

PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PENGUAPAN FALLING FILM CAMPURAN UAP-GAS METANOL – AIR ARAH BERLAWANAN

K. Budhikarjono, Susianto dan N. Soewarno *)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh adanya aliran gas/udara terhadap koefisien perpindahan panas dan massa dalam falling film evaporator untuk sistem larutan campuran biner, dan memperoleh persamaan empiris koefisien perpindahan panas dan massa. Penelitian dilakukan menggunakan kolom tegak sepanjang 2 meter dan diameter dalam 2,8 cm. Larutan metanol-air dan udara panas dialirkan pada kolom dengan aliran berlawanan arah. Laju alir cairan 20 – 160 l/jam, konsentrasi umpan sebesar 10-50% metanol dan laju alir gas 0-2,16 standar m³/jam. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas dipengaruhi oleh laju alir umpan dan konsentrasi larutan. Semakin besar laju alir umpan, semakin besar koefisien perpindahan panas, semakin besar konsentrasi larutan, semakin kecil koefisien perpindahan panas. Hal ini identik dengan koefisien perpindahan massa, semakin besar laju alir cairan semakin besar koefisien perpindahan massa. Semakin besar konsentrasi larutan, semakin kecil koefisien perpindahan massa. Koefisien perpindahan panas yang dihasilkan berkisar antara 5,6 - 9 kW/m².K dan koefisien perpindahan massa yang dihasilkan berkisar antara 1,06 – 2,73.10⁻⁴ m/detik untuk kisaran $N_{Re,l}$ 1800-6000 dan $N_{Re,g}$ 0-2000.

Kata Kunci: falling film evaporator; koefisien perpindahan panas; koefisien perpindahan massa

Pendahuluan

Falling film evaporator kini banyak digunakan dalam proses industri kimia untuk pemisahan pelarut atau campuran multi komponen dimana fluida sensitif terhadap suhu, dibutuhkan driving force perbedaan suhu yang rendah, dan dibutuhkan penurunan tekanan (pressure drop) yang rendah.

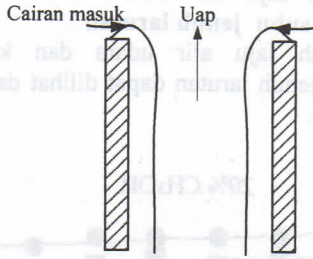
Cryder dan Gilliland (1932) meneliti perpindahan panas dari permukaan logam ke cairan yang mendidih. Stroebe, dkk (1939) meneliti korelasi koefisien perpindahan panas dengan perbedaan suhu permukaan dengan cairan. Yih dan Liu (1983) membuat model untuk prediksi perpindahan panas dalam turbulen falling film dengan atau tanpa interfacial shear. Davis, dkk (1984) membuat model fraksinasi falling film dengan penguapan atau pengembunan dalam wetted wall column. Yih, dkk (1986) memberi permodelan koefisien perpindahan panas dan massa. Hewit, dkk (1994) telah memberi berbagai persamaan korelasi koefisien perpindahan panas untuk falling film evaporator juga memberi pandangan adanya laju alir umpan-gas dapat mengurangi penurunan tekanan parsial uap. Palen, dkk (1994) telah melakukan penelitian falling film evaporator campuran biner larutan air-etilen glikol. Krupickza, dkk (2002) telah melakukan penelitian perpindahan panas pada berbagai kisaran fluks panas. Cheresources Inc (2002) juga meneliti dan membuat

persamaan korelasi falling film evaporator dalam industri makanan, tetapi penelitian mengenai adanya pengaruh laju alir campuran uap-gas terhadap koefisien perpindahan panas dan massa masih sangat sedikit.

Untuk meningkatkan laju penguapan film tipis dapat dilakukan dengan menurunkan tahanan panas dari film dengan menaikkan koefisien perpindahan panas dan menurunkan suhu jenuh cairan permukaan dengan jalan menurunkan tekanan total uap murni sistem penghampaan, dan mengurangi tekanan parsial uap. Cara pertama terbatas karena harus menghindari adanya pendidihan nucleate. Cara kedua sering timbul kebocoran dalam sistem penghampaan untuk uap murni, sedangkan cara ketiga untuk campuran uap-gas digunakan untuk proses pemekatan dimana komponen gas dalam umpan dapat menurunkan tekanan parsial uap.

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh adanya gas terhadap koefisien perpindahan panas dan massa di dalam falling film evaporator untuk sistem larutan campuran biner yang mempunyai perbedaan titik didih relatif besar dengan pengaliran diatur berlawanan arah, serta membuat persamaan empiris koefisien perpindahan panas dan massa.

