



**Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi
Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi
secara Multidisiplin**

Nasruddin

**Pidato Pengukuhan Guru Besar Tetap Bidang Ilmu Optimasi Sistem Energi
Pada Fakultas Teknik - Universitas Indonesia
Depok 28 Agustus 2019**



**Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi
Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi
secara Multidisiplin**

Nasruddin

**Pidato Pengukuhan Guru Besar Tetap Bidang Ilmu Optimasi
Sistem Energi
Pada Fakultas Teknik - Universitas Indonesia
Depok 28 Agustus 2019**



Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi
Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi secara Multidisiplin

© Hak Pengarang dan Penerbit Dilindungi Undang-Undang
Cetakan 2019

Pengarang: Nasruddin

Dicetak oleh: Universitas Indonesia Publishing (UI Publishing)

Penerbit: Universitas Indonesia Publishing (UI Publishing)

Website: uipublishing.ui.ac.id

email: uipublishing@ui.ac.id

ISBN: 978-979-456-811-8

..... dan tidaklah kamu diberi ilmu pengetahuan melainkan sedikit.

(QS. Al-Isra:85)

"Ya Allah, aku berlindung kepada-Mu dari ilmu yang tidak bermanfaat, dari hati yang tidak khusyu', dari jiwa yang tidak merasa puas, dan dari doa yang tidak didengar (tidak dikabulkan)."

(HR. Abu Dawud no. 1548, An-Nasa'i no. 5536, dan Ibnu Majah no. 3837. Hadits ini shahih.)



Kata Pengantar

Buku Pidato Pengukuhan saya menjadi Guru Besar Tetap Fakultas Teknik Universitas Indonesia bidang ilmu Optimasi Sistem Energi berjudul Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi secara Multidisiplin, berisi mengenai sebagian dari hasil riset yang saya lakukan selama lima tahun terakhir di Departemen Teknik Mesin FTUI. Dalam buku ini diuraikan mengenai kaitan antara energi dengan tujuan-tujuan *Sustainable Development Goals* (SDGs), pengertian exergi secara termodinamika dan pengembangan aplikasinya pada analisa *Exergoeconomic* dan *Exergoenvironmental*.

Saya berharap buku pidato ini dapat memberikan inspirasi bagi kita untuk berpikir kreatif dan inovasi.

Depok, 28 Agustus 2019

Nasruddin

Daftar Isi

Contents

Kata Pengantar	v
1. Pendahuluan	3
2. Apa Perbedaan Exergi dengan Energi?	6
3. Analisis <i>Exergoeconomic</i>	8
4. Analisa Exergi dan Lingkungan (<i>Exergoenvironmental</i>)	13
5. Optimasi Sistem Energi	16
6. Optimasi Multi-Objektif Sistem Energi secara Multidisiplin	18
7. Penutup	23
8. Daftar Pustaka	25
CURRICULUM VITAE	32

Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi secara Multidisiplin

Oleh: Nasruddin

Bismillahirrohmaanirrahiim

Yang terhormat,

Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia
Ketua dan Anggota Majelis Wali Amanah Universitas Indonesia
Rektor dan Wakil Rektor Universitas Indonesia
Ketua dan Anggota Senat Akademik Universitas Indonesia
Ketua dan Anggota Dewan Guru Besar Universitas Indonesia
Dekan, Wakil Dekan, dan jajaran pimpinan Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Para Dekan, Wakil Dekan Fakultas di lingkungan Universitas Indonesia
Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Para Ketua dan Sekretaris Departemen di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Ketua dan Anggota Senat Akademik Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Para staf pengajar Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Seluruh Sivitas Akademika Universitas Indonesia

Sanak keluarga semuanya yang Saya cintai, dan

Ibu/Bapak para undangan yang Saya hormati

Assalamu'alaikum warahmatullaahi wabarakatuh,

Selamat pagi, Salam sejahtera untuk kita semua

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankanlah Saya mengucapkan Alhamdulillahirobbil'alamiin, Segala puji dan syukur kehadiran Allah Subhanahu Wata'ala atas segala rahmat, hidayah, rizki, dan karuniaNya sehingga kita dapat hadir di sini dalam keadaan sehat wal'afiat

dan penuh keridhoan pada upacara pengukuhan Saya sebagai Guru Besar Tetap dalam bidang Teknik Mesin di Universitas Indonesia. Shalawat serta salam tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya.

Sebelum Saya menyampaikan pidato pengukuhan ini, izinkanlah Saya menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya atas kesediaan para hadirin yang telah meluangkan waktu dan meringankan langkah kaki guna menghadiri upacara pengukuhan ini. Kehadiran Ibu/Bapak dan saudara-saudara sekalian tentunya merupakan suatu kehormatan dan kebahagiaan yang tak terhingga bagi Saya dan keluarga.

Ibu/Bapak hadirin yang Saya hormati,

Pada kesempatan ini, perkenankan Saya untuk menyampaikan pidato ilmiah pengukuhan Guru Besar Saya dengan judul:

Analisis Exergi sebagai Pendekatan Baru dalam Optimasi Multi-Objektif Sistem Energi: Sebuah Upaya Mencari Solusi secara Multidisiplin

1. Pendahuluan

United Nation Development Program (UNDP) telah menetapkan Tujuan Pembangunan Bearkelanjutan (Gambar 1) '*Sustainable Development Goals*' (SDGs) atau dikenal juga sebagai *Global Goals*. SDGs adalah sebuah panggilan untuk melakukan aksi guna menghilangkan kemiskinan, perlindungan terhadap planet, dan memastikan bahwa semua orang menikmati kedamaian dan kesejahteraan. Di antara 17 tujuan yang ingin dicapai, ada tiga Tujuan yang terkait dengan energi, diantaranya adalah **Tujuan 7**, yaitu memastikan akses pada energi bersih dan terjangkau. Saat ini, energi merupakan 60% penyumbang gas efek rumah kaca dan merupakan kontributor utama terjadinya perubahan iklim. Selain itu, efisiensi energi dapat menurunkan konsumsi listrik pada industri dan gedung hingga 14%. Tujuan yang terkait energi lainnya adalah **Tujuan 12**, yaitu konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab. Salah satu target dari tujuan 12 ini adalah penggunaan sumber daya alam yang lebih efisien dan berkelanjutan. Kemudian, **Tujuan 13**, yaitu penanganan perubahan iklim. Terkait Tujuan 13 ini maka dorongan untuk melakukan aksi guna membatasi dan mengurangi secara signifikan pemanasan global dan emisi CO₂ serta mendorong pembuatan pembangkit daya dengan energi yang berkelanjutan [1]. Sementara itu *Food and Agriculture Organization* (FAO) menetapkan bahwa energi juga termasuk salah satu dari tiga *nexus* (air-energi-makanan) yang harus dijamin ketersediaannya oleh penduduk bumi, karena ketiganya sangat penting dan saling terkoneksi satu sama lain.



Gambar 1. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau SDGs [2]

Beberapa penelitian yang terkait dengan tujuan pembangunan berkelanjutan telah dilakukan oleh beberapa peneliti dan bahkan sudah diaplikasikan di Indonesia. Penelitian yang terkait dengan Tujuan 7 adalah pemanfaatan sumber daya alam Indonesia yang terbarukan. Sebagaimana diketahui, di Indonesia, energi matahari adalah sumber energi yang tak pernah habis sehingga dapat dimanfaatkan hampir sepanjang tahun. Perkembangan terakhir dari *absorption chiller* menunjukkan bahwa sistem ini cocok untuk penggunaan energi matahari/surya secara efektif. Pemanfaatan energi matahari (*solar energy*) untuk sistem pendingin yang digerakkan oleh panas memiliki keuntungan yang signifikan, yaitu merupakan sumber energi bersih, tersedia tanpa biaya langsung, dan dapat diakses secara proporsional ketika beban pendinginan meningkat di siang hari. Oleh karena itu, memanfaatkan energi matahari untuk sistem *absorption chiller* di Indonesia

adalah salah satu teknologi yang menjanjikan yang dapat memecahkan masalah energi dan lingkungan [3]. Sementara itu, penggunaan teknologi yang tepat sesuai dengan karakteristik dari energi matahari merupakan tantangan tersendiri. Hal ini disebabkan karakteristik dari energi radiasi matahari yang tidak konstan sehingga suplai energi akan menjadi bervariasi dan sistem harus mampu mengikutinya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka digunakanlah *single-double-effect absorption chiller* [4].

Selain itu, Indonesia juga memiliki potensi energi terbarukan geotermal yang merupakan potensi terbesar di dunia dan tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Potensi ini belum dimanfaatkan secara maksimal mengingat tantangan-tantangan dalam pengembangan energi tersebut untuk menghasilkan listrik dalam jumlah yang memadai. Di samping itu, eksplorasi dan eksploitasi sumber energi geotermal harus dilakukan secara bertanggung jawab sehingga dapat dijaga keberlanjutannya tanpa merusak lingkungan [5].

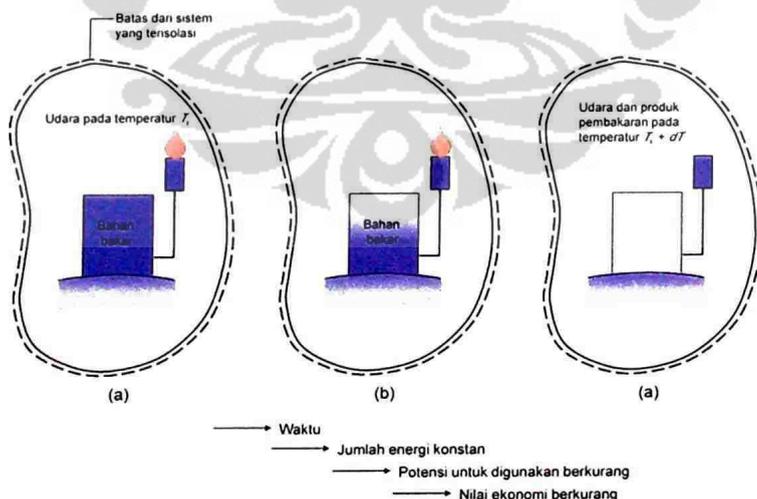
Peningkatan efisiensi dari suatu sistem pembangkit daya merupakan suatu hal yang sangat penting sehingga perlu adanya suatu kesepakatan bersama untuk menghitung nilai tersebut. Dengan hal itu, dapat diketahui secara *fair* berapa emisi yang dihasilkan oleh pembangkit tersebut dibandingkan dengan pembangkit lainnya [6]. Terkait program pengurangan emisi dari pembangkit sebagaimana yang ditetapkan oleh Tujuan 13 dari *SDGs* maka penggunaan bahan bakar alternatif dan terbarukan, seperti bioetanol, merupakan kandidat yang potensial untuk menggantikan bahan bakar fosil. Penelitian tentang dampak penggunaan bioetanol terhadap aspek lingkungan dan ekonomi perlu terus dilakukan untuk meningkatkan daya saing bioetanol terhadap bahan bakar fosil [7]. Disamping itu, untuk mencapai Tujuan 13 ini maka diperlukan pula teknologi yang dapat menangkap CO_2 di atmosfer dengan menggunakan CO_2 capture pada proses adsorpsi melalui *adsorbent* yang bahan bakunya tersedia di Indonesia [8].

Berdasarkan hal di atas maka diperlukan suatu pendekatan baru untuk mencapai ketiga Tujuan *SDGs* di atas yaitu, energi bersih terjangkau, penggunaan energi yang bertanggung jawab, dan penanganan perubahan iklim secara bersamaan, yaitu melalui sebuah pendekatan analisa exergi yang dilakukan secara komprehensif melalui optimasi multi-objektif.

2. Apa Perbedaan Exergi dengan Energi?

Exergi secara mendasar adalah bagian dari konsep Hukum Kedua Termodinamika yang sudah ada semenjak tahun 1800-an. Beberapa tahun terakhir ini, konsep exergi mendapat perhatian yang cukup besar dalam analisa proses yang biasanya digunakan untuk melihat ketidakefisienan (*inefficiency*) energi. Saat ini, analisis exergi tidak hanya digunakan untuk analisis proses tetapi telah diimplementasikan jauh melewati batasan aplikasi di bidang teknik, misalnya pada bidang ekonomi, dikenal istilah *Exergoeconomic* dan di bidang lingkungan, dikenal istilah *Exergoenvironmental*.

