

# ANALISIS THERMODINAMIKA SECARA GRAFIS DENGAN KONSEP EKSERGI

A. Budiman<sup>\*)</sup>

## Abstrak

Analisis termodinamika mempunyai peran sangat penting untuk proses sintesa dan pengembangan proses yang efisien. Selama ini analisis dilakukan berdasar hukum termodinamika 1, tetapi analisis ini belum memberikan informasi yang lengkap karena hanya memberikan informasi yang bersifat kuantitatif. Sejak tahun 70-an analisis berdasarkan hukum termodinamika 2 yang berhubungan langsung dengan eksergi (exergy) lebih disukai, karena dapat memberikan informasi yang bersifat kuantitatif dan kualitatif. Dengan analisis ini akan dapat diperoleh informasi tentang thermodynamic efficiency, lokasi/region yang mempunyai efisiensi energi rendah sehingga dapat dilakukan targeting untuk penghematan energi. Paper ini akan membahas analisis termodinamika berdasarkan konsep eksergi. Uraian diawali dengan perbedaan analisis energi dan eksergi, selanjutnya dilakukan analisis eksergi pada salah satu industri kimia. Grafik yang didapatkan akan dengan mudah memberikan informasi tentang kuantitas dan kualitas energi serta efisiensi unit operasi.

**Kata kunci:** analisis termodinamika, eksergi

## Pendahuluan

Jika ditinjau suatu sistem yang terdiri atas panas masuk, panas yang diterima dan sejumlah panas yang hilang, analisis yang biasa dipakai adalah analisis energi (*energy analysis*). Analisis ini akan memberikan informasi tentang aliran energi pada sistem yang ditinjau dan informasi tersebut akan membantu untuk mencari variabel operasi dan efeknya terhadap efisiensi pemakaian energi. Hanya saja didalam analisis ini, tidak dapat mengidentifikasi sumber penyebab rendahnya efisiensi serta memberi informasi usaha apa yang perlu dilakukan untuk memperbaiki kondisi tersebut dari sisi termodinamika.

Akhir-akhir ini berkembang suatu analisis berdasarkan hukum termodinamika 2 yang dikenal dengan analisis eksergi (*exergy analysis*) yang dapat menjelaskan kondisi *irreversibility* selama terjadi transformasi energi (Kotas, 1986; Moran & Sciubba, 1994; Budiman & Ishida, 2004). Analisis ini mempunyai kelebihan dapat memberikan informasi energi secara kuantitatif dan kualitatif pada sistem yang ditinjau. Pada paper ini akan dibahas tentang perbedaan konsep analisis energi dan eksergi serta manajemen eksergi yang merupakan pengembangan dari analisis eksergi pada satu unit operasi. Sebagai studi kasus ditinjau unit etil asetat di salah satu industri kimia.

## Analisis Termodinamika

### Analisis energi

Analisis energi pada suatu sistem lebih ditekankan pada aplikasi hukum termodinamika 1 tentang konservasi energi. Hukum tersebut menyatakan bahwa di dalam suatu proses, energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan. Yang terjadi

hanyalah perubahan bentuk dari suatu energi menjadi energi yang lain (Ishida, 2002). Jika sistem yang ditinjau hanyalah melibatkan sumber panas (*heat source*) dan penerima panas (*heat sink*) hukum pertama diatas secara matematis dapat ditulis sebagai penjumlahan enthalpy yang selalu sama dengan nol:

$$\sum H_i = 0 \quad (1)$$

Jika dinyatakan dalam persamaan neraca energi, persamaan (1) dapat ditulis:

$$\text{Energi masuk} - \text{energi keluar} = 0 \quad (2)$$

Enthalpy dan energi yang ada pada persamaan (1) dan (2) merupakan fungsi suhu, sehingga analisis energi bisa dilakukan jika suhu pada sumber panas dan penerima panas diketahui.

Dalam analisis energi, satuan yang biasa digunakan adalah satuan panas per satuan waktu, misal cal/s atau BTU/s. Dari satuan tersebut terlihat bahwa, analisis energi hanya bisa memberikan informasi jumlah/kuantita energi. Sementara itu, kualitas energi yang ada pada sumber panas maupun penerima panas tidak dapat dianalisis.

