

PENGARUH *NON-CONDENSABLE GAS* (UDARA) PADA PENGEMBUNAN PARSIAL SISTEM N-HEKSAN – ETANOL

Bregas S T Sembodo

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNS

Abstract : *The objective of the research is to seek the effect of the concentration of air, as a non-condensable gas, towards mass transfer coefficient and heat transfer coefficient on the condensation of n-hexane–ethanol vapor. The experiment was carried out in the vertical double pipe condenser with the length, inner and outer diameter of the tube was 1 m, 1.1 cm and 1.25 cm, respectively. The diameter of annulus was 3,25 cm. Water, as a cold fluid, flowed in the annulus side while the n-hexane vapor, ethanol vapor and air flowed in the tube side. In the interval of air concentration studied (9.92% to 33.91% mole) the heat transfer coefficient of gas (h_g), the mass transfer coefficient of n-hexane (kg_1) and ethanol (kg_2) was down significantly.*

Keywords : non-condensable gas, condensation, double pipe condenser

PENDAHULUAN

Pemanfaatan panas pengembunan dari suatu uap atau campuran uap baik yang mengandung *non-condensable gas* maupun tidak, sering dilakukan pada industri mengingat harga energi panas yang makin mahal. Untuk dapat mengambil panas semaksimal mungkin diperlukan alat pengambil panas, dalam hal ini berupa kondensor, yang sesuai dengan maksud tersebut.

Non-condensable gas mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap koefisien transfer panas. Adanya *non-condensable gas* dalam persentase kecil saja sudah dapat menurunkan kecepatan transfer panas yang cukup besar [8]

Secara kuantitatif perlu diketahui berapa besar penurunan koefisien transfer panas dan koefisien transfer massa akibat adanya *non-condensable gas* dalam suatu sistem campuran uap multikomponen. Sistem yang diteliti adalah sistem n-heksan – etanol dengan udara sebagai *non-condensable gas* yang mudah diperoleh.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh konsentrasi udara terhadap transfer massa dan panas pada proses kondensasi sistem n-heksan – etanol yang mengandung udara.

DASAR TEORI

Persamaan Nusselt untuk menentukan koefisien transfer panas pengembunan uap murni berlaku untuk kecepatan transfer uap ke lapisan kondensat yang sangat cepat. Uap masuk kondensor pada tekanan jenuh, lalu mengembun karena suhu permukaan kondensor di bawah suhu dew point. Kecepatan transfer uap ke kondensat tergantung pada mekanisme difusinya. Jika suhu kondensat lebih rendah daripada suhu jenuh uap, maka terjadi transfer massa dari fase uap ke fase cair (kondensat). Hal ini disebabkan adanya perbedaan tekanan uap pada fase uap dan fase cair [5].

Hoffman [4] dan Schrodt [7] memperkirakan luas kondensor dengan memperhatikan transfer massa dan panas secara simultan. Persamaan diferensial linier yang diperoleh dan digabung dengan persamaan kesetimbangan pada *interface* dapat dipakai untuk pengembunan total atau parsial.

Model matematik yang disusun Schrodt [7] menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Aliran plug flow.
2. Kondensat tercampur sempurna.
3. Perpindahan panas pada gas film secara konduksi.

4. Setiap komponen mendifusi (tidak ada interaksi satu dengan yang lain) melalui suatu komponen yang tidak mendifusi (*non-condensable gas*)

Neraca massa untuk komponen yang mengembun :

$$-\frac{dV_i}{dA} = k_{gi}(P_{gi} - P_{si}) \quad (1)$$

$i = 1, 2$

Sedangkan untuk komponen yang tidak mengembun :

$$-\frac{dV_3}{dA} = 0 \quad (2)$$

Neraca panas pada campuran uap :

$$-G C_p \frac{dT_g}{dA} = h_g \left(\frac{\varepsilon}{e^\varepsilon - 1} \right) (T_g - T_s) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum N_i C_{p_i}}{h_g}$$

Neraca panas pada pendingin (air) untuk aliran berlawanan arah :

$$W C_{p_w} \frac{dT_w}{dA} = -h_o (T_s - T_w) \quad (4)$$

Suku sebelah kanan persamaan (3) menunjukkan kecepatan transfer panas konduksi pada *interface*. Jika tidak terjadi pengembunan nilai $\varepsilon = 1$ dan nilai ε naik dengan bertambahnya kecepatan pengembunan. Faktor $\varepsilon / (e^\varepsilon - 1)$ menunjukkan pengaruh transfer massa pada suhu campuran uap dan gas. Persamaan (1) berlaku untuk semua komponen yang mengembun.