*) Jurusan Teknik Kimia, FTI - ITS, Sukolilo, Surabaya 60111
Telp. (031) 5924448-(031)5996350 Fax.(031)5999282



Gambar 1. *Falling film evaporator* berlawanan arah

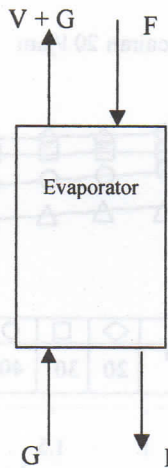
Perhitungan neraca massa total, neraca massa komponen dan neraca panas total adalah sebagai berikut:

$$F = V + P \quad (1)$$

$$F x_F = Vy_V + P x_P \quad (2)$$

$$F \cdot h_F + G \cdot H_{g_m} + Q = V \cdot H_V + G \cdot H_{g_k} + P \cdot h_P$$

$$Q = V \cdot H_V + G \cdot H_{g_k} + P \cdot h_P - (F \cdot h_F + G \cdot H_{g_m}) \quad (3)$$



Gambar 2. Skema Aliran

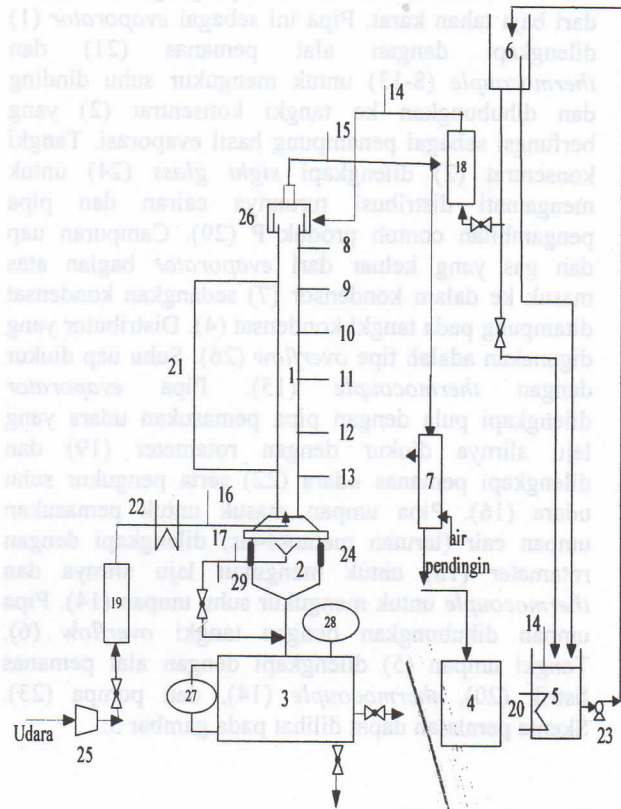
Koefisien perpindahan panas efektif dihitung berdasarkan persamaan:

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_s)} \quad (3)$$

$$h = \frac{q}{T_w - T_s} \quad (4)$$

Metode Penelitian

Alat penelitian



Gambar 3. Peralatan Penelitian

Keterangan gambar:

- 1 : *Evaporator*
- 2 : tangki konsentrat
- 3 : tangki produk
- 4 : tangki kondensat.
- 5 : tangki umpan
- 6 : tangki *overflow*
- 7 : kondensor
- 8-13 : pengukur suhu dinding
- 14 : pengukur suhu umpan
- 15 : pengukur suhu campuran uap-gas
- 16 : pengukur suhu udara
- 17 : pengukur suhu produk
- 18 : rotameter umpan
- 19 : rotameter udara
- 20 : alat pemanas tangki umpan
- 21 : alat pemanas *evaporator*
- 22 : alat pemanas udara
- 23 : pompa umpan
- 24 : *sight glass*
- 25 : kompresor
- 26 : distributor
- 27 : penunjuk level
- 28 : penunjuk tekanan
- 29 : pipa pengambilan contoh produk

Dalam penelitian ini digunakan peralatan yang terdiri dari sebuah pipa tegak berdiameter dalam 28 mm dan diameter luar 35 mm, panjang 2 m terbuat dari baja tahan karat. Pipa ini sebagai *evaporator* (1) dilengkapi dengan alat pemanas (21) dan *thermocouple* (8-13) untuk mengukur suhu dinding dan dihubungkan ke tangki konsentrat (2) yang berfungsi sebagai penampung hasil evaporasi. Tangki konsentrat (2) dilengkapi *sight glass* (24) untuk mengamati distribusi turunnya cairan dan pipa pengambilan contoh produk P (29). Campuran uap dan gas yang keluar dari *evaporator* bagian atas masuk ke dalam kondensor (7) sedangkan kondensat ditampung pada tangki kondensat (4). Distributor yang digunakan adalah tipe *overflow* (26). Suhu uap diukur dengan *thermocouple* (15). Pipa *evaporator* dilengkapi pula dengan pipa pemasukan udara yang laju alirnya diukur dengan rotameter (19) dan dilengkapi pemanas udara (22) serta pengukur suhu udara (16). Pipa umpan masuk untuk pemasukan umpan cair (larutan metanol-air) dilengkapi dengan rotameter (18) untuk mengukur laju alirnya dan *thermocouple* untuk mengukur suhu umpan (14). Pipa umpan dihubungkan dengan tangki *overflow* (6). Tangki umpan (5) dilengkapi dengan alat pemanas listrik (20), *thermocouple* (14), dan pompa (23). Skema peralatan dapat dilihat pada gambar 3.

