

BAB 2 DASAR TEORI

Biodiesel adalah bahan bakar alternatif yang diproduksi dari sumber nabati yang dapat diperbaharui untuk digunakan di mesin diesel. Biodiesel mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan solar, yaitu dapat diurai kembali oleh lingkungan dan emisi rendah sehingga lebih ramah lingkungan.

Biodiesel dapat digunakan baik secara murni (100 % biodiesel) ataupun dicampur dengan solar. B20 menandakan bahan bakar diesel mengandung 20% biodiesel dan 80% solar. Penggunaan biodiesel murni (B100) dapat mengurangi CO₂ hingga 78% karena tumbuhan biodiesel yang ditanam menggunakan CO₂ untuk proses fotosintesis. Sebagai tambahan, kandungan berbahaya seperti hidrokarbon dan karbon monoksida dapat dikurangi[2].

2.1. Produksi Biodiesel

Biodiesel adalah salah satu sumber energi terbarukan sebagai alternatif pengganti solar yang berasal dari minyak tumbuh-tumbuhan. Di Indonesia, bahan baku utama biodiesel adalah minyak kelapa sawit. Biodiesel dihasilkan melalui reaksi trans-esterifikasi dan reaksi esterifikasi. Reaksi trans-esterifikasi adalah reaksi dari minyak sawit (*triacylglycerol*) dengan alkohol (methanol atau ethanol) memakai katalis (KOH atau NaOH) yang akan menghasilkan biodiesel (*alkyl ester*) dan gliserol sebagai produk sampingan.

Biodiesel direaksikan dengan memakai CSTR (*Continous Stirred Tank Reactor*) sebagai reaksi utama dimana bahan-bahan yang diperlukan dicampurkan di CSTR dengan suhu sekitar 60-70° C agar reaksi berjalan dengan optimal.

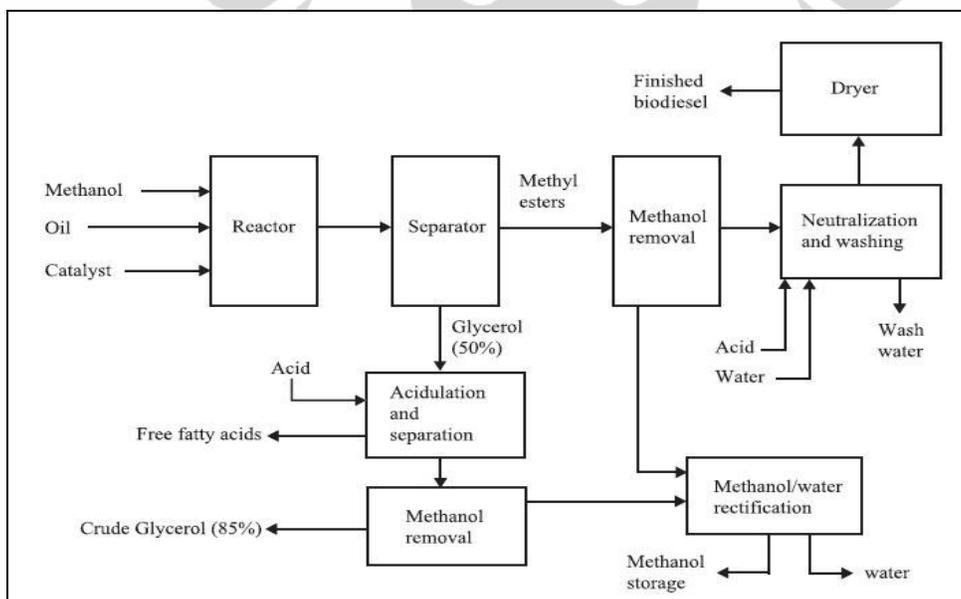
Sebelum minyak sawit dimasukkan ke CSTR ada beberapa hal yang harus dilakukan (*pretreatment*). Hal-hal tersebut adalah *degumming* untuk menghilangkan gum dari minyak sawit. Setelah proses *degaumming* dilakukan dilakukan proses *dewatering* untuk menghilangkan kandungan air pada minyak sawit. Setelah proses *dewatering*, barulah minyak sawit dimasukkan ke CSTR. Bersamaan dengan proses *pretreatment* pada minyak sawit, alkohol dicampurkan dengan katalis menjadi *methoxide*.

