidup adalah kemampuan kita untuk mengatasi kegalatan dan kembali padanya sebagai tujuan untuk semua penyelesaian masalah, tetapi tetap saja itu tidak menengakkan kita semua. Kita, yang dengan galat dapat mengembangkan pikiran dan sejarah, justru telah mengkotak-kotakannya menjadi hanya sebatas benar dan salah. Jika sains dapat dilihat sebagai sesuatu yang tak sinambung, hal ini akan nampak bagi kita sebagai suatu serangkaian “koreksi”. Hingga pada akhirnya manusia menjadi disibukkan dengan ini semua dan kehilangan kesempatan untuk merealisasikan kebenaran itu sendiri, juga sekaligus mencari dimensi yang tepat untuk kehidupan manusia itu sendiri.²⁹⁸

Pada sisi ini, oleh karenanya dapat dicatat bahwa “*error*” dan “*caring*” adalah dua topik yang menjadi fokus kajian penelitian ini. Dalam bab 2 dan 3, kita dapat menemukan bahwa *error*-lah yang menjadi sumber persoalan. Kerusakan DNA dan mutasi adalah *error* dan kesalahan manusia dalam melakukan sesuatu (aktivitas pemrograman) adalah *error*. Rekayasa genetis adalah *caring*, begitupun *debugging* dan komputasi DNA itu sendiri. Namun demikian, dalam proses *caring*

²⁹⁸ Foucault dalam pengantar karya Canguilhem. *Op.cit.*, hal. xix..

atas *error* ini, manusia merasakan suatu *excitement*. Ini karena manusia dapat melakukan *exercise* kekuasaan-pengetahuan untuk suatu alasan yang sangat mendasar seperti telah dibahas dalam bab 4, yaitu “*care of the self*”.

Exercise kekuasaan-pengetahuan sebagaimana dibahas secara panjang lebar di bab 4 itu kalau diringkaskan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 6.1. *Exercise* Kekuasaan-Pengetahuan dalam Konteks Komputasi

Peran (Role)	Pengetahuan (Episteme)	Teknologi (Technology)
Pengamat (Observer)	Kemiripan (Resemblance)	Pemodelan (Modelling)
Penakluk (Conqueror)	Penghadiran (Representation)	Pensimulasian (Simulating)
Pengembang (Developer)	Penandaan (Signification)	Pembangunan ulang (Rebuilding)

Sedangkan sikap etis yang dapat dibuat atas *exercise* kekuasaan-pengetahuan yang tersampaikan di atas seperti dibahas dalam bab 5 dapat diringkaskan pula pada tabel berikut.

Tabel 6.2. Sikap Etis atas *Exercise* Kekuasaan-Pengetahuan dalam Konteks Komputasi DNA

	Platonian	Aristotelian
<i>Substance éthique</i> (substansi etis)	Perawatan (Caring)	Perawatan (Caring)
<i>Mode d’assujettissement</i> (modus pendukung etis)	Pribadi (Individual)	Prosedur, Kelembagaan (Procedural, Institutional)
<i>L’ascétisme</i> (praktek etis)	Praktek Pewarta-Kebenaran (Askesis of Parrhesia)	—
<i>Teleologie</i> (tujuan etis)	Manusia Kritis (Homo Kritikus)	Manusia Kreatif (Homo Poieticus)

Dalam kaitannya dengan hal ini, penulis memilih untuk menggunakan model Platonian dengan dua pertanyaan etis yang dipertimbangkan sebelumnya dalam sub bab 5.3. Dua pertanyaan etis ini adalah:

1. *Apakah yang engkau (homo poieticus) lakukan ini benar-benar untuk hidup dan kehidupan?*
2. *Apakah harms, risks, consequences, dan aspek playing dari exercise kekuasaan-pengetahuan itu semua sudah dipertimbangkan apa belum ketika merealisasikan hasrat re-nurturasi ini?*

Dari dua pertanyaan etis ini, dapat dirumuskan dua langkah aplikatif berkenaan strategi etis yang lebih praktis, yaitu:

1. *Segala aspek yang berkenaan dengan pengembangan komputasi DNA, harus dikritisi dalam terang dua pertanyaan etis biotechne model parrhesiastic.*
2. *Reformulasi etis biotechne model parrhesiastic ini memiliki cara preventif, dengan melangsungkan instropeksi atas apa saja yang sudah dan akan kita kembangkan melalui relasi kekuasaan-pengetahuan dalam terang seorang parrhesiastes.*

Pilihan ini diambil setelah mempertimbangkan kemungkinan-kemungkinan yang telah dibahas dalam bab 4.