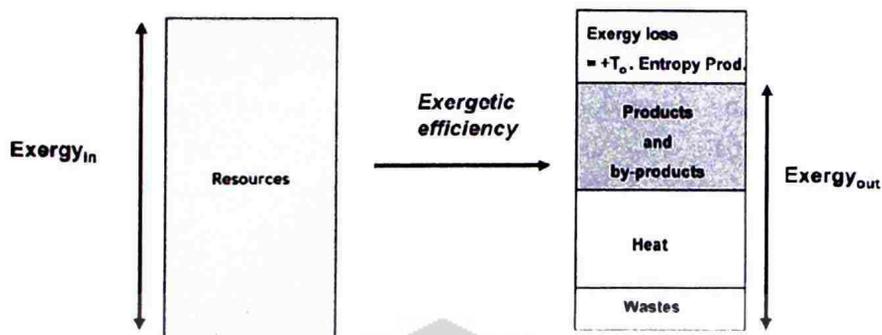
Mengapa analisis exergi diperlukan? Analisis sebagai sebuah sistem berdasarkan energi hanya akan mengidentifikasi energi yang ditransfer ke lingkungan sebagai sebuah ketidakefisienan secara termodinamika (*thermodynamic inefficiencies*), akan tetapi gagal untuk mengidentifikasi ketidakefisienan (*inefficiency*) pada kondisi yang *adiabatic* (suatu proses di mana tidak ada panas yang keluar atau masuk dalam sistem), sehingga terjadi kesalahpahaman analisis, yaitu dengan menganggapnya sebagai *inefficiencies* dari proses pelepasan panas ke lingkungan. Oleh karena itu, untuk memperbaiki kondisi tersebut, analisis exergi diperlukan.



Gambar 2. Ilustrasi tentang Exergi [9]

Untuk menggambarkan konsep exergi dan perbedaannya dengan konsep energi dapat dilihat pada gambar di atas (Gambar 2). Sebuah sistem terisolasi yang merupakan sebuah tangki yang berisi bahan bakar yang dikelilingi udara yang berjumlah sangat banyak di atmosfer (Gambar 2.a). Diasumsikan bahwa bahan bakar tersebut dibakar (Gambar 2.b) sehingga menghasilkan gas-gas hasil pembakaran dan panas serta udara yang ada di atmosfer (Gambar 2.c). Berdasarkan konsep kesetimbangan energi, maka total jumlah energi yang ada dalam sistem tersebut adalah konstan karena tidak adanya transfer energi yang melewati batas dari sistem terisolasi tersebut. Akan tetapi kondisi awal pada Gambar 2.a dengan kombinasi bahan bakar dan udara, akan lebih bermanfaat daripada campuran gas hasil pembakaran dan udara luar yang temperaturnya meningkat (Gambar 2.b dan 2.c). Secara aplikatif, konsep ini dapat digunakan pada bahan bakar beberapa peralatan guna menghasilkan listrik atau uap *superheat* dibandingkan dengan kegunaan dan manfaatnya yang terbatas dari gas-gas hasil pembakaran. Dengan demikian, dapat dikatakan sistem pada kondisi awal memiliki potensi lebih besar dibandingkan dengan kondisi akhir. Jika sebuah proses hanya mendapatkan gas-gas hasil pembakaran bertemperatur lebih tinggi maka potensi ini adalah sebuah *waste* yang berjumlah besar atau lebih tepatnya nilai potensi awal hilang atau rusak karena adanya proses natural yang irreversibel.

Berdasarkan Gambar 2. dapat disimpulkan bahwa kondisi awal dari sistem yang masih mengandung bahan bakar memiliki nilai ekonomi lebih tinggi dibandingkan dengan campuran gas-gas hasil pembakaran yang hanya naik sedikit temperaturnya di atmosfer. Dalam kata lain, nilai ekonomi dari sistem ini kurang potensial. Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan inilah dapat disimpulkan bahwa sesungguhnya antara exergi dengan nilai ekonomi sangat erat hubungannya. Hal yang sama juga berlaku terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan oleh sistem pada kondisi awal dan akhirnya.



Gambar 3. Analisa Hukum ke-2 Termodinamika pada Sistem [10]

Berdasarkan analisis Hukum ke-2 Termodinamika pada sebuah sistem (Gambar 3), komponen exergi masuk dari suatu proses yang dapat digambarkan sebagai *resources* akan mengalami degradasi menjadi *exergy out* dan *exergy loss*, di mana exergi keluar terdiri dari *product* dan *by-product*, kalor, dan *waste*. Perbedaan inilah yang disebut sebagai efisiensi exergi.

Exergi adalah kerja berguna teoritis maksimum, misalnya berupa listrik atau kerja poros yang dapat dihasilkan dari sistem konversi energi yang mencapai kondisi *thermodynamic equilibrium*. Adapun rumus dasar dari exergi sebagai berikut:

$$E_{\text{sys}} = E^{\text{PH}} + E^{\text{CH}} \quad (1)$$

Dari rumus di atas, total exergi yang selalu diperhitungkan keberadaannya dari sebuah system E_{sys} terdiri dari komponen exergi fisika E^{PH} dan exergi kimia E^{CH} .

3. Analisis Exergoeconomic

Exergoeconomic adalah metode berbasis exergi yang mengidentifikasi dan menghitung lokasi, nilai, penyebab, dan biaya ketidakefisienan secara termodinamika dalam sistem konversi energi. Inefisiensi sebenarnya terjadi dalam sistem tersebut adalah karena kehancuran exergi (*exergy destruction*) dan kehilangan exergi (*exergy loss*). Analisis *exergoeconomic* dilakukan pada tingkat komponen sistem dengan cara mengidentifikasi pentingnya biaya relatif dari

masing-masing komponen. Jika sebuah sistem memiliki lebih dari satu produk yang dihasilkan oleh keseluruhan instalasi yang ada, maka analisis *exergoeconomic* juga dapat dilakukan dengan mempertimbangkan alokasi biaya untuk masing-masing produk yang berbeda.

Exergoeconomic didasarkan pada dua prinsip penting yang merepresentasikan hubungan mendasar antara prinsip termodinamika dan prinsip ekonomi. Prinsip termodinamika adalah bersifat umum untuk semua pendekatan dan aplikasi *exergoeconomic*. Sedangkan prinsip ekonomi hanya mengacu pada aplikasi di mana diperlukan biaya investasi baru.

3.1 Exergy-Costing

Prinsip penetapan biaya exergi (*exergy-costing*) menyatakan bahwa exergi adalah satu-satunya dasar yang rasional untuk menetapkan nilai moneter yang terjadi, baik pada transport energi maupun pada inefisiensi dalam suatu sistem. Dalam proses konversi dan instalasi energi, exergi mewakili komoditas nilai termodinamika yang sebenarnya. Nilai biaya dan dampak lingkungan harus ditetapkan hanya berdasarkan komoditas yang bernilai sebenarnya. Massa, energi, atau entropi tidak boleh digunakan untuk menetapkan nilai biaya karena penggunaan parameter tersebut dapat menghasilkan kesimpulan yang keliru.

Menurut prinsip biaya exergi, aliran biaya (\dot{C}_j) adalah biaya dikaitkan dengan aliran exergi (\dot{E}_j), yang dirumuskan dengan persamaan, berikut:

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}_j \quad (2)$$

dimana c_j mewakili biaya rata-rata untuk setiap unit exergi pada aliran j dalam sistem yang sedang analisa.

Dalam *exergoeconomic*, tingkat biaya dihitung sebagai biaya per unit waktu operasi sistem pada kapasitas yang diberikan. Persamaan diterapkan pada exergi yang terkait dengan aliran material yang masuk atau keluar sistem serta transfer exergi yang terkait dengan transfer kerja dan panas.

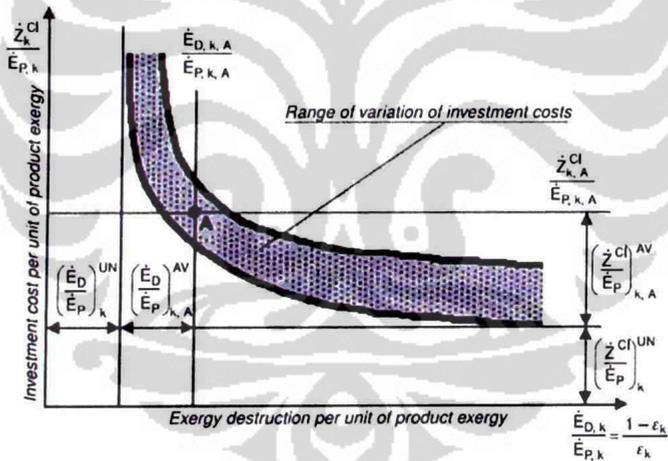
Adapun biaya (\dot{C}_k) yang terkait dengan exergi (\dot{E}_k) yang terkandung dalam komponen k dari sistem yang dirumuskan sebagai:

$$\dot{C}_k = c_k \dot{E}_k \quad (3)$$

Di sini c_k adalah biaya rata-rata per unit exergi yang terkandung dalam komponen k .

3.2. Kehancuran Exergi (*Exergy Destruction*) Mempengaruhi Biaya Investasi

Dalam termodinamika, kehancuran exergi merupakan inefisiensi yang besar dan merupakan kuantitas yang harus diminimalkan ketika efisiensi sistem secara keseluruhan harus maksimum. Namun, dalam desain suatu sistem konversi energi, kehancuran exergi dalam komponen tidak hanya mewakili inefisiensi termodinamika tetapi juga peluang untuk mengurangi biaya investasi yang terkait dengan komponen yang dianalisa dan juga terhadap keseluruhan sistem.



Gambar 4. Hubungan yang diharapkan antara biaya investasi dan kehancuran exergi (atau efisiensi exergi) untuk komponen ke- k dari sistem konversi energi [11]

Gambar 4 mengacu pada komponen sistem secara keseluruhan dan menunjukkan bahwa tingkat biaya yang terkait dengan investasi modal berkurang dengan meningkatnya tingkat kehancuran exergi ($E_{D,k}$) dalam komponen yang sama. Luasan kurva yang diarsir pada Gambar 4 untuk menunjukkan bahwa biaya investasi dapat bervariasi dalam kisaran tertentu

untuk setiap nilai kehancuran exergi tertentu. Pengaruh ukuran komponen yang dipertimbangkan dalam Gambar 4 adalah menghubungkan nilai $\dot{E}_{D,k}$ dengan tingkat exergi dari produk yang dihasilkan dalam komponen ini ($\dot{E}_{P,k}$).

Sebagian besar komponen dalam sistem konversi energi secara kualitatif menunjukkan hubungan antara $\dot{E}_{D,k}$ (Gambar 4). Jika biaya investasi komponen meningkat atau tetap konstan dengan meningkatnya kerusakan exergi, maka komponen ini tidak perlu dipertimbangkan dalam optimasi karena dalam hal ini akan selalu dipilih komponen yang memiliki biaya investasi terendah dan inefisiensi termodinamika terendah (yaitu efisiensi exergi tertinggi). Untuk aplikasi praktis, area di mana *trade-offs* yang signifikan antara biaya investasi dan kehancuran exergi adalah nilai yang harus dioptimalkan.

3.3 Neraca Biaya Exergi

Neraca biaya menunjukkan bahwa jumlah biaya yang terkait dengan semua aliran exergi yang keluar sistem sama dengan jumlah biaya semua aliran exergi masuk sistem ditambah biaya yang disebabkan oleh investasi modal dan operasi serta biaya pemeliharaan. Jumlah dari dua istilah terakhir dilambangkan dengan Z dan dihitung dengan bantuan analisis ekonomi yang terperinci. Dalam *exergoeconomic*, neraca biaya dirumuskan secara terpisah untuk setiap komponen sistem. Jadi, untuk komponen ke- k yang menerima transfer panas dan menghasilkan daya dapat ditulis:

$$\sum_c^{N_c} (c_e \dot{E}_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum_i^{N_i} (c_i \dot{E}_i)_k + \dot{Z}_k \quad (4)$$

Di sini, N_c sama dengan jumlah aliran yang keluar dari komponen ke- k dan N_i sama dengan jumlah aliran yang memasuki komponen ke- k .

