

# PENGHEMATAN ENERGI PADA MENARA DISTILASI DENGAN *HEAT INTEGRATED DISTILLATION COLUMN* (HIDiC)

Arief Budiman

Process System Engineering Research Group, Jurusan Teknik Kimia, FT UGM  
Jalan Grafika 2, Kampus UGM, Yogyakarta Telp: 0274-902171, fax: 0274-902170,  
E-mail: abudiman@ugm.ac.id

## Abstrak

Distilasi merupakan salah satu unit operasi yang banyak digunakan dalam industri, tetapi dikenal boros energi, sehingga perlu dilakukan upaya peningkatan efisiensi energi agar terjadi penurunan biaya produksi. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah menggunakan *heat integrated distillation column* (HIDiC), yang merupakan aplikasi dari *heat pump*. Dari sisi analisis termodinamika, penulis telah mengembangkan metoda grafis berdasarkan hukum termodinamika satu & dua dengan *material-utilization diagram* (MUD). Metoda ini mempunyai peran penting untuk proses sintesa dan pengembangan proses distilasi yang efisien. Dengan analisis ini akan diperoleh informasi tentang *thermodynamic efficiency*, lokasi dengan efisiensi energi rendah sehingga dapat dilakukan *targeting* untuk penghematan energi. Kelebihan dari MUD adalah tersedianya informasi konsentrasi komponen ringan & komponen berat di setiap plate dan karakteristik *exergy*, yang berupa; *exergy loss* yang disebabkan oleh baik *mixing* pada fase cair & fase gas, *evaporation* dari komponen ringan maupun *condensation* dari komponen berat. Tulisan ini akan membahas tentang HIDiC, meliputi pengaruh kenaikan tekanan *rectifying section* pada HIDiC terhadap kemurnian hasil, kebutuhan panas dan *exergy loss*. Pada operasi HIDiC dengan *energy level* kondenser lebih besar dari pada *energy level* reboiler akan bisa dihemat sekitar 75% kebutuhan panas pada reboiler.

**Kata kunci:** *exergy analysis, HIDiC, MUD*

## Abstract

Distillation is the most frequently used method of separation in chemical process industries and is well known as the energy consumer. So, a practice of decreasing energy requirement could have considerable impact on the existing distillation process. One of the candidates for reducing energy consumption is using *heat integrated distillation column* (HIDiC) that is one of the most effective and advanced *heat pump* technologies to industrial processes. Author have invented graphical *exergy analysis*, namely *Material-Utilization Diagram* (MUD). This diagram has ability to disclose separation performance and the *exergy* features of the process system. It is also powerful for qualifying and quantifying the *exergy loss* in distillation column, since the four kind of *exergy loss*, i.e., losses due to mixing in liquid phase, due to mixing in vapour phase, and due to evaporation of light component and condensation of heavy component, can be displayed compactly on single figure. The purpose of this paper is to discuss the HIDiC from view point of separation performance and *exergy* characteristics using MUD methodology.

**Keywords:** *exergy analysis, HIDiC, MUD*

## PENDAHULUAN

Menara distilasi merupakan unit operasi yang sering dijumpai pada industri kimia dan merupakan pengguna energi yang sangat besar. Sebaliknya, distilasi juga dikenal sebagai proses dengan inefisiensi tinggi (*highly inefficient process*) jika dikaji dari parameter unjuk kerja pemisahan terhadap panas yang dibutuhkan (Mah *et al.*, 1977). Oleh karenanya

berbagai usaha untuk menghemat energi (*energy saving improvement*) terus dilakukan agar dapat mereduksi biaya operasi secara keseluruhan (Dhole and Linhoff, 1993).

Secara umum usaha penghematan energi pada menara distilasi dapat dikelompokkan menjadi:

- Proses integrasi (Smith, 2000),

- b. *Side condenser* dan *reboiler* (Budiman and Ishida, 1998),
- c. *Heat pump* (Bagajewicz and Barbaro, 2003).

Berbagai konfigurasi dengan konsep *heat pump* telah dipelajari beberapa peneliti, seperti *vapor recompression* dan *close cycle* (Meili, 1990; Matijasevic and Beer, 2000) dan *bootom flashing* (Budiman, 2006).

Dari sisi analisis termodinamika, beberapa metodologi berdasar hukum termodinamika satu telah dikembangkan, seperti Umeda dkk (1979) memperkenalkan analisis termodinamika dengan menggunakan *availability diagram* dengan menggambar beban panas  $Q$  sebagai sumbu  $x$  dan efisiensi Carnot,  $1-T_0/T$  sebagai sumbu  $y$ . Pada menara distilasi suhu pada *heat source* selalu lebih besar daripada suhu pada *heat sink*, sehingga garis *heat source* akan selalu lebih tinggi dari pada garis *heat sink*, dimana luasan diantara keduanya merupakan *energy loss*.

Selanjutnya, Bodo Linhoff (1984) mengenalkan *pinch technology* yang dikenal dengan *pinch analysis*, untuk mengevaluasi perancangan sistem dengan menggunakan CGCC (*column grand composite curve*). Metoda ini sangat sederhana dan dapat memberikan informasi karakteristik energi proses secara fisis, tetapi informasi yang terkait dengan karakteristik pemisahan tidak dapat disajikan pada diagram yang digunakan.

