

BOTTOM FLASHING PADA MENARA DISTILASI

Arief Budiman*)

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 bottom flashing. In this system, the column and condenser are maintained at high pressure by means of a compressor installed between output vapor from reboiler and the column, while the pressure of the reboiler is maintained at atmospheric condition.

The purpose of this paper is to discuss the bottom flashing in distillation column from view point of separation performance and energy characteristics. It is found that this system is less energy consumption and exergy losses compared to the conventional column.

PENDAHULUAN

Menara distilasi merupakan unit operasi yang paling banyak digunakan di industri kimia dan petrokimia. Proses pemisahan pada unit ini membutuhkan banyak sekali energi untuk merubah fase cair menjadi fase uap dan melepas panas saat mengembunkan kembali uap menjadi cairan pada kondenser. Disamping itu distilasi juga dikenal sebagai proses dengan inefisiensi tinggi (*highly inefficient process*) jika dikaji dengan parameter unjuk kerja pemisahan dengan panas yang dibutuhkan (Mah dkk., 1977). Data yang ada menunjukkan bahwa kebutuhan energi pada menara distilasi berkisar antara 30 – 60 % dari kebutuhan energi total suatu industri (Meili, 1990).

Disamping kondisi diatas, harga energi beberapa dekade terakhir juga meningkat, sehingga diperlukan usaha untuk mengurangi kebutuhan energi pada menara distilasi. Berbagai usaha penghematan energi sudah dilakukan dan secara umum dapat dikelompokkan menjadi:

- a. Proses integrasi (Smith, 2000)
- b. *Side condenser* dan *reboiler* (Budiman dan Ishida, 1998)
- c. *Heat pump*

Meili (1990) mempelajari dua sistem *heat pump* pada menara distilasi yang meliputi *vapor recompression* dan *close cycle*. Evaluasi ekonomi juga dibahas pada tulisan tersebut dengan membandingkan kedua *heat pump* dengan menara distilasi konvensional. Tulisan yang hampir sama dibuat oleh Matijasevic dan Beer (2000) dengan penekanan pembahasan pada *vapor recompression*. Pada tahun 2003, Bagajewicz dan Barbaro mencoba mengaplikasikan konsep *heat pump* pada dua unit industri kimia sebagai suatu usaha untuk integrasi proses. Pada tulisan tersebut dibahas juga dengan rinci urutan berhitung yang diperlukan.

Paper ini membahas *bottom flashing* yang merupakan aplikasi *heat pump* pada *internal* menara distilasi. Pembahasan tidak hanya dari sisi unjuk kerja pemisahan tetapi juga dari sisi kebutuhan energi dan eksergi.

MENARA DISTILASI

a. Menara konvensional

Menara distilasi konvensional dipakai untuk memisahkan campuran dua atau lebih cairan yang diumpankan pada menara. Cairan dengan titik didih yang lebih rendah akan teruapkan keatas menara dan diembunkan pada kondenser untuk diambil sebagai produk atas (*distillate*), sedangkan cairan yang titik didihnya tinggi akan terambil sebagai hasil bawah (*bottom*).

Sebagai *agent* untuk pemisahan digunakan panas, biasanya *steam*, yang dimasukkan ke reboiler. Sedangkan pada kondenser diambil panas dengan kualitas yang lebih rendah dibandingkan dengan kualitas panas reboiler.

b. Heat pumping

Secara umum, prinsip dari *heat pump* adalah pemanfaatan panas buangan pada level energi rendah dengan cara menaikkan tekanannya. Dengan naiknya tekanan akan menaikkan pula level energinya. *Heat pump* yang paling sederhana adalah *close cycle*, seperti terlihat pada Gambar 1a. Pendingin pada kondenser yang mempunyai level energi rendah dinaikkan tekanannya dengan kompresor, sehingga panas yang terbawa akan naik suhunya. Panas ini akan digunakan sebagai pemanas pada reboiler. Selanjutnya keluar dari reboiler tekanannya diturunkan dengan *expansion valve*. Dengan kata lain sistim ini merupakan sistem tertutup (*close loop*) dengan media perpindahan panas yang berfungsi sebagai pengambil