Setelah minyak sawit direaksikan dengan alkohol yang menghasilkan biodiesel dan gliserol sebagai produk sampingan, ada proses-proses lanjutan yang harus dilakukan untuk mendapatkan biodiesel yang murni. Biodiesel dan gliserol yang masih tercampur dipisahkan oleh proses separasi. Biodiesel yang telah terpisah dari gliserol dicampur air untuk menghilangkan zat-zat lain yang tidak diperlukan. Setelah itu campuran biodiesel dan air dipisahkan kembali dengan metode distilasi. Setelah biodiesel dan air dipisahkan, biodiesel yang telah terbentuk disaring lagi untuk menghasilkan biodiesel yang siap menjadi bahan bakar.

Reaksi esterifikasi adalah reaksi antara asam lemak bebas dan methanol yang menghasilkan biodiesel dan air.

2.2. Proses pembuatan biodiesel

Proses pembuatan biodiesel melalui reaksi trans-esterifikasi meliputi beberapa tahap yang diperlukan dari minyak sawit mentah hingga menghasilkan biodiesel yang siap dipakai oleh kendaraan bermotor. Secara sederhana, proses pembuatan biodiesel dapat dijelaskan oleh gambar 2 berikut ini.



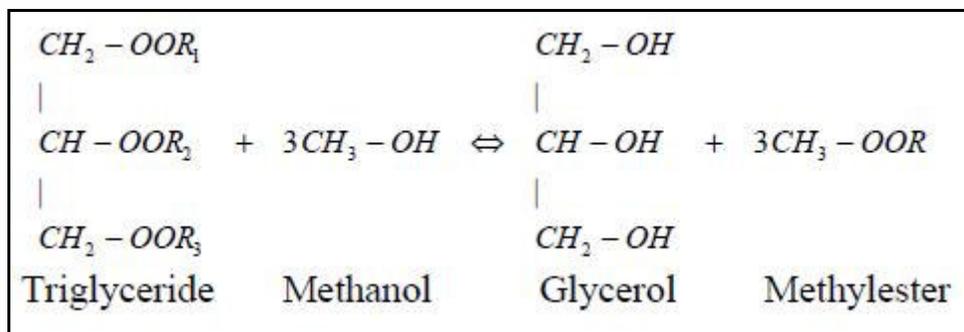
Gambar 2 Proses Pembuatan Biodiesel

Penjelasan dari gambar 2 di atas adalah berikut ini:

- Sebelum dimasukkan ke reaktor, minyak sawit dilakukan proses *degumming* untuk menghilangkan *gum* dan penyaringan untuk mendapatkan minyak sawit mentah yang benar-benar murni.
 - Pada saat bersamaan, methanol dicampur dengan NaOH yang berperan sebagai katalis melalui proses *methoxide*
 - Setelah itu minyak sawit dan campuran methanol-NaOH direaksikan di tabung CSTR pada suhu 60°-70° C dengan kecepatan adukan sedang yang menghasilkan dua lapisan yaitu biodiesel dan gliserol
 - Campuran biodiesel dan gliserol ini didiamkan selama kurang lebih satu jam agar terbentuk dua lapisan di reaktor yang selanjutnya dipisahkan lewat proses separasi
 - Biodiesel yang terbentuk dicuci dengan air untuk menghilangkan kotoran, lalu dikeringkan untuk menghilangkan air, setelah itu disaring lagi hingga siap dipakai oleh kendaraan
 - Gliserol yang terbentuk direaksikan dengan asam sehingga terbentuk asam lemak bebas
 - Gliserol yang lebih murni dihilangkan sisa methanol dan airnya agar methanol dapat dipakai lagi pada proses esterifikasi
 - Methanol dan air yang telah dipisahkan disimpan kembali ke tangki penyimpanan
- Dari serangkaian proses pembuatan biodiesel ini, proses yang paling penting dan krusial adalah proses reaksi antara minyak sawit mentah (CPO) dan ethanol di tabung CSTR karena diproses inilah pembentukan biodiesel dilakukan.