### Analisis eksergi

Sejauh ini, analisis energi berdasarkan hukum termodinamika 1 belum bisa memberikan informasi tentang arah atau kualitas transformasi energi sistem yang ditinjau. Selanjutnya dengan konsep eksergi yang tercakup dalam hukum termodinamika 2 analisis eksergi yang memberikan informasi yang bersifat kuantitatif dan kualitatif, bisa dilakukan (Budiman, 2001; Ishida, 2002). Hukum ke 2 tersebut menekankan adanya produksi entropi yang

<sup>\*)</sup> Process System Engineering Research Group, Jurusan Teknik Kimia, FT-UGM

cenderung bernilai maksimum dan dapat ditulis dengan:

$$\sum S_i \geq 0 \quad (3)$$

Kotas (1995) mendefinisikan eksergi (*exergy*) sebagai: *bagian dari energi yang dapat dikonversi menjadi bentuk-bentuk energi yang lain*. Dari definisi tersebut dapat diartikan bahwa ada energi yang dapat dirubah dan ada yang tidak dapat dirubah kedalam bentuk lain. Kondisi ini terjadi karena adanya *irreversibility* atau produksi entropi yang nilainya positif pada proses yang terjadi. Hubungan energi dan eksergi dapat dituliskan sebagai:

$$\text{Energi} = \text{eksergi} + \text{anergi} \quad (4)$$

Dalam hal ini anergi adalah energi yang tidak dapat dirubah ke dalam bentuk lain. Anergi juga bisa diartikan sebagai eksergi yang hilang (*exergy loss*) atau eksergi yang rusak (*exergy destruction*).

Uraian tentang konsep eksergi sendiri dapat dimulai dari definisi perubahan energi bebas Gibbs yang didefinisikan sebagai:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5)$$

Selanjutnya untuk mengetahui kualitas energi, suhu  $T$  pada persamaan (5) diganti dengan suhu lingkungan  $T_0$  (298,15 K) dan ini disebut perubahan eksergi:

$$\Delta \varepsilon = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (6)$$

sementara itu, Ishida (2002) mendefinisikan tingkat energi (*energy level*) sebagai:

$$A = 1 - T_0(\Delta S/\Delta H) \quad (7)$$

Pada kondisi keseimbangan dan tidak terjadi reaksi kimia, entropi dapat didefinisikan sebagai:

$$\Delta S = \Delta H/T \quad (8)$$

sehingga jika dimasukkan ke dalam persamaan (7), *energy level*  $A$  dapat ditulis:

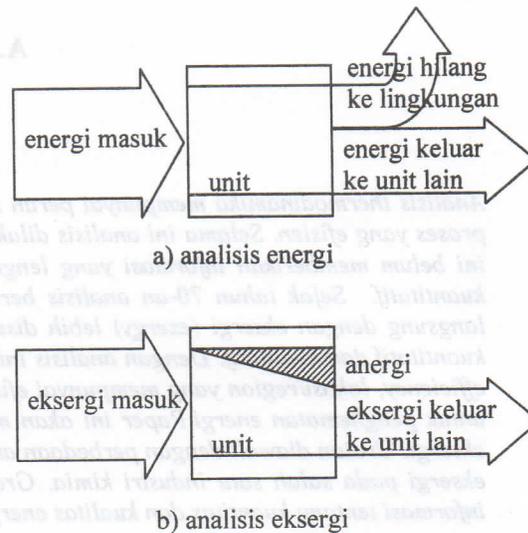
$$A = 1 - T_0/T \quad (10)$$

Perbedaan prinsip antara analisis energi dan eksergi dapat dilihat pada gambar 1 sebagaimana diuraikan pada persamaan (2) dan (4). Terlihat pada gambar 1(a) bahwa energi yang masuk ke unit operasi sama dengan energi yang keluar ke unit lain, dan energi yang hilang ke lingkungan. Sementara pada analisis eksergi seperti terlihat pada gambar 1 (b), eksergi yang masuk ke unit operasi sama dengan eksergi yang keluar dan anergi atau eksergi yang hilang ke lingkungan ditambah eksergi yang rusak akibat proses yang ada.