Prosedur penelitian

Penelitian dilakukan dengan mengalirkan umpan cair larutan biner (metanol-air) dengan konsentrasi 10-50% metanol. Larutan metanol-air dipanaskan didalam tangki umpan hingga suhu jenuh, kemudian larutan metanol-air dipompa menuju tangki *overflow*, dan selanjutnya dialirkan masuk ke dalam *evaporator* dengan laju alir 20-160 l/jam ($N_{Re,l}$ 200-6000). Bersamaan itu udara dari kompresor dengan laju alir 0-2,16 standar m^3 /jam ($N_{Re,g}$ 0 – 2000) masuk dibagian bawah *evaporator* (arah aliran berlawanan). Udara dipanaskan hingga suhunya sama atau mendekati suhu jenuh uap. Distribusi turunnya cairan diamati melalui *sight glass*, dan dicatat suhu umpan, suhu dinding, suhu produk, suhu campuran uap-gas keluar. Sampel diambil di pipa pengambilan contoh produk dan konsentrasi metanolnya dianalisis serta laju alir produk diukur.

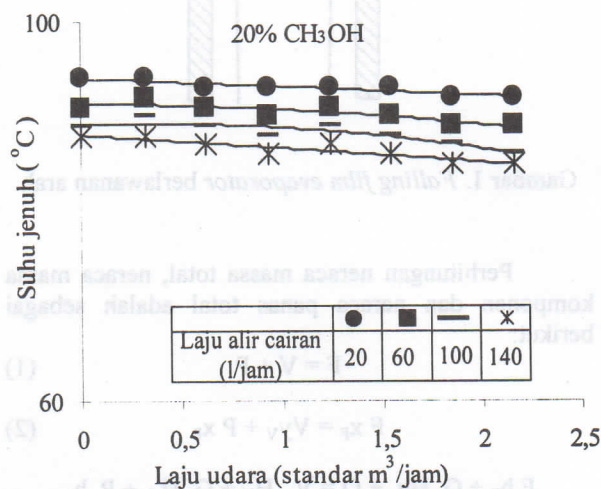
Pembahasan

Pengaruh laju alir umpan, konsentrasi larutan, dan laju alir gas diamati terhadap koefisien perpindahan panas dan massa. Laju alir umpan 20-160 l/jam), konsentrasi larutan biner 10-50% metanol, dan laju alir gas 0-2,16 standar m^3 /jam menghasilkan harga koefisien perpindahan panas berkisar antara 5,6-9 $kW/m^2.K$ dan koefisien perpindahan massa antara $1,06 - 2,73.10^{-4}$ m/detik untuk kisaran $N_{Re,l}$ yang diambil 1800-6000 dan kisaran $N_{Re,g}$ 0-2000.

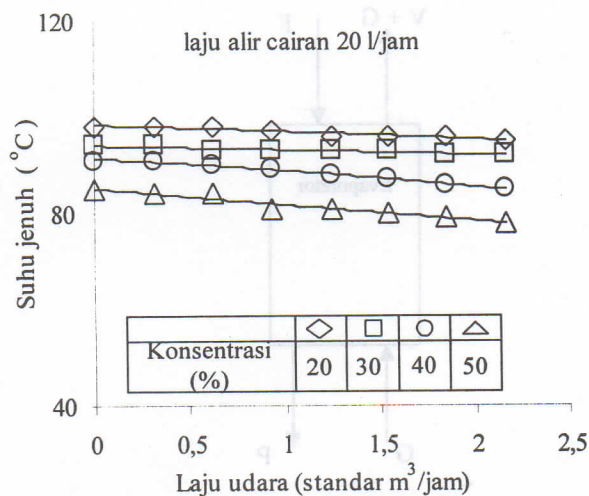
1. Koefisien Perpindahan Panas

1.1. Pengaruh laju air udara dan konsentrasi terhadap suhu jenuh larutan

Pengaruh laju alir udara dan konsentrasi terhadap suhu jenuh larutan dapat dilihat dari gambar 4 dan gambar 5.



Gambar 4. Efek laju alir udara terhadap suhu jenuh pada konsentrasi tetap



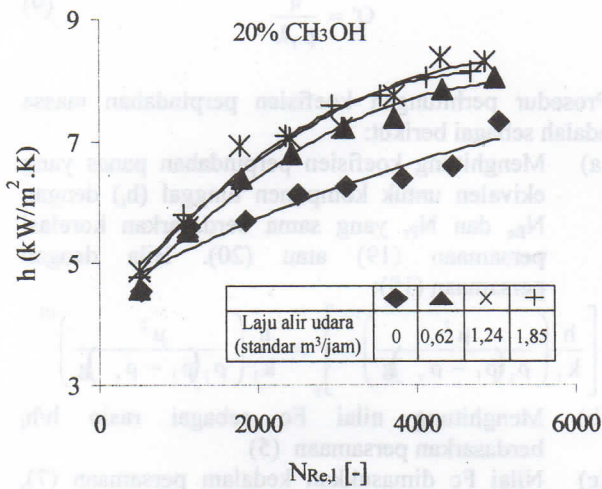
Gambar 5. Efek laju alir udara terhadap suhu jenuh pada laju alir cairan tetap

Gambar 4 menunjukkan laju alir udara semakin besar, suhu jenuh larutan semakin menurun. Hal ini disebabkan pada laju alir udara semakin besar tekanan parsial udara semakin besar, sehingga tekanan parsial campuran uap metanol dan uap air semakin kecil yang mengakibatkan suhu jenuh larutan semakin menurun. Gambar 4 menunjukkan pula laju alir cair semakin besar, suhu jenuh cairan semakin rendah, ini disebabkan jumlah fraksi yang teruapkan semakin kecil sehingga konsentrasi larutan masih tinggi, suhu jenuh larutan menurun.