2.3. Reaksi Trans-esterifikasi biodiesel

Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk memproduksi biodiesel. Salah satu cara yang paling banyak dipakai di dunia adalah reaksi trans-esterifikasi. Reaksi trans-esterifikasi adalah reaksi yang dilakukan untuk melakukan pertukaran grup *alkoxy* dari senyawa ester dengan alkohol. Reaksi ini menggunakan katalis asam atau basa agar reaksi bisa berlangsung lebih cepat. Reaksi trans-esterifikasi dapat digambarkan seperti pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3 Reaksi Trans-esterifikasi Biodiesel[3]

Minyak sawit/*triglyceride* direaksikan dengan methanol menghasilkan biodiesel/*methylester* dengan gliserol. Reaksi ini sebenarnya adalah reaksi tiga langkah yang disederhanakan menjadi satu langkah. Reaksi lengkapnya adalah berikut ini[1].



TG, DG, MG, dan GL berturut-turut adalah trigliserida, digliserida, monogliserida dan gliserol. Digliserida dan monogliserida adalah bagian dari hasil reaksi *multistage* sehingga pada kondisi awal DG dan MG tidak ada. Reaksi trans-esterifikasi ini adalah reaksi dua arah dalam arti minyak sawit dan methanol dapat menjadi biodiesel dan gliserol, dan proses sebaliknya juga bisa terjadi. Konstanta k_1 sampai k_6 adalah konstanta laju reaksi. Jika k_1 , k_3 , dan k_5 adalah konstanta laju reaksi ke arah kanan, maka k_2 , k_4 , dan k_6 adalah konstanta laju reaksi ke arah kiri. Nilai k_1 sampai k_6 didapat dari persamaan Arrhenius $k_i = k_{0i}e^{-e_i/RT}$. Nilai k_1 hingga k_6 pada suhu $50^\circ C$ berturut-turut adalah 0,050; 0,110; 0,215; 1,228; 0,242; dan 0,007. Energi aktivasinya secara berturut-turut adalah 13145, 9932, 19860, 14639, 6421, dan 9588[4][5].

Dengan memakai persamaan Arrhenius, nilai k_{01} hingga k_{06} secara berturut-turut ditampilkan di tabel berikut

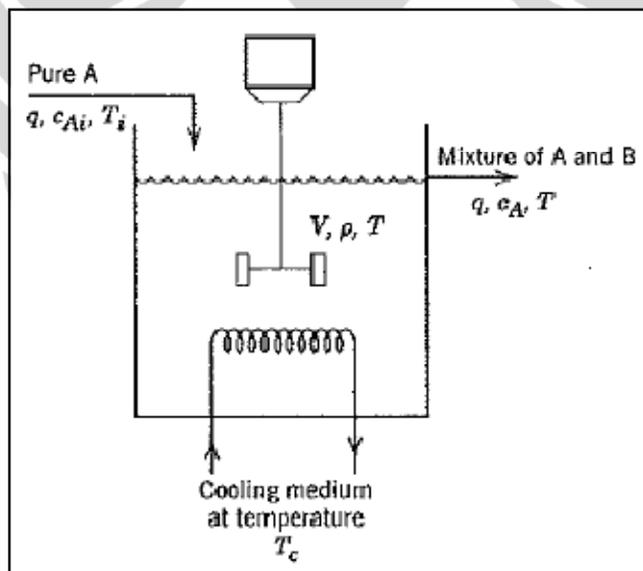
Tabel 1 Nilai konstanta laju reaksi

	k_i	E_i	k_{0i}
k_1	0,05	13145	39716257,1
k_2	0,11	9932	583426,71
k_3	0,215	19860	$6,01059488 \times 10^{12}$
k_4	1,228	14639	$1,001680884 \times 10^{10}$
k_5	0,242	6421	5385,67
k_6	0,007	9588	21716,1