Koefisien transfer panas gabungan, h_o didasarkan pada hambatan lapisan kondensat, dinding tube, kerak yang terbentuk dan lapisan pendingin. Hambatan lapisan kondensat berubah terhadap tebal dan besaran-besaran fisisnya.

Pada kondensor vertikal, perubahan hambatan pada lapisan kondensat cukup berarti. Akan tetapi, jika digabung dengan hambatan lainnya dan dibandingkan dengan hambatan pada fase gas, perubahannya tidak berarti [7].

Pada *interface* dianggap terjadi kesetimbangan antara kondensat dengan campuran uap dan fase gas, sehingga tekanan parsial pada *interface*, P_{si} , dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_{si} = \gamma_i x_i P_i^o \quad (5)$$

$$P_i^o = f(T_s) \quad (6)$$

$$\gamma_i = f(T_{si}, x_i) \quad (7)$$

Neraca panas pada *interface* dalam keadaan *steady state*,

$$h_o (T_s - T_w) = \sum k_{gi} (P_{si} - P_{gi}) \lambda_i + h_g \left(\frac{\varepsilon e^\varepsilon}{e^\varepsilon - 1} \right) (T_g - T_s)$$

Setelah diatur :

$$T_s = \frac{k_g \left(\frac{\varepsilon}{1 - e^{-\varepsilon}} \right) T_g + \sum k_{gi} (P_{si} - P_{gi}) \lambda_i + h_o T_w}{h_o + h_g \left(\frac{\varepsilon}{1 - e^{-\varepsilon}} \right)} \quad (8)$$

Suhu T_w pada persamaan (8) dihitung dari neraca panas pada elemen A.

$$W C_{p_w} \frac{dT_w}{dA} = e^\varepsilon G C_p \frac{dT_g}{dA} + \sum \left[\frac{dV_i}{dA} \right] \lambda_i \quad (9)$$

Dengan keadaan batas :

Pada $A=0$

$$T_w = T_{wo}$$

$$T_g = T_{g \text{ masuk}}$$

$$V_i = V_{i \text{ masuk}}$$

Setelah diintegrasikan dengan keadaan batas tersebut diperoleh :

$$T_w = T_{wo} + \frac{e^\varepsilon G C_p}{W C_{p_w}} (T_g - T_{g \text{ masuk}}) + \frac{\sum \lambda_i (V_i - V_{i \text{ masuk}})}{W C_{p_w}} \quad (10)$$

Kecepatan transfer panas lokal dihitung dari persamaan berikut:

$$q = -W C p_w \frac{dT_w}{dA} \quad (11)$$

atau tranfer panas total dari A=0 sampai A=A adalah :

$$Q = -W C p_w \int_0^A \frac{dT_w}{dA} dA \quad (12)$$

Tekanan parsial komponen i pada fase gas dan mol fraksi cair dihitung dari korelasi berikut [7]

$$P_{gi} = \frac{V_i P_i}{\sum V_i} \quad (13)$$

$$i = 1,2,3$$

$$x_i = \frac{(V_{i \text{ masuk}} - V_i)}{\sum (V_{i \text{ masuk}} - V_i)} \quad (14)$$

$$i = 1,2$$

Untuk A>0 vertikal

$$x_i = \frac{k_{gi} (P_{gi} - P_{si})}{\sum k_{gi} (P_{gi} - P_{si})} \quad (15)$$

$$i = 1,2$$

Untuk A=0, vertikal

Perhitungan dilakukan dengan cara coba-coba. Untuk sistem 2 komponen yang mengembun, k_{g1} , k_{g2} dan h_g diberi nilai awal, lalu dioptimasi sehingga V_1 , V_2 dan T_g data mempunyai beda minimum dengan V_1 , V_2 dan T_g terhitung.

Persamaan (1) sampai (12) mewakili suatu kondensor dengan aliran pendingin dan campuran uap berlawanan arah. Tekanan uap murni komponen i diestimasi dengan persamaan Antoine [1], koefisien aktifitas γ_i diestimasi dengan persamaan Wilson [1], dan koefisien transfer panas gabungan h_o diestimasi dengan persamaan Eagle-Ferguson [1]. Persamaan (1), (3) dan (4) diselesaikan dengan cara Runge-Kutta [3] dan persamaan (11) dengan formula integrasi trapezoidal [3]. Nilai h_g dan k_{gi} dievaluasi dengan metode Hooke-Jeeves [6] sehingga diperoleh nilai optimal. Nilai h_g dan k_{gi} optimal jika kesalahan realtif absolut semua peubah telah mencapai nilai minimum.