### Manajemen eksergi

Berdasarkan uraian diatas, seandainya kondisi arus masuk dan keluar (suhu, komposisi dan kecepatan aliran) pada satu unit operasi diketahui, analisis eksergi pada unit operasi tersebut dapat dilakukan (Budiman 2001). Jika analisis eksergi dilakukan pada semua unit operasi pada suatu pabrik kimia, maka akan didapat neraca eksergi secara keseluruhan (Chung & Cho,

2000). Manajemen eksergi inilah yang akhirnya akan bisa untuk mengetahui efisiensi unit operasi ataupun efisiensi pabrik.



Gambar 1. Perbedaan analisis energi dan eksergi

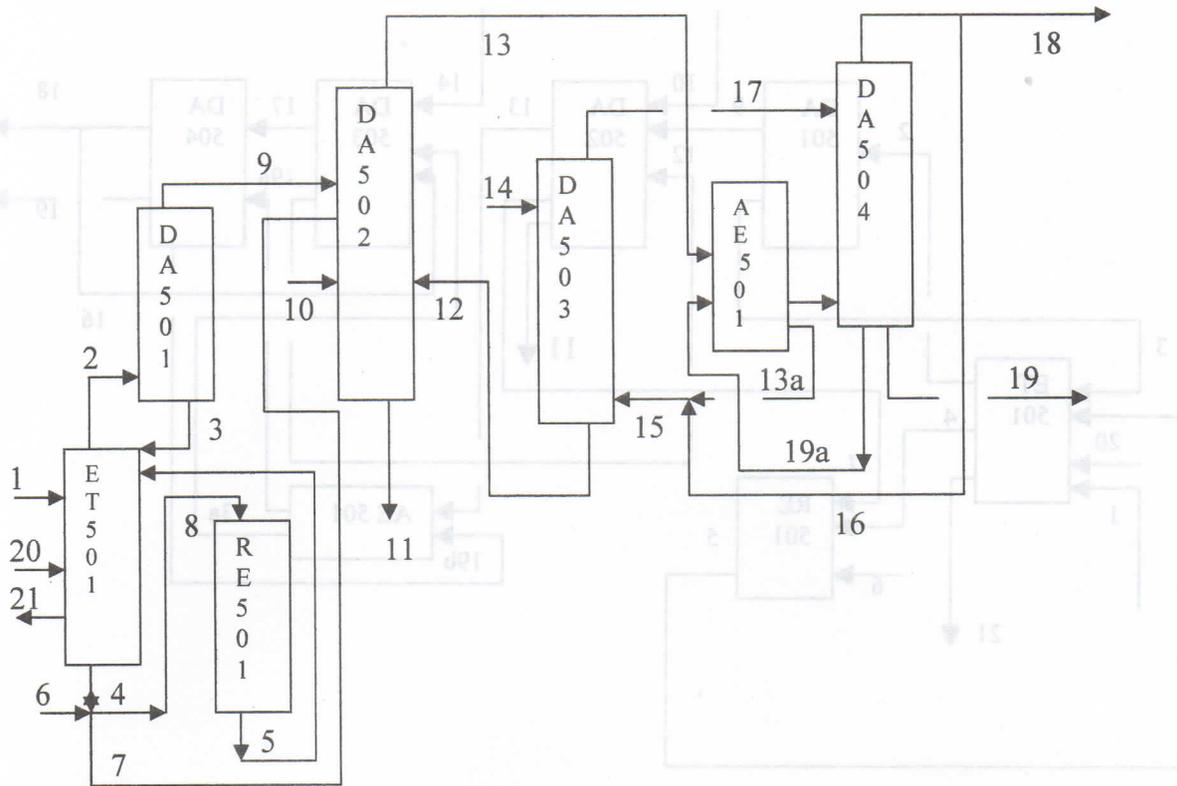
Seperti apa yang diuraikan di muka bahwa besarnya anergi atau eksergi yang hilang dan yang rusak terjadi karena adanya produksi entropi yang nilainya positif dan jumlahnya cenderung menuju ke angka yang maksimum. Dari kondisi ini, diperlukan pemahaman terhadap jenis penyebab dan cara mengurangi produksi entropi tersebut pada masing-masing komponen yang ada. Pemahaman terhadap satu atau lebih bagian yang memberikan kontribusi terbesar terhadap eksergi yang hilang maupun eksergi yang rusak akan bisa memberikan tindakan yang tepat dalam penghematan eksergi dan juga energi.

