

ANALISIS EFEKTIFITAS MENARA DISTILASI DENGAN MATERIAL-UTILISATION DIAGRAM (MUD)

A Budiman dan Sutijan^{*)}

Abstrak

Analisis efektifitas menara distilasi dengan menggunakan konsep dasar hukum termodinamika mempunyai peran penting untuk proses sintesa dan pengembangan proses distilasi yang efisien. Dengan analisis ini akan dapat diperoleh informasi tentang *thermodynamic efficiency*, lokasi/region yang mempunyai efisiensi energi rendah sehingga dapat dilakukan *targeting* untuk penghematan energi. Tulisan ini akan membahas analisis termodinamika secara grafis pada menara distilasi untuk mengevaluasi karakteristik pemisahan serta karakteristik *exergy* pada menara distilasi menggunakan *Material Utilization Diagram (MUD)*. Informasi yang diperoleh berupa konsentrasi komponen ringan dan komponen berat di setiap plate dan karakteristik *exergy* yang berupa *exergy loss due to mixing pada phase cair dan phase gas*, *exergy loss due to evaporation dari komponen ringan dan exergy loss due to condensation dari komponen berat*. Tulisan dimulai dari pembahasan *internal phenomena pada satu plate dan selanjutnya pembahasan pada seluruh plate*. Tulisan ini juga akan membahas karakteristik pemisahan serta karakteristik *exergy* saat diubah-ubah.

Kata kunci/Key words : *exergy analysis, material utilization diagram (MUD), distilasi*

Pendahuluan

Menara distilasi merupakan unit operasi yang sering dijumpai pada industri kimia dan merupakan pengguna energi yang sangat besar, sehingga analisis efektifitas yang bertujuan melakukan penghematan energi sangat perlu dilakukan oleh para *process engineer*. Keberhasilan melakukan penghematan energi akan dapat mereduksi biaya operasi secara keseluruhan. Salah satu *tool* yang biasa digunakan adalah analisis termodinamika, baik dengan dasar hukum termodinamika 1 yang dikenal *energy analysis* maupun hukum 2 yang dikenal dengan *exergy analysis* (Ahern, 1980).

Beberapa analisis berdasar hukum termodinamika 1 seperti: Umeda, Niida dan Shiroko (1979) melakukan 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* juga akan selalu lebih tinggi dari pada garis *heat sink*. Sedangkan luasan diantara keduanya merupakan *energy loss*.

Bodo Linhoff (1984) mengenalkan *pinch technology* yang dikenal dengan *pinch analysis*, untuk mengevaluasi perancangan sistem dengan menggunakan CGCC (*column grand composite curve*). Metoda tersebut merupakan metoda yang 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.

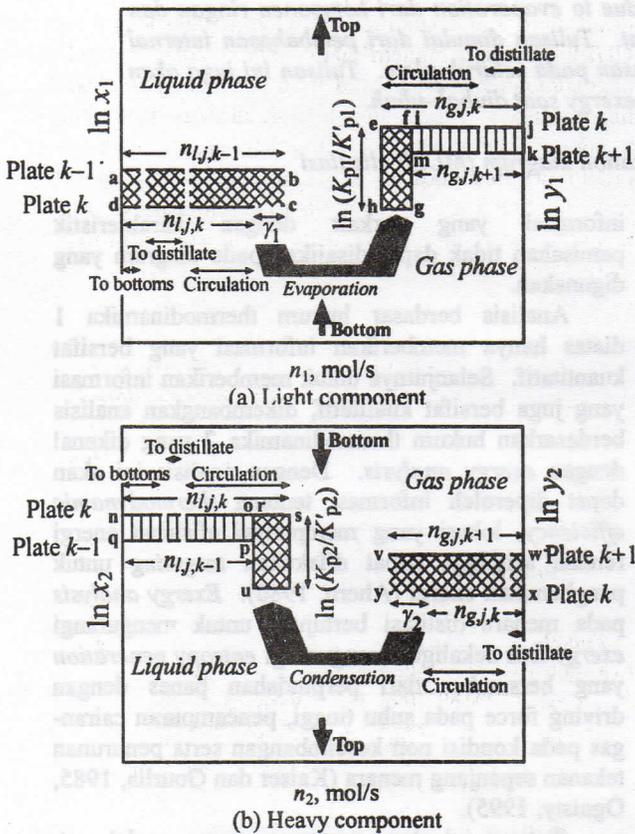
Analisis berdasar hukum termodinamika 1 diatas hanya memberikan informasi yang bersifat kuantitatif. Selanjutnya untuk memberikan informasi yang juga bersifat kualitatif, dikembangkan analisis berdasarkan hukum termodinamika 2 yang dikenal dengan *exergy analysis*. Dengan analisis ini akan dapat diperoleh informasi tentang *thermodynamic efficiency*, 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 dan Gourlia, 1985, Ognisty, 1995).