Akhirnya, apakah hidup dan kehidupan kita sebagai manusia hanya dapat dipahami dalam *tekhne* seperti model Aristotelian? Kita mungkin juga harus mempertimbangkan bahwa *techne tou biou* pun bukan pilihan yang buruk. Ada satu sisi di mana manusia tidak hanya hidup sebagai makhluk yang memerlukan perpanjangan dengan segala *tools* yang dibuatnya. Manusia harus sadar bahwa perpanjangan kekuasaan bukanlah cara yang sepenuhnya benar jika itu dijalankan dalam kerangka *exercise* kekuasaan-pengetahuan. Sebab, alam pun telah memberikan anugrah yang terbaik pada kita semua sebagai manusia tanpa kita harus “berkuasa sepenuhnya” atas alam itu sendiri.

6.2. Saran

Penelitian yang dilakukan dalam tulisan ini masih jauh dikatakan dari sempurna. Dalam beberapa hal, kemungkinan besar penulis telah menggunakan metode Foucauldian dengan tidak tepat. Meskipun demikian, hal ini tentu saja tidak menghalangi proses jalannya penelitian ini. Kalaupun ada kritik yang

disampaikan, maka hal itu akan penulis sebagai suatu masukan yang membangun dan dapat memperbaiki kualitas penelitian ini.

Adapun saran yang dapat disampaikan dalam penelitian ini adalah:

1. Oleh karena metode analisis Foucauldian belum dapat dikatakan sistematis, maka perlu disusun suatu perumusan ulang secara komprehensif aspek-aspek metodenya berdasarkan perspektif Foucault sendiri. Hal itu akan dapat dilaksanakan dalam analisis kekuasaan sebagaimana Foucault inginkan.
2. Dua pertanyaan etis yang disampaikan belum dapat dijawab sepenuhnya. Ini karena penulis mengambil perspektif model Platonian. Jika seandainya ada yang ingin melakukan kajian yang sama dalam kerangka etis perspektif Aristotelian, dua pertanyaan etis seharusnya dijawab secara tuntas.

Demikian, dua saran ini yang dapat penulis sampaikan. Semoga apa yang penulis lakukan dalam penelitian ini dapat mendorong penelitian sejenis mengingat kelangkaan kajian filosofis dalam tema-tema yang berkaitan dengan masalah ini.

REFERENSI

Buku, Kamus, dan Ensiklopedia:

- Allhoff, Fritz, Patrick Lin, and Daniel Moore. *What is Nanotechnology and Why Does It Matter? From Science to Ethics*. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2010.
- Amos, Martyn. *Theoretical and Experimental DNA Computation*, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- _____. *Genesis Machine: The New Science of Biocomputing*, London: Atlantic Books, 2006.
- Bacon, Francis. *The New Organon*, Ed. Lisa Jardine dan Michael Silverthorne. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- Badry, Ahmad Ibrahim. *Konstruk Citra dan Tanda di Dunia Cyber: Analisis Semiotik atas Kasus Bahasa Pemrograman dan Cyberspeak*. Skripsi pada Fakultas Filsafat. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, 2003.
- Bainbridge, William Sims. *Nanoconvergence: The Unity of Nanoscience, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- Beauchamp, Tom L. *Standing on Principles: Collected Essays*. New York: Oxford University Press, Inc., 2010.
- Benn, Stanley I. "Power", 1967. *Encyclopedia of Philosophy*. Ed. Donald M. Borchert. 2nd Ed. Vol. VII. Detroit: Thomson Gale, 2006.
- Bentham, Jeremy. "Principles of Penal Law". *The Works of Jeremy Bentham*. Ed. John Bowring. Vol. I. New York: Russell & Russell Inc., 1962. 365-580.
- Bertens, Kees. *Perspektif Etika Baru: 55 Esai tentang Masalah Aktual*. Yogyakarta: Kanisius, 2009.
- Bhagavan, N. V. *Medical Biochemistry*. 4th Ed. California: Academic Press, 2002.
- Borchert, Donald M., Ed. *Encyclopedia of Philosophy*. 2nd Ed. Vol. VII. Detroit: Thomson Gale, 2006.