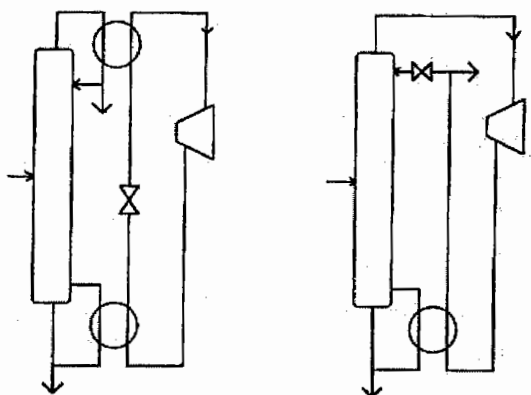
* Ir. Arief Budiman, MS., D.Eng, Dosen Jurusan Teknik Kimia, FT UGM

panas pada kondenser dan pemberi panas pada reboiler setelah level energinya dinaikkan. Sistem ini biasanya dipakai untuk memisahkan produk yang sensitif terhadap suhu, media yang digunakan bersifat korosif, atau tekanan menara yang digunakan mendekati tekanan kritis.

Jenis heat pump yang lain adalah *vapor recompression*, seperti terlihat pada Gambar 1b. Gas yang keluar dari menara, sebelum masuk kondenser dinaikkan tekanannya dengan kompresor. Setelah suhunya naik akibat naiknya tekanan, selanjutnya arus ini dipakai sebagai media pemanas pada reboiler. Keuntungan sistem ini hanya memerlukan satu *heat exchanger* (HE), sementara itu untuk sistem *close cycle* diperlukan dua buah HE.

c. Bottom flashing

Kedua jenis *heat pump* diatas sebenarnya dapat dikatakan sebagai pemanfaatan panas kualitas rendah pada menara distilasi bagian atas dengan cara menaikkan tekanan. Sedangkan pada bottom flashing, seperti yang terlihat pada Gambar 2, prinsipnya memanfaatkan panas pada dasar menara distilasi.



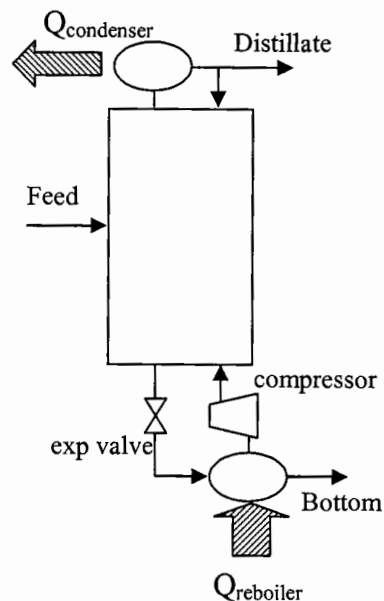
a. Close cycle b. Vapor recompression

Gambar 1. *Heat pump* pada menara distilasi

Arus gas yang keluar dari reboiler ditekan sehingga tekanan pada menara juga naik dan akibatnya tekanan pada kondenser akan lebih tinggi dari pada tekanan pada reboiler. Naiknya tekanan pada kondenser akan mengakibatkan suhu produk atas (*distillate*) juga akan meningkat dan diharapkan panas yang terambil dari kondenser dapat dipakai sebagai sumber panas pada reboiler. Agar supaya cairan yang masuk reboiler berada pada tekanan atmosferik, arus cair dari menara distilasi diekspansikan dengan *expansion valve* dahulu.

Pada konfigurasi ini kondisi yang harus dipenuhi adalah suhu pada kondenser harus lebih tinggi dari

pada suhu reboiler. Agar supaya perpindahan panas berjalan dengan baik, perbedaan suhu ini paling tidak besarnya sepuluh derajat Celcius. Secara praktis, proses perpindahan panas dari kondenser ke reboiler dapat dilakukan dengan sebuah HE. Cairan dari menara distilasi bagian bawah setelah keluar dari *expansion valve* masuk kondenser sebagai arus pendingin atau pengembun dari *distillate* dan selanjutnya ditekan dengan kompresor sebelum masuk ke menara pada fase gas.