2.4. Pemodelan Dinamis Tabung CSTR

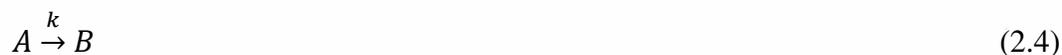
Tabung *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) digunakan secara luas di industri-industri. Pemodelan CSTR lebih sederhana daripada pemodelan tabung reaktor yang lain, seperti reaktor *tubular* atau reaktor *packed-bed*. Dengan demikian, pemodelan CSTR menggambarkan prinsip-prinsip pemodelan reaktor kimia secara baik.

Diagram skematik CSTR secara sederhana ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4 Pemodelan CSTR sederhana

Dimisalkan terjadi reaksi kimia sederhana yang terjadi satu arah dimana dimisalkan unsur A bereaksi untuk membentuk unsur B. persamaan reaksi ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Diasumsikan laju reaksi adalah reaksi orde pertama yang berhubungan dengan komponen A.

$$r = k[A] \quad (2.5)$$

Dimana r adalah kecepatan reaksi A per satuan volume, k adalah konstanta reaksi, dan $[A]$ adalah konsentrasi molar A. Untuk reaksi fasa tunggal, konstanta reaksi adalah fungsi reaksi terhadap temperatur yang diberikan oleh persamaan Arrhenius berikut ini:

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (2.6)$$

Dimana k_0 adalah factor frekuensi, E adalah energi aktivasi, dan R adalah konstanta gas.

Pada gambar di atas, aliran zat masuk adalah komponen A dengan konsentrasi molar c_{Ai} atau $[A]_i$. lilitan pemanas digunakan untuk menjaga campuran reaksi pada temperatur operasi yang diinginkan dengan menghasilkan panas. Pemodelan CSTR secara umum berdasarkan pada tiga asumsi:

1. CSTR tercampur dengan sempurna.
2. Massa jenis aliran bahan baku dan produk sama dan konstan (ρ).
3. Volume cairan dalam reaktor dijaga agar tetap konstan dengan laju aliran keluar.

Dengan asumsi-asumsi di atas, kesetimbangan massa untuk CSTR adalah berikut ini:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho q_i - \rho q \quad (2.7)$$

Karena V dan ρ konstan, maka persamaan (2.7) diatas dapat direduksi menjadi

$$q = q_i \quad (2.8)$$

Karenanya, meskipun aliran masuk dan keluar berubah-ubah bergantung pada kondisi, persamaan (2.8) harus terpenuhi sepanjang waktu.

Untuk asumsi-asumsi di atas, kesetimbangan komponen untuk unsur A adalah berikut ini:

$$V \frac{d[A]}{dt} = q([A]_i - [A]) - V k_0 e^{-E/RT} [A] \quad (2.9)$$

Untuk memodelkan kesetimbangan energi CSTR, sebelumnya dibuat beberapa asumsi.

4. Perubahan entalpi yang berhubungan dengan campuran bahan baku dan cairan dalam tangki diabaikan terhadap pertukaran entalpi pada reaksi kimia
5. Gaya baling-baling pengaduk dapat diabaikan.

Kesetimbangan energi CSTR adalah berikut ini:

$$V \rho C \frac{dT}{dt} = w C (T_i - T) + Q \quad (2.10)$$

2.5. Perancangan Pengendali Model Ciancone[10]

Dewasa ini, model pengendali yang paling banyak digunakan dalam dunia industry adalah model kendali algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID). Algoritma PID