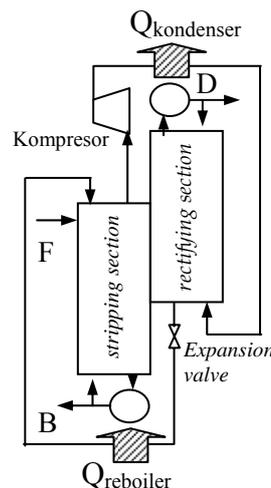
Untuk melengkapi kekurangan analisis di atas, dikembangkan analisis berdasarkan hukum termodinamika dua yang dikenal dengan *exergy analysis*. Dengan analisis ini akan dapat diperoleh informasi tentang *thermodynamic efficiency* dan lokasi yang mempunyai efisiensi energi rendah sehingga dapat dilakukan *targeting* untuk penghematan energi (Ahern, 1980). *Exergy analysis* pada menara distilasi bertujuan untuk mengurangi *exergy loss* sekaligus mengurangi *entropy generation* yang bersumber dari perpindahan panas dengan *driving force* pada suhu tinggi, pencampuran cairan-gas pada kondisi non keseimbangan serta penurunan tekanan sepanjang menara (Kaiser and Gourlia, 1985; Ognisty, 1995).

Pada tahun 2004, penulis mengembangkan metoda analisis termodinamika pada menara distilasi menggunakan *material-utilization diagram* (MUD). Kelebihan metoda ini adalah informasi yang ditampilkan tidak hanya berupa karakteristik energi pada menara distilasi, tetapi juga informasi tentang fenomena pemisahan (*separation performance*). Paper ini akan membahas aplikasi MUD pada *heat integrated distillation column* (HIDiC). Pembahasan diawali dengan analisis unjuk kerja pemisahan dan analisis energi, yang dilanjutkan analisis termodinamika dengan menggunakan MUD.

**Operasi Heat Integrated Distillation Column (HIDiC)**

*Heat integrated distillation column* (HIDiC) merupakan aplikasi *heat pump* yang dioperasikan pada

internal menara distilasi. Pada menara distilasi konvensional *stripping section* dan *rectifying section* beroperasi pada tekanan yang sama, sedangkan pada HIDiC, kedua seksi tersebut dioperasikan pada tekanan yang berbeda. *Rectifying section* beroperasi pada tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *stripping section* agar supaya panas yang diambil dari kondenser mempunyai *energy level* lebih tinggi dari pada *energy level* pada reboiler. Jika kondisi ini bisa dipenuhi maka panas yang diambil dari kondenser akan dapat dipakai memanasi reboiler.



Gambar 1. Skema heat integrated distillation column (HIDiC)

Gambar 1 menunjukkan skema HIDiC. Gas keluar dari *stripping section* dilewatkan kompresor agar aliran gas yang masuk ke *rectifying section* mempunyai tekanan yang lebih tinggi dari pada *stripping section*. Sebaliknya cairan keluar dari *rectifying section* dilewatkan *expansion valve* agar tekanan aliran cairan yang masuk *stripping section* mempunyai tekanan yang lebih rendah dari pada *rectifying section*.

Agar supaya HIDiC dapat beroperasi dengan baik diperlukan analisis *operability* yang mensyaratkan agar *energy level* kondenser lebih tinggi dari pada *energy level* reboiler. Kondisi ini bisa dipenuhi dengan jalan mengoperasikan *rectifying section* pada tekanan tinggi dengan mengatur kompresor.

Untuk melakukan analisis *operability*, didefinisikan  $\beta$  sebagai rasio *energy level* kondenser dengan *energy level* reboiler dan ditulis:

$$\beta = \frac{A_{\text{kondenser}}}{A_{\text{reboiler}}} \tag{1}$$

dalam hal ini:

$$A_{\text{kondenser}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{kondenser}}} \tag{2}$$

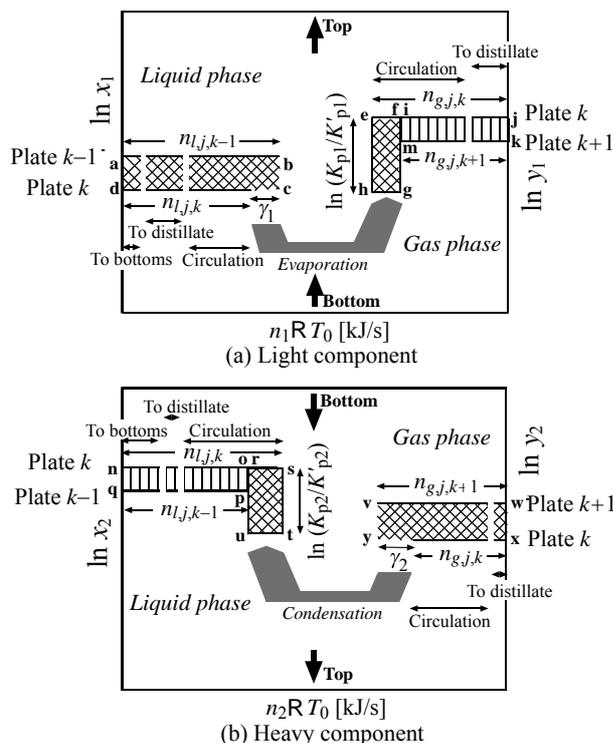
$$A_{\text{reboiler}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{reboiler}}} \tag{3}$$

dimana  $T_0$  = suhu lingkungan = 298,15 K.