- Bowring, John, Ed. *The Works of Jeremy Bentham*. Vol. I. New York: Russell & Russell Inc., 1962.
- Burk, Dan L. "Lex Genetica: The Law and Ethics of Programming Biological Code". *Ethics, Computing, and Genomics*. Ed. Herman T. Tavani. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2006. 55-74.
- Burley, Justine, and John Harris, Ed. *A Companion to Genethics*. Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2004.
- Bynum, Terrell Ward. "Milestones in the History of Information and Computer Ethics". *The Handbook of Information and Computer Ethics*. Ed. Kenneth Einar Himma and Herman T. Tavani. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 25-48.
- _____. "Norbert Wiener and the Rise of Information Ethics". *Information Technology and Moral Philosophy*. Ed. Jeroen van Den Hoven and John Weckert. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 8-25.
- Canguilhem, Georges. *On the Normal and the Pathological*. Trans. Carolyn R. Fawcett. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1978.
- Care, Charles. *Technology for Modelling: Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing*. London: Springer-Verlag, 2010.
- Ceruzzi, Paul E. *A History of Modern Computing*, 2nd Ed. Cambridge: The MIT Press, 2003.
- Chadwick, Ruth, Ed. *The Concise Encyclopedia of the Ethics of New Technologies*. San Diego: Academic Press, 2001.
- Childress, James F. "Method in Bioethics". *The Oxford Handbook of Bioethics*. Ed. Bonnie Steinbock. Oxford: Oxford University Press, 2007. 15-45.
- Davidson, Arnold I. "Ethics as Ascetics: Foucault, the History of Ethics, and Ancient Thought", 1994. *The Cambridge Companion to Foucault*. Ed. Gary Gutting. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 123-148.
- Dyson, Anthony, and John Harris, Ed. *Ethics and Biotechnology*. London: Routledge, 1994.

Floridi, Luciano. *Philosophy and Computing: An Introduction*. London: Routledge, 1999.

_____. "Foundations of Information Ethics". *The Handbook of Information and Computer Ethics*. Ed. Kenneth Einar Himma and Herman T. Tavani. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 3-24.

_____. "Information Ethics: Its Nature and Scope". *Information Technology and Moral Philosophy*. Ed. Jeroen van Den Hoven and John Weckert. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 40-65.

_____. "Information Ethics". *The Cambridge Handbook of Information and Computer Ethics*. Ed. Luciano Floridi. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 77-100.

_____, Ed. *The Cambridge Handbook of Information and Computer Ethics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

Foucault, Michel. "Introduction". *On the Normal and the Pathological*. Georges Canguilhem. Trans. Carolyn R. Fawcett. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1978. ix-xx.

_____. "Questions on Geography". *Power/Knowledge: Selected Interviews and Other Writings 1972-1977*. Michel Foucault. Ed. Colin Gordon. New York: Pantheon Books, 1980. 63-77.

_____. "Two Lectures", 1976. *Power/Knowledge: Selected Interviews and Other Writings 1972-1977*. Michel Foucault. Ed. Colin Gordon. New York: Pantheon Books, 1980. 78-108.

_____. *Power/Knowledge: Selected Interviews and Other Writings 1972-1977*. Ed. Colin Gordon. New York: Pantheon Books, 1980.

_____, *Discipline and Punish: The Birth of Prison*, Trans. Alan Sheridan. Middlesex: Penguin Books, 1982a.

_____. *The Archaeology of Knowledge and the Discourse on Language*, Trans. A.M. Sheridan Smith. New York: Pantheon Books, 1982b.

_____. "On the Genealogy of Ethics: An Overview of Work in Progress". *Ethics: Subjectivity and Truth. Essential Works of Foucault*

1954-1984. Michel Foucault. Ed. Paul Rabinow. Vol. I. New York: The New Press, 1997. 253-280.

_____. "Penal Theories and Institutions". *Ethics: Subjectivity and Truth. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Michel Foucault. Ed. Paul Rabinow. Vol. I. New York: The New Press, 1997. 17-22.

_____. "The Ethics of the Concern for Self as a Practice of Freedom". *Ethics: Subjectivity and Truth. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Michel Foucault. Ed. Paul Rabinow. Vol. I. New York: The New Press, 1997. 281-302.