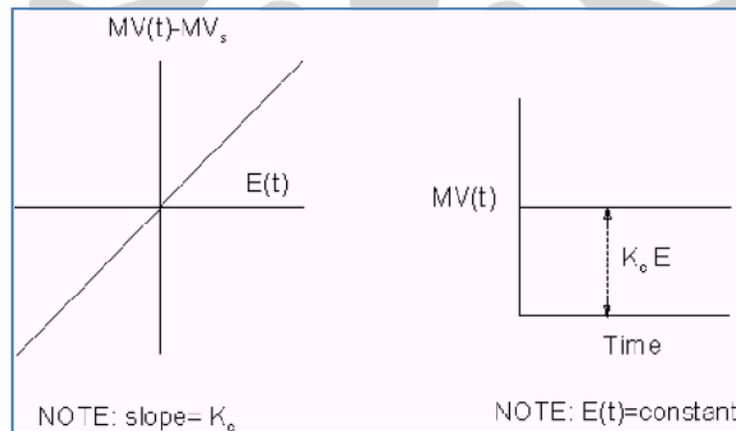
telah sukses digunakan dalam industry proses sejak tahun 1940an dan masih sering digunakan hingga kini. Algoritma ini digunakan dalam sistem loop tunggal, atau bisa disebut Single Input Single Output (SISO), yang memiliki satu variable yang dikendalikan (keluaran) dan satu variable yang dimanipulasi (masukan). Dalam algoritma kendali PID ini, terdapat tiga mode kendali yang digunakan. Mode-mode tersebut adalah mode proporsional, mode integral dan mode derivative. Ketiga mode ini akan dipaparkan secara singkat .

Dalam mode proporsional, tindakan kendali berupa penyesuaian masukan berbanding lurus terhadap sinyal galat (error) yang terjadi. Konsep ini dijabarkan dalam persamaan berikut

$$MV_p(t) = K_c E(t) + I_p$$

$$G_c(s) = \frac{MV_p(s)}{E(s)} = K_c$$

Dimana K_c adalah penguatan kendali. Mode proporsional ini digambarkan dalam grafik berikut ini



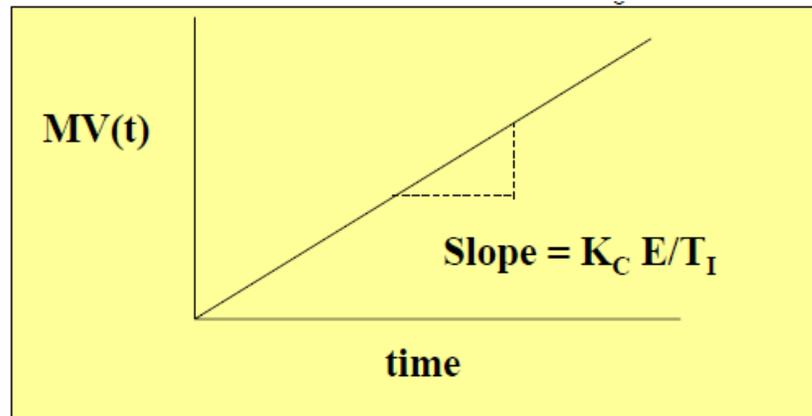
Gambar 5 mode proporsional

Mode proporsional ini sederhana dan menghasilkan penyesuaian yang cepat terhadap masukan, dan mempercepat respon dinamis tetapi tidak menghasilkan selisih nol dan dapat menyebabkan ketidakstabilan bila distel secara kurang tepat.

Dalam mode integral, parameter disesuaikan dengan cara diintegrasikan terhadap waktu yang digabungkan dengan penguatan kendali dalam persamaan berikut ini.

$$MV_I(t) = \frac{K_c}{T_I} \int_0^t E(t') dt' + I_I$$

$$G_c(s) = \frac{MV_I(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{T_I s}$$



Gambar 6 Mode Integral

Mode integral ini sederhana dan menghasilkan offset nol, tetapi responnya lambat dan dapat menyebabkan ketidakstabilan bila disetel kurang tepat

Dalam mode derivative, parameter disesuaikan terhadap waktu dengan cara diturunkan terhadap waktu yang digabungkan dengan penguatan kendali dalam persamaan berikut ini.