Gambar 2. Bottom flashing

ANALISIS PERANCANGAN

a. Analisis unjuk kerja pemisahan

Simulasi pada menara distilasi biasanya menggunakan model keseimbangan. Model ini sangat sederhana karena tidak memperhitungkan pengaruh difusi massa dari fase gas ke fase cair, sehingga semua panas pada fase gas diterima oleh cairan. Akibatnya efisiensi panas pada menara nilainya seratus persen.

Pada tulisan ini digunakan model non keseimbangan atau *mass transfer model* seperti yang dijelaskan pada tulisan sebelumnya (Budiman, 1999). Asumsi yang digunakan pada model ini adalah proses perpindahan massa dan panas belum sampai pada tahap keseimbangan, sehingga terjadi perpindahan massa dan panas pada *interface* saat uap dari plate bawah berkontak dengan cairan dari plate atas. Akibatnya, pada perhitungan keseimbangan gas-cair harus memperhatikan kecepatan penguapan dan pengembunan. Besarnya *flux* massa pada fase gas, N_i untuk component i , dievaluasi dengan menjumlahkan *flux* difusi J_i dan *flux* konvektif $y_i \cdot C \cdot v_s$ pada *interface* dengan C adalah densitas gas molar.

Unjuk kerja heat pump dapat diukur dengan parameter yang dikenal dengan *coefficient of performance* (COP) yang didefinisikan sebagai:

$$\text{COP} = Q/P_m \quad (1)$$

dengan Q = beban reboiler dan P_m = tenaga kompresor, yang dapat dicari dengan persamaan (Ishida, 2002):

$$W = n C_p T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_p} - 1 \right] \quad (2)$$

Persamaan (2) dapat digunakan jika gas sebanyak n mol/s dengan tekanan P_1 dinaikkan menjadi P_2 . Agar supaya sistem *heat pump* ini mempunyai nilai ekonomis, nilai COP untuk *indirect heat pump* seperti *close cycle* sebaiknya berkisar antara 4 -10, sedangkan untuk *direct heat pump* seperti *vapor recompression* sebaiknya berkisar antara 6 – 15 (Meili, 1990).

b. Analisis termodinamika

Analisis termodinamika merupakan *excellent tool* untuk melakukan analisis energi pada menara distilasi. Dengan metoda ini para *engineer* akan dapat melakukan analisis secara kuantitatif maupun secara kualitatif, melakukan identifikasi lokasi dimana kemungkinan pemborosan energi dapat diperbaiki dan selanjutnya menentukan target minimasi kebutuhan energi (Ahern, 1980; Ognisty, 1995; Budiman dan Ishida, 2004).

Karakteristik *exergy* pada menara distilasi dapat dikelompokkan menjadi *exergy loss* sub-proses dan *exergy loss* pada kondenser dan reboiler. Penjumlahan ketiga jenis *exergy loss* tersebut merupakan nilai *exergy loss* total. Uraian yang lebih rinci dapat dibaca pada tulisan sebelumnya (Budiman dan Ishida, 2004). *Exergy loss* sub-proses terdiri dari *exergy loss* karena pencampuran pada fase gas dan cair, *exergy loss* karena perubahan fase (*exergy loss* evaporasi dan kondensasi) dan *exergy loss* karena *heating* dan *cooling*.

Exergy loss kondensasi pada kondenser dan *exergy loss* evaporasi pada reboiler dapat dicari dengan persamaan (Ishida, 2002):

$$\text{EXL} = Q \left[1 - \frac{T_0}{(T_h - T_l)/2} \right] \quad (3)$$

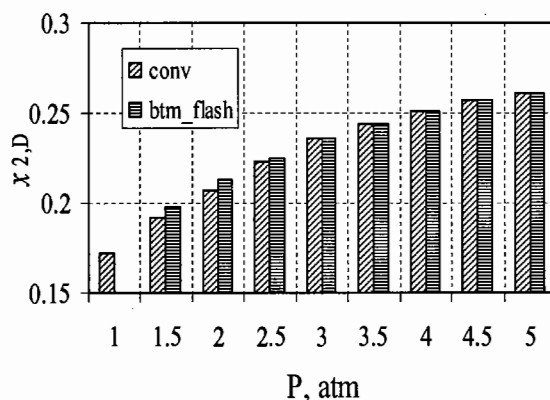
dengan Q = beban panas kondenser/reboiler, T_0 = suhu lingkungan, 298,15 K, T_h = suhu masuk kondenser/ suhu keluar reboiler dan T_l = suhu keluar kondenser/ suhu masuk reboiler.

STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Sebagai studi kasus, ditinjau proses pemisahan campuran biner $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$ and $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$. Dipilih menara dengan jumlah *plate* 15, *plate* 1 merupakan kondenser total dan *plate* 15 merupakan reboiler parsial. Umpan masuk dari tengah menara pada *plate* ke 8 dengan kecepatan 100 mol/s, *reflux ratio* $R = 2.0$ dan fraksi mole umpan, $x_1=x_2= 0,5$. Sedangkan *distillate* diset pada kecepatan 50 mol/s. *Tray* yang digunakan mempunyai spesifikasi: diameter *hole* (D_0)= 0.003 m, ketinggian *phase* cair (Z)= 0.1 m, dan jumlah *hole* tiap *plate*= 10.000.

Pada menara *bottom flashing*, tekanan reboiler dijaga tetap satu atmosfer, sedangkan tekanan menara dan kondenser merupakan parameter yang diubah nilainya. Perlu dicatat bahwa nilai tekanan menara dan kondenser selalu sama. Sedangkan menara distilasi konvensional mempunyai tekanan menara sama dengan tekanan kondenser dan reboiler.

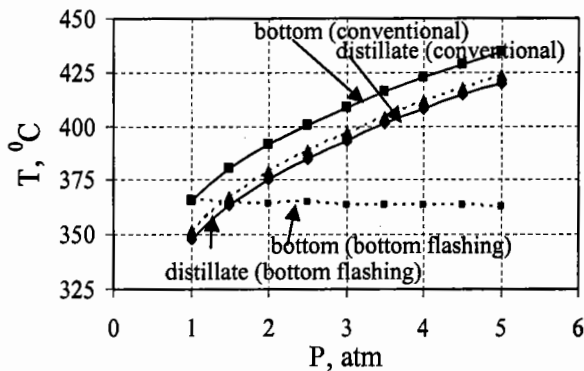
Gambar 3 menunjukkan hubungan antara unjuk kerja pemisahan pada berbagai tekanan. Nilai $x_{2,D}$ pada sumbu y adalah fraksi impuritis pada produk atas (*distillate*) yang merupakan fraksi berat yang seharusnya terambil pada hasil bawah. Komponen yang diinginkan pada produk atas menara adalah $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$.



Gambar 3. Unjuk kerja pemisahan ($x_{2,D}$) pada berbagai tekanan

Terlihat pada gambar 3, fraksi impuritis naik dengan bertambahnya tekanan menara, baik untuk menara konvensional maupun untuk menara *bottom flashing*. Pada tekanan yang lebih kecil atau sama dengan 2,5 atm, impuritis menara *bottom flashing* lebih banyak dibandingkan dengan menara konvensional. Sedangkan pada tekanan yang lebih besar dari pada 2,5 impuritis kedua konfigurasi tersebut nilainya sama. Hal ini menunjukkan bahwa menara *bottom flashing* akan efektif jika tekanan menara dan kondenser lebih besar dari 2,5 atm.

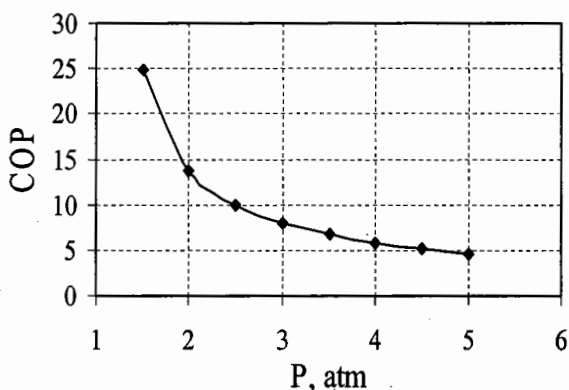
Suhu hasil atas (*distillate*) menara konvensional selalu lebih kecil dari pada suhu bawah (*bottom*). Perbedaan kedua suhu tersebut akan selalu konstan dengan naiknya tekanan seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Suhu reboiler dan kondenser pada berbagai tekanan

Pada menara *bottom flashing*, suhu distilat naik dengan bertambahnya tekanan dan suhu bottom selalu konstan. Kondisi ini disebabkan karena reboiler pada menara *bottom flashing* dijaga pada satu atmosfer. Perlu dicatat bahwa pada tekanan sekitar 1,4 atm, suhu *distillate* sama dengan suhu *bottom* dan selanjutnya suhu distilat selalu lebih besar dari pada suhu bottom. Perbedaan suhu ini semakin membesar dengan naiknya tekanan.