### Studi Kasus dan Pembahasan

Sebagai studi kasus ditinjau unit etil asetat di salah satu industri kimia. Adapun diagram blok unit tersebut dapat dilihat pada gambar 2.

### Uraian proses

Umpan asam asetat dimasukkan dalam evaporator tank, ET 501 yang dilengkapi dengan pengaduk dan pemanas yang dialirkan dalam coil yang juga berfungsi untuk menguapkan etil asetat yang berasal dari reaktor, RE 501. Di dalam reaktor terjadi reaksi esterifikasi antara asam asetat dan etanol menjadi etil asetat dengan katalisator resin. Hasil reaksi yang berupa campuran etanol, asam asetat sisa, air, dan etil asetat setelah keluar dari reaktor dikembalikan lagi ke ET 501 untuk menguapkan etil asetat.



Gambar 2. Blok diagram unit etil asetat

Uap dari ET 501 dialirkan ke dalam prekolom, DA 501 untuk mengambil kembali asam asetat yang terikat keluar dalam uap. Uap dari kondensor prekolom dimasukkan kolom konsentrasi, DA 502. Dari kolom konsentrasi ini didapat *side stream* yang berupa etanol, dan bersama etanol umpan segar merupakan umpan bagi reactor RE 501.

Selanjutnya, hasil atas DA 502 yang berupa uap dialirkan ke AE 501 yang berfungsi sebagai reboiler dan kondensor. Cairan hasil pendinginan diumpankan ke bagian bawah kolom ekstraktor DA 503 yang berfungsi untuk memisahkan etanol dan etil asetat dengan menggunakan pelarut air. Hasil berupa ekstrak dan rafinat. Ekstrak yang sebagian besar berupa air dikeluarkan melalui bagian bawah kolom, kemudian dimasukkan ke kolom DA 502. Rafinat yang sebagian besar terdiri dari etil asetat dialirkan ke bagian atas kolom finishing, DA 504 yang berfungsi untuk memurnikan hasil etil asetat.

**Manajemen eksergi pada unit etil asetat yang ditinjau**

Untuk membuat manajemen eksergi, diagram blok pada gambar 2 perlu diubah dengan mengikuti beberapa ketentuan:

- a. Arus masuk suatu unit operasi digambar disebelah kiri dan
- b. Arus keluar suatu unit operasi digambar disebelah kanan