PELAKSANAAN PENELITIAN

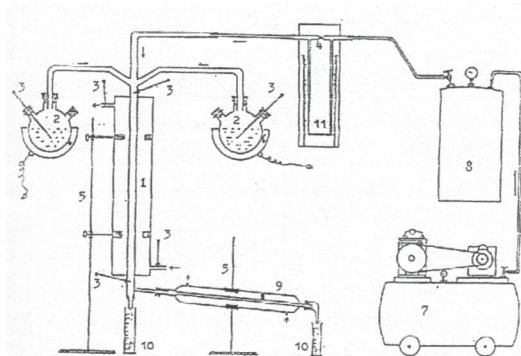
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alkohol absolut dan n-heksan.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini dan susunannya dapat dilihat pada gambar 1.

Mula-mula disiapkan larutan standart n-heksan-etanol dengan cara membuat campuran etanol dan n-heksan dalam beberapa macam komposisi dan ditentukan massa jenisnya. Sebagai hasilnya diperoleh hubungan komposisi larutan n-heksan-etanol dengan massa jenisnya. Selanjutnya pada tahap persiapan ini juga dilakukan kalibrasi terhadap termometer dan *orificemeter* yang dipakai.

Aliran udara diatur pada kecepatan tertentu dan dialirkan ke dalam tube, Air pendingin dialirkan dalam anulus dengan kecepatan tertentu pula. N-heksan dan etanol dimasukkan dalam labu masing-masing dan pemanas mantel dihidupkan. Pada saat *steady state*, yaitu ditandai dengan suhu yang konstan pada keempat termometer, dilakukan pengambilan data. Data yang diambil antara lain debit dan komposisi embunan keluar kondensor dan keluar pendingin balik serta suhu-suhu yang tercatat pada keempat termometer yang terpasang.

Percobaan dilakukan dengan 4 variasi kecepatan aliran udara masuk kondensor.



keterangan :

1. Double pipe condensor
2. Labu leher tiga 1 liter
3. Termometer
4. Orificemeter
5. Statif
6. Pemanas mantel
7. Kompresor
8. Tangki udara
9. Pendingin balik
10. Gelas ukur
11. Manometer air raksa

Gambar 1. Susunan alat-alat percobaan.

HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

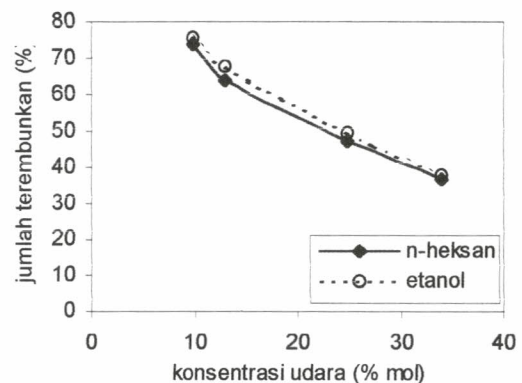
Hasil percobaan yang telah dilakukan ditampilkan pada tabel 1 dan tabel 2 berikut ini.

Tabel 1. Data kecepatan aliran uap/gas n-heksan, etanol dan udara

Kecepatan uap masuk, kgmol/s			Kecepatan uap keluar, kgmol/s		
n-heksan $\times 10^6$	etanol $\times 10^6$	udara $\times 10^6$	n-heksan $\times 10^6$	etanol $\times 10^6$	udara $\times 10^6$
4,8831	2,4094	0,8033	1,2735	0,5849	0,8033
4,6357	2,6471	1,0942	1,668	0,8505	1,0942
3,3543	2,2509	1,8618	1,7732	1,1371	1,8618
3,2437	1,7281	2,5409	2,0632	1,0784	2,5409

Tabel 2. Data suhu air pendingin dan suhu campuran uap

Pada A=0		Pada A=A	
$T_w, ^\circ\text{C}$	$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_w, ^\circ\text{C}$	$T_g, ^\circ\text{C}$
32,2	58,5	28,5	40,5
31,75	58,75	29	41,5
31,25	58	29	42,25
31	57,75	29	42,5



Gambar 2. Hubungan jumlah terembunkan dengan konsentrasi udara.

Kecepatan etanol dan n-heksan yang terembunkan dan persentase yang terembunkan ditunjukkan pada gambar 2. Terlihat bahwa makin tinggi kadar udara dalam campuran, jumlah etanol dan n-heksan yang terembunkan makin kecil yang berarti kecepatan pengembunan makin menurun.