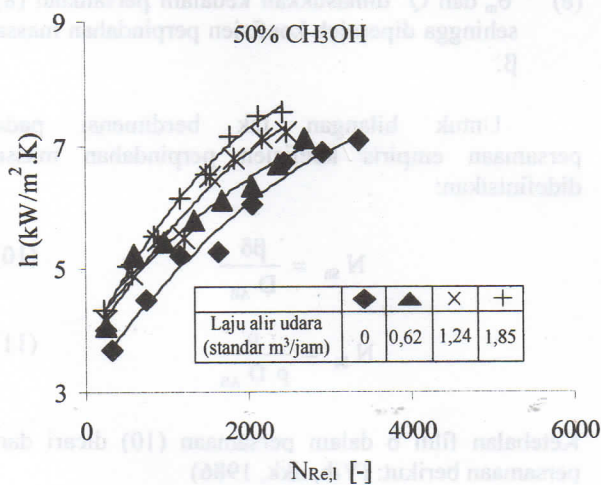
Gambar 5 menunjukkan konsentrasi larutan semakin tinggi suhu jenuh larutan semakin rendah. Ini disebabkan suhu jenuh metanol lebih kecil dari suhu jenuh air.

1.2. Pengaruh laju alir umpan terhadap koefisien perpindahan panas

Dari pengamatan laju alir umpan terhadap koefisien perpindahan panas terlihat laju alir (bilangan Reynold) semakin besar, koefisien perpindahan panas semakin besar pula seperti terlihat pada gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Efek N_{Re} cairan terhadap h



Gambar 7. Efek N_{Re} cairan terhadap h

Hal ini disebabkan terjadi turbulensi aliran yang semakin besar yang mengakibatkan laju perpindahan panas secara konveksi semakin besar pula, sehingga koefisien perpindahan panas semakin besar. Hasil penelitian sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Palen, dkk (1994) yang menyatakan bahwa pada aliran laminar-turbulen, semakin besar laju alir cairan semakin besar koefisien perpindahan panas.

1.3. Pengaruh konsentrasi larutan terhadap koefisien perpindahan panas

Gambar 8 menunjukkan konsentrasi larutan semakin pekat koefisien perpindahan panas semakin menurun. Hal ini disebabkan perubahan konsentrasi mempengaruhi sifat fisik larutan seperti viskositas, dan konduktivitas panas larutan, terutama viskositas. Dari tabel 1 didapatkan nilai viskositas dan konduktivitas panas larutan metanol sebagai berikut:

Tabel 1. Nilai viskositas dan konduktivitas panas larutan metanol

Konsentrasi (%)	0	40	50	90	100
Viskositas (cp)*	0,38	0,54	0,54***	0,39	0,29

Konsentrasi (%)	0	40	60	80	100
Konduktivitas**	0,347	0,234	0,190	0,154	0,124

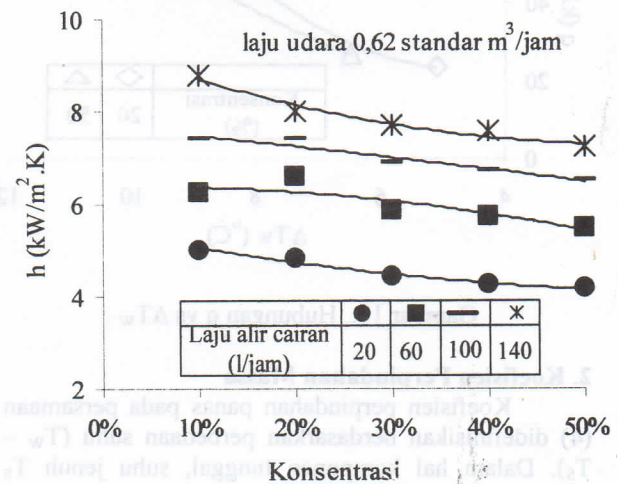
* Kern, Gambar 14 (75°C)

**Kern, Tabel 4 (20°C)

*** Interpolasi

Dalam kisaran konsentrasi metanol 0 – 50% diperoleh harga viskositas semakin tinggi bila konsentrasi semakin tinggi. Hal ini mengakibatkan turbulensi (bilangan Reynold) menjadi lebih rendah yang mengakibatkan koefisien perpindahan panas semakin menurun. Pada konsentrasi yang tinggi, kemungkinan koefisien perpindahan panas akan menaik karena viskositas menurun.