- c. Masing-masing arus diberi nomer dan penomoran dilakukan dari kiri ke kanan

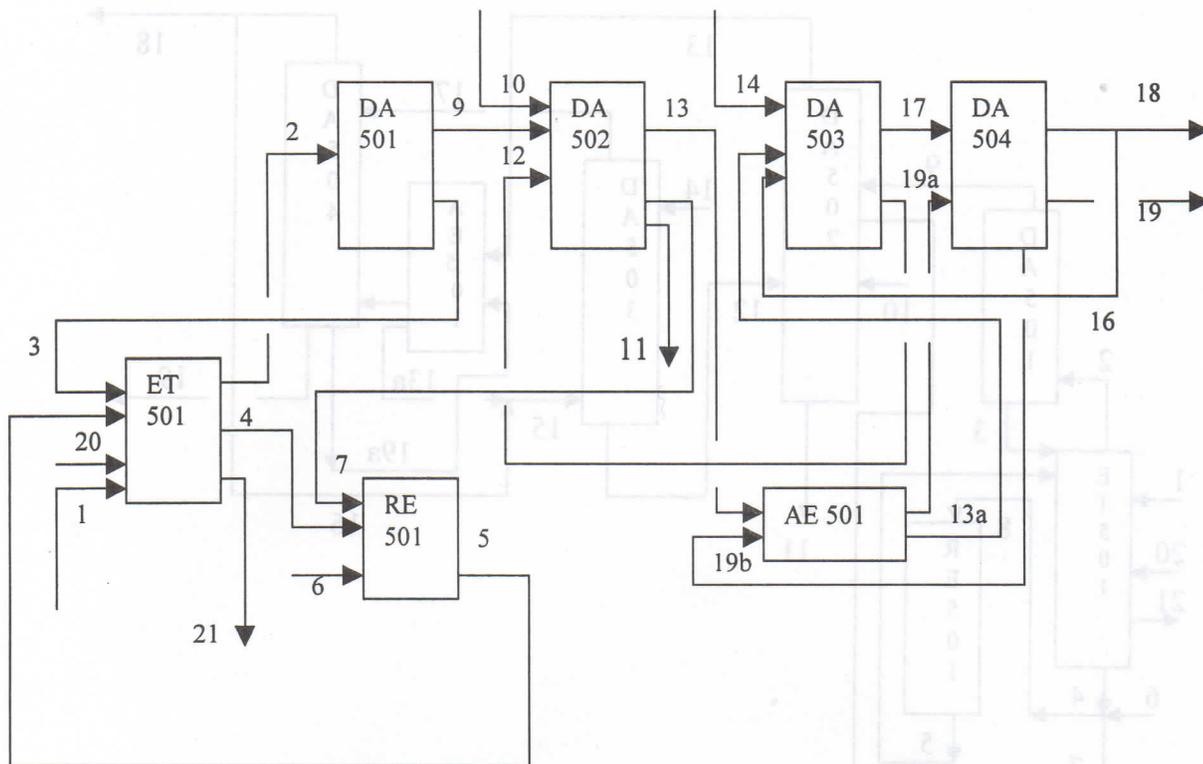
Gambar 3 adalah diagram blok yang sudah diubah sesuai dengan ketentuan diatas. Terlihat bahwa sudah semua arus masuk dari sebelah kiri dan arus keluar dari sebelah kanan.

Selanjutnya untuk menghitung neraca eksergi pada unit yang ditinjau diperlukan data jumlah massa dan kondisi operasi (suhu) pada masing-masing arus. Nilai enthalpi, entropi, eksergi dan *energy level* sebagian arus ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Enthalpi, entropi, eksergi dan *energy level* beberapa arus

Arus	Suhu,K	$\Delta H, J/jam$	$\Delta S, J/jam$	$\Delta \epsilon, J/jam$	$A$
1	305	3918773,8	12474,6	201315,8	0,0229
6	301	2111375,9	7049,7	10541,6	0,0099
10	377,5	1153,3	1,7	209241593,1	0,2107
11	379,5	565277301,3	1675829,7	65880025,5	0,2147
14	304,8	37885180,8	125703,2	425623,03	0,0223
18	300,5	182375,3	609,3	791,1	0,0083
19	307	10098151,3	33384,8	149464,35	0,0293
20	424,8	1661839775	4017911,3	464502200	0,2985
21	377,4	1621294688	4316539,8	334965806,3	0,2104

Nilai  $\Delta H$  dan  $\Delta S$  dihitung sesuai dengan sifatnya yang merupakan fungsi suhu, dan  $\Delta \epsilon$  dihitung dengan menggunakan persamaan (6).



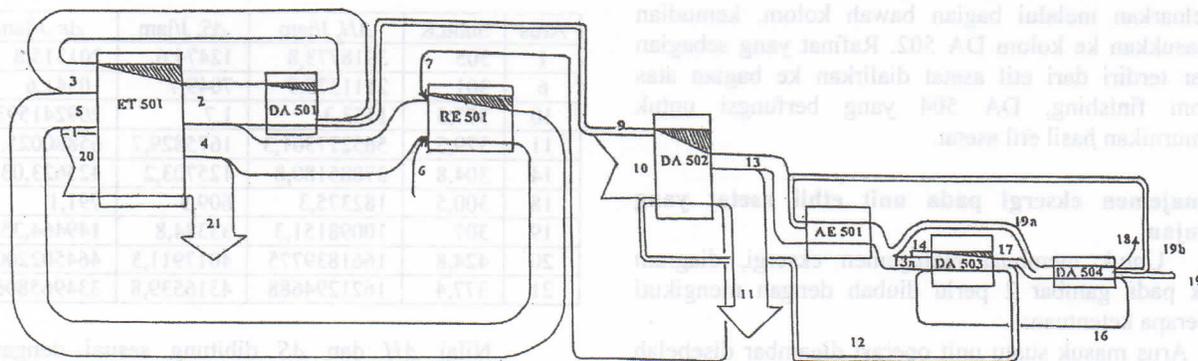
Gambar 3. Blok diagram arus masuk-keluar unit etil asetat

Sementara itu *energy level A* dihitung dengan menggunakan persamaan (10). Dari nilai  $\Delta\epsilon$  dan  $A$ , selanjutnya dibuat grafik manajemen eksergi.