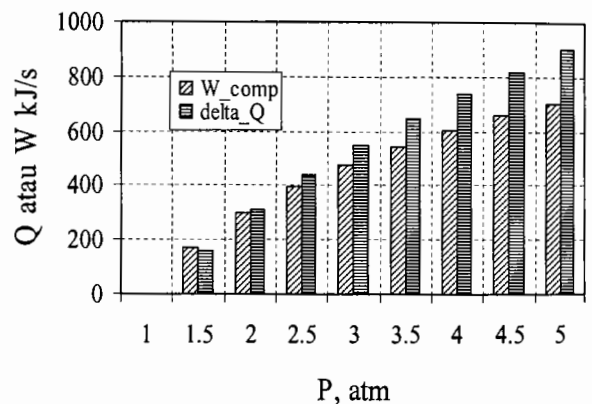
Parameter lain yang biasa dipakai pada sistem *heat pump* adalah *coefficient of performance*, COP. Gambar 5 menunjukkan nilai COP menara *bottom flashing* pada berbagai tekanan. Terlihat bahwa nilai COP naik dengan naiknya tekanan menara dan kondenser. Naiknya tekanan dari 1,5 ke 3 atm, terjadi penurunan COP yang cukup signifikan. Selanjutnya kenaikan tekanan setelah 3 atm penurunan COP relatif kecil.



Gambar 5. COP pada berbagai tekanan

Pada menara *bottom flashing*, panas yang harus disuplai pada reboiler dipenuhi dengan mengambil panas dari kondenser, sehingga sistem ini tidak perlu mengambil panas dari luar. Tapi perlu dicatat bahwa sistem ini perlu tenaga untuk menggerakkan kompresor. Dari definisi COP pada persamaan (1) dapat dikatakan bahwa nilai COP= 1 adalah kondisi pada saat beban reboiler sama dengan kerja yang diberikan kepada kompresor, artinya energi yang harus disuplai ke menara *bottom flashing* sama dengan menara konvensional. Dengan kata lain menara *bottom flashing* dengan nilai COP=1 sama dengan menara distilasi konvensional. Sistem ini akan efektif saat nilai COP jauh lebih besar dari pada satu, misal pada saat P=3 atm, nilai COP= 7,9.

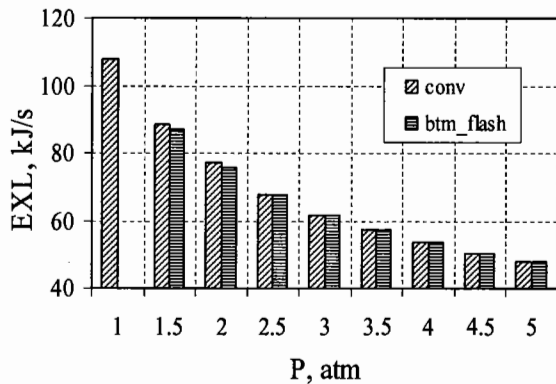
Agar supaya perpindahan panas pada kondenser dan reboiler dapat berjalan dengan baik perlu adanya batasan perbedaan arus panas dan dingin (ΔT) pada sistem tersebut. Jika dianggap ΔT yang diijinkan berkisar antara 10 - 50 °C, maka dapat dikatakan bahwa COP menara *bottom flashing* nilainya berkisar antara COP= 5 - 15.