$$MV_d(t) = K_c T_d \frac{dE(t)}{dt} + I_d$$

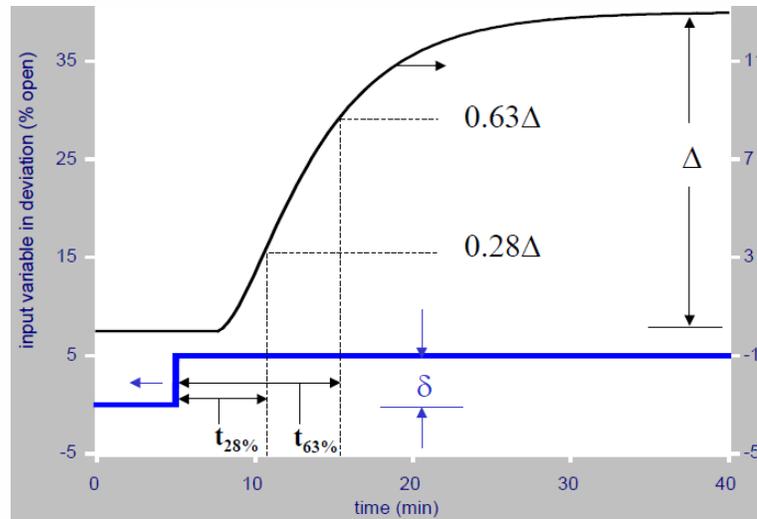
$$G_c = \frac{MV_d(s)}{E(s)} = K_c T_d s$$

Mode derivative ini sederhana, tidak mempengaruhi nilai mapan dan menghasilkan koreksi yang cepat berdasarkan kecepatan perubahan masukan, tetapi bisa menghasilkan frekuensi tinggi yang tak diinginkan pada keluaran.

Bila ketiganya digabung, maka pengendali PID dinyatakan dalam persamaan berikut ini

$$MV(t) = K_c \left(E(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t E(t') dt' - T_d \frac{dCV(t)}{dt} \right) + I$$

Dalam perancangan pengendali model Ciancone, langkah-langkah yang dilakukan adalah berikut ini



Gambar 7 Pengukuran input-output

Untuk melakukan pendekatan orde 1 terhadap data empiris, mula-mula dihitung penguatan proporsional (K_p) yang merupakan nilai keluaran (Δ) pada saat mapan dibagi nilai masukan (δ).

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta}$$

Selanjutnya mencari konstanta waktu (τ) dengan mencari waktu yang diperlukan untuk mencapai 28% dari keadaan mapan ($t_{28\%}$) dan waktu yang diperlukan untuk mencapai 63% keadaan mapan ($t_{63\%}$) dengan persamaan berikut