Secara umum, jika ada sejumlah N_c aliran exergi keluar dari komponen yang dianalisis, maka kita perlu merumuskan $(N_c - 1)$ persamaan bantu untuk dapat menghitung biaya yang terkait dengan aliran yang ada saat biaya yang terkait dengan aliran masuk diketahui. Tergantung pada metode *exergoeconomic* yang digunakan, persamaan bantu dirumuskan secara eksplisit atau implisit. Untuk formulasi eksplisit dari persamaan bantu, yang

disebut prinsip F dan P (prinsip yang mengacu pada bahan bakar/Fuel (F) dan produk (P), yang selanjutnya digunakan dalam menghitung efisiensi exergi. Prinsip F mengacu pada pemindahan exergi dari aliran exergi dalam komponen yang sedang dianalisis dan menyatakan bahwa biaya spesifik rata-rata (biaya per unit exergi) yang terkait dengan transfer exergi ini (yang merupakan bagian dari exergi bahan bakar) harus sama dengan rata-rata biaya spesifik exergi yang diibuang ke aliran yang sama dalam komponen hulu.

Prinsip P mengacu pada suplai exergi ke aliran dalam komponen yang sedang dianalisis dan menyatakan bahwa setiap unit exergi dipasok ke aliran apa pun yang terkait dengan produk exergetik komponen dengan biaya rata-rata yang sama (c_F). Dengan bantuan neraca biaya dan persamaan tambahan, tingkat biaya dan biaya per unit exergi dihitung untuk setiap aliran exergi (yaitu, untuk setiap aliran material dan energi) dalam sistem keseluruhan. Dengan cara ini dapat dihubungkan setiap aliran tidak hanya massa, energi, entropi, dan exergi tetapi juga biaya. Hal ini adalah langkah pertama dalam memahami proses pembentukan biaya dan sumber biaya sebenarnya. Dengan demikian, dapat dihasilkan keputusan yang tepat untuk meningkatkan efektivitas biaya sistem konversi energi.

Adapun neraca biaya untuk komponen sistem k juga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k \quad (5)$$

$$c_{P,k} \dot{C}_{P,k} = c_{F,k} \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k \quad (6)$$

Di sini $\dot{C}_{P,k}$ dan $\dot{C}_{F,k}$ masing-masing adalah tarif biaya yang terkait dengan produk dan bahan bakar, $c_{P,k}$ dan $c_{F,k}$ mewakili biaya per unit exergi terkait dengan produk dan bahan bakar dan \dot{Z}_k adalah jumlah biaya yang terkait dengan investasi modal dan biaya operasi dan pemeliharaan untuk komponen ke- k :

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (7)$$

4. Analisa Exergi dan Lingkungan (Exergoenvironmental)

4.1 Konsep Umum

Untuk meningkatkan kinerja sistem konversi energi dari sudut pandang lingkungan, maka pemahaman tentang pembentukan dampak lingkungan di tingkat komponen suatu sistem energi adalah penting. Istilah lingkungan di sini mengacu pada lingkungan fisik, yang berbeda dari lingkungan termodinamika, yaitu segala sesuatu di luar sistem yang dianalisis dan digunakan dalam analisis exergi. Adapun yang disebut analisis *exergoenvironmental* bertumpu pada anggapan bahwa exergi adalah satu-satunya dasar rasional untuk menetapkan tidak hanya nilai biaya secara ekonomis tetapi juga nilai dampak lingkungan untuk transfer energi dan ketidakefisienan suatu sistem.

Analisis *exergoenvironmental* terdiri dari tiga langkah:

1. analisis *exergetic* dari keseluruhan sistem konversi energi.
2. *Life Cycle Assessment* (LCA) dari:
 - (a) setiap komponen sistem yang terkait,
 - (b) semua aliran input yang terkait terhadap keseluruhan sistem.
3. Menghitung dampak lingkungan yang diperoleh dari LCA untuk setiap aliran exergi sistem

4.2 Life Cycle Assessment (LCA) dan Exergi

LCA dilakukan untuk aliran input yang disuplai ke keseluruhan sistem, terutama aliran bahan bakar, dan untuk siklus komponen daur hidup. Inventarisasi aliran, yaitu konsumsi sumber daya alam dan energi serta emisi dapat dihitung berdasarkan pedoman pendekatan standar. Penilaian dampak lingkungan dapat dilakukan dengan sebuah indikator, misalnya *Eco-Indicator99* atau lainnya. Semua indikator ini didasarkan pada tiga kategori kerusakan, yaitu kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan sumber daya alam. Angka-angka yang diperoleh dari ketiga kategori tersebut kemudian digabungkan dan hasilnya dinyatakan sebagai poin Indikator-Lingkungan (pts), di mana kerusakan yang lebih tinggi didapat dari nilai Indikator-Lingkungan yang lebih tinggi.

4.3 Evaluasi Lingkungan

Dengan menggunakan analogi yang sama dengan biaya untuk aliran exergi dalam *exergoeconomics*, maka tingkat dampak lingkungan (\dot{B}) dan dampak lingkungan per unit exergi (b) digunakan untuk aliran exergi dalam evaluasi lingkungan. Tingkat dampak lingkungan adalah dampak lingkungan yang dinyatakan, misalnya, dalam *point* Eco-Indicator per unit waktu operasi sistem (*Point/minute* atau *mPts/s*). Dampak lingkungan spesifik (*exergy-based*) (juga disebut sebagai biaya lingkungan spesifik) adalah dampak lingkungan rata-rata yang terkait dengan produksi aliran j per unit exergi dari aliran yang sama [*Point/(exergy kJ)* atau *mPts/(exergy MJ)*]. Tingkat dampak lingkungan dari aliran exergi j adalah produk dari laju exergi E_j ; dan dampak lingkungan spesifik b_j yang didefinisikan sebagai

$$\dot{B}_j = \dot{E}_j b_j \quad (8)$$

Neraca dampak lingkungan untuk komponen k menyatakan bahwa jumlah dampak lingkungan yang terkait dengan semua aliran *input* ditambah dampak lingkungan terkait komponen sama dengan jumlah dampak lingkungan yang terkait dengan semua aliran keluaran:

$$\sum_c^{N_c} \dot{B}_{c,k} + \dot{Y}_k = \sum_i^{N_i} \dot{B}_{i,k} \quad (9)$$

atau

$$\sum_c^{N_c} (b_c \dot{E}_c)_k + \dot{Y}_k = \sum_i^{N_i} (b_i \dot{E}_i)_k \quad (10)$$

Persamaan F (*Fuel*) dan P (*Product*) dirumuskan dalam analogi persamaan yang sama untuk evaluasi *exergoeconomic*. Dampak lingkungan spesifik dari aliran exergi yang terkait dengan bahan bakar tetap konstan antara *inlet* dan *outlet*. Setiap unit exergi disuplai ke semua aliran exergi yang terkait dengan produk pada dampak lingkungan spesifik rata-rata yang sama yaitu b_{pk} . Dengan cara ini dampak lingkungan yang terkait dengan komponen yang dianalisa dan dengan kehancuran exergi di dalamnya, dibebankan ke aliran exergi yang terkait dengan produk dan pada akhirnya ke produk yang dihasilkan oleh keseluruhan sistem.

Dengan bantuan variabel *exergoenvironmental*, kinerja lingkungan dari komponen sistem dapat dievaluasi. Variabel-variabel ini didefinisikan untuk setiap komponen sistem dalam analogi sebagaimana sama dengan definisi variabel *exergoeconomic*.

Dampak lingkungan spesifik rata-rata (berbasis exergi) dari produk dan bahan bakar untuk komponen k masing-masing diberikan oleh:

$$b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (11)$$

$$b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (12)$$

Posisi relatif komponen ke- k dan hubungannya dengan komponen lain memengaruhi nilai-nilai $b_{P,k}$ dan $b_{F,k}$. Secara umum, nilai-nilai ini lebih rendah untuk komponen yang lebih dekat ke bahan bakar sistem keseluruhan dan lebih tinggi untuk komponen yang lebih dekat ke aliran produk untuk sistem keseluruhan. Hal ini disebabkan oleh penurunan tingkat exergi dan meningkatnya tingkat dampak lingkungan ketika kita beralih dari bahan bakar sistem keseluruhan ke produk sistem.

Tingkat dampak lingkungan yang terkait dengan kehancuran exergi, dalam komponen k dapat dihitung dengan rumus :

$$\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (13)$$

Pendekatan *exergoenvironmental* menilai dampak lingkungan total yang terkait dengan komponen k dengan menghitung dampak lingkungan dari kehancuran exergi $\dot{B}_{D,k}$, dan dampak lingkungan yang terkait dengan komponen \dot{Y}_k . Jumlah dari $(\dot{Y}_k + \dot{B}_{D,k})$ mengidentifikasi relevansi dari sudut pandang lingkungan dari komponen k dalam sistem yang sedang dipelajari.

Perbedaan relatif $r_{b,k}$, ditentukan oleh:

$$r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}} \quad (14)$$

Perbedaan relatif $r_{b,k}$ ini adalah indikator potensi untuk mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan suatu komponen, terutama ketika dihitung

dengan hanya biaya yang dapat dihindari. Sumber-sumber untuk pembentukan dampak lingkungan dalam suatu komponen dibandingkan dengan menggunakan faktor *exergoenvironmental* $f_{b,k}$ yang menyatakan kontribusi relatif dari dampak lingkungan terkait-komponen \dot{Y}_k dengan jumlah dampak lingkungan yang terkait dengan komponen ke- k :

$$f_{b,k} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{Y}_k + \dot{B}_{D,k}} \quad (15)$$

Penentuan dampak lingkungan pada tingkat komponen sistem dari suatu sistem konversi energi dapat dipelajari dengan bantuan analisis lingkungan. Tujuannya adalah untuk menghasilkan informasi yang berfungsi sebagai dasar untuk pengembangan opsi yang digunakan dalam perbaikan sehingga dampak lingkungan dari keseluruhan sistem akan berkurang.

5. Optimasi Sistem Energi

Berdasarkan definisi secara matematika, optimasi adalah sebuah proses mencari nilai maksimum atau minimum dari sebuah fungsi objektif yang dibatasi oleh beberapa *constraint* yang terdiri dari beberapa variabel yang memiliki *range* tertentu [12]. Secara sederhana dan praktis, optimasi melibatkan cara untuk mencari kemungkinan konfigurasi terbaik untuk suatu permasalahan tertentu yang mempertimbangkan batasan-batasan tertentu.

Jika suatu problem optimasi hanya melibatkan satu fungsi objektif, maka kondisi untuk mencari solusi optimum disebut sebagai optimasi *single* objektif. Optimasi *single* objektif hanya mempertimbangkan untuk mencari solusi dari permasalahan yang mengacu hanya pada satu kriteria. Optimasi *single* objektif telah banyak diaplikasikan dengan cukup luas dalam sistem energi untuk beberapa dekade berjalan. Kebutuhan untuk melakukan suatu optimasi yang melibatkan lebih dari satu fungsi objektif yang memiliki kepentingan yang setara dan merupakan kondisi riil yang sering dihadapi dalam kehidupan sehari-hari termasuk dalam sistem energi.

5.1 Optimasi Multi-Objektif

Suatu kondisi optimal sangat dipengaruhi oleh pemilihan fungsi objektif. Bagaimanapun juga ada beberapa aspek dari unjuk kerja yang cukup penting dalam aplikasi praktis. Di dalam disain sistem energi dan sistem termal, ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan. Di antaranya adalah fungsi objektif, yaitu efisiensi (energi dan/ atau exergi), laju produksi, *output*, kualitas, dan laju *heat transfer*. Fungsi objektif tersebut adalah parameter-parameter yang umum yang harus dicari nilai maksimumnya. Sementara itu, fungsi objektif yang lain, seperti biaya, *input*, dampak lingkungan, dan tekanan adalah parameter-parameter yang harus dicari nilai minimumnya. Semua hal-hal di atas, dapat dipilih sebagai fungsi objektif dari suatu kasus. Akan tetapi, hal tersebut akan lebih berarti dan bermanfaat jika mempertimbangkan lebih dari satu fungsi objektif yang merupakan kombinasi dari beberapa fungsi objektif di atas.