Dari persamaan 1, dapat dikatakan bahwa menara distilasi konvensional selalu mempunyai nilai  $\beta$  lebih kecil dari satu. Sedangkan untuk HIDiC bisa beroperasi jika mempunyai nilai  $\beta$  lebih besar dari satu.

**Material-Utilization Diagram (MUD)**

MUD merupakan metoda baru yang dikembangkan penulis berdasarkan hukum termodinamika 1 dan 2 yang terkait dengan konsep *exergy*. Diagram ini mempunyai sumbu x yang berupa kecepatan gas maupun cair ( $n$ , mol/s) dan fraksi mol gas maupun cairan ( $\ln x$  pada sisi kiri dan  $\ln y$  pada sisi kanan). Gambar 2 menunjukkan MUD pada satu plate  $k$ . Gambar (a) merupakan MUD untuk komponen ringan dan (b) merupakan MUD untuk komponen berat. Pada komponen ringan di (a) kondenser (plate 1) terletak pada diagram bagian atas, sementara itu komponen ringan di (b), reboiler (plate N) terletak pada diagram bagian atas.



Gambar 2. MUD pada satu plate

Karakteristik *exergy* dan unjuk kerja (*separation performance*) yang tergambar pada MUD dapat diuraikan sebagai berikut:

**Exergy loss dan exergy gain pada proses perubahan konsentrasi**

Sifat termodinamika pada sistem akan dapat digambarkan dengan mudah saat digunakan konsep *premixing* (Budiman and Ishida, 1998). Pada suatu plate  $k$  menara distilasi, cairan dari plate di atasnya masuk ke *premixer* dan bercampur dengan arus

*recycle* yang keluar dari plate  $k$ . Akibatnya, pada fase cair terdapat *exergy loss of mixing* untuk komponen ringan seperti yang ditunjukkan oleh luasan **abcd** pada (a). Sementara itu, pada komponen berat kenaikan konsentrasi akan mengakibatkan timbulnya *exergy gain* seperti yang ditunjukkan luasan **nopq** pada (b). Selanjutnya perbedaan luasan **abcd** - **nopq** menunjukkan *net exergy loss of mixing* pada fase cair. Dengan logika sama, *exergy loss of mixing* pada fase gas ditunjukkan oleh luasan **vwxy** dan *exergy gain* ditunjukkan oleh luasan **ijkm**. Perbedaan luasan **vwxy** - **ijkm** menunjukkan *net exergy loss of mixing* pada fase gas.

**Exergy loss pada proses perubahan phase**

Jika digunakan konsep *premixing* pada suatu plate  $k$ , didalam proses utama akan terdapat proses evaporasi komponen ringan dan kondensasi komponen berat. Misal ditinjau proses evaporasi komponen ringan, *exergy loss* evaporasi dapat dihitung dengan persamaan,

$$EXL_{r,1} = \gamma_1 RT_0 \ln \frac{K_{p1}}{K_{p1}'} \quad (4)$$

dengan  $K_{p1}'$  adalah perbandingan antara konsentrasi dan tekanan komponen 1 atau,

$$K_{p1}' = \ln \frac{P_{1,out}}{x_{1,out}} \quad (5)$$

Sedangkan  $K_{p1}$  adalah konstanta keseimbangan atau

$$K_{p1} = p_{1,eq} / x_{1,eq} \quad (6)$$

Dengan cara yang sama akan dapat dihitung *exergy loss* kondensasi, sehingga *exergy loss* total pada proses perubahan fase dapat dihitung dengan,

$$EXL_{r,out} = EXL_{r,1} + EXL_{r,2} = \sum_r \gamma_r RT_0 \ln \frac{K_{pr}}{K_{pr}'} \quad (7)$$

Pada MUD, *exergy loss* evaporasi ditunjukkan dengan luasan **efgh** pada gambar 1 (a) dengan  $\ln (K_{p1}/K_{p1}')$  digambarkan sebagai ketinggian **eh** (atau **fg**). Untuk *exergy loss* kondensasi digambarkan dengan luasan **rstu** pada (b). Nilai  $\ln (K_{p2}/K_{p2}')$  ditunjukkan oleh ketinggian **ru** (atau **st**). Ketinggian **eh** dan **ru** menunjukkan besarnya penyimpangan proses dari kondisi keseimbangannya dan juga merupakan *driving forces* dari evaporasi komponen 1 dan kondensasi komponen 2.

**Exergy loss of heating dan cooling**

*Exergy loss of heating* terjadi karena adanya kenaikan atau perbedaan suhu masuk dan keluar plate pada fase cair, sedangkan *exergy loss of cooling* terjadi karena adanya penurunan atau perbedaan suhu masuk dan keluar plate pada fase gas. Besarnya kedua *exergy loss* tersebut tergantung selisih antara suhu masuk dan keluar, tetapi biasanya nilainya kecil jika dibandingkan dengan *exergy loss of mixing*, sehingga pada MUD tidak digambarkan.

## STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

## Analisis MUD Pada Menara Distilasi Konvensional

Sebagai studi kasus untuk melihat MUD seluruh menara distilasi, ditinjau proses pemisahan campuran biner  $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$  sebagai komponen ringan dan  $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$  sebagai komponen berat. Dipilih menara dengan jumlah plate 21, plate 1 merupakan kondenser total dan plate 21 merupakan reboiler parsial. Umpan masuk dari tengah menara pada plate ke 11 dengan kecepatan 100 mol/s, *reflux ratio*,  $R = 3.0$ . Sedangkan kecepatan distilat digunakan 50 mol/s. Menara dioperasikan pada tekanan atmosferis. Model pada menara distilasi yang digunakan dan spesifikasi alat dapat dilihat pada tulisan sebelumnya (Budiman, 1999). MUD untuk studi kasus ini dapat dilihat pada Gambar 3. Dari kedua komponen ringan pada (a) dan komponen berat pada (b) dapat dilihat *internal phenomena* sebagai berikut:

## Karakteristik pemisahan

Pada sumbu  $y$  sebelah kiri akan terlihat fraksi mol fase cair komponen ringan dan komponen berat, masing-masing  $x_{1,D}=0,878$  dan  $x_{2,D} = 0,122$  seperti ditunjukkan tanda  $p_{2,in}$  pada (a) dan (b), sedangkan pada sumbu  $y$  sebelah kanan terlihat fraksi mole fase gas, pada kondisi keseimbangan yang besarnya masing-masing  $y_{1,D}=0,9455$  dan  $y_{2,D} = 0,0545$  seperti ditunjukkan tanda  $p_{1,eq}$  pada (a) dan (b). Fraksi mol fase cair dan fase gas pada tiap-tiap plate dapat juga dilihat dengan jelas pada Gambar 2 tersebut. Komposisi umpan juga dapat dilihat pada sumbu  $y$  sebelah kiri yang berupa garis titik-titik, yaitu  $x_{1,F}=0,5$  dan  $x_{2,F}=0,5$ .

Pada Gambar 3 terlihat bahwa ada 5 kolom yang menunjukkan adanya distribusi cairan pada *internal column*. Kolom pertama pada (a) menunjukkan jumlah cairan komponen 1 yang terambil pada menara bagian bawah atau *bottom*, sedangkan kolom 2 menunjukkan jumlah cairan yang terambil pada distilat dan jumlahnya sama dengan jumlah yang tertera pada kolom 5. Jumlah kolom 1 dan 2 merupakan jumlah komponen 1 pada umpan. Pada kolom 3, misal pada plate 2 ( $p_{2,in}$  dan  $p_{3,in}=p_{2,out}$ ) terjadi pengurangan jumlah cairan. Pengurangan ini menunjukkan jumlah cairan yang terevaporasi pada plate 2 dari fase cair ke fase gas. Proses ini terjadi dari plate 11 ke plate 2, selanjutnya pada plate 1 atau kondensor terjadi kondensasi. Kalau kita amati pada kolom 3 dan 4 secara keseluruhan, terlihat bahwa terjadi proses *looping* dari fase cair (kolom 3) ke fase gas (kolom 4).

Phenomena yang sama dapat juga dilihat untuk komponen berat pada (b). Kolom 1 menunjukkan jumlah cairan yang terambil lewat *bottom*, kolom 2 dan 5 menunjukkan jumlah gas yang terambil pada distilat. Sementara itu perbedaan jumlah gas masuk dan keluar pada suatu plate menunjukkan jumlah gas yang terkondensasi pada plate tersebut. Proses kondensasi terjadi dari plate 1 sampai plate 20 dan selanjutnya terjadi evaporasi pada plate 21 atau

reboiler. Jika kita amati secara keseluruhan pada kolom 3 dan 4 terlihat adanya proses *looping* dari fase gas ke fase cair.

Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa pada *internal column* sejumlah cairan (komponen ringan) diambil pada puncak menara sebagai distilat dan sejumlah cairan (komponen berat) diambil pada dasar menara sebagai *bottom*. Disamping itu pada *internal column* juga terjadi proses evaporasi dan kondensasi, sehingga mengakibatkan terjadinya proses *looping*. Jumlah cairan atau gas yang terambil pada puncak dan dasar menara, ataupun yang hanya *looping* pada *internal column* tergantung banyaknya umpan, distilat atau *bottom*.

## Karakteristik exergy

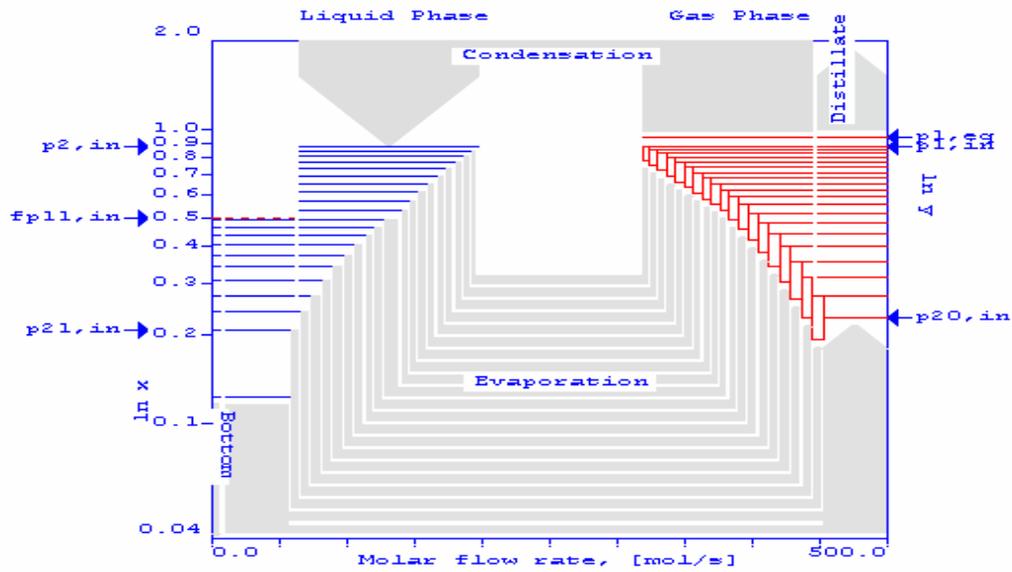
*Exergy loss of mixing* fase cair dapat dilihat pada luasan kecepatan molar,  $n_1$  dengan komposisi  $\ln x_1$  pada sisi kiri gambar (a) dan untuk fase gas pada sisi kanan gambar (b). *Exergy gain of mixing* fase gas dapat dilihat pada luasan kecepatan molar,  $n_1$  dengan komposisi  $\ln y_1$  pada sisi kanan gambar (a) dan untuk fase cair pada sisi kiri gambar (b). Besarnya *exergy loss of mixing* fase cair dan gas, masing-masing  $EXL_{ML}= 383,48$  kJ/s dan  $EXL_{MG}= 366,76$  kJ/s, sementara itu besarnya *exergy gain of mixing* fase cair dan gas, masing-masing,  $EXG_{ML}= 339,49$  kJ/s dan  $EXG_{MG}= 324,59$  kJ/s. Pengurangan antara *exergy loss* dan *exergy gain* menghasilkan *net exergy loss* yang besarnya  $EXL_{ML}= 43,99$  kJ/s dan  $EXL_{MG}= 42,17$  kJ/s,