Tulisan ini akan mengupas tentang salah satu metoda analisis termodinamika pada menara distilasi menggunakan *Material Utilization Diagram (MUD)*. Kelebihan metoda ini, informasi yang ditampilkan tidak hanya berupa karakteristik energi pada menara distilasi, tetapi juga informasi tentang fenomena pemisahan (*separation performance*). Pengaruh perubahan tekanan juga dibahas pada tulisan ini.

^{*)} Process System Engineering Research Group
Jurusan Teknik Kimia, FT-UGM, Jalan Grafika 2, Yogyakarta
Fax: 0274-902170, email: abudiman@ugm.ac.id

Material-utilization diagram (MUD)

Pada dasarnya material-utilization diagram, disingkat dengan MUD adalah suatu *tool* yang biasa dipakai untuk menganalisis menara distilasi. MUD merupakan metoda baru berdasarkan pengembangan 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 1 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 1. Material Utilization Diagram untuk

Karakteristik *exergy* yang terlihat pada MUD dapat dijelaskan 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 dan 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 fase

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,

$$EXL_{r1} = \gamma_1 RT_0 \dots\dots\dots(1)$$

dengan K_p' adalah perbandingan antara konsentrasi dan tekanan komponen 1 atau,

$$K_{p1}' = \ln \frac{P_{1,out}}{x_{1,out}} \dots\dots\dots(2)$$

Sedangkan K_{p1} adalah konstanta keseimbangan atau

$$K_{p1} = p_{1,eq}/x_{1,eq}$$

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

$$EXL_{r,out} = EXL_{r,1} + EXL_{r,2} = \sum_r \gamma_r RT_0 \ln \frac{K_{pr}}{K_{pr}'} \quad (3)$$

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 kesimbangannya dan juga merupakan *driving forces* dari evaporasi komponen 1 dan kondensasi komponen 2.

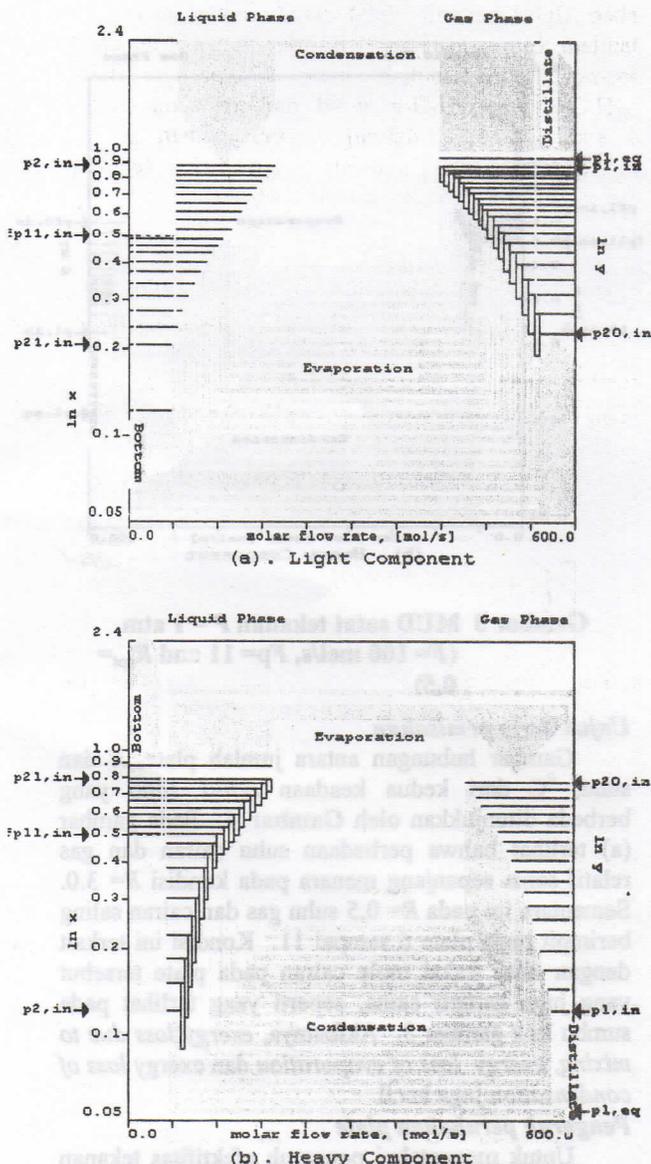
Exergy loss of heating dan cooling

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.