_____. *Ethics: Subjectivity and Truth. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Ed. Paul Rabinow. Vol. I. New York: The New Press, 1997.

_____. "The Order of Things", 1966. *Aesthetics, Method, and Epistemology. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Michel Foucault. Ed. James D. Faubion. Vol. II. New York: The New Press, 1998. 261-268.

_____. "On the Ways of Writing of History", 1967. *Aesthetics, Method, and Epistemology. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Michel Foucault. Ed. James D. Faubion. Vol. II. New York: The New Press, 1998. 279-298.

_____. *Aesthetics, Method, and Epistemology. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Ed. James D. Faubion. Vol. II. New York: The New Press, 1998.

_____. "Truth and Power", 1977. *Power. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Michel Foucault. Ed. James D. Faubion. Vol. III. New York: The New Press, 2000. 111-133.

_____. *Power. Essential Works of Foucault 1954-1984*. Ed. James D. Faubion. Vol. III. New York: The New Press, 2000.

_____. *Fearless Speech*. Ed. Joseph Pearson. Los Angeles: Semiotext(e), 2001.

_____. *The Order of Things: An Archaeology of the Human Sciences*, Trans. Alan M. Sheridan. London: Routledge, 2002.

- _____. *Psychiatric Power: Lectures at the College de France, 1973-74*, New York: Palgrave MacMillan, 2006.
- Fulcher, John. "Intelligent Information Systems". *Encyclopedia of Information Science and Technology*. Ed. Mehdi Khosrow-Pour. Vol. IV. New York: Information Science Reference. 2009.
- Garmonsway, G. N. *The Penguin English Dictionary*. Middlesex: Penguin Books, 1969.
- Gheorghe, Marian, Ed. *Molecular Computation Models: Unconventional Approaches*. Hershey: Idea Group Publishing, 2005.
- Goodman, Kenneth W., Ed. *Ethics, Computing, and Medicine*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- Grey, William. "Playing God". *The Concise Encyclopedia of the Ethics of New Technologies*. Ed. Ruth Chadwick. San Diego: Academic Press, 2001.
- Grötter, Thorsten, et al. *The Developer's Guide to Debugging*. New York: Springer, 2008.
- Gutting, Gary, Ed. *The Cambridge Companion to Foucault*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Häyry, Matti. "Categorical Objections to Genetic Engineering: A Critique". *Ethics and Biotechnology*. Ed. Anthony Dyson and John Harris. London: Routledge, 1994. 202-215.
- Hesti Widayanti dan Ika N. Krishnayanti, Penyunt. *Bioteknologi: Imperialisme Modal dan Kejahatan Globalisasi*. Yogyakarta: INSIST Press dan Konphalindo, 2003.
- Himma, Kenneth Einar, and Herman T. Tavani, Ed. *The Handbook of Information and Computer Ethics*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- Hirvensalo, Mika. "An Introduction to Quantum Computing". *Current Trends in Theoretical Computer Science: Entering the 21st Century*. Ed. Gheorghe Paun, Grzegorz Rozenberg, and Arto Salomaa. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001. 643-663.
- Hongladaram, Soraj, and Charles Ess, Ed. *Information Technology Ethics: Cultural Perspectives*. Hershey: Idea Group Reference, 2007.

- Ifrah, Georges. *The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer*. Trans. E. F. Harding. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- Ignatova, Zoya, Israel Martínez-Pérez, and Karl-Heinz Zimmermann. *DNA Computing Models*. New York: Springer, 2008.
- Jonoska, Nataša, and Nadrian C. Seeman, Ed. *DNA Computing: 7th International Workshop on DNA Based Computers, DNA 7, Tampa, FL, USA, June 10 - 13, 2001, Revised Papers*. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- Kari, Lila, Elena Losseva, and Petr Sosík. “DNA Computing and Errors: A Computer Science Perspective”. *Molecular Computation Models: Unconventional Approaches*. Ed. Marian Gheorghe. Hershey: Idea Group Publishing, 2005. 56-77.
- Kelly, Mark G. E. *The Political Philosophy of Michel Foucault*. New York: Routledge, 2009.
- Kendall, Gavin, and Gary Wickham. *Using Foucault's Methods*. London: SAGE Publications, 1999.
- Khodor, Julia, and David K. Gifford. “Programmed Mutagenesis is a Universal Model of Computation”. *DNA Computing: 7th International Workshop on DNA Based Computers, DNA 7, Tampa, FL, USA, June 10-13, 2001, Revised Papers*. Ed. Nataša Jonoska and Nadrian C. Seeman. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 300-307.
- Khosrow-Pour, Mehdi, Ed. *Encyclopedia of Information Science and Technology*. Vol. IV. New York: Information Science Reference, 2009.
- Koolman, Jan, and Klaus-Heinrich Roehm. *Color Atlas of Biochemistry*. 3rd Ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005.
- Lyon, David. *The Electronic Eye: The Rise of Surveillance Society*. Minnesota: University of Minnesota Press, 1994.
- Moor, James H. “Why We Need Better Ethics for Emerging Technologies”, 2005. *Information Technology and Moral Philosophy*. Ed. Jeroen van Den Hoven and John Weckert. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 26-39.