*Exergy loss* evaporasi dapat dilihat pada segi empat pada sisi kanan gambar (a), sedangkan *exergy loss* kondensasi dapat dilihat pada segi empat sisi kiri gambar (b). Nilai kedua *exergy loss* tersebut, masing-masing,  $EXL_{EVA}= 67,72$  kJ/s dan  $EXL_{COND}= 64,71$  kJ/s. Penjumlahan semua nilai *exergy loss* merupakan *exergy loss of subprocesses* dan besarnya,  $EXL_{SUB-P}= 220,19$  kJ/s.

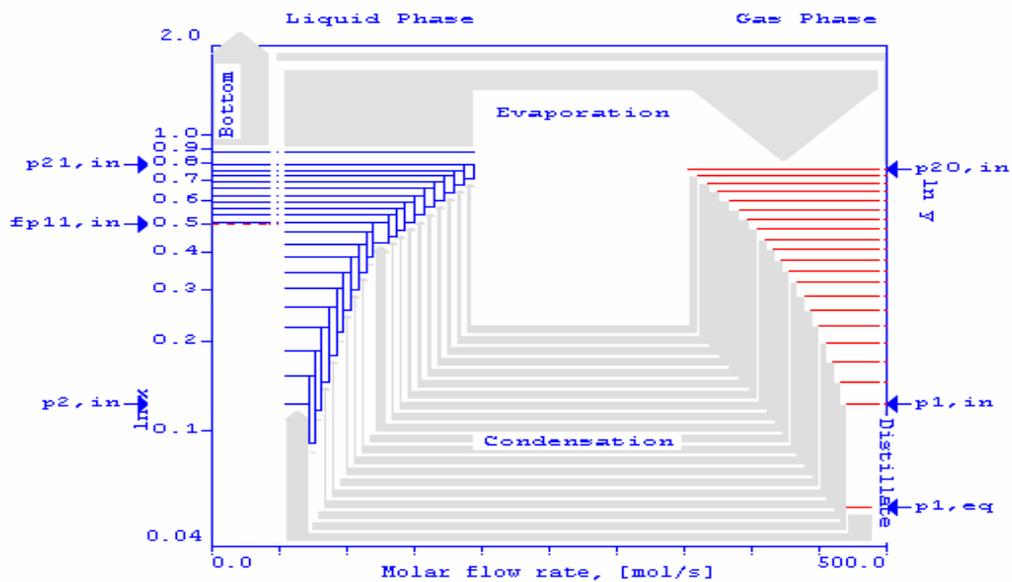
Pada reboiler, steam dimasukkan pada suhu  $5^\circ\text{C}$  diatas suhu *bottom* dan air pendingin dimasukkan kondensor pada suhu  $5^\circ\text{C}$  dibawah suhu distilat. Jika dilakukan penghitungan akan didapat *exergy loss of heating* pada reboiler dan *exergy loss of cooling* pada kondenser, masing-masing,  $EXL_{REB}= 75,39$  kJ/s dan  $EXL_{COND}= 65,61$  kJ/s, sehingga *exergy loss* total,  $EXL_{TOT}= 361,19$  kJ/s. Pada kondisi ini jumlah panas yang dimasukkan ke reboiler,  $Q_{REB}= 6035,21$  kJ/s dan panas yang diambil dari kondenser,  $Q_{COND}= 5992,41$  kJ/s.