Untuk kasus optimasi sederhana, biasanya hanya dipergunakan untuk menentukan nilai minimum atau maksimum dari suatu fungsi variabel tunggal, yang dapat diselesaikan dengan menggunakan turunan pertama dan kedua untuk mencari nilai optimal dari nilai fungsi tersebut. Pada tingkatan yang lebih lanjut, optimasi dilakukan untuk mencari sebuah nilai optimum dari fungsi multi variabel. Hal ini, dapat diselesaikan dengan menggunakan beberapa *constraints*. Optimasi dengan menggunakan *constraints* adalah sangat penting dalam praktek keteknikan karena semua problem nyata dalam dunia keteknikan mengandung *constraints*.

Salah satu dari pendekatan umum yang digunakan untuk aplikasi fungsi multi-objektif adalah mengkombinasi fungsi-fungsi objektif yang ada menjadi satu *single* objektif yang akan diminimalkan atau dimaksimalkan. Contohnya dalam disain *heat exchanger* dan *cooling system* untuk peralatan elektronik, diinginkan nilai maksimum dari laju *heat transfer*. Bagaimanapun, hal ini sering mengakibatkan naiknya biaya laju aliran fluida dan juga naiknya kerugian tekanan akibat gesekan.

Untuk mencari solusi dari optimasi multi-objektif digunakan metode Pareto *frontier* yang digunakan untuk mencari titik-titik terbaik dari hasil optimasi tersebut. Semua titik pada Pareto *frontier* adalah kondisi disain yang optimal. Pemilihan dari sebuah disain tertentu dari beberapa titik Pareto *frontier* tersebut sangat tergantung kepada pengambil keputusan yang akan memilih titik optimal sesuai kebutuhan dari beberapa titik-titik optimal Pareto *frontier* tersebut.

6. Optimasi Multi-Objektif Sistem Energi secara Multidisiplin

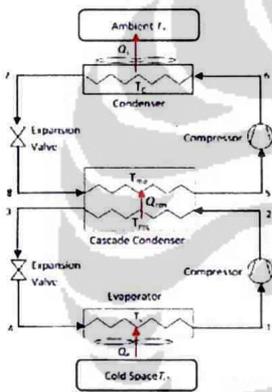
Sebuah sistem energi merupakan bidang yang sangat menarik dan menantang, hal ini karena dalam perancangan, pembuatan maupun operasionalnya melibatkan beberapa disiplin ilmu yang akan melengkapi beberapa aspek yang sangat diperlukan dalam tahapan aplikasinya. Sebagaimana dijelaskan di atas bahwa ada suatu konektivitas antara termodinamika, aspek ekonomi dan aspek lingkungan yang kesemuanya merupakan disiplin yang berbeda tetapi dapat disatukan oleh exergi yang mungkin sebelumnya seolah tidak ada keterkaitan antara satu dengan yang lainnya. Adanya keterkaitan ini akan memudahkan untuk melakukan suatu proses optimasi yang melibatkan dan mengaitkan antara beberapa disiplin tersebut.

Berikut ini disampaikan beberapa aplikasi optimasi multi-objektif pada system energi yang melibatkan ketiga disiplin tersebut baik dengan kombinasi dua fungsi objektif maupun dengan tiga fungsi objektif sekaligus.

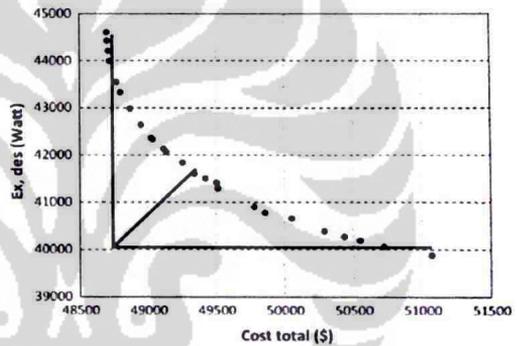
Optimasi multi-objektif dari sistem refrigerasi kaskade dengan menggunakan refrigeran Propana pada Siklus Temperatur Tinggi dan campuran Etana+CO₂ pada siklus temperatur rendah [13]

Pada penelitian ini, temperatur evaporator, temperatur kondenser, temperatur kondensasi campuran Etana+CO₂, perbedaan temperatur kaskade dan fraksi massa CO₂ dalam campuran dipilih sebagai *decision variables*. Sementara itu kapasitas pendinginan, temperatur ruang pendingin dan temperatur udara luar ditetapkan sebagai *constraint*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang

sistem pendingin kaskade seperti terlihat pada Gambar 5 yang kinerja optimalnya ditentukan dari segi ekonomi dan termodinamika. Dengan demikian, ada dua fungsi objektif yang seharusnya dioptimalkan secara simultan, termasuk total biaya tahunan yang terdiri dari modal dan biaya operasional dan total *exergy destruction* dari sistem tersebut. Untuk mencapai tujuan ini, temperatur operasi optimal sistem dan fraksi CO₂ harus ditentukan sehingga sistem memiliki *exergy destruction* dan biaya tahunan yang minimum. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa nilai optimal dari *decision variables* dari sistem ini ditentukan oleh trade-off antara biaya tahunan dan *exergy destruction* sebagaimana terlihat pada diagram Pareto pada Gambar 6.



Gambar 5. Skematik diagram sistem pendingin kaskade [13]

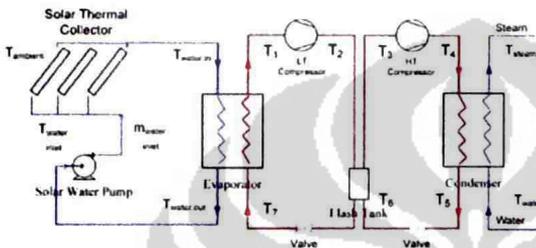


Gambar 6. Diagram Pareto biaya tahunan dan *exergy destruction* [13]

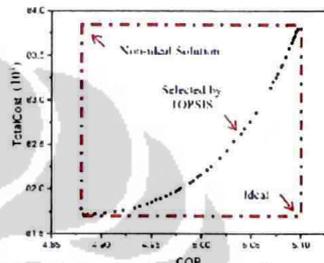
Optimasi Multi-Objektif dari Pompa Kalor dengan Tenaga Matahari dengan Menggunakan Refrigeran Ramah Lingkungan R1234ze(E) [14]

Kombinasi antara kolektor *solar* termal dan pompa kalor dalam sebuah aplikasi pompa kalor temperatur tinggi dengan target temperatur air panas yang dihasilkan yaitu sebesar 105 °C, merupakan salah satu cara untuk menggunakan energi terbarukan dan sekaligus menghemat biaya dari sebuah sistem termal (Gambar 7). Ada dua fungsi objektif yang ditetapkan yaitu koefisien unjuk kerja (COP) dan juga biaya total. Sedangkan sebagai *constraint* dipilih temperatur evaporasi, temperatur sisi hisap kompresor

dan juga temperatur kondensasi. *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA) digunakan untuk mencari solusi dari kasus ini, di mana sistem menggunakan refrigeran ramah lingkungan R1234ze(E). Berdasarkan hasil optimasi didapatkan bahwa temperatur evaporasi adalah 319 K, temperature kondensasi adalah 379 K dan nilai optimum COP adalah 5,04 dan total biaya 82.678 USD sebagaimana terlihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Skematik diagram pompa kalor temperatur tinggi dengan kolektor solar termal [14]

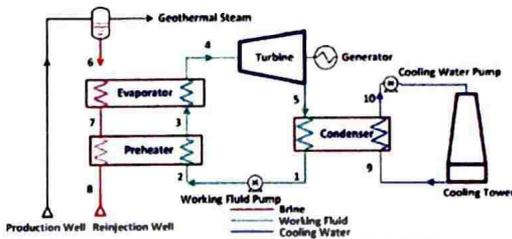


Gambar 8. Diagram Pareto COP dan total biaya tahunan [14]

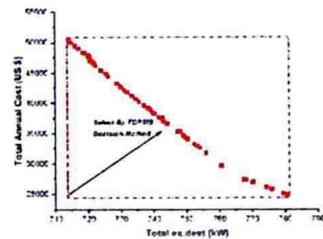
Analisis Exergi dan Optimasi Exergoeconomic dari Siklus Biner dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) [15]

Dengan meningkatnya kebutuhan akan energi dan juga isu-isu yang terkait lingkungan mendorong para ahli untuk mengembangkan teknologi yang cocok untuk menghadapi kedua masalah tersebut. Siklus sistem biner adalah sebuah teknologi pembangkit yang efektif yang dapat diaplikasikan dengan menggunakan sebuah PLTP skala kecil dengan menggunakan fluida yang memiliki temperatur penguapan yang lebih rendah dibandingkan dengan air. Pada penelitian ini sebuah model PLTP biner (Gambar 9) digerakkan dengan menggunakan sisa *brine* yang masih memiliki temperatur cukup tinggi yaitu 180 °C. Dua fungsi objektif yang ditetapkan untuk optimasi di sistem ini adalah minimum total *exergy destruction* dan minimum total biaya tahunan. Dari hasil optimasi didapatkan bahwa temperatur evaporasi adalah 163,3 °C, temperatur keluar *brine* 130 °C, dan temperatur keluar air pendingin condenser 35,4 °C. Tekanan kerja fluida keluar pompa adalah 3,859 kPa dengan komposisi campuran sebesar 86% R601 dan 14% R744.

Minimum total *exergy destruction* adalah 742.4 kW dan total biaya tahunan sebesar 36,723 USD dapat terlihat pada Gambar 10.



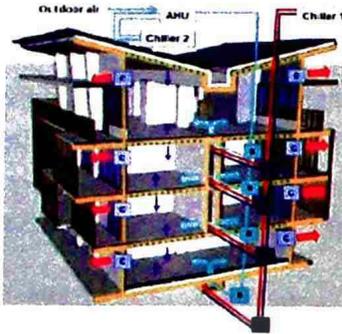
Gambar 9. Model PLTP biner [15]



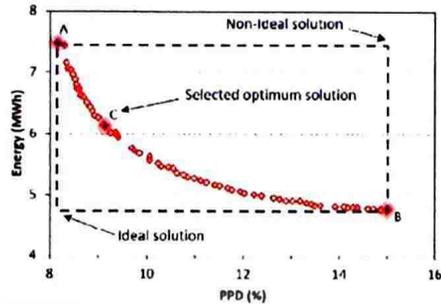
Gambar 10. Diagram Pareto total *exergy destruction* dan total biaya tahunan [15]

Optimasi Konsumsi Energi untuk HVAC dalam Sebuah Bangunan dengan Menggunakan Artificial Neural Network dan MOGA [16]

Optimasi dari sebuah sistem operasi *heating, ventilating and air conditioning* (HVAC) bertujuan untuk mendapatkan minimum biaya energi tahunan dan beberapa parameter dalam bangunan dan memaksimalkan kenyamanan termal. Kombinasi dari *artificial neural network* (ANN) and *multi-objective genetic algorithm* (MOGA) digunakan untuk mengoptimalkan operasi dari dua buah chiller dalam bangunan. Adapun sistem HVAC (Gambar 11) yang diinstal dalam bangunan adalah sistem *variable air volume* (VAV) dengan menggunakan *chiller* dan dilengkapi dengan *system dedicated outdoor air system* (DOAS). Beberapa parameter termasuk *setting thermostat*, desain solar pasif, dan *system control* dari operasi *chiller* adalah *decision variables* pada optimasi ini. Sementara itu *percentage of people* (PPD) dan total energi ditetapkan sebagai fungsi objektif, hasil optimasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 12.