Konsentrasi larutan semakin pekat, konduktivitas panas semakin rendah, kemampuan perambatan panas menjadi semakin rendah pula.



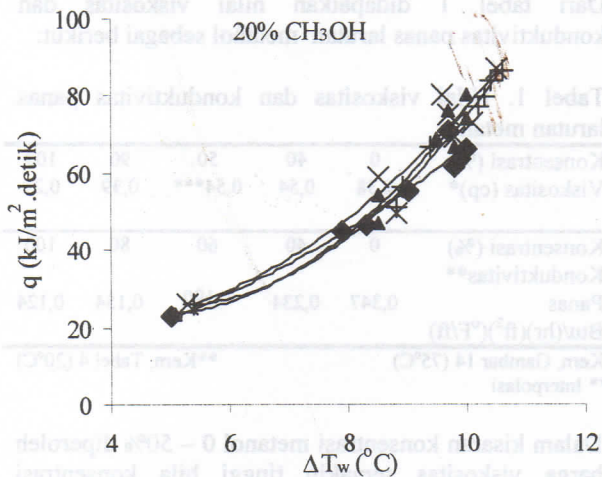
Gambar 8. Efek konsentrasi terhadap h

1.4. Pengaruh perbedaan suhu dinding dengan larutan terhadap fluks panas

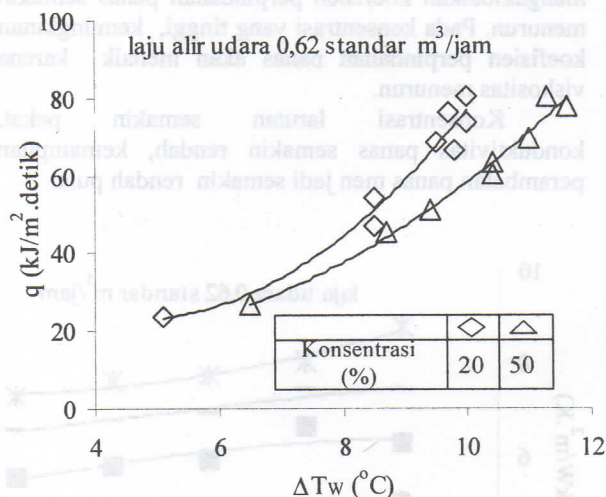
Pada setiap laju alir udara yang tetap, semakin besar perbedaan suhu dinding dan suhu jenuh (ΔT_w) semakin besar harga fluks panas (q) terlihat pada gambar 9 dan 10. Hal ini sesuai dengan hubungan

pendidihan film dimana ΔT_w semakin besar q semakin besar pula (McAdams, 1985 dan Cengel, 2003).

Gambar 10 menunjukkan konsentrasi yang besar, fluks panas lebih rendah disebabkan koefisien perpindahan panas semakin rendah dengan naiknya viskositas dan turunnya konduktivitas panas seperti terlihat pada tabel 1.



Gambar 9. Hubungan q vs ΔT_w



Gambar 10. Hubungan q vs ΔT_w

2. Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan panas pada persamaan (4) didefinisikan berdasarkan perbedaan suhu ($T_w - T_s$). Dalam hal komponen tunggal, suhu jenuh T_s diidentikkan dengan suhu interfase T_i . Ini dihipotesa bahwa untuk campuran biner, koefisien perpindahan panas efektif disamakan dengan komponen tunggal, jika menggunakan suhu interfase (T_i), sehingga faktor koreksi campuran didefinisikan sebagai berikut: (Palen, dkk, 1994)

$$F_c = \frac{T_w - T_i}{T_w - T_s} = \frac{h}{h_i} \quad (5)$$

dimana h_i adalah koefisien untuk komponen tunggal pada N_{Re} dan N_{Pr} yang sama.

$$h_i = \frac{q}{T_w - T_i} \quad (6)$$

Setelah melalui penyederhanaan, perhitungan F_c menjadi :

$$F_c = \left(1 - \left(\frac{h_i}{q} \right) (T_2 - T_1) (y_b - x_b) \theta_m \right)^{-1} \quad (7)$$

dimana:

$$\theta_m = 1 - \exp(Q' / \beta) \quad (8)$$

$$Q' = \frac{q}{\rho_1 \lambda} \quad (9)$$

Prosedur perhitungan koefisien perpindahan massa adalah sebagai berikut:

- (a) Menghitung koefisien perpindahan panas yang ekuivalen untuk komponen tunggal (h_i) dengan N_{Re} dan N_{Pr} yang sama berdasarkan korelasi persamaan (19) atau (20). Bila dengan persamaan (19):

$$\left[\frac{h}{k_1} \left(\frac{\mu^2}{\rho_1 (\rho_1 - \rho_v)} \right)^{1/3} \right]_i = \frac{h}{k_1} \left(\frac{\mu^2}{\rho_1 (\rho_1 - \rho_v)} \right)^{1/3}$$

- (b) Menghitung nilai F_c sebagai rasio h/h_i berdasarkan persamaan (5)
- (c) Nilai F_c dimasukkan kedalam persamaan (7), diperoleh θ_m .
- (d) Menghitung Q' berdasarkan persamaan (9).
- (e) θ_m dan Q' dimasukkan kedalam persamaan (8) sehingga diperoleh koefisien perpindahan massa β .