## Analisis operability dan exergy analysis pada HIDiC

Agar supaya HIDiC dapat beroperasi dengan baik diperlukan analisis *operability*. Analisis ini mensyaratkan nilai  $\beta$  pada persamaan 1 mempunyai nilai lebih besar dari satu atau nilai *energy level*,  $A_{kondenser}$  lebih besar dari pada  $A_{reboiler}$

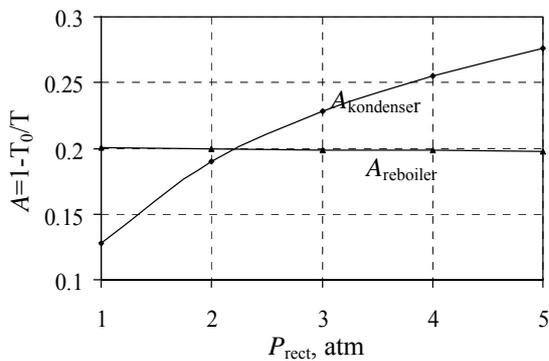


(a) . Light Component



(b) . Heavy Component

Gambar 3. MUD menara distilasi konvensional,  $P_{rect} = 1 \text{ atm}$ ,  $R_{opt} = 3.0$



Gambar 4. Energy level kondenser dan reboiler pada berbagai tekanan rectifying section

Gambar 4 menunjukkan hubungan energy level  $A$  pada tekanan rectifying section yang berbeda.

Dari Gambar 4 terlihat  $A_{kondenser}$  naik dengan naiknya tekanan pada rectifying section. Sementara itu karena stripping section dioperasikan pada tekanan atmosferik, maka nilai  $A_{reboiler}$  selalu tetap. Pada tekanan lebih kecil dari 2 atm, nilai  $A_{kondenser}$  lebih kecil dari pada  $A_{reboiler}$ . Selanjutnya sekitar tekanan 2,2 atm nilai  $A_{kondenser}$  sama dengan  $A_{reboiler}$  dan setelah itu nilai  $A_{kondenser}$  lebih besar dari pada  $A_{reboiler}$ . Dari hubungan tersebut dapat dikatakan bahwa pada kasus yang ditinjau, HIDiC akan bisa beroperasi pada tekanan rectifying section lebih besar dari 2,2 atm.

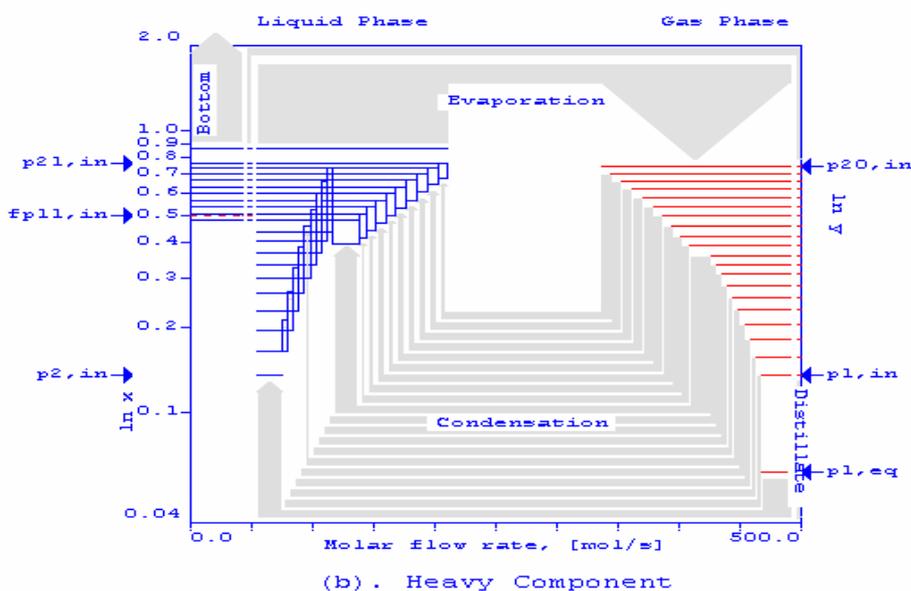
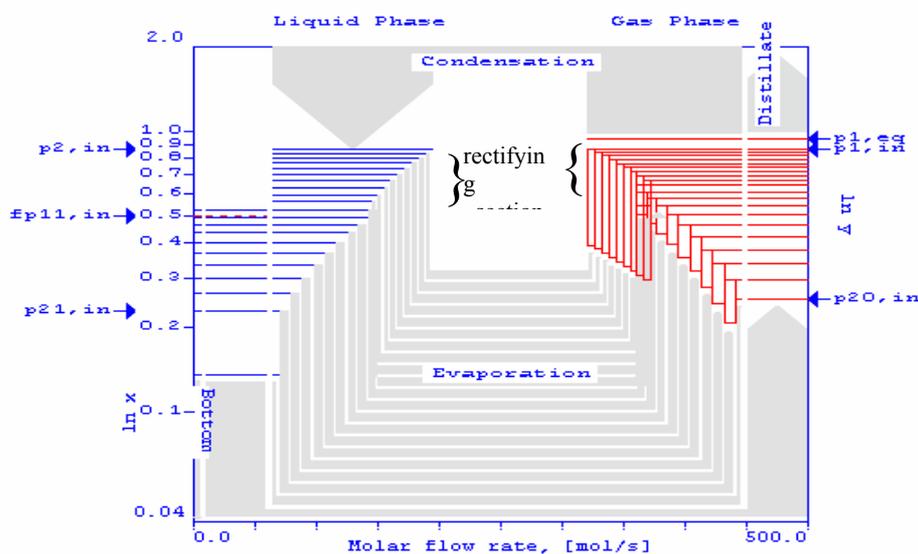
Profil lengkap unjuk kerja, beban panas, *energy level* dan *exergy loss* pada tekanan *rectifying section* yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 1.