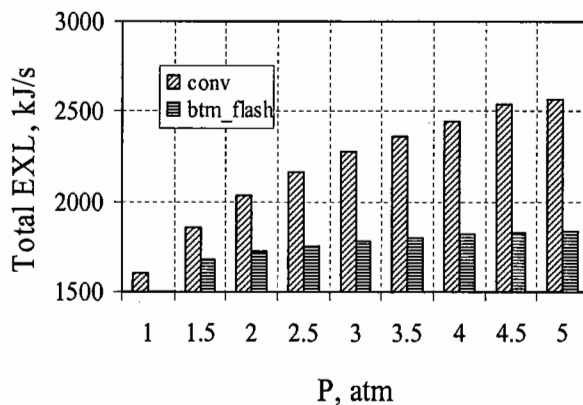
Gambar 6. Kelebihan beban panas dan kerja kompresor pada berbagai tekanan

Gambar 6 menunjukkan nilai kelebihan beban panas atau delta Q ($Q_{\text{kondenser}} - Q_{\text{reboiler}}$) dan kerja (W) kompresor pada berbagai tekanan. Pada tekanan 1,5 atm, delta Q lebih besar dari pada W kompresor, tetapi pada tekanan yang lebih besar dari itu, delta Q selalu lebih besar dari pada W kompresor. Pada tekanan lebih kecil dari 3 atm perbedaan kedua nilai tersebut tidak begitu besar, tetapi pada tekanan yang lebih besar perbedaan tersebut sangat signifikan. Kondisi ini sebenarnya mempunyai hubungan yang erat dengan penurunan COP yang tidak begitu signifikan pada tekanan yang lebih besar dari 3 atm, seperti terlihat pada gambar 5.

Exergy loss pada menara distilasi dapat digolongkan menjadi *exergy loss* sub-proses pada menara, *exergy loss* pada kondenser dan *exergy loss* pada reboiler. Penjumlahan ketiganya merupakan *exergy loss* total pada menara *bottom flashing*. Gambar 7 menunjukkan nilai *exergy loss* sub-proses pada berbagai tekanan. Nilai ini menurun dengan bertambahnya tekanan. Pada tekanan lebih kecil dari pada 2,5 atm *exergy loss* sub-proses menara konvensional lebih tinggi dari pada menara *bottom flashing*, tetapi pada tekanan lebih besar atau sama dengan 2,5 atm nilainya selalu sama. Gambar 8 menunjukkan nilai *exergy loss* total pada berbagai tekanan. Pada menara distilasi konvensional, kenaikan tekanan diikuti kenaikan *exergy loss* total yang cukup signifikan, sedangkan pada menara *bottom flashing* hanya terjadi sedikit kenaikan *exergy loss* total dengan naiknya tekanan.



Gambar 7. Eksergi loss sub-proses pada berbagai tekanan



Gambar 8. Eksergi loss total pada berbagai tekanan

KESIMPULAN

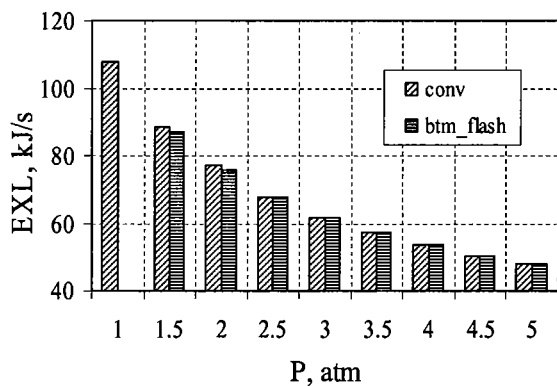
Dari uraian diatas dapat diambil kesimpulan:

1. Menara *bottom flashing* sangat efektif untuk menghilangkan beban panas reboiler
2. Pada tekanan tertentu:
 - a. Unjuk kerja menara konvensional sama dengan menara *bottom flashing*.
 - b. *Exergy loss* sub-proses menara konvensional sama dengan menara *bottom flashing*.
3. Jika dianggap perbedaan arus panas dan dingin (ΔT) pada kondenser dan reboiler yang diijinkan berkisar antara 10 -50 °C, maka COP menara *bottom flashing* nilainya berkisar antara 5 -15.
4. *Exergy loss* total menara *bottom flashing* jauh lebih kecil dibandingkan dengan menara konvensional.