Untuk bilangan tak berdimensi pada persamaan empiris koefisien perpindahan massa didefinisikan:

$$N_{sh} = \frac{\beta \delta}{D_{AB}} \quad (10)$$

$$N_{sc} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (11)$$

Ketebalan film δ dalam persamaan (10) dicari dari persamaan berikut: (Yih, dkk, 1986)

$$\delta = \frac{\delta^+ u^*}{u^*} \quad (12)$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w g_c}{\rho_1} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Shear stress pada dinding dari persamaan (13) dicari dengan persamaan dibawah ini:

$$\tau_w = \rho g \delta \quad (14)$$

Delta (δ) untuk persamaan (14) didapat dari δ' persamaan berikut dengan anggapan berlaku untuk aliran laminar:

$$\delta' = \left(\frac{3 \mu \Gamma}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \quad (15)$$

sedangkan δ^+ dalam persamaan (12) dicari dari:

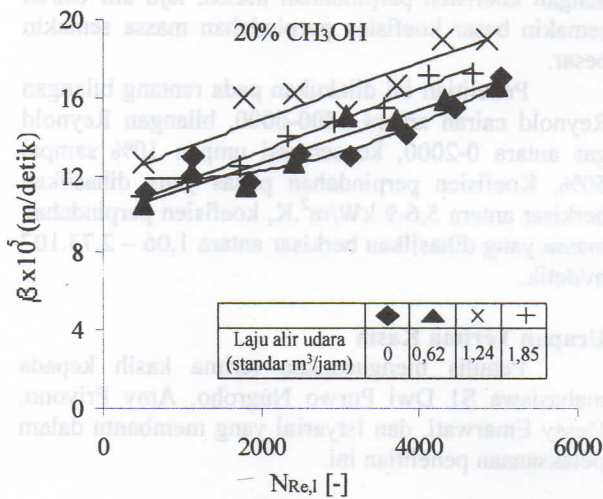
$$\frac{\Gamma}{\mu} = \delta^+ (3 + 2,5 \ln \delta^+) - 64 \quad \delta^+ > 30 \quad (16)$$

$$\frac{\Gamma}{\mu} = 5 \delta^+ \ln \delta^+ - 8,05 \delta^+ + 12,5 \quad 5 \leq \delta^+ \leq 30 \quad (17)$$

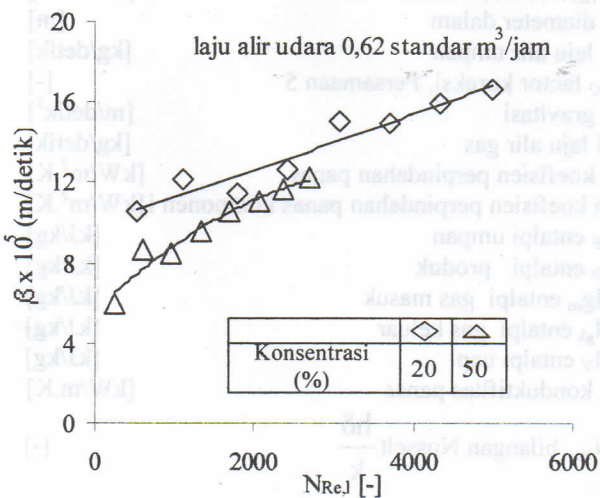
$$\frac{\Gamma}{\mu} = \delta^{+2}/2 \quad 0 \leq \delta^+ < 5 \quad (18)$$

2.1. Pengaruh laju alir umpam terhadap koefisien perpindahan massa dan bilangan Sherwood

Laju alir cairan semakin besar koefisien perpindahan massa semakin besar seperti pada gambar 11 dan gambar 12. Hal ini disebabkan karena terjadi turbulensi aliran cairan yang semakin besar.