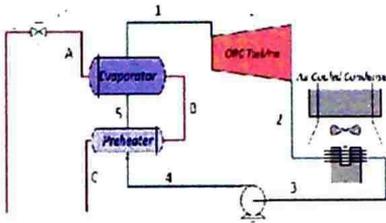
Gambar 11. Sistem HVAC [16]



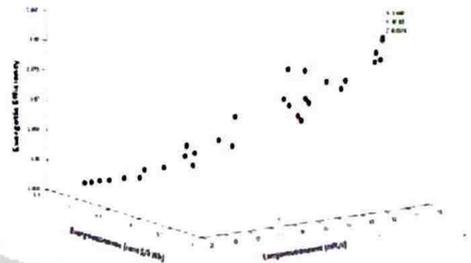
Gambar 12. Diagram Pareto PPD dan total energi [16]

Optimasi Multi-objektif dengan Menggunakan tiga Fungsi Objektif untuk Sebuah Siklus Organic Rankine Cycle (ORC) [17]

Optimasi multi-objektif yang terdiri dari tiga fungsi objektif yaitu: *exergetic efficiency*, *exergoeconomic*, and *exergoenvironment* untuk sebuah PLTP siklus biner di salah satu wilayah kajian di Ampallas, Sulawesi Barat. Siklus biner ORC (*organic rankine cycle*) dengan menggunakan Isopentana (Gambar 13) sebagai fluida sekunder dari sistem PLTP. Optimasi multi-objektif dilakukan untuk variasi sumber air panas yang memiliki temperatur antara 170 °C sampai dengan 175 °C. Setelah dilakukan optimasi maka didapatkan nilai optimum untuk *exergetic efficiency* sekitar 88,16% dengan biaya 3,44 cent\$/kWh dan nilai total *environmental impact* sebesar 10.85 mPt/s yang disebabkan adanya *exergy destruction* dari keseluruhan sistem untuk menghasilkan daya optimum sebesar 10.5 MW, hasil optimasi dari ketiga fungsi objektif diplot pada Gambar 14.



Gambar 13. Skematik diagram ORC [17]



Gambar 14. 3D Pareto ORC dengan fluida kerja Isopentana [17]

7. Penutup

Analisis exergi yang mempertimbangkan aspek ekonomi dan lingkungan, serta tidak menutup kemungkinan juga pada aspek lain, adalah sebuah pengembangan keilmuan yang patut dihargai. Melalui pendekatan yang bersifat multidisiplin ini, yang selanjutnya mengarah menjadi transdisiplin, maka pemanfaatan energi bukan hanya berpotensi memberikan profit, namun juga menghasilkan pemanfaatan energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, masing-masing bidang yang terlibat akan memiliki persepsi yang sama bahwa exergi adalah satu-satunya dasar rasional yang tidak hanya memiliki nilai ekonomis tetapi juga berperan dalam mendorong aksi yang bersifat menyelamatkan lingkungan dari kerusakan. Analisis exergi, ekonomi, lingkungan, dan bidang lain seperti ilmu hayati, sesungguhnya memiliki pandangan yang sama bahwa hal-hal yang bersifat natural, termasuk kualitas energi, adalah sesuatu yang tidak kekal, akan menurun potensinya seiring dengan waktu dan proses. Oleh karena itu, walaupun ilmu termodinamika, ekonomi, dan lingkungan merupakan disiplin ilmu yang berbeda, namun ketiganya dapat terjalin koneksifitas melalui analisis exergi. Dengan demikian, analisis exergi jawaban dari persoalan bagaimana energi di bumi yang terbatas dapat dimanfaatkan untuk kepentingan manusia tanpa pemborosan. Selain itu, hal yang tak kalah penting, analisis exergi dapat menjadi *'tools'* untuk mencapai Tujuan 7, Tujuan 12, dan Tujuan 13

dari *Sustainable Development Goal* (SDGs). Hal ini sejalan dengan salah satu peran Universitas Indonesia sebagai kontributor dalam memecahkan persoalan bangsa secara transdisiplin, termasuk di dalamnya hal-hal yang terkait dengan energi.



8. Daftar Pustaka

1. The Sustainable Development Goals Report 2017, United Nations publication issued by the Department of Economic and Social Affairs (DESA), ISBN: 978-92-1-101368-9.
2. United Cities and Local Governments Asia-Pacific, Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang Perlu diketahui oleh Pemerintah Daerah.
3. Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Idrus Alhamid M., **Nasruddin**, Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates, *Renewable Energy*, 99 (2016) 825-835
4. Lubis A., Jeong J., Giannetti N., Yamaguchi S., Saito K., Yabase H., Alhamid M.I., **Nasruddin**, Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller, *Applied Energy*, 219 (2018) 299-311
5. **Nasruddin**, Idrus Alhamid M., Daud Y., Surachman A., Sugiyono A., Aditya H.B., Mahlia T.M.I., Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (2016) 733-740
6. Mahlia T.M.I., Lim J.Y., Aditya L., Riayatsyah T.M.I., Pg Abas A.E., **Nasruddin**, Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20 (2018) 309-327
7. Hanif M., Mahlia T.M.I., Aditya H.B., Chong W.T., **Nasruddin**, Techno-economic and environmental assessment of bioethanol production from high starch and root yield Sri Kanji 1 cassava in Malaysia, *Energy Reports*, 2 (2016) 246-253
8. Martin A., Idrus Alhamid M., **Nasruddin**, Suryawan B., Soong Loh W., Bin Ismail A., Chun W., Choon Ng K., High-Pressure Adsorption Isotherms of Carbon Dioxide and Methane on Activated Carbon from Low-Grade Coal of Indonesia, *Heat Transfer Engineering*, 38 (2017) 396-402
9. Michael J. Moran, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* eight edition, 2014, John Wiley & Sons, United State of America, ISBN 978-1-118-41293-0.
10. Jo Dewulf, Herman Van Langenhove, Bart Muys, Stijn Bruers, Bhavik R. Bakshi, Geoffrey F. Grubb, D. M. Paulus, Enrico Sciubba, *Exergi: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology*, *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 7, p.2221-2232.

11. Bhavik R. Bakshi, Timothy G. Gutowski, Dusan P. Sekulic, Thermodynamics and the Destruction of Resources, 2011, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88455-6
12. Adrian Bejan, George Tsatsaronis, Michael J. Moran, Michael Moran, Thermal Design and Optimization, 1995, John Wiley & Son, ISBN: 978-0-471-58467-4
13. **Nasruddin**, Sholahudin S., Giannetti N., Amas, Optimization of a cascade refrigeration system using refrigerant C3H8 in high temperature circuits (HTC) and a mixture of C2H6/CO2 in low temperature circuits (LTC), Applied Thermal Engineering, 104 (2016) 96-103.
14. **Nasruddin N.**, Alhamid M.I., Aisyah N., Energetic, economic and environmental (3E) optimization of solar assisted heat pump using low GWP refrigerant R1234ze(E) for high temperature application, 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET 2017, 2018-January (2018) 79-84
15. **Nasruddin**, Nasution S., Aisyah N., Surachman A., Wibowo A.S., Exergi analysis and exergoeconomic optimization of a binary cycle system using a multi objective genetic algorithm, International Journal of Technology, 9 (2018) 275-286
16. **Nasruddin**, Sholahudin, Satrio P., Mahlia T.M.I., Giannetti N., Saito K., Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 35 (2019) 48-57
17. **Nasruddin**, Multi-objective Optimization: Exergetic Efficiency, Exergoeconomic and Exergoenvironment Analysis for Geothermal Binary Cycle Power Plant at Ampallas West Sulawesi, Indonesia, 2019, International Conference on Polygeneration.

Ucapan Terima Kasih

Pada hadirin yang Saya hormati, akhirnya perkenankanlah Saya pada akhir pidato ini memanjatkan puji syukur kehadirat Allah Subhanahu wata'ala atas segala karunia, limpahan rizki, dan nikmat yang tiada terhitung yang telah Allah berikan kepada Saya dan keluarga selama ini.

Pada kesempatan ini pula, ijinakanlah Saya mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui Menteri Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Bapak Prof. Mohammad Natsir, PhD. Ak yang telah memberikan kepercayaan kepada Saya dengan mengangkat Saya menjadi Guru Besar Tetap pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia, serta kepada Rektor Universitas Indonesia Prof. Dr. Ir. Muhammad Anis, M.Met dan kepada Ketua Dewan Guru Besar Universitas Indonesia Prof. Harkristuti Harkrisnowo, SH, MA, Ph.D. beserta seluruh Anggota Dewan Guru Besar Universitas Indonesia yang telah mengukuhkan saya pada hari ini dan telah berkenan menerima saya dalam lingkungan akademik yang sangat terhormat ini.

Terima kasih saya ucapkan juga pada Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia - Dr. Ir. Hendri D.S. Budiono, M.Eng, Ketua Dewan Guru Besar Fakultas Teknik Universitas Indonesia - Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas beserta anggota Dewan Guru Besar Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Wakil Dekan bidang Akademik FTUI - Dr. Ir. Muhammad Asvial, Wakil Dekan bidang Administrasi Umum FTUI – Prof. Dr.-Ing. Nandy Putra, Manajer Umum dan Fasilitas FTUI - Jos Istiyanto PhD, Ketua Departemen Teknik Mesin Dr. Ario Sunar Baskoro, Sekretaris Departemen Teknik Mesin Dr. Agus S. Pamitran yang telah memproses, mengusulkan dan mendukung Saya sehingga pengukuhan Guru Besar ini dapat terlaksana dengan baik.

Selanjutnya terima kasih Saya sampaikan kepada rekan-rekan Dosen dan Guru Besar di Departemen Teknik Mesin dan khususnya dari Kelompok Ilmu Konversi Energi DTM FTUI. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada tim review usulan Guru Besar saya baik dari internal Departemen Teknik Mesin, Prof. Dr. Ir. Budiarmo, Prof. Yulianto S. Nugroho, Herr Prof. Nandy Putra, dan juga dari eksternal yaitu Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA dari Departemen

Teknik Mesin dan Teknik Industri, Universitas Gadjah Mada dan Prof. Ir. Ari Darmawan Pasek Ph.D. dari Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Insititut Teknologi Bandung, yang telah memberikan tenaga, pikiran dan waktu yang cukup panjang dalam *me-review* karya-karya ilmiah saya. Ucapan terima kasih juga saya khususkan kepada Prof. Dr. Ir. M. Idrus Alhamid sebagai pembimbing S1 dan pembimbing spiritual saya dan akan tetap selalu menjadi pembimbing saya bahkan hingga saat ini dan seterusnya insya Allah. Selain itu juga kepada Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto yang telah membimbing saat saya pertama kali menjadi dosen dengan segala romantikanya. Ucapan terima kasih juga untuk Prof. Gandjar Kiswanto yang selalu bersama mulai dari satu kelas SMA, S1, jadi PNS dan S2 yang telah banyak membantu saya selama ini, termasuk dalam acara pengukuhan ini.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Direktur SDM Universitas Indonesia Ibu Riani Rachmawati SE., MA., PhD beserta tim SDM UI, tim SDM FTUI dan Departemen Teknik Mesin FTUI Ibu Suprapti, Pak Mulyadi, Pak Slamet, Bu Amida, Pak Maruih, Pak Nurul yang telah memproses, mendokumentasi, dan mendukung pengusulan Guru Besar Saya dari awal, terima kasih atas bantuannya.

Secara khusus ucapan terimakasih saya haturkan kepada kolega saya di Lab Teknik Pendingin dan Tata Udara DTM FTUI, Dr. Ir. Budihardjo, Ir. Rusdi Malin, MEng, Dr. Arnas yang telah menambah pengetahuan saya di bidang teknik refrigerasi dan tata udara dengan aplikasinya di lapangan. Terima kasih juga saya haturkan kepada pembimbing S2 saya Prof. dr. ir. Jan Berghmans dari Mechanical Engineering Department, Katholieke Universiteit Leuven, Belgia yang telah mengenalkan dan mengajarkan saya tentang *process safety*. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan untuk Promotor S3 saya Prof. Dr.-Ing. Klaus Lucas dan juga pengganti beliau Prof. Dr.-Ing. Andre Bardow dari *Lehrstuhl fuer Technische Thermodynamik (LTT), Faculty of Mechanical Engineering, RWTH Aachen, Jerman*. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr.-Ing. Belal Dawoud dari OTH Regensburg, Jerman yang telah membimbing saya selama selama mengerjakan disertasi di LTT, RWTH Aachen, Jerman.