- Morgan, David O. *The Cell Cycle: Principles of Control*. London: New Science Press, 2007.
- Muladno. *Teknologi Rekayasa Genetika*. Ed. II. Bogor: IPB Press, 2010.
- Nelson, David L., and Michael M. Cox. *Lehninger Principles of Biochemistry*. New York: W.H. Freeman, 2004.
- Nicholl, Desmond S. T. *An Introduction to Genetic Engineering*, 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- Nietzsche, Friedrich. *The Will to Power*. Trans. Walter Kaufmann and R. J. Hollingdale. New York: Vintage Books, 1968.
- O'Farrell, Clare. *Michel Foucault*. London: SAGE Publications, 2005.
- Omoto, Charlotte K., and Paul F. Lurquin. *Genes & DNA: A Beginners Guide to Genetics & Its Applications*. New York: Columbia University Press, 2004.
- Pai, Anna C. *Dasar-dasar Genetika: Ilmu untuk Masyarakat*. Penerj. Muchidin Apandi. Ed. II. Jakarta: Erlangga, 1992.
- Passarge, Eberhard. *Color Atlas of Genetics*, 2nd Ed. Stuttgart: Thieme, 2001.
- Paun, Gheorghe, Grzegorz Rozenberg, and Arto Salomaa, Ed. *Current Trends in Theoretical Computer Science: Entering the 21st Century*. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001.
- Peltonen, Markku, Ed. *The Cambridge Companion to Bacon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Pérez-Ramos, Antonio. "Bacon's Legacy". *The Cambridge Companion to Bacon*. Ed. Markku Peltonen. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 311-334.
- Pranoto, Eka Dharma. *The Art of Debugging*. Yogyakarta: Andi, 2007.
- Raghavan, Chakravarthi. "Benih Transgenik: Dari 'Terminator' ke 'Traitor'". *Bioteknologi: Imperialisme Modal dan Kejahatan Globalisasi*. Penyunt. Hesti Widayanti dan Ika N. Krishnayanti. Yogyakarta: INSIST Press dan Konphalindo, 2003. 42-54.
- Rittner, Don, and Ronald A. Bailey. *Encyclopedia of Chemistry*. New York: Facts On File, Inc., 2005.

- Shiva, Vandana. "Ambisi Perusahaan Transnasional: Kuasai Sistem Pangan Dunia", 1997. *Bioteknologi: Imperialisme Modal dan Kejahatan Globalisasi*. Penyunt. Hesti Widayanti dan Ika N. Krishnayanti. Yogyakarta: INSIST Press dan Konphalindo, 2003. 35-41.
- Søraker, Johnny Hartz. "The Moral Status of Information and Information Technologies: A Relational Theory of Moral Status". *Information Technology Ethics: Cultural Perspectives*. Ed. Soraj Hongladaram and Charles Ess. Hershey: Idea Group Reference, 2007. 1-19.
- Steinbock, Bonnie, Ed. *The Oxford Handbook of Bioethics*. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- Stone, Jon R. *The Routledge Dictionary of Latin Quotations: The Illiterati's Guide to Latin Maxims, Mottoes, Proverbs and Sayings*. New York: Routledge, 2005.
- Sumner, Adrian T. *Chromosomes: Organization and Function*, Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- Tavani, Herman T., Ed. *Ethics, Computing, and Genomics*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2006.
- Tim Redaksi Driyarkara. *Hakikat Pengetahuan dan Cara Kerja Ilmu-Ilmu*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1993.
- van Den Hoven, Jeroen, and John Weckert, Ed. *Information Technology and Moral Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- Verhaak, Christ. "Francis Bacon: Perintis Filsafat Ilmu Pengetahuan", 1990 *Hakikat Pengetahuan dan Cara Kerja Ilmu-Ilmu*. Tim Redaksi Driyarkara. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1993. 13-20.
- Wang, Jean Y. J. and Sarah K. Cho. "Coordination of Repair, Checkpoint, and Cell Death Responses to DNA Damage". *DNA Repair and Replication*. Ed. Wei Yang. California: Elsevier Academic Press, 2004.
- Warren, Mary Anne. "The Moral Status of Gene". *A Companion to Genethics*. Ed. Justine Burley and John Harris. Malden: Blackwell Publishing Ltd., 2004.