$$\tau = 1,5(t_{63\%} - t_{28\%})$$

Selanjutnya adalah mencari waktu delay (θ) dengan cara berikut ini

$$\theta = t_{63\%} - \tau$$

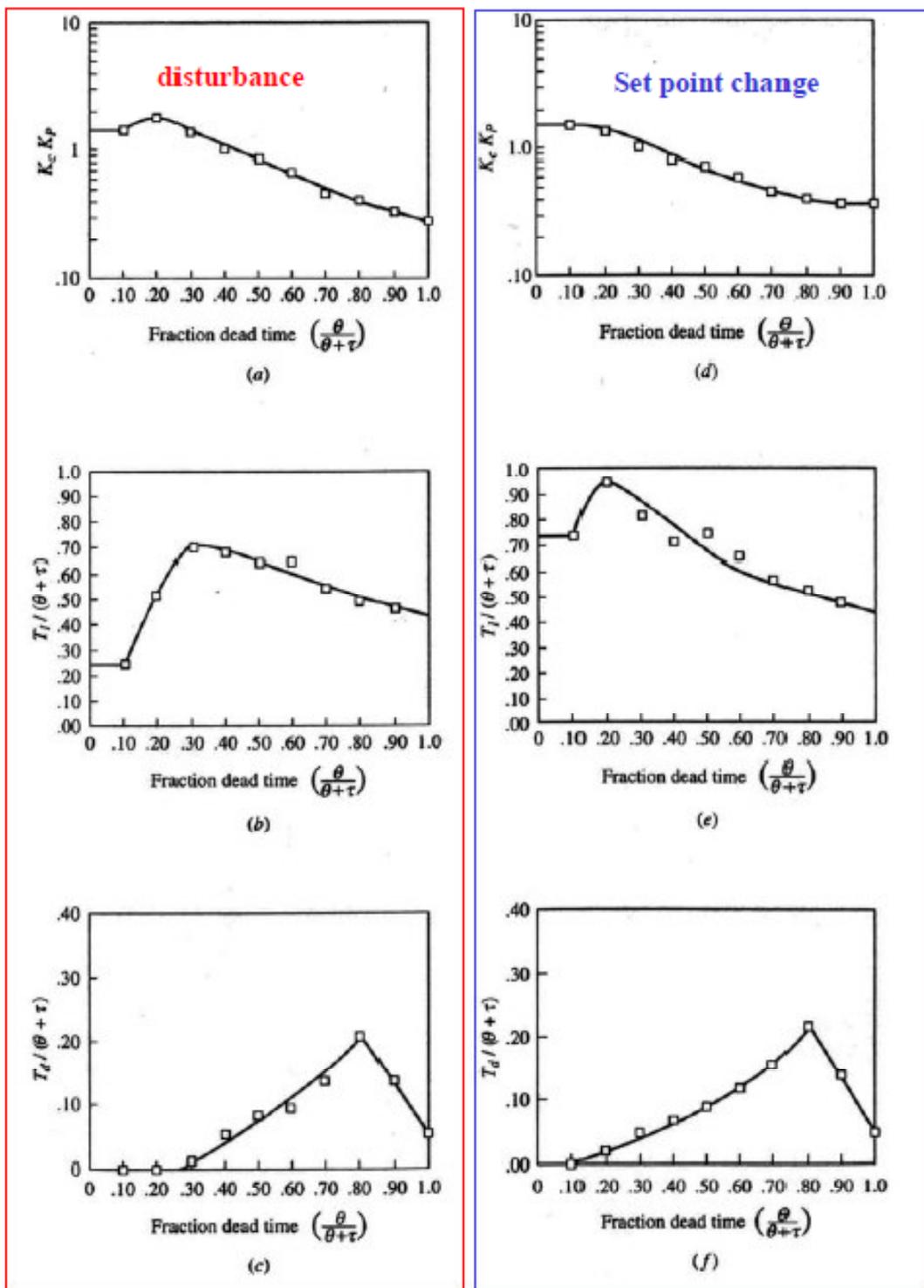
Dengan demikian, data empiris dapat dimodelkan dengan pendekatan orde 1 berikut ini