Ucapan terimakasih juga saya sampaikan kepada K.U. Leuven atas beasiswa yang diberikan untuk program S2 saya, serta terimakasih kepada DAAD yang telah mensupport saya dengan beasiswa selama S3 di RWTH Aachen.

Pada kesempatan ini Saya juga ingin menyampaikan terima kasih kepada mahasiswa bimbingan Saya baik dari program S1, S2 maupun S3 Departemen Teknik Mesin FTUI yang berkat Rahmat Allah SWT telah memberikan saya banyak pengalaman dan pengetahuan yang luas sehingga Saya dapat memperdalam bidang keilmuan, baik melalui diskusi, tulisan ilmiah di jurnal nasional dan internasional, serta seminar nasional dan internasional. Alhamdulillah, semua itu merupakan hasil penelitian di laboratorium, baik di dalam maupun luar negeri melalui eksperimen, simulasi, dan *review paper*. Ucapan terima kasih ini, khusus saya tuju kepada Dr. Awaludin Martin, Dr. Darwin R.B.S., Dr. M. Yulianto, Dr. Suryadi, Dr. Ratiko, Dr. Arief Surachman, Dr. Nyayu Aisyah, Dr. Edy Susanto, Dr. Amas, Sholahuddin, MSc., Muswar Muslim, Euis Djubaedah, Dyah Arum Wulandari, Rizky Ruliandini, Fayza Yulia, Arif Rahman, dan yang lainnya yang tidak dapat sebutkan satu per satu. Semuanya telah berjuang keras, meluangkan waktu, dan mendo'akan Saya sehingga mencapai posisi saat ini.

Terima kasih kepada guru-guru Saya di Madrasah Ibtidaiyah (SD) dan Tsanawiyah (SMP) Darussa'adah, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, SMAN 8 Jakarta, serta para dosen di Departemen Teknik Mesin FTUI yang telah mendidik saya dengan tulus, semoga ini menjadi amal jariyah untuk para guru dan dosen yang saya cintai.

Saya sampaikan terima kasih kepada para karyawan di DTM FTUI, ibu Tina, ibu Ida, Indah, Yani, H. Maruih, Nurul, Hasan, Sarip, Mas Udi, Fery, Yasin dan yang lainnya yang telah banyak membantu saya terutama saat saya menjadi Ketua Departemen Teknik Mesin FTUI tahun 2013-2018 dan juga kepada semua pegawai P2M DTM Salemba yang banyak membantu saya terutama saat ditugaskan menjadi Direktur selama kurang lebih 6 bulan pada masa transisi di tahun 2001.

Terima kasih pada rekan-rekan Alumni Madrasah Ibtidaiyah (SD) dan Tsanawiyah (SMP) Darussa'adah, Alumni SMAN 8 Jakarta angkatan 90, rekan-

rekan alumni Mesin 90, Iluni UI, teman-teman selama di Leuven-Belgia dan Aachen-Jerman, atas segala dukungan, persahabatan dan persaudaraan yang terus terjalin hingga saat ini.

Terima kasih terbesar saya haturkan kepada kedua orang tua saya, ayah saya H. M. Yusuf Rodjali dan ibu saya Hj. Muslimah Umar yang telah melahirkan, membesarkan, membimbing dan mendidik Saya serta terus menerus mendo'akan saya dengan tulus-ikhlas sejak saya lahir hingga saat ini sehingga Alhamdulillah keberkahan selalu meliputi saya dan keluarga. Ayah dan Ibu saya ini juga telah mengikhhlaskan dan meridhoi Saya untuk meniti karir akademis di FTUI sehingga waktu saya menjadi terbatas bersamanya. Padahal di masa tua ayah dan ibu, seharusnya Saya banyak bersamanya. Dalam kesempatan ini, Saya memohon maaf yang sebesar-besar atas segala kekurangan dan kekhilafan yang saya lakukan. Sekali lagi, terima kasih Saya haturkan pada ayah dan ibu yang Saya cintai atas segala keridhoannya.

Kepada kedua mertua saya, bapak Alm. Drs. H. Abdurrahman Saleh, saya juga ucapkan terima kasih. Semasa hidup, beliau selalu memberikan dukungan kepada Saya, baik moril dan materil serta dengan perhatinnya dan panjatan do'a-do'anya yang ikhlas. Semoga Allah mengampuni segala dosanya, memberikan kasih sayangNya, dan memberikan cahayaNya dalam kuburnya. Aamiin ya Robbal 'Aalamiin, serta kepada ibu Hj. Siti Munawaroh yang juga selalu men-*support*, memberikan cintanya, mendo'akan dan selalu ingat akan makanan kesukaan Saya, menyediakannya, bahkan memberikan bekal pulang ketika Kami datang silaturrahim ke Ciputat. Semoga Allah SWT selalu meberikan kasih sayangNya kepada orang tua dan mertua sebagaimana mereka menyayangi kami ketika kami kecil.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada adik dan kakak saya, yaitu Nazulah, Nurcholis, Ikoh Suroyah, Papang, Mumun, Munsir, mas Budhy Munawar Rachman, mas Noer Fauzi Rachman, mas Didi Rosyadi Rachman, mbak Ima Farchaturrahmah, mbak Iis Istiqamah, Devi Arovah Mumtazah, mbak Meirita Widaningrum, mbak Budi Prawitasari mbak Triyuni Damayanti, mas Budi Tjahyono, mas Yusuf Dardiri, dan Samsu Rizal, juga tak lupa kepada 21

orang keponakan-keponakan yang selalu mendukung, memberikan kasih sayang dan pengertiannya, serta mendo'akan Saya dan keluarga. Kepada teman-teman dan warga di kompleks Taman Siliwangi Depok terimakasih atas persahabatan dan bantuannya selama ini semoga menambah keberkahan dan terus kompak.

Untuk istriku tercinta Nurul Huriyah Astuti, SKM, MKM, terima kasih atas doa dan kesabaran, pengorbanan serta kasih sayangnya selama menjalani romantika kehidupan ini. Suka duka dan perjuangan telah kita lewati sepanjang 22 tahun hidup bersama. Semoga Allah SWT terus memberikan keberkahan dalam hidup kita dan semoga selalu bersama dalam kebaikan dan terus bersama menua di dunia dan bertemu kembali menjadi pasangan abadi di akhirat kelak. Kepada anakku Sofia Taqia terima kasih atas doa, kesabaran, dan dukungannya. Terima kasih atas segala kebersamaan yang telah Sofi berikan, dan memberikan kebahagiaan untuk ayah dan bunda. Semoga Allah SWT menjadikan Sofi anak yang sholihah dan menjadi *qurratu a'yun* bagi ayah dan bunda. Semoga cita-cita dan harapan Sofi dikabulkan Allah. Semangat selalu ya, nak! Semoga Allah SWT berikan kesehatan, keberkahan kepada keluarga kami sehingga kami menjadi orang-orang yang bersyukur, bersabar dan *Ahlulqur'an*.

Akhir kata saya ucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada para hadirin, teman, kerabat dan undangan yang hadir pada upacara pengukuhan ini. Mohon maaf yang sebesar-besarnya, tidak dapat Saya sebutkan satu persatu. Saya juga sekali lagi menyampaikan mohon maaf yang sebesar-besarnya jika ada kekeliruan dan kekhilafan dalam pidato pengukuhan ini serta kekurangan dalam penerimaan pada acara pengukuhan ini. Semoga Allah SWT membalas budi baik Bapak dan Ibu sekalian dengan balasan yang lebih baik lagi. Terima Kasih.

Wabillahi Taufiq Wal Hidayah, Wassalaamu'alaikum Warahmatullaahi Wabarakaatuh

CURRICULUM VITAE

Data Pribadi

Nama : Prof. Dr.-Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng
 NIP : 197204111995121001
 Jabatan : Guru Besar (TMT 1 Mei 2019)
 Pangkat : Pembina Tingkat I
 Golongan : IV B
 Tempat/Tgl Lahir : Jakarta, 11 April 1972
 Agama : Islam
 Isteri : Nurul Huriyah Astuti, SKM, MKM
 Anak : Sofia Taqia
 Orang Tua : H. M. Yusuf Rodjali (Ayah)
 Hj. Muslimah Umar (Ibu)
 Alamat Rumah : Perumahan Taman Siliwangi No. D-23 Depok 16431 Jawa Barat
 Alamat Kantor : Departemen Teknik Mesin
 Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 16424
 Telp. 021-7270032
 Email : nasruddin@eng.ui.ac.id



Riwayat Pendidikan:

1978 – 1984	:	Madrasah Ibtidaiyah (SD) Darussa'adah, Mampang Prapatan, Jakarta
1984 – 1987	:	Madrasah Tsanawiyah (SMP) Darussa'adah, Mampang Prapatan, Jakarta
1987 – 1990	:	SMAN 8, Bukit Duri, Jakarta Selatan
1990 – 1995	:	Sarjana Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin - Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
1997 – 1999	:	Master of Engineering (M.Eng.), <i>Departement of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgia</i>
2001 – 2005	:	Doktoringenieur (Dr.-Ing.), <i>Lehrstuhl fuer Technische Thermodynamik (LTT), Faculty of Mechanical Engineering, RWTH Aachen, Jerman</i>

Pengalaman Kerja:

1995 – sekarang	: Dosen Tetap Departemen Teknik Mesin – Universitas Indonesia
2018 – sekarang	: Kepala Laboratorium Teknik Pendingin dan Tata Udara, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia
2013 – 2018	: Ketua Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
2010 – 2013	: Kepala Laboratorium Teknik Pendingin dan Tata Udara, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia
2017 - sekarang	: Anggota Evaluation and Accreditation Committee (EAC) dari <i>Indonesian Accreditation Board for Engineering Education</i> (IABEE)
Mengajar Kuliah :	
Program Sarjana	: Optimasi Sistem Energi, Termodinamika, Termofluida, Sistem Ventilasi dan Tata Udara, Audit Energi, Teknik Pendingin
Program Pascasarjana	: Optimasi Sistem Energi, Energi dan Lingkungan, Desain Penelitian Sistem dan Teknologi Geotermal,

Hibah Penelitian Dalam 5 Tahun Terakhir:

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
1	2019	Anggota Pengusul	Pengembangan Sistem Tata Udara Modular untuk Bus Listrik	LPDP
2	2019	Ketua Pengusul	Diversifikasi Sumber Daya Alam Indonesia untuk Konservasi Energi dan Lingkungan	Universitas Indonesia
3	2019	Anggota Pengusul	World Class Professor (WCP) Program Skema: A	Ristekdikti
4	2019	Ketua Pengusul	Pengembangan Material Alami dan Material Maju untuk Konservasi Energi Dan Lingkungan	Universitas Indonesia

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
5	2019	Anggota Pengusul	<i>Design and Preparation of Amino Acid-based Metal Organic Framework for CO₂ Adsorption Technology</i>	Osaka Gas Foundation
6	2019	Ketua Pengusul	<i>Understanding tribological behaviour of hBN nanoparticles in TMP Ester based biolubricant by assessing its rheological properties</i>	Institute of Fluid Science, Research Center of Tohoku University
7	2019	Ketua Pengusul	Pengembangan Prototype AC Modular untuk Bus Listrik dengan Tambahan Sistem <i>Heat Pipe</i>	PPTI Ristekdikti
8	2018	Anggota Pengusul	World Class Professor (WCP) Program Skema: A	Ristekdikti
9	2018	Ketua Pengusul	<i>Understanding tribological behaviour of hBN nanoparticles in TMP Ester based biolubricant by assessing its rheological properties</i>	Institute of Fluid Science, Research Center of Tohoku University
10	2018	Anggota Pengusul	<i>Synthesis and characterization of a Novel Biologically Metal Organic Framework by Functionalizing Ligand for Higher and more Economical CO₂ capture</i>	Osaka Gas Foundation
11	2018	Ketua pengusul	Perancangan dan Pembuatan Alat Ukur <i>Portable</i> Temperatur, Kelembaban, dan Aliran Udara Berbasis <i>Microkontroler</i> untuk Aplikasi Efisiensi Energi di <i>Data Center</i>	Ristekdikti