Gambar 4 adalah manajemen eksergi yang dihasilkan dari unit etil asetat. Terlihat bahwa ketinggian arus masuk atau keluar dari suatu unit operasi besarnya bisa sama seperti pada AE 501 dan DA 504 ataupun tidak sama seperti pada unit operasi yang lain. Misal pada ET 501, perbedaan ketinggian arus masuk dan keluar menunjukkan adanya eksergi yang hilang dan digambarkan dengan daerah segitiga berarsir. Dari gambar 4 terlihat bahwa kehilangan eksergi terbesar terdapat pada DA 502 dan diikuti dengan ET 501, RE 501, DA 501, DA 503. Sementara

itu pada AE 501 dan DA 504 relatif tidak terjadi kehilangan eksergi.

Pada kolom terakhir tabel 1, terdapat nilai *energy level, A* yang digunakan untuk menggambarkan tinggi rendahnya unit operasi pada gambar 4. Terlihat bahwa kehilangan eksergi pada ET 501 jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kehilangan eksergi pada DA 503. Dengan demikian, misal kehilangan eksergi pada ET 501 dapat dimanfaatkan dengan baik akan dapat dipakai untuk keperluan panas pada unit operasi lain yang mempunyai tingkat energi lebih rendah, misal DA 503.



Gambar 4. Manajemen eksergi pada unit etil asetat

Selanjutnya dari tabel 1 maupun gambar 4, akan dapat dibuat neraca eksergi seluruh sistem, seperti yang terlihat pada gambar 5. Dari gambar tersebut dapat dilihat efisiensi pabrik secara keseluruhan seperti yang digambarkan pada daerah yang diarsir.

### Kesimpulan

Dari uraian diatas dapat diambil kesimpulan:

1. Analisis termodinamika secara grafis dengan konsep eksergi dapat memberikan informasi secara kualitatif dalam bentuk neraca eksergi maupun kuantitatif dalam bentuk tingkat eksergi.
2. Dari gambar manajemen eksergi akan dapat diketahui penggunaan eksergi maupun kehilangan eksergi terbesar. Selanjutnya dari data ini akan dapat dicari peluang penghematan eksergi.
3. Dengan diketahuinya peluang penghematan eksergi, akan dapat dilakukan *setting* penghematan eksergi.

### Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ir. Eko Mulyono yang telah memberikan kesempatan penulis mengambil bahasan unit etil asetat pada studi kasus dalam paper ini. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Rudi Gunawan yang telah membantu menyelesaikan paper ini.

### Daftar Pustaka

- Budiman, A. and Ishida, M. (2004). "A New Method for Disclosing Internal Phenomena in a Distillation Column by use of Material Utilization Diagram," *Energy-the International Journal*, 29, 2213-2223.
- Budiman, A., (2001), "Eksergi, tinjauan Konsep dan Aplikasi", *Seminar Nasional Teknologi Proses Kimia*, UI, Jakarta, 21 Maret 2001.
- Chung, Y. and Cho, H., (2000), "Exergy Analysis of Hidrotreating Unit", *International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Aspect of Energy System, ECOS-2000*, Enschede-Netherland, July 2000.
- Ishida, M., (2002), *Thermodynamics Made Comprehensible*, Nova Science Publisher, Inc., New York.
- Kotas, T.J., (1986), "Exergy Method of Thermal and Chemical Plant Analysis", *Chem. Eng. Res. Des*, 64, 212-229
- Moran, M.J. and Sciubba, E., (1994), "Exergy Analysis: Prinsiples and Practice", *Journal of Eng. Prog.*, 91, 2, 40-46.