Persentase etanol yang mengembun lebih besar untuk semua kondisi yang diteliti. Hal ini disebabkan difusivitas etanol-udara ($0,102 \text{ cm}^2/\text{detik}$ pada suhu 294°K) [2] lebih besar daripada difusivitas n-heksan-udara ($0,086 \text{ cm}^2/\text{detik}$ pada suhu 294°K) [2], dan juga titik didih etanol lebih besar daripada titik didih n-heksan.

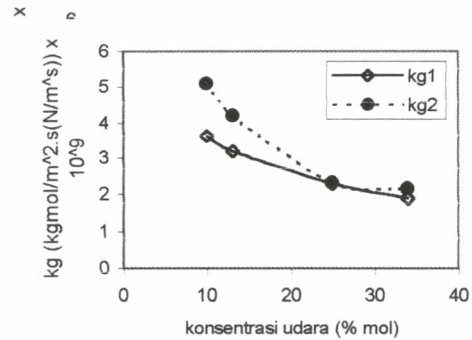
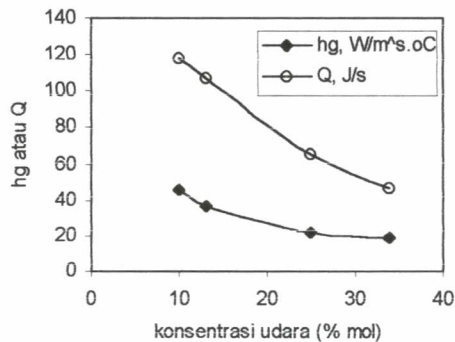
Hasil perhitungan untuk nilai-nilai h_g , k_{g1} , k_{g2} dan panas total yang diserap

kondensor (Q) ditampilkan pada tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Hasil perhitungan simulasi dengan program komputer

% udara dalam camp. uap masuk	kg1 kgmol/(m ² .s) /(N/m ²)x 10 ⁹	kg2 kgmol/(m ² .s) /(N/m ²)x 10 ⁹	hg W/(m ² .°C)	Q J/s
9,92	3,634	5,099	45,911	118,5
13,06	3,175	4,201	37,095	107,6
24,93	2,298	2,326	22,173	65,33
33,91	1,903	2,155	19,245	47,10

Gambar 3. Hubungan koefisien transfer massa dengan konsentrasi udara



Gambar 4. Hubungan koefisien transfer panas (hg) dan panas total yang terambil (Q) dengan konsentrasi udara

Berdasarkan gambar 3 dan gambar 4 terlihat bahwa nilai k_{g1} , k_{g2} , h_g dan Q semakin menurun dengan bertambahnya persentase udara dalam campuran uap. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan transfer massa dan panas makin kecil dengan bertambahnya *non-condensable gas* dalam campuran uap. Dengan kata lain *non-condensable gas* menghambat transfer massa dan transfer panas campuran uap. Hal ini karena dengan makin tingginya kadar udara dalam campuran, sifat-sifat fluida mendekati sifat udara.

Seperti yang terlihat pada gambar 3, kecenderungan yang ditunjukkan oleh k_{g1} , k_{g2} , h_g dan Q pada tabel 3 sudah sesuai, yaitu makin sedikit yang terembunkan, maka nilai k_{g1} , k_{g2} , h_g maupun Q juga menurun.

Perbandingan antara data hasil percobaan dan hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4 dan tabel 5.

Tabel 4. Perbandingan hasil dari data dan simulasi untuk V_1 .

V_1 , kgmol/s		V_2 , kgmol/s	
Data	Terhitung	data	Terhitung
$1,273 \cdot 10^{-6}$	$1,273 \cdot 10^{-6}$	$5,849 \cdot 10^{-7}$	$5,842 \cdot 10^{-7}$
$1,668 \cdot 10^{-6}$	$1,668 \cdot 10^{-6}$	$8,505 \cdot 10^{-7}$	$8,509 \cdot 10^{-7}$
$1,773 \cdot 10^{-6}$	$1,773 \cdot 10^{-6}$	$1,137 \cdot 10^{-6}$	$1,137 \cdot 10^{-6}$
$2,063 \cdot 10^{-6}$	$2,063 \cdot 10^{-6}$	$1,078 \cdot 10^{-6}$	$1,079 \cdot 10^{-6}$

Tabel 5. Perbandingan hasil dari data dan simulasi untuk T_g dan T_w

T_g , °C		T_w , °C	
data	hitung	data	hitung
40,5	40,5	28,5	31,6
41,5	41,5	29	31,2
42,25	41,26	29	30,9
42,5	42,5	29	30,8

Simulasi terhadap proses pengembunan campuran uap yang mengandung *non-condensable gas* ini menunjukkan hasil yang mendekati proses yang sesungguhnya. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4 dan tabel 5, nilai data dan terhitung tidak banyak berbeda bahkan kesalahan relatif rata-rata mendekati 0%, kecuali pada T_w (suhu air pendingin masuk kondensor). Kesalahan yang agak besar pada T_w ini mungkin disebabkan ketelitian termometer yang digunakan hanya sebesar 1°C, sedangkan perbedaan suhu air pendingin masuk dan keluar kondensor kurang dari 1°C.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Koefisien transfer panas dan transfer massa menurun dengan bertambahnya konsentrasi *non-condensable gas* (udara).
2. Koefisien difusivitas molekuler dan titik didih berpengaruh terhadap jumlah yang terembunkan.