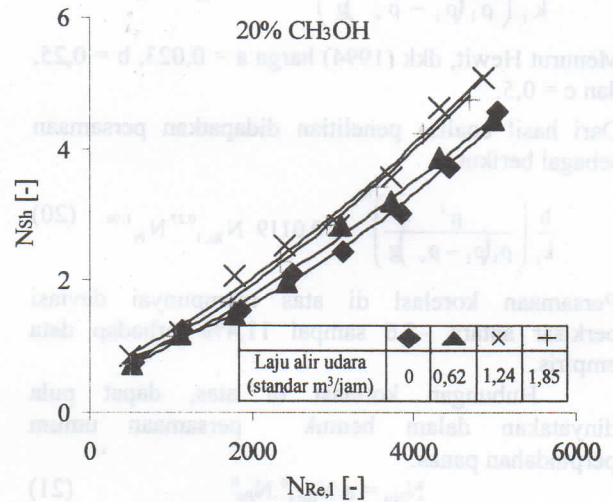


Gambar 11. Efek N_{Re} cairan terhadap β

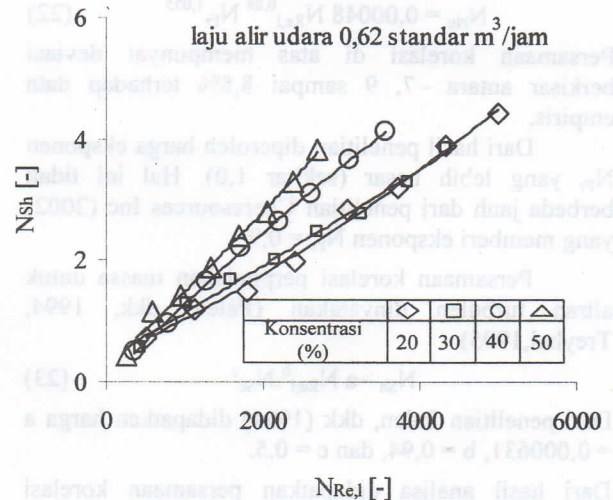


Gambar 12. Efek N_{Re} cairan terhadap β

Dari gambar 12 menunjukkan pula konsentrasi larutan yang lebih besar, koefisien perpindahan massa lebih rendah. Ini disebabkan konsentrasi yang lebih besar, viskositas menjadi lebih rendah seperti tabel 1, sehingga turbulensi menurun, disamping itu .lingkup gerakan molekul untuk konsentrasi besar semakin sempit.



Gambar 13. Hubungan N_{Sh} vs N_{Re} cairan



Gambar 14. Hubungan N_{Sh} vs N_{Re} cairan

Gambar 13 dan gambar 14 menunjukkan N_{Re} cairan semakin besar, harga N_{Sh} semakin besar. Hal ini disebabkan turbulensi semakin besar sehingga koefisien perpindahan massa semakin besar. Gambar 13 menunjukkan bilangan N_{Re} gas berpengaruh cukup signifikan pada N_{Re} cairan yang besar.

Konsentrasi larutan semakin besar bilangan Sherwood semakin rendah terlihat pada gambar 14. Hal ini disebabkan koefisien perpindahan massa semakin rendah.

3. Korelasi Empiris pada Falling Film Evaporator

3.1. Korelasi empiris tanpa aliran gas

Pada konsentrasi 10 sampai 50%, aliran turbulen, salah satu bentuk korelasi dapat dinyatakan dalam suatu hubungan sebagai berikut (Hewit, dkk, 1994):

$$\frac{h}{k_1} \left(\frac{\mu^2}{\rho_1(\rho_1 - \rho_v)g} \right)^{1/3} = a N_{Re}^b N_{Pr}^c \quad (19)$$

Menurut Hewit, dkk (1994) harga a = 0,023, b = 0,25, dan c = 0,5.

Dari hasil analisa penelitian didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{h}{k_1} \left(\frac{\mu^2}{\rho_1(\rho_1 - \rho_v)g} \right)^{1/3} = 0,0119 N_{Re,1}^{0,27} N_{Pr}^{1,06} \quad (20)$$

Persamaan korelasi di atas mempunyai deviasi berkisar antara -5,6 sampai 11,4% terhadap data empiris.

Hubungan korelasi di atas, dapat pula dinyatakan dalam bentuk persamaan umum perpindahan panas:

$$N_{Nu} = a N_{Re,1}^b N_{Pr}^c \quad (21)$$

Menurut Chun dan Seban (1971) harga a = 0,0038, b = 0,4, dan c = 0,65.

Dari hasil analisa didapatkan persamaan:

$$N_{Nu} = 0,00048 N_{Re,1}^{0,88} N_{Pr}^{1,055} \quad (22)$$

Persamaan korelasi di atas mempunyai deviasi berkisar antara -7, 9 sampai 8,8% terhadap data empiris.

Dari hasil penelitian diperoleh harga eksponen N_{Pr} yang lebih besar (sekitar 1,0). Hal ini tidak berbeda jauh dari penelitian Cheresources Inc (2002) yang memberi eksponen $N_{Pr} = 0,9$.

Persamaan korelasi perpindahan massa untuk aliran turbulen dinyatakan (Palen, dkk, 1994, Treybal, 1995):

$$N_{Sh} = a N_{Re,1}^b N_{Sc}^c \quad (23)$$

Dari penelitian Palen, dkk (1994) didapatkan harga a = 0,000631, b = 0,94, dan c = 0,5.

Dari hasil analisa didapatkan persamaan korelasi perpindahan massa untuk aliran turbulen :

$$N_{Sh} = 0,000683 N_{Re,1}^{0,98} N_{Sc}^{0,13} \quad (24)$$

Dengan deviasi sebesar -24 sampai dengan 24,2%.