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
12	2018	Anggota Pengusul	Optimasi Perbanyakkan Biomassa <i>Strain Culturable Cyanobacteria Indigenous</i> dari Indonesia untuk Produksi Biodiesel	Ristekdikti
13	2018	Ketua pengusul	Studi Simulasi Dinamika Molekuler dan Eksperimen untuk Optimasi Biopelumas Nano	Ristekdikti
14	2018	Ketua pengusul	Modifikasi Zeolite Alam Indonesia asal Blitar dengan Metode Impregnasi Larutan Logam untuk Aplikasi Pendingin Adsorpsi	Ristekdikti
15	2018	Ketua pengusul	Optimasi Fotobioreaktor dalam Memproduksi Biomassa Mikroalga untuk Menghasilkan Biofuel sebagai Bahan Bakar yang Ramah Lingkungan	Ristekdikti
16	2018	Ketua pengusul	Kajian Eksperimental Dan Simulasi Molekular Adsorpsi Gas Karbondioksida Dengan Adsorben Komposit <i>Metal-Organic Framework</i> Sebagai Upaya Mereduksi Emisi Gas Rumah Kaca	Ristekdikti
17	2018	Anggota Pengusul	Pengembangan Solar Thermal Energy untuk Industrial Heat Pump	Ristekdikti
18	2017	Ketua Pengusul	World Class Professor (WCP) Program Skema: B	Ristekdikti
19	2017	Anggota Pengusul	Material Berbahan Plastik Bekas Untuk Rumah Murah	Ristekdikti
20	2017	Anggota Pengusul	Pembuatan Oksidasi Grafena dari Limbah Grafit dan Aplikasinya sebagai Bahan Aditif pada Pembuatan Fluida Pengeboran	Ristekdikti

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
21	2017	Anggota Pengusul	Analisis dan Desain Sistem Penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas Reaktor Daya Eksperimental	Ristekdikti
22	2017	Ketua Pengusul	Optimasi <i>exergi</i> , ekonomi dan dampak lingkungan pada <i>chiller</i> adsorpsi menggunakan <i>multiobjective genetic algorithms</i>	Universitas Indonesia
23	2017	Ketua Pengusul	Simulasi dan Eksperimen Pengaruh Gelombang Ultrasonik pada Fotobioreaktor terhadap Proses Pemanenan <i>Synechococcus Sp</i>	Universitas Indonesia
24	2017	Ketua Pengusul	Pengaruh jenis silika gel pada dua model <i>fin tube adsorber</i> berbeda terhadap performa <i>chiller</i> adsorpsi	Universitas Indonesia
25	2017	Ketua Pengusul	Kinerja Lapisan Tapioka-Zeolite sebagai Adsorben pada Alat Penukar Kalor Sistem Pendingin Adsorpsi	Universitas Indonesia
26	2017	Ketua Pengusul	Pengaruh Intensitas Aerasi terhadap Pertumbuhan <i>Synechococcus Sp. HS-9</i> dan <i>HS-7</i> dalam Fotobioreaktor Sederhana	Universitas Indonesia
27	2017	Ketua Pengusul	Analisa kinerja <i>cooling module</i> pada kotak vaksin dengan membandingkan 3 jenis adsorbent (silika gel, zeolite alami, dan zeolite sintesis)	Universitas Indonesia
28	2017	Ketua Pengusul	Simulasi dan Eksperimen Pengaruh Mikro <i>Bubble</i> pada Fotobioreaktor terhadap Proses Pertumbuhan <i>Synechococcus sp</i>	Universitas Indonesia

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
29	2017	Principal Investigator	<i>New Generation Zeolites from Indonesian Natural Zeolite based for Adsorption Cooling and Refrigeration Application</i>	<i>Japan International Cooperation Agency project Office for ASEAN University Network</i>
30	2016	Anggota Pengusul	Pressure Drop Aliran Dua Fase Evaporasi Diabatik untuk Pengembangan Microchannel Heat Exchanger dengan Refrigeran Ramah Lingkungan	Ristekdikti
31	2016	Ketua Pengusul	Rancang Bangun Pemanfaatan Solar Thermal Untuk Sistem Desorpsi Pada Mobile Vaccine Refrigerator Teknologi Adsorpsi Di Daerah Terpencil	Pemerintah
32	2016	Ketua Pengusul	Analisa Energi di Pelabuhan Peti Kemas Berpendingin (<i>Refrigerated Container</i>)	Universitas Indonesia
33	2016	Principal Investigator	<i>New Generation Zeolites from Indonesian Natural Zeolite based for Adsorption Cooling and Refrigeration Application</i>	<i>Japan International Cooperation Agency project Office for ASEAN University Network</i>
34	2016	Ketua Pengusul	Pengembangan Sistem Pemeliharaan dan Peningkatan untuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebagai Sumber Daya Energi Terbarukan	Universitas Indonesia

No	Tahun	Peran	Judul	Sumber dana
35	2015	Anggota Pengusul	Pengembangan Heat Pump dengan Solar Thermal Kolektor Menggunakan Refrigeran yang Ramah Lingkungan	Ristekdikti
36	2015	Ketua Pengusul	Rancang Bangun Pemanfaatan Solar Thermal untuk Sistem Desorpsi pada Mobile Vaccine Refrigerator Teknologi Adsorpsi di Daerah Terpencil	Ristekdikti
37	2015	Principal Investigator	<i>New Generation Zeolites from Indonesian Natural Zeolite based for Adsorption Cooling and Refrigeration Application</i>	<i>Japan International Cooperation Agency project Office for ASEAN University Network</i>
38	2014	Ketua Pengusul	Desain dan Pengembangan Chiller Sistem Adsorpsi Tenaga Matahari Tipe Adsorber Modular untuk Aplikasi di Indonesia	Ristekdikti
39	2014	Ketua Pengusul	<i>Theoretical and Experimental Study of Adsorption Chiller using Indonesian Natural Zeolite- Water Working Pair for Application in Indonesia</i>	Ristekdikti

Buku:

Nasruddin, *Modeling and Simulation of Silicagel-Water Two-Bed Adsorption*, 2005, Mainz Verlag, Aachen Germany, ISBN: 3-86130-826-6

Budiarso dan **Nasruddin**, *Optimasi Sistem Energi*, 2011, DTM, Depok, ISBN: 9-786029-841206

Paten:

Judul: Metode Pengeringan Beku Vakum yang Memanfaatkan Panas Buang Kondensor dan Peralatan untuk Metode Pengeringan Beku Vakum yang Memanfaatkan Panas Buang Kondensor

Inventor: M. Idrus Alhamid, Nasruddin, M. Yulianto

No Paten: IDP000045669

Tanggal Pemberian: 8 Mei 2017

Award/Penghargaan:

- 1) Satyalancana Karya Satya 20 tahun pada tahun 2018
- 2) Juara II Ketua Program Studi berprestasi tingkat Universitas Indonesia tahun 2017
- 3) Peneliti terbaik I Universitas Indonesia tahun 2012
- 4) Satyalancana Karya Satya 10 tahun pada tahun 2008
- 5) Beasiswa Doktor dari DAAD *Deutscher Akademischer Austauschdienst/German Academic Exchange Services*, 2001 - 2004
- 6) Beasiswa Magister di Katholike Universiteit Leuven, Belgia, 1997 - 1999

Pengalaman menjadi Pembicara Utama:

<i>Konferensi/Seminar</i>	Lokasi	Tahun
<i>The 6th International Conference of Saving Energy in Refrigeration and Air-Conditioning</i>	Seoul, Korea	2019
<i>The 3rd i-TREC (International Tropical Renewable Energy Conference) 2018, Bali, Indonesia</i>	Bali, Indonesia	2018
<i>Internasional Internasional Meeting Advanced Thermofluids (IMAT)</i>	Johor Bahru, Malaysia	2017

<i>IWGTB - International Workshop on Geothermal Technology and Bussiness, 2016, UI, Depok</i>	UI Depok, Indonesia	2016
<i>Asian Heat Pump Meeting, Waseda, Japan pada tahun 2016</i>	Tokyo, Jepang	2016
<i>Society Air Conditioning and Refrigeration Engineer of Korea (SAREK) Meeting</i>	Seoul, Korea	2013

Pengalaman sebagai Penguji S3 Eksternal:

Tahun	Perguruan Tinggi	Tema
2019	Kookmin University, Seoul, Korea	<i>Smart ventilation control based on Bayesian occupancy estimation</i>
2016	Universitas Gadjah Mada	Analisis Kehandalan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Entalpi Tinggi

Editor Jurnal:

Tahun	Nama Journal International	Penerbit	Jabatan
2019-sekarang	Evergreen (Scopus Q3)	Kyushu University, Japan	<i>Regional Editor</i>
2018-sekarang	Makara Journal of Technology	Universitas Indonesia	<i>Editorial Board</i>

Web of Science ResearcherID : S-7663-2019

PUBLICATIONS:	TOTAL TIMES CITED:	H-INDEX:
80	266	8

Publikasi 5 Tahun Terakhir yang Terindeks di *Web of Science*

No	Publikasi yang terindeks <i>Web of Science</i>	<i>SCImago Journal Rank Indicator</i>
1	Nasruddin , Sholahudin, Satrio P., Mahlia T.M.I., Giannetti N., Saito K., Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm, Sustainable Energy Technologies and Assessments , 35 (2019) 48-57	Q1
2	Ratiko, Moriizumi J., Yamazawa H., Nasruddin , Quantification of the impact of temperature difference between two connected indoor spaces on 222Rn concentration, Building and Environment , 149 (2019) 322-329	Q1
3	Nasruddin , Aisyah N., Alhamid M.I., Saha B.B., Sholahudin S., Lubis A., Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis, Case Studies in Thermal Engineering , 13 (2019)	Q1
4	Susanto E., Alhamid M.I., Nasruddin , Budihardjo, An experimental investigation into the effect of thermostat settings on the energy consumption of household refrigerators, International Journal of Technology , 9 (2018) 364-371	Q2
5	Yuliusman, Afdhol M.K., Sanal A., Nasruddin , CFD Modelling of Adsorption Behaviour in AGN Tank with Polyethylene Terephthalate Plastic Waste Based Activated Carbon, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 316 (2018)	
6	Susanto E., Idrus Alhamid M., Nasruddin , Budihardjo, Characteristics Air Flow in Room Chamber Test Refrigerator Household Energy Consumption with Inlet Flow Variation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 316 (2018)	
7	Kusrini E., Utami C.S., Usman A., Nasruddin , Tito K.A., CO2 capture using graphite waste composites and ceria, International Journal of Technology , 9 (2018) 287-296	

8	Nasruddin , Budiyo M.A., Nawara R., Comparative study of the monthly global solar radiation estimation data in Jakarta, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
9	Nasruddin , Kurniawan N., Prasetyadi D., Sherly, Critical analysis using FMEA fuzzy logic on geothermal steam turbine system, AIP Conference Proceedings, 1983 (2018)	
10	Nasruddin , Djubaedah, Gurky R.G., Alius Q.H., Arsyad A.P., Design, development and performance prediction of solar heater for regeneration of adsorbent chamber, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
11	Nasruddin N. , Alhamid M.I., Aisyah N., Energetic, economic and environmental (3E) optimization of solar assisted heat pump using low GWP refrigerant R1234ze(E) for high temperature application, 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET 2017, 2018-January (2018) 79-84	
12	Nasruddin , Alhamid M.I., Aisyah N., Exergetic-Economic analysis and optimization of solar assisted heat pump using Multi-objective Genetic Algorithm, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
13	Rachmat A., Nasruddin , Wibowo A.S., Surachman A., Exergoeconomic analysis and optimization of a combined double flash - Binary cycle for Ulubelu geothermal power plant in Indonesia, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
14	Nasruddin , Nasution S., Aisyah N., Surachman A., Wibowo A.S., Exergi analysis and exergoeconomic optimization of a binary cycle system using a multi objective genetic algorithm, International Journal of Technology , 9 (2018) 275-286	Q2