Weckert, John. "The Control of Scientific Research: The Case of Nanotechnology". *Ethics, Computing, and Genomics*. Ed. Herman T. Tavani. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2006. 323-339.

Wiener, Norbert. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. London: Free Association Books, 1989.

Williams, Michael R., *A History of Computing Technology*, 2nd Ed. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1997.

Yang, Wei, Ed. *DNA Repair and Replication*. California: Elsevier Academic Press, 2004.

Jurnal dan Majalah:

Adleman, Leonard M. "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems". *Science*. Vol. 266. 11 November 1994: 1021-1024.

_____. "Computing with DNA". *Scientific American*. Vol. 279. No. 2. Agustus 1998: 54-61.

Benenson, Yaakov, et al. "An Autonomous Molecular Computer for Logical Control of Gene Expression". *Nature*. Vol. 414. 28 April 2004: 430-434.

Benenson, Yaakov, et al. "Programmable and Autonomous Computing Machine made of Biomolecules". *Nature*. Vol. 414. 22 November 2001: 430-434.

Jonoska, Nataša. "Theoretical and Experimental DNA Computation". *Genetic Programming and Evolvable Machines*. Vol. 7. No. 3. 2006: 287-291.

Shapiro, Ehud, and Yaakov Benenson. "Bringing DNA Computers to Life". *Scientific American*. Vol. 294 No. 5. Mei 2006: 44-51.

Wilmot, Ian. "Cloning for Medicine". *Scientific American*. Vol. 279. No. 6. Desember 1998: 58-65.

Situs Internet:

"Animation Quiz 4 - Addition and Deletion Mutations". *Biology*. Peter H. Raven, et al. 7th Ed. Columbus: McGraw-Hill, 2005. 11 Mei 2011.

<http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0072556781/student_view0/chapter11/animation_quiz_4.html>

“DNA Replication”. (Animation) *Essential Biochemistry*. Charlotte W. Pratt and Kathleen Cornely. New Jersey: John Wiley & Sons: 2004. 07 Mei 2011.
<http://www.wiley.com/college/pratt/0471393878/student/animations/dna_replication/index.html>

“DNA Replication”. (Animation text) *Essential Biochemistry*. Charlotte W. Pratt and Kathleen Cornely. New Jersey: John Wiley & Sons: 2004. 07 Mei 2011.
<http://www.wiley.com/college/pratt/0471393878/student/animations/dna_replication/anim_text.html>

“DNA Replication”, 28 January 2011. *Biology*. John W. Kimball, 2011. 12 Mei 2011.
<<http://users.rcn.com/jkimball.ma.ultranet/BiologyPages/D/DNAReplication.html>>

“Hershey and Chase Experiment”. (Animation) *Biology*. Peter H. Raven, et al. 7th Ed. Columbus: McGraw-Hill, 2005. 08 Mei 2011.
<<http://highered.mcgraw-hill.com/olcweb/cgi/pluginpop.cgi?it=swf::535::535::sites/dl/free/0072437316/120076/bio21.swf::Hershey%20and%20Chase%20Experiment>>

“Monic Simulation”. *YouTube*. reservebankofnz, Mar 9, 2009. 17 Juni 2011.
<<http://www.youtube.com/watch?v=XqPtW40w1no&feature=related>>

Akira Suyama. “DNA Chips: Integrated Chemical Circuits for DNA Diagnosis and DNA Computers”. Makalah Riset dengan hibah Menteri Pendidikan Jepang. CiteSeerx, 2010.
<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.51.1877>>

Amos, Martyn, Alan Gibbons, and David Hodgson. *Error-resistant Implementation of DNA Computations*. Makalah Riset di Universitas Warwick. CiteSeerx. 2010.
<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.38.6998>>

BdgYes. "Jadwal Pesawat". 28 Mei 2011.