3.2. Korelasi empiris adanya aliran Gas

Dengan memasukkan pengaruh adanya aliran gas, didapatkan persamaan korelasi,

$$\frac{h}{k_1} \left(\frac{\mu^2}{\rho_1(\rho_1 - \rho_v)g} \right)^{1/3} = 0,0125 N_{Re,1}^{0,26} N_{Pr}^{0,97} N_{Re,g}^{0,033} \quad (25)$$

Persamaan korelasi diatas mempunyai deviasi berkisar antara -5,7 sampai 12,8% terhadap data empiris. Bila dinyatakan dalam persamaan umum didapatkan:

$$N_{Nu} = 0,000457 N_{Re,1}^{0,88} N_{Pr}^{0,98} N_{Re,g}^{0,03} \quad (26)$$

Dengan deviasi sebesar -8,7 sampai 9,8% terhadap data empiris.

Sedangkan untuk perpindahan massa diperoleh:

$$N_{Sh} = 2,55.10^{-4} N_{Re,1}^{0,88} N_{Sc}^{0,53} N_{Re,g}^{0,024} \quad (27)$$

Dengan deviasi sebesar -29,7 sampai 25,8% terhadap data empiris.

Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa adanya aliran gas/udara dapat menurunkan suhu jenuh larutan.

Koefisien perpindahan panas tergantung pada laju alir umpan, konsentrasi umpan dan laju alir udara. Laju alir umpan semakin besar koefisien perpindahan panas semakin besar, sebaliknya konsentrasi umpan semakin pekat, koefisien perpindahan panas semakin kecil. Laju alir udara semakin besar, koefisien perpindahan panas semakin besar. Fenomena ini sama dengan koefisien perpindahan massa, laju alir cairan semakin besar koefisien perpindahan massa semakin besar.

Penelitian ini dilakukan pada rentang bilangan Reynold cairan antara 1800-6000, bilangan Reynold gas antara 0-2000, konsentrasi umpan 10% sampai 50%. Koefisien perpindahan panas yang dihasilkan berkisar antara 5,6-9 kW/m².K, koefisien perpindahan massa yang dihasilkan berkisar antara 1,06 - 2,73.10⁻⁴ m/detik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa S1 Dwi Purwo Nugroho, Amy Priyono, Dessy Emarwati, dan Istyarini yang membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Notasi

A luas perpindahan panas	[m ²]
D _{AB} koefisien difusi	[m ² /detik]
d diameter dalam	[m]
F laju alir umpan	[kg/detik]
F _C factor koreksi, Persamaan 5	[-]
g gravitasi	[m/detik ²]
G laju alir gas	[kg/detik]
h koefisien perpindahan panas	[kW/m ² .K]
hi koefisien perpindahan panas komponen i	[kW/m ² .K]
h _F entalpi umpan	[kJ/kg]
h _P entalpi produk	[kJ/kg]
H _{g,m} entalpi gas masuk	[kJ/kg]
H _{g,k} entalpi gas keluar	[kJ/kg]
H _v entalpi uap	[kJ/kg]
k konduktifitas panas	[kW/m.K]
N _{Nu} bilangan Nusselt	$\frac{h\delta}{k}$ [-]
N _{Pr} bilangan Prandlt	$\frac{c_p \mu}{k}$ [-]

$N_{Re, g}$ bilangan Reynold gas	$\frac{\rho du}{\mu}$	[-]
$N_{Re, l}$ bilangan Reynold cairan	$\frac{4\Gamma}{\mu_l}$	[-]
N_{Sc} bilangan Sherwood	$\frac{\beta\delta}{D_{AB}}$	[-]
N_{Sh} bilangan Schimidt	$\frac{\mu}{\rho D_{AB}}$	[-]
P laju alir produk		[kg/detik]
Q laju alir panas		[kJ/detik]
Q' Persamaan 9		[m/detik]
q fluks panas		[kJ/m ² .detik]
T suhu		[°C]
T _i suhu interfase		[°C]
T _s suhu jenuh		[°C]
T _w suhu dinding		[°C]
ΔT_w perbedaan suhu dinding dan suhu jenuh (T _w - T _s)		[°C]
u kecepatan gas		[m/detik]
u* Persamaan 13		[m/detik]
V laju alir uap		[kg/detik]
X fraksi mol komponen volatil dalam cairan		[-]
x _f fraksi massa umpan		[-]
x _p fraksi massa produk		[-]
Y fraksi mol komponen volatil dalam uap		[-]
y _v fraksi massa uap		[-]

Huruf Yunani

β koefisien perpindahan massa		[m/detik]
δ ketebalan film		[m]
δ' ketebalan film aliran laminar, Persamaan 15		[m]
$\delta^+ = \frac{\delta u^*}{\nu}$		[m]
ν kinematik viskositas		[m ² /detik]
μ viskositas		[kg/m.detik]
θ_m , Persamaan 8		[-]
ρ densitas		[kg/m ³]
τ_w shear stress pada dinding, Persamaan 14		[kg/m.detik ²]
Γ laju alir film per satuan keliling		[kg/m.detik]

Subscript

- b bulk
- l cairan
- g gas
- v uap
- 1 komponen ringan
- 2 komponen berat

Daftar Pustaka

Baker, E.M., Kazmark, E.W., and Stroebe, G.W. (1939), "Steam-film Heat Transfer Coefficients for Vertical Tubes", *Ind. and Eng. Chem*, 31