Hasil dan Pembahasan

Pada uraian diatas telah dibahas MUD pada suatu plate k dan sebagai studi kasus untuk melihat MUD pada seluruh menara distilasi, ditinjau proses pemisahan campuran biner $n-C_6H_{14}$ and $n-C_7H_{16}$. 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* = 3.0. Sedangkan kecepatan distilat digunakan 50 mol/s. Model pada menara distilasi yang digunakan dan spesifikasi alat dapat dilihat pada tulisan sebelumnya (Budiman, 1999).

MUD untuk studi kasus diatas dapat dilihat pada Gambar 2. Dari kedua komponen ringan pada (a) dan komponen berat pada (b) dapat dilihat *internal phenomena* sebagai berikut:



Gambar 2 MUD satat tekanan $P = 1$ atm ($F = 100$ mol/s, $F_p = 11$ and $R_{opt} = 3.0$)

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 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 mole 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 2 dapat juga dilihat 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, $EXL_{SUB-P} = 220,20$ kJ/s.

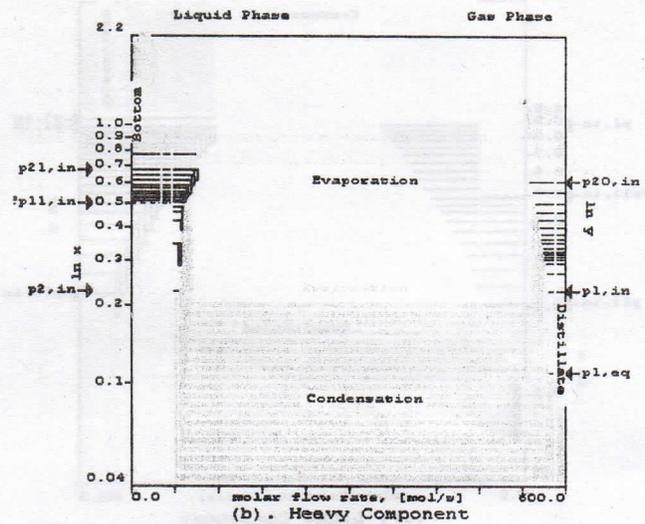
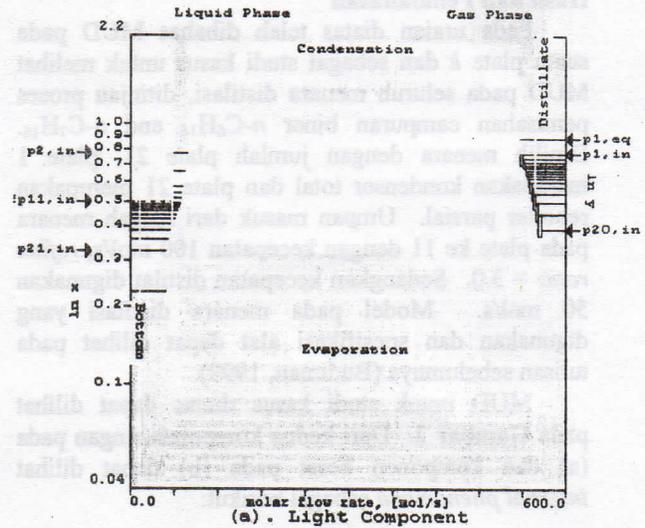
Pada reboiler, steam dimasukkan pada suhu 5°C diatas suhu *bottom* dan air pendingin dimasukkan kondensor pada suhu 5°C dibawah suhu distilat. Jika dilakukan penghitungan akan didapat *exergy loss of heating* pada reboiler dan *exergy loss of cooling* pada kondensor, masing-masing, $EXL_{REB} = 75,39$ kJ/s dan $EXL_{COND} = 65,62$ kJ/s, sehingga *exergy loss* total, $EXL_{TOT} = 361,21$ kJ/s. Pada kondisi ini jumlah panas yang dimasukkan ke reboiler, $Q_{REB} = 6035,2$ kJ/s dan panas yang diambil dari kondensor, $Q_{COND} = 5992,4$ kJ/s.