Jika kita amati beban panas reboiler dan kondenser pada kolom 4 dan 6 terlihat nilainya naik dengan naiknya tekanan, tetapi perlu dicatat bahwa pada tekanan lebih besar dari 2,2 atm beban kondenser

akan bisa dipakai sebagai beban panas reboiler. Pada tekanan 3 atm, misalnya, terlihat  $Q_{reboiler} = 7362,26$  dan  $Q_{kondenser} = 5621,09$  kJ/s. Beban panas kondenser sebanyak 5621,09 kJ/s akan dipakai untuk memanasi reboiler, sehingga beban tambahan reboiler dari luar sistem tinggal  $7362,26 - 5621,09 = 1741.17$  kJ/s.

Tabel 1. Profil unjuk kerja, beban panas, *energy level* dan *exergy loss* pada tekanan *rectifying section* yang berbeda

$P_{rect}$ atm	$x_{1,D}$	$R$	$Q_{reboiler}$ kJ/s	$A_{heating}$	$Q_{condenser}$ kJ/s	$A_{cooling}$	<i>Exergy loss</i> , kJ/s			
							subproc	condenser	reboiler	total
1	0.878	3	6035.21	0.2002	5992.41	0.1275	220.19	65.61	75.39	361.19
2	0.865	3	6962.47	0.1993	5857.05	0.1901	357.09	75.88	62.51	495.48
3	0.856	3	7632.26	0.1986	5621.09	0.2278	510.54	83.31	55.48	649.33
4	0.851	3	8181.99	0.1982	5521.55	0.2551	637.14	89.41	50.74	777.29
5	0.848	3	8659.98	0.1979	5443.24	0.2765	758.57	94.69	47.21	900.47



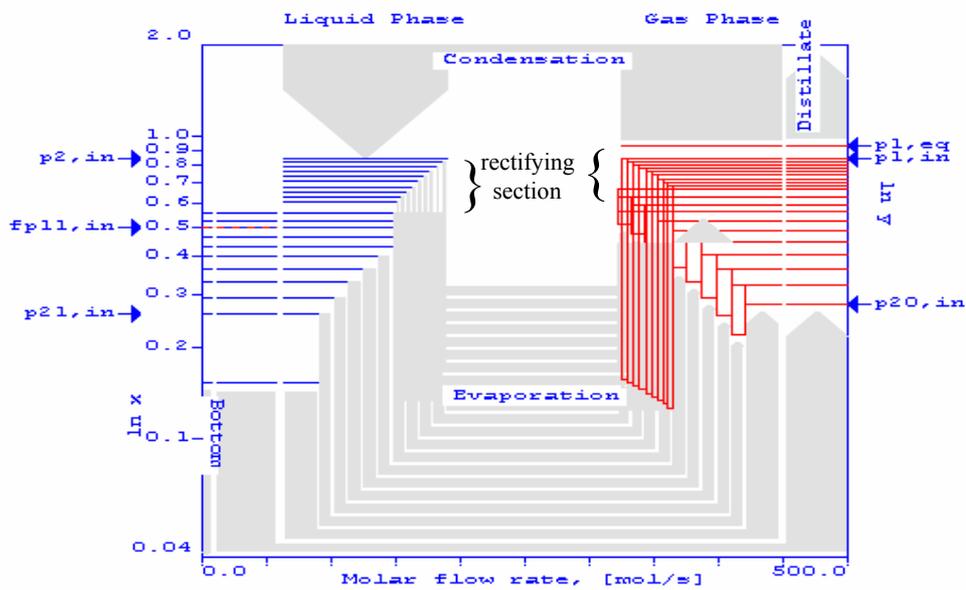
Gambar 5. MUD untuk HIDiC,  $P_{rect} = 2$  atm,  $R_{opt} = 3.0$

Gambar 5 menunjukkan MUD untuk HIDiC saat *rectifying section* dioperasikan pada tekanan 2 atm. Jika dibandingkan dengan menara distilasi konvensional pada Gambar 3, terlihat bahwa naiknya tekanan dari 1 atm ke 2 atm mengakibatkan:

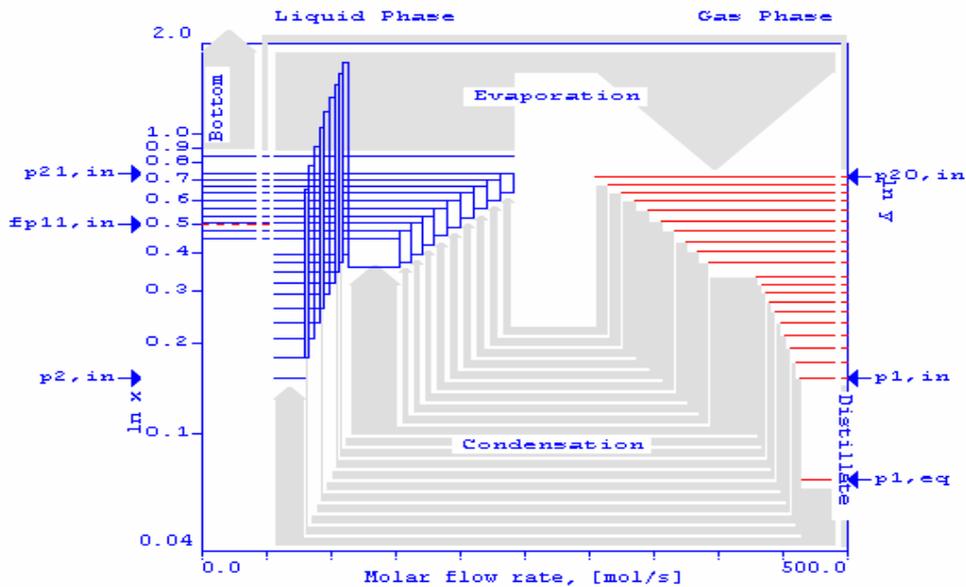
- Terjadi pengurangan kecepatan cairan & gas komponen ringan pada *rectifying section* HIDiC seperti terlihat pada kolom 3 & 4 atas pada Gambar 5 (a) dan sebaliknya terjadi penambahan kecepatan cairan & gas pada komponen berat pada *stripping section* seperti terlihat pada kolom 3 & 4 bawah pada Gambar 5 (b).
- Terjadi pembalikan arah *exergy loss* kondensasi komponen berat. Pada distilasi konvensional