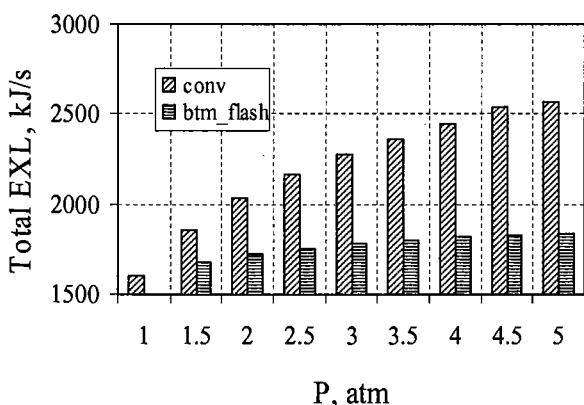
DAFTAR PUSTAKA

- 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.Engng.*, 27, 1707-1719.
- Budiman, A., (1999), "Perancangan Menara Distilasi dengan Model Non Keseimbangan", Seminar Nasional Dasar-Dasar dan Aplikasi Perpindahan Panas dan Massa, PAU IT, UGM, Maret 1999, 190-195.
- 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.
- Ishida, M., 2002, *Thermodynamics Made Comprehensible*, Nova Science Publisher, Inc., New York.
- 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, 651-658
- Matijasevic, L. and Beer, E., 2000, "Application of Heat Pump: A Feasibility Study", *Chem.Eng.Ed.*, winter, 68-72.
- Meili, A., 1990, "Heat Pump for Distillation Column", *Chem.Eng.Prog.*, 86, 6,60-65.
- 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, 1337-1345.

Exergy loss pada menara distilasi dapat digolongkan menjadi *exergy loss* sub-proses pada menara, *exergy loss* pada kondenser dan *exergy loss* pada reboiler. Penjumlahan ketiganya merupakan *exergy loss* total pada menara *bottom flashing*. Gambar 7 menunjukkan nilai *exergy loss* sub-proses pada berbagai tekanan. Nilai ini menurun dengan bertambahnya tekanan. Pada tekanan lebih kecil dari pada 2,5 atm *exergy loss* sub-proses menara konvensional lebih tinggi dari pada menara *bottom flashing*, tetapi pada tekanan lebih besar atau sama dengan 2,5 atm nilainya selalu sama. Gambar 8 menunjukkan nilai *exergy loss* total pada berbagai tekanan. Pada menara distilasi konvensional, kenaikan tekanan diikuti kenaikan *exergy loss* total yang cukup signifikan, sedangkan pada menara *bottom flashing* hanya terjadi sedikit kenaikan *exergy loss* total dengan naiknya tekanan.



Gambar 7. Eksergi loss sub-proses pada berbagai tekanan



Gambar 8. Eksergi loss total pada berbagai tekanan

KESIMPULAN

Dari uraian diatas dapat diambil kesimpulan:

1. Menara *bottom flashing* sangat efektif untuk menghilangkan beban panas reboiler
2. Pada tekanan tertentu:
 - a. Unjuk kerja menara konvensional sama dengan menara *bottom flashing*.
 - b. *Exergy loss* sub-proses menara konvensional sama dengan menara *bottom flashing*.
3. Jika dianggap perbedaan arus panas dan dingin (ΔT) pada kondenser dan reboiler yang diijinkan berkisar antara 10 -50 °C, maka COP menara *bottom flashing* nilainya berkisar antara 5 -15.
4. *Exergy loss* total menara *bottom flashing* jauh lebih kecil dibandingkan dengan menara konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahem, 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.Engng.*, 27, 1707-1719.
- Budiman, A., (1999), "Perancangan Menara Distilasi dengan Model Non Keseimbangan", Seminar Nasional Dasar-Dasar dan Aplikasi Perpindahan Panas dan Massa, PAU IT, UGM, Maret 1999, 190-195.
- 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.
- Ishida, M., 2002, *Thermodynamics Made Comprehensive*, Nova Science Publisher, Inc., New York.
- 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, 651-658
- Matijasevic, L. and Beer, E., 2000, "Application of Heat Pump: A Feasibility Study", *Chem.Eng.Ed.*, winter, 68-72.
- Meili, A., 1990, "Heat Pump for Distillation Column", *Chem.Eng.Prog.*, 86, 6,60-65.
- 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, 1337-1345.