MUD pada kondisi reflux ratio minimum

Reflux ratio minimum perlu diketahui didalam operasi menara distilasi, karena merupakan kondisi minimum dimana terjadi proses pemisahan. Pada kondisi ini beban reboiler menjadi paling rendah. Gambar 3 menunjukkan MUD pada saat *reflux ratio* minimum, $R_{min} = 0,5$.

Pada saat menara distilasi beroperasi dengan *reflux ratio* minimum, terlihat fraksi mole pada plate 6 sampai 11 nilainya hampir sama, sehingga *driving force* proses evaporasi dan kondensasi nilainya mendekati nol. Hal ini disebabkan karena nilai γ_1 dan γ_2 sangat kecil pada plate ini. Kondisi ini pada perancangan menara distilasi dengan metoda McCabe-Thiele dikenal dengan *pinch point*.

Seperti yang terlihat pada sumbu $\ln x_1$, nilai fraksi mol pada distilat turun menjadi, $x_1 = 0,7731$. Setelah dilakukan penghitungan, besarnya *exergy loss of subprocesses*, $EXL_{SUB-P} = 41,86$ kJ/s. *Exergy loss of cooling* pada kondensor dan *exergy loss of heating* pada reboiler, masing-masing besarnya $EXL_{REB} = 28,59$ kJ/s dan $EXL_{COND} = 25,76$ kJ/s. Panas yang dimasukkan ke reboiler, $Q_{REB} = 2323,58$ kJ/s dan panas yang diambil dari kondensor, $Q_{COND} = 2303,1$ kJ/s.



Gambar 3 MUD satat tekanan $P = 1$ atm ($F = 100$ mol/s, $F_p = 11$ and $R_{opt} = 0,5$)

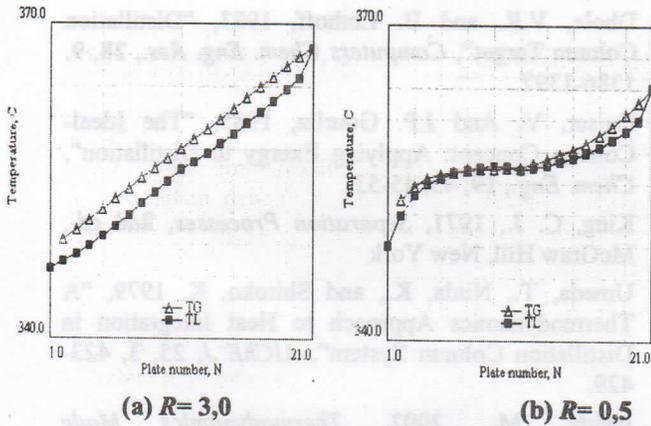
Unjuk kerja pemisahan

Gambar hubungan antara jumlah plate, N dan suhu, $^\circ\text{C}$ dari kedua keadaan *reflux ratio* yang berbeda ditunjukkan oleh Gambar 4. Pada gambar (a) terlihat bahwa perbedaan suhu cairan dan gas relatif sama sepanjang menara pada kondisi $R = 3,0$. Sementara itu pada $R = 0,5$ suhu gas dan cairan saling berimpit pada plate 6 sampai 11. Kondisi ini terkait dengan nilai fraksi mole cairan pada plate tersebut yang juga hampir sama, seperti yang terlihat pada sumbu $\ln x$ gambar 3. Akibatnya, *exergy loss due to mixing*, *exergy loss of evaporation* dan *exergy loss of condensation* juga kecil.

Pengaruh perubahan plate

Untuk mengetahui pengaruh efektifitas tekanan pada menara distilasi, tekanan dinaikkan menjadi 4 atm. Gambar 5 menunjukkan MUD saat tekanan diubah menjadi $P = 4$ atm. Pada kondisi ini *reflux*

ratio optimum masih tetap, $R_{opt}=3$. Jika dibandingkan dengan gambar 2 saat tekanan, $P= 1$ atm, terlihat bahwa *driving force* evaporasi pada plate 2 sangat kecil dan nilainya semakin kebawah menara semakin besar. Kecenderungan serupa juga terjadi pada *driving force* proses kondensasi. Sementara itu pada saat $P+ 4$ atm, nilai terkecil kedua *driving force* tersebut ada pada plate 11 (*feed plate*) dan dari plate tersebut nilainya naik ke atas dan ke dasar menara. Nilai fraksi mol komponen 1 pada distilat turun dari $x_{1,D}=0.878$ menjadi $x_{1,D}=0.8033$.