terjadi kondensasi komponen berat, sedangkan pada HIDiC terjadi evaporasi pada komponen tersebut. Phenomena ini timbul karena besarnya *confective flow* kearah berlawanan akibat adanya kenaikan tekanan.

- Pada distilasi konvensional terjadi evaporasi komponen ringan & kondensasi komponen berat, sedangkan pada HIDiC terjadi evaporasi pada kedua komponen ringan & berat.
- Terjadi kenaikan *driving force* evaporasi pada komponen ringan & berat yang ditandai dengan naiknya ketinggian segi empat kolom 4 pada 5 (a) & kolom 3 pada 5(b).



(a) . Light Component



(b) . Heavy Component

Gambar 6. MUD untuk HIDiC,  $P_{rect} = 5 \text{ atm}$ ,  $R_{opt} = 3.0$

Gambar 6 menunjukkan MUD untuk HiDiC saat tekanan *rectifying section* dinaikkan menjadi 5 atm. Jika dibandingkan dengan Gambar 4, terlihat bahwa:

- Kecepatan cairan & gas komponen ringan pada *rectifying section* semakin berkurang, sedangkan kecepatan cairan & gas komponen berat semakin bertambah.
- Terjadi proses evaporasi pada komponen ringan & berat dan *driving force* keduanya semakin besar.

#### KESIMPULAN

Analisis pada menara distilasi dengan menggunakan metoda material-utilization diagram (MUD) dapat memaparkan *internal phenomena* yang terkait dengan karakteristik pemisahan dan karakteristik *exergy* pada tiap-tiap plate. Agar HiDiC beroperasi dengan baik diperlukan analisis *operability* untuk memastikan agar nilai  $\beta$ , rasio *energy level* kondenser dengan reboiler lebih besar dari satu. Operasi HiDiC pada nilai  $\beta$  lebih besar dari satu akan menurunkan beban panas reboiler dari luar sistem, akan tetapi diikuti dengan kenaikan nilai *exergy loss*. Pada distilasi konvensional terjadi proses evaporasi komponen ringan & kondensasi komponen berat, sedangkan pada HiDiC terjadi proses evaporasi pada kedua komponen ringan & berat.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ir. Sutijan, MT, Ph.D atas masukan, diskusi dan bantuannya menyiapkan tulisan ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Masaru Ishida, Tokyo Institute of Technology, Japan partner kerjasama selama ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

Ahern, J.E., (1980), *The Exergy Method of Energy System Analysis*, 2nd ed., McGraw Hill, New York.

Bagajewicz, M.J., Barbaro, A.F., (2003), On the Use of Heat Pump in the Total Site Heat Integration, *Computers Chem. Eng.*, 27, pp. 1707-1719.

Budiman, A., (1999), Perancangan Menara Distilasi Dengan Model Non Keseimbangan, Seminar Perpindahan Panas dan Massa, PAU-Teknik, Yogyakarta, March-1999.

Budiman, A. and M. Ishida, (1998), Optimal Side Heating and Cooling in a Distillation Column, *Energy-the International Journal*, 23, 5, 365-372.

Budiman, A. and M. Ishida, (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., (2006), Bottom Flashing pada Menara Distilasi, *Media Teknik*, 2, XXVIII, 29-33.

Dhole, V.R. and B. Linhoff, (1993), Distillation Column Target, *Computers Chem. Eng.*, 28, 9, 1386-1397.

Kaiser, V. And J.P. Gourelia, (1985), The Ideal-Column Concept: Applying Exergy to Distillation, *Chem. Eng.*, 19, 45, 45-53.

Linhoff, B., (1984), Pinch Technology Has Come of Age, *Chem. Eng. Prog.*, 80, 7, 33-40.

Mah, R.S.H., Nicholas, J.J., and Wodnik, R.B., (1977), Distillation with Secondary Reflux and Vaporization: A Comparative Evaluation in Distillation, *AIChE J.*, 23, 5, pp. 651-658.

Matijasevic, L. And Beer, E., (2000), Application on Heat Pump: A Feasibility Study, *Chem.Eng.Ed.*, winter, pp. 68-72.

Meili, A., (1990), Heat Pump for Distillation Column, *Chem.Eng.Prog.*, 86, 6, pp. 60-65.

Umeda, T., Niida, K., and Shiroko, K., (1979), A Thermodynamics Approach to Heat Integration in Distillation Column System, *AIChE J.*, 25, 3, 423-429.

Ognisty, T.P., (1995), Analyze Distillation Column With Thermodynamics, *Chem. Eng. Prog.*, 91, 2, 40-46.

Smith, R., (2000), State of Art in Process Integration, *App. Thermal Eng.*, 20, pp. 1337-1345.