<http://bdgyes.com/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=70>

Computer Museum. "The TRIDAC Analog Computer System". Amsterdam: University of Amsterdam, October 10, 2010. 17 Juni 2011.

<<http://www.science.uva.nl/museum/biganalog.php>>

Elliott, Larry. "The Computer Model that Once Explained the British Economy". *Guardian*, 8 May 2008. 17 Juni 2011.

<<http://www.guardian.co.uk/business/2008/may/08/bankofenglandgovernor.economics>>

Ibiblio. "Internet Pioneers: Vannevar Bush". 17 Juni 2011.

<<http://www.ibiblio.org/pioneers/bush.html>>

IBM. "System/360 Model 65". 17 Juni 2011.

<http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/mainframe/mainframe_2423PH2065C.html>

_____. "The IBM PC's Debut". 17 Juni 2011.

<http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/pc25/pc25_intro.html>

Intel. "Intel® Xeon® Processor E7-8870". 17 Juni 2011.

<<http://ark.intel.com/Product.aspx?id=53580>>

Kari, Lila. "Careers in Nanobiotechnology: Through the Eyes of a Mathematician". February 02, 2001. 8 Juni 2011.

<http://sciencecareers.sciencemag.org/career_magazine/previous_issues/articles/2001_02_02/noDOI.7963422558378343770>

Lundberg, Kent H. "Vannevar Bush's Differential Analyzer". May 17, 2005. 17 Juni 2011

<<http://web.mit.edu/klund/www/analyzer/>>

Pemerintah Kota Semarang. "Jadwal Penerbangan dari Bandara Ahmad Yani". 28 Mei 2011.

<<http://www.semarang.go.id/info/k-udara.php>>

Schlosshauer, Maximilian. *Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics*, 28 June 2005. Artikel dalam situs Cornell University Library. 18 Juni 2011.

<<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0312059>>

VirtualBox. "Screenshots". *ORACLE*. 17 Juni 2011.

<<http://www.virtualbox.org/wiki/Screenshots>>

Wikipedia. "DNA Replication". 07 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_replication>

_____. "File:DNA replication en.svg". 07 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:DNA_replication_en.svg>

_____. "Nonsense Mutation". 11 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Nonsense_mutation>

_____. "File:Notable mutations.svg". 12 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Notable_mutations.svg>

_____. "Mutation Rate". 12 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Mutation_rate>

_____. "Unary Operation". 27 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Unary_operation>

_____. "Hamiltonian Path". 28 Mei 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian_path>

_____. "Debugging". 2 Juni 2011.

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Debugging>>

_____. "Difference Engine". 17 Juni 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Difference_engine>

_____. "Digital". 17 Juni 2011.

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Digital>>

_____. "ENIAC". 17 Juni 2011.

<<http://en.wikipedia.org/wiki/ENIAC>>

_____. "File:Yale's_Hartmann_astrolabe.jpg". 17 Juni 2011.

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Yale%27s_Hartmann_astrolabe.jpg>

_____. “Whirlwind”. 17 Juni 2011.

<[http://en.wikipedia.org/wiki/Whirlwind_\(computer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Whirlwind_(computer))>

_____. “BioBrick”. 21 Juni 2011.

<<http://en.wikipedia.org/wiki/BioBrick>>

_____. “Panopticon”. 21 Juni 2011.

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Panopticon>>

Wiktionary. “Nano”. 17 Juni 2011.

<<http://en.wiktionary.org/wiki/nano->>

Wuppertal Institute, Germany, Forum of the Future, UK, EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research), and Triple Innova of Germany. “Europe-wide Dialogue on Social, Ethical, and Legal Impacts of Nanotechnology”. 18 Juni 2011.

<<http://www.nanologue.net>>

YogYes. “Jadwal Penerbangan Reguler ke Yogyakarta”. 28 Mei 2011.

<<http://www.yogyes.com/id/yogyakarta-tourism-article/getting-there-and-around/adisutjipto-airport/flight-schedule/>>