3. Komponen yang mempunyai difusivitas molekuler dan titik didih yang lebih tinggi mengembun lebih banyak.
4. Pada kisaran konsentrasi udara yang dipelajari (9,92% sampai 33,91%) dan $h_o=399,5535 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$, koefisien transfer massa n-heksan (k_{g1}) menurun dari $3,634 \cdot 10^{-9} \text{ kgmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{N/m}^2))$ menjadi $1,903 \cdot 10^{-9} \text{ kgmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{N/m}^2))$; koefisien transfer massa etanol (k_{g2}) menurun dari $5,099 \cdot 10^{-9} \text{ kgmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{N/m}^2))$ menjadi $2,155 \cdot 10^{-9} \text{ kgmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{N/m}^2))$; koefisien transfer panas gas (h_g) menurun dari $45,911 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$ menjadi $19,245 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$, jika kandungan udara naik dari 9,92% menjadi 33,91%.

SARAN

Beberapa hal yang masih perlu diteliti antara lain :

1. Kisaran kecepatan pengembunan uap yang masih dapat diprediksi dengan model matematik yang disusun.
2. Tebal lapisan kondensat pada penyusunan model matematik.
3. Simulasi untuk kondensor horisontal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada seluruh staf Laboratorium Teknologi Kimia Umum Jurusan Teknik Kimia FT-UGM diucapkan banyak terima kasih atas segala fasilitas yang telah diberikan sehingga penelitian ini bisa dilakukan.

DAFTAR LAMBANG

- A : luas permukaan, m^2
 C : konsentrasi, kgmol/m^3 , gmol/l
 Cp: kapasitas panas, $\text{J/kgmol}^\circ\text{C}$
 h : koefisien transfer panas, $\text{W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$
 G : kecepatan aliran campuran gas, kgmol/s
 k : koefisien transfer massa, $\text{kgmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{N/m}^2))$
 N : kecepatan perpindahan massa, $\text{kgmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 P : tekanan, N/m^2
 P_i^o : tekanan uap murni komponen i, N/m^2

q : kecepatan transfer panas lokal, $J/(m^2 \cdot s)$
 Q : kecepatan transfer panas total, J/s
 T : suhu, $^{\circ}C$
 u : kecepatan linier, m/s
 V_i : kecepatan aliran gas i , $kgmol/s$
 W : kecepatan aliran air pendingin, $kgmol/s$
 x : mol fraksi
 z : panjang pipa, m
 γ : koefisien aktifitas
 λ : panas laten penguapan, $J/kgmol$

[8] Sparrow, E.M. and Eckert, E.R.G., "Effect of Superheated Vapor and Non-condensable Gas on Laminar Film Condensation", *A.I.Ch.E Journal*, **7** (3), 1961, pp. 473-477

Subscripts :

1 : n-heksan
 2 : etanol
 3 : udara
 g : fase gas
 o : overall
 s : pada interface
 t : total
 w : air pendingin

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coulson, J.H, and Richardson, J.F., "Chemical Engineering", vol.6, Pergamon Press, Oxford, 1983, pp. 253, 264
- [2] Cussler, E.L., "Diffusion Mass Transfer in Fluid System", Cambridge University Press, Cambridge, 1984, pp. 105-115
- [3] Gerald, C.F. and Wheatley, P.O., "Applied Numerical Analysis", 3rd edition, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1984, pp. 254-256, 332-333
- [4] Hoffman, E.J., "Partial Condensation by the Methods of Simultaneous Heat and Mass Transfer", *A.I.Ch.E Journal*, **17** (3), 1971, pp. 741-744
- [5] Kern, D.Q., "Process Heat Transfer", International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, 1950
- [6] Rudd, D.F. and Watson, C.C., "Strategy of Process Engineering", John Wiley & Sons, New York, 1968, pp. 170-172
- [7] Schrodt, J.T., "Simultaneous Heat and Mass Transfer from Multicomponent Condensing Vapor-Gas Systems", *A.I.Ch.E Journal*, **19** (4), 1973, pp.753-754