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{1 + \tau s}$$

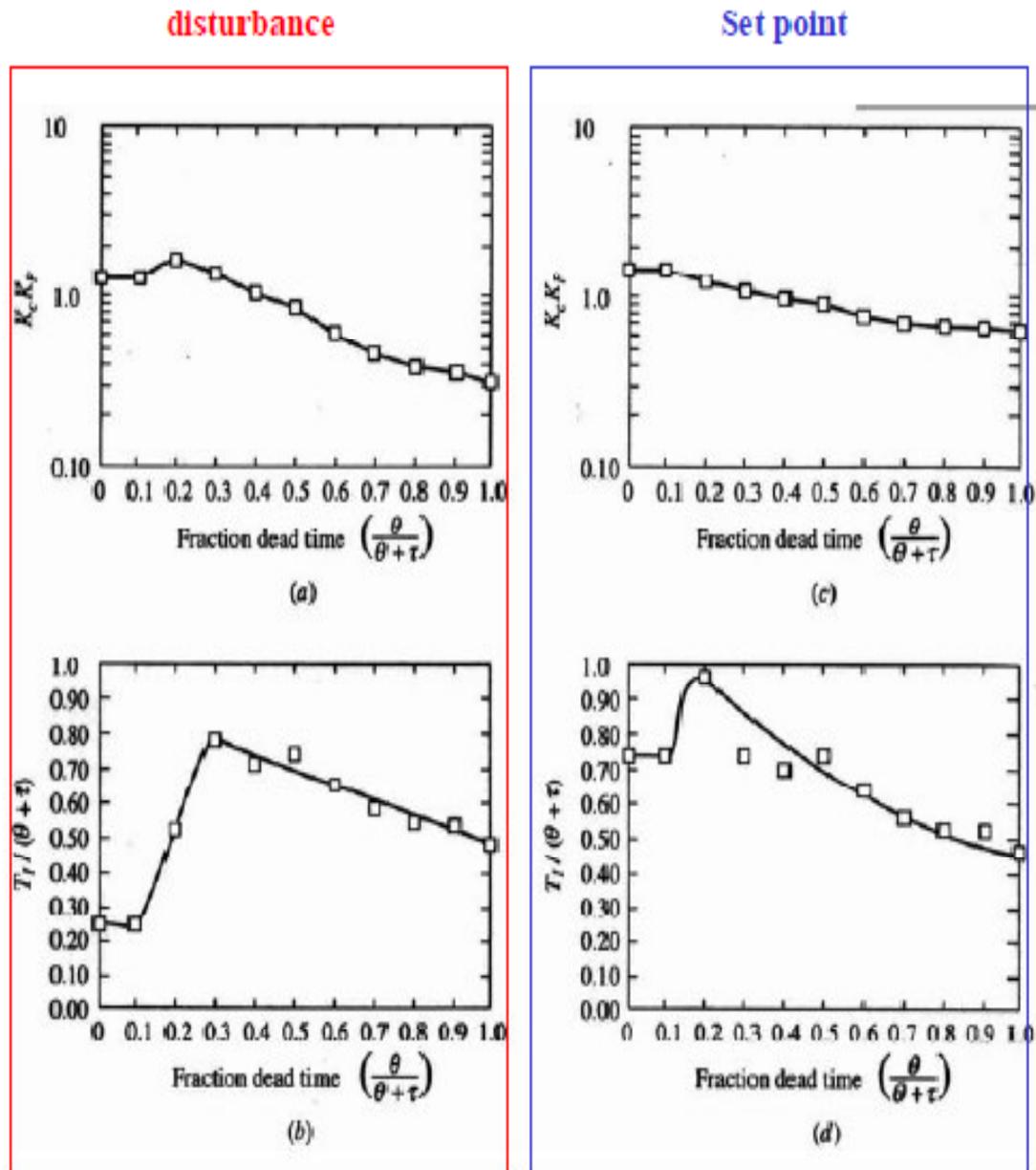
Selanjutnya adalah menghitung fraction dead time

$$\frac{\theta}{\theta + \tau}$$

Selanjutnya nilai K_c , T_i , dan T_d didapat dengan melihat grafik Ciancone berikut ini



Gambar 8 Grafik Ciancone PID



Gambar 9 Grafik Ciancone PI

Dengan melihat ke grafik, maka akan didapat parameter-parameter K_c , T_i , dan T_d .

2.6. Perancangan Pengendali Model Ziegler-Nichols[9]

Dalam perancangan pengendali model Ziegler-Nichols ini, langkah awal yang dilakukan sama dengan perancangan Pengendali model Ciancone. Bila grafik data hasil pengukuran secara empiris mendekati orde 1, maka dapat dilakukan pendekatan orde 1 seperti model

Ciancone. Dengan demikian, didapatkan persamaan fungsi alih pendekatan orde 1 berikut ini:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{1 + \tau s}$$

Dimana K_p adalah penguatan proses, τ adalah konstanta waktu, dan θ adalah waktu tunda. Dengan parameter-parameter tersebut, dapat dilakukan perancangan pengendali P, PI, maupun PID berdasarkan aturan berikut:

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	τ / θ	∞	0
PI	$0,9 \tau / \theta$	$\theta / 0,3$	0
PID	$1,2 \tau / \theta$	2θ	$0,5 \theta$