15	Aisyah N., Alhamid M.I., Nasruddin , Exergy and exergoenvironmental assessment and optimization of low GWP refrigerant for vapor compression heat pump system, International Journal of Technology , 9 (2018) 1256-1265	Q2
16	Nasruddin , Sholahudin, Idrus Alhamid M., Saito K., Hot water temperature prediction using a dynamic neural network for absorption chiller application in Indonesia, Sustainable Energy Technologies and Assessments , 30 (2018) 114-120	Q1
17	Nasruddin , Budiyanto M.A., Lubis M.H., Hourly solar radiation in Depok, West Java, Indonesia (106.7942 Longitude, -6.4025 Latitude), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
18	Perdana L.R., Ratnasari N.G., Ramadhan M.L., Palamba P., Nasruddin , Nugroho Y.S., Hydrophilic and hydrophobic characteristics of dry peat, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
19	Mahlia T.M.I., Lim J.Y., Aditya L., Riayatsyah T.M.I., Pg Abas A.E., Nasruddin , Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction, Clean Technologies and Environmental Policy , 20 (2018) 309-327	Q1
20	Wibowo A.S., Kurniawan N., Nasruddin , Surachman A., Multi-objective optimization and integration of double effect absorption refrigeration system (DEARS) into Kamojang power plant (PP) to improve plant performance, AIP Conference Proceedings, 1983 (2018)	
21	Djubaedah E., Rachmat A., Aisyah N., Nasruddin , Kurniawan A., Multi-objective optimization of a two-bed solar adsorption chiller based on exergy and economics, International Journal of Technology , 9 (2018) 1276-1284	Q2
22	Lubis A., Jeong J., Giannetti N., Yamaguchi S., Saito K., Yabase H., Alhamid M.I., Nasruddin , Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller, Applied Energy , 219 (2018) 299-311	Q1

23	Ratiko R., Samudera S.A., Hindami R., Siahaan A.T., Naldi L., Hapsari D., Mahlia T.M.I., Nasruddin N. , Optimization of dry storage for spent fuel from G.A. Siwabessy nuclear research reactor, International Journal of Technology , 9 (2018) 55-67	Q2
24	Nasruddin , Lestari M., Supriyadi, Sholahudin, Optimization Study of Hydrogen Gas Adsorption on Zig-zag Single-walled Carbon Nanotubes: The Artificial Neural Network Analysis, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 333 (2018)	
25	Nasruddin , Alius Q.H., Djubaedah, Taufan A., Gurky R.G., Arsyad A.P., Performance prediction of vaccine carrier using adsorption process and 13x/cacl2 composite zeolite as adsorbent, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
26	Djubaedah, Wulandari, Nasruddin , Preliminary study of natural zeolite from Bayah for solar powered cooling application, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
27	Kusrini E., Utami C.S., Nasruddin , Prasetyanto E.A., Bawono A.A., Preparation and Characterization of Graphite Waste/CeO2 Composites, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 316 (2018)	
28	Wulandari D.A., Nasruddin , Lemington, Studies of the water adsorption on Lampung's natural zeolite of Indonesia for cooling application, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 316 (2018)	
29	Budiyanto M.A., Nasruddin , Study on the estimation of solar radiation: Case study: Jakarta, Indonesia, 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET 2017, 2018-January (2018) 5-8	
30	Nasruddin , Monasari R., Dewantoro B.R., Attharik M.I., Wibowo A.S., Surachman A., Thermodynamic analysis and multi objective optimization of kalina and absorption cycle for power and cooling driven by lahendong geothermal source, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	

31	Nasruddin , Wibowo A.S., Utilization of waste heat from separation process of Ulubelu's geothermal power plant by implementing an Absorption Refrigeration System (ARS) to improve plant performance, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 105 (2018)	
32	Nasruddin , Martin A., Alhamid M.I., Tampubolon D., Adsorption Isotherms of Hydrogen on Granular Activated Carbon Derived From Coal and Derived From Coconut Shell, Heat Transfer Engineering , 38 (2017) 403-408	Q2
33	Nasruddin , Muhammad Arif Budiyanto, Anondho Wijanarko, Osvaldo Sahat, Ghilandy Ramadhan, Adsorption isotherms of natural gas on activated carbons from banana peel waste and water hyacinth, IEEE, (2017)	
34	Alhamid M.I., Nasruddin , Aisyah N., Sholahudin, Characteristics of evacuated tubular solar thermal collector as input energy for cooling system at Universitas Indonesia, AIP Conference Proceedings, 1826 (2017)	
35	Djubaedah E., Taufan A., Ratnasari N., Fahrizal A., Hamidi Q., Nasruddin , Design and performance prediction of solar adsorption cooling for mobile vaccine refrigerator, AIP Conference Proceedings, 1826 (2017)	
36	Martin A., Idrus Alhamid M., Nasruddin , Suryawan B., Soong Loh W., Bin Ismail A., Chun W., Choon Ng K., High-Pressure Adsorption Isotherms of Carbon Dioxide and Methane on Activated Carbon From Low-Grade Coal of Indonesia, Heat Transfer Engineering , 38 (2017) 396-402	Q2
37	Yuliusman, Nasruddin , Sanal A., Bernama A., Haris F., Hardhi M., Improved of Natural Gas Storage with Adsorbed Natural Gas (ANG) Technology Using Activated Carbon from Plastic Waste Polyethylene Terephthalate, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 75 (2017)	
38	Kusrini E., Sasongko A.K., Nasruddin , Usman A., Improvement of carbon dioxide capture using graphite waste/ Fe ₃ O ₄ composites, International Journal of Technology , 8 (2017) 1436-1444	Q2

39	Farizal Farizal, Radityo Aji, Amar Rachman, Nasruddin Nasruddin , Teuku Meurah Indra Mahlia, Indonesia's Municipal Solid Waste 3R and Waste to Energy Programs, <i>Makara Journal of Technology</i> , 21 (2017) 153-159	
40	R. Ratiko, N. Nasruddin , W. Wulandari, A. Rosidi, E. Marzuki, Multi-objective optimization of ventilation and air conditioning system at Interim Storage for Spent Nuclear Fuel, <i>IEEE</i> , (2017)	
41	Mulia K., Putri S., Krisanti E., Nasruddin , Natural deep eutectic solvents (NADES) as green solvents for carbon dioxide capture, <i>AIP Conference Proceedings</i> , 1823 (2017)	
42	Satrio P., Sholahudin S., Nasruddin , Performance evaluation of radiant cooling system application on a university building in Indonesia, <i>AIP Conference Proceedings</i> , 1826 (2017)	
43	Yuliusman, Nasruddin , Afdhol M.K., Amiliana R.A., Hanafi A., Preparation of Activated Carbon from Palm Shells Using KOH and ZnCl ₂ as the Activating Agent, <i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i> , 75 (2017)	
44	Yuliusman, Nasruddin , Sanal A., Bernama A., Haris F., Ramadhan I.T., Preparation of activated carbon from waste plastics polyethylene terephthalate as adsorbent in natural gas storage, <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , 176 (2017)	
45	Yuliusman, Nasruddin , Afdhol M.K., Haris F., Amiliana R.A., Hanafi A., Ramadhan I.T., Production of activated carbon from coffee grounds using chemical and physical activation method, <i>Advanced Science Letters</i> , 23 (2017) 5751-5755	
46	Nasruddin , Taufan A., Manga A., Budiman D., Simulation of adsorber tube diameter's effect on new design silica gel-water adsorption chiller, <i>AIP Conference Proceedings</i> , 1826 (2017)	
47	Muhammad Arif Budiyanto, Takeshi Shinoda, Nasruddin , Study on the CFD simulation of refrigerated container, <i>IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering</i> , 257 (2017)	

48	Novianto S., Pamitran A.S., Nasruddin , Alhamid M.I., Effect of superficial velocity on vaporization pressure drop with propane in horizontal circular tube, AIP Conference Proceedings, 1737 (2016)	
49	Supriyadi, Nasruddin , Kosasih E.A., Kurniawan B., Zulkarnain I.A., Improving hydrogen physisorption energy using swents through structure optimization and metal doping substitution, International Journal of Technology , 7 (2016) 1454-1462	Q2
50	Agus Sunjarianto Pamitran, Sentot Novianto, Normah MohdGhazali, Nasruddin , Raldi Koestoer, INVESTIGATION ON VOID FRACTION FOR TWO-PHASE FLOW PRESSURE DROP OF EVAPORATIVE R-290 IN HORIZONTAL TUBE, Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering) , 78 (2016) 97-104	Q2
51	Nasruddin , Sholahudin S., Giannetti N., Arnas, Optimization of a cascade refrigeration system using refrigerant C3H8 in high temperature circuits (HTC) and a mixture of C2H6/CO2 in low temperature circuits (LTC), Applied Thermal Engineering , 104 (2016) 96-103	Q1
52	Farizal Farizal, Wenty Eka Septia, Amar Rachman, Nasruddin Nasruddin , Teuku Meurah Indra Mahlia , Optimization of Electricity Generation Schemes in the Java-Bali Grid System with Co2 Reduction Consideration, Makara Journal of Technology , 20 (2016) 49-57	
53	Nasruddin , Kosasih E.A., Kurniawan B., Supriyadi, Zulkarnain I.A., Optimization of hydrogen storage capacity by physical adsorption on open-ended single-walled carbon nanotube as diameter function, International Journal of Technology , 7 (2016) 264-273	Q2
54	Nasruddin , Idrus Alhamid M., Daud Y., Surachman A., Sugiyono A., Aditya H.B., Mahlia T.M.I., Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews , 53 (2016) 733-740	Q1

55	Fauzi H., Metselaar H.S.C., Mahlia T.M.I., Chyuan Ong H., Nasruddin , Khanlou H.M., Preparation and thermal characteristics of eutectic fatty acids/Shorea javanica composite for thermal energy storage, Applied Thermal Engineering , 100 (2016) 62-67	Q1
56	Yabase H., Saito K., Lubis A., Alhamid I., Nasruddin , Solar air-conditioning system at the University of Indonesia, International Journal of Technology , 7 (2016) 212-218	Q2
57	Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Idrus Alhamid M., Nasruddin , Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates, Renewable Energy , 99 (2016) 825-835	Q1
58	Hanif M., Mahlia T.M.I., Aditiya H.B., Chong W.T., Nasruddin , Techno-economic and environmental assessment of bioethanol production from high starch and root yield Sri Kanji 1 cassava in Malaysia, Energy Reports , 2 (2016) 246-253	Q1
59	Nasruddin , Alamsyah D., Budiman D., Eriesson J., The effect of zeolite adsorbent granular size on solar adsorption chiller for Universitas Indonesia area, International Journal of Technology , 7 (2016) 254-263	Q2
60	Nasruddin Nasruddin , Arnas Arnas, Ahmad Faqih, Niccolo Giannetti, Thermo-economic Optimization of Cascade Refrigeration System Using Mixed Carbon Dioxide and Hydrocarbons at Low Temperature Circuit, Makara Journal of Technology , 20 (2016) 132-138	
61	Nasruddin , Sinambela H., Design and experimental study of air conditioning system using brushless direct current (BLDC) compressor in national electric car, International Journal of Technology , 6 (2015) 954-960	Q2
62	Alhamid M.I., Nasruddin , Senoadi, Perdana M.B., Ratiko, Effect of methane gas flow rate on adsorption capacity and temperature distribution of activated carbon, International Journal of Technology , 6 (2015) 584-593	Q2

63	Nasruddin Nasruddin , Agus Noor Sidiq, Abdulmajeed Mohamad, Rama Usvika, Energy and Exergy Analysis of Kalina Cycle for the Utilization of Waste Heat in Brine Water for Indonesian Geothermal Field, <i>Makara Journal of Technology</i> , 19 (2015) 38-44	
64	Budihardjo, Nasruddin , Nugraha M.H., Experimental and simulation study on the performance of counter flow closed cooling tower systems, <i>International Journal of Technology</i> , 6 (2015) 365-379	Q2
65	Harjanto S., Noviana L.N., Diniati M., Yunior S.W., Nasruddin , Hydrogen adsorption capacity reduction of activated carbon produced from Indonesia low rank coal by pelletizing, <i>Sains Malaysiana</i> , 44 (2015) 747-752	Q2
66	Nasruddin , Lemington, Alhamid M.I., Numerical simulation of a two-bed solar-driven adsorption chiller in a tropical climate, <i>International Journal of Technology</i> , 6 (2015) 594-603	Q2