Gambar 4. Hubungan jumlah plate N dengan suhu, T

Dari analisis *exergy* terlihat adanya penurunan nilai *exergy loss of subprocesses* dan *exergy loss total* menjadi, $EXL_{SUB-P}= 158.99$ kJ/s dan $EXL_{TOT}= 275.13$ kJ/s. Kenaikan terjadi pada jumlah panas yang dimasukkan ke reboiler, $Q_{REB}= 6725,6$ kJ/s dan panas yang diambil dari kondenser, $Q_{COND}= 6694,6$ kJ/s.

Gambar 6 menunjukkan MUD saat tekanan menara dinaikkan lagi menjadi, $P= 8$ atm. Pada kondisi ini *reflux ratio* optimum nilainya tetap, $R_{opt}=3$. Terlihat bahwa nilai *driving force* evaporasi dan kondensasi terkecil ada pada *feed plate* (plate 11). Dari analisis *exergy*, jika dibandingkan dengan kondisi saat $P= 1$ atm ataupun $P= 4$ atm, terlihat adanya penurunan nilai *exergy loss of subprocesses* dan *exergy loss total* menjadi, $EXL_{SUB-P}= 137.99$ kJ/s dan $EXL_{TOT}= 240.16$ kJ/s. Kenaikan terjadi dengan jumlah panas yang dimasukkan ke reboiler, $Q_{REB}= 7118,5$ kJ/s dan panas yang diambil dari kondenser, $Q_{COND}= 7083,4$ kJ/s. Sementara itu, nilai fraksi mol komponen 1 pada distilat turun menjadi $x_{1,D}=0.77$.

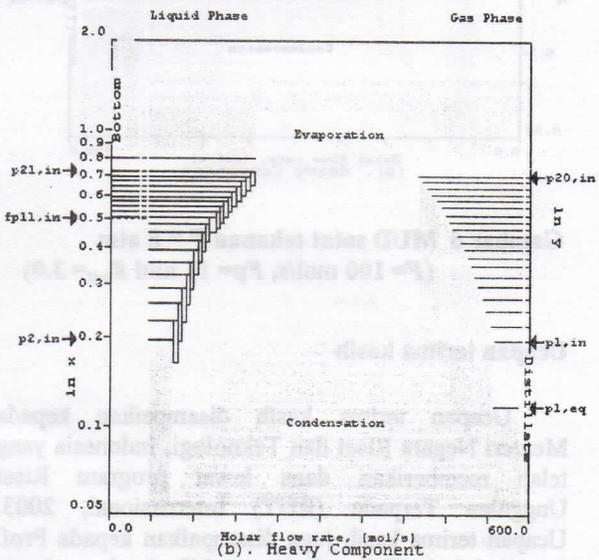
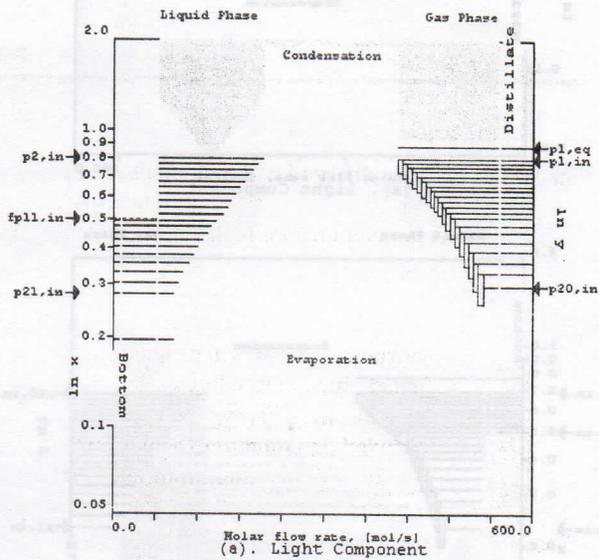
Kesimpulan

Dari pembahasan diatas dapat diambil kesimpulan:

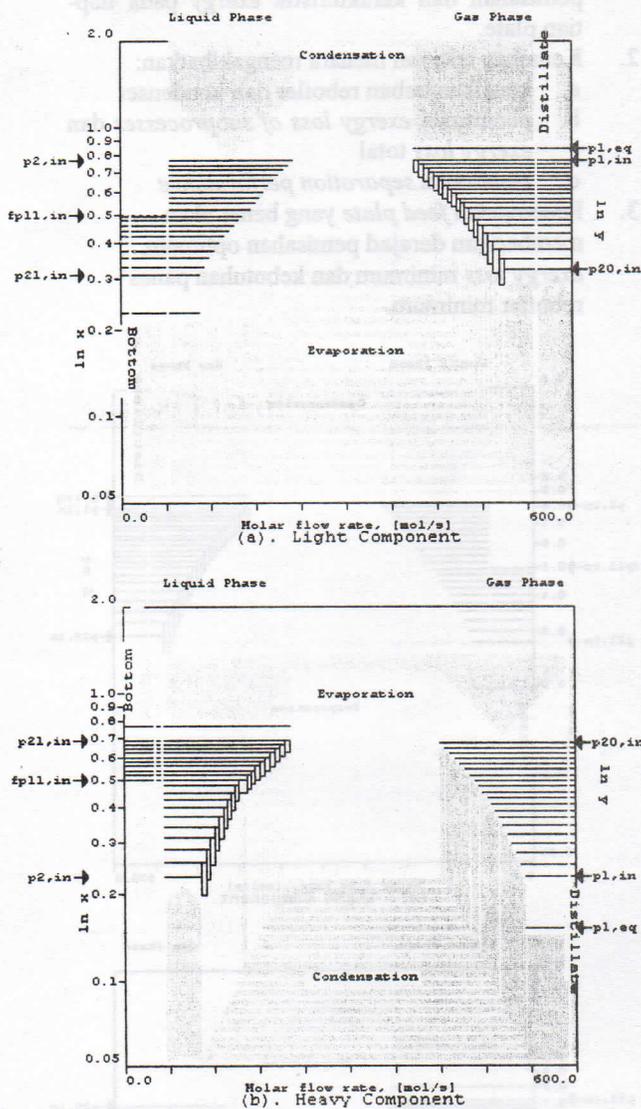
1. Analisis efektifitas pada menara distilasi dengan menggunakan metoda Material Utilization Diagram (MUD) dapat memaparkan *internal phenomena* yang terkait dengan karakteristik

pemisahan dan karakteristik *exergy* pada tiap-tiap plate.

2. Kenaikan tekanan menara mengakibatkan:
 - a. kenaikan beban reboiler dan kondenser
 - b. penurunan *exergy loss of subprocesses* dan *exergy loss total*
 - c. penurunan *separation performance*
3. Penempatan *feed plate* yang benar akan memberikan derajat pemisahan optimum, *exergy loss* minimum dan kebutuhan panas reboiler minimum.



Gambar 5 MUD saat tekanan $P= 4$ atm ($F= 100$ mol/s, $F_p= 11$ and $R_{opt}= 3.0$)



Gambar 6 MUD satat tekanan $P = 8$ atm
($F = 100$ mol/s, $F_p = 11$ and $R_{opt} = 3.0$)

Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Menteri Negara Riset dan Teknologi, Indonesia yang telah memberikan dana lewat program Riset Unggulan Terpadu (RUT) Internasional, 2003. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Prof. Masaru Ishida, Tokyo Institute of Technology, Japan yang telah bersedia menjadi partnet kerjasama.

Daftar Pustaka

Ahern, J.E., 1980, *The Exergy Method of Energy System Analysis*, 2nd ed., McGraw Hill, New York.
 Budiman, A. and M. Ishida, 1998, "Optimal Side Heating and Cooling in a Distillation Column", *Energy*, **23**, 5, 365-372.
 Budiman, A, 1999, "Perancangan Menara Distilasi Dengan Model Non Keseimbangan", Seminar Perpindahan Panas dan Massa, PAU-Teknik, Yogyakarta, March-1999.
 Dhole, V.R. and B. Linhoff, 1993, "Distillation Column Target", *Computers Chem. Eng. Res.*, **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.
 King, C. J., 1971, *Separation Processes*, 2nd ed., McGraw Hill, New York
 Umeda, T., Niida, K., and Shiroko, K, 1979, "A Thermodynamics Approach to Heat Integration in Distillation Column System", *AIChE J*, **25**, 3, 423-429.
 Ishida, M., 2002, *Thermodynamics Made Comprehensible*, Nova Science Publisher, Inc., New York.
 Linhoff, B., 1984, "Pinch Technology Has Come of Age", *Chem. Eng. Prog.*, **80**, 7, 33-40.
 Ognisty, T.P., 1995, "Analyze Distillation Column With Thermodynamics", *Chem.Eng. Prog.*, **91**, 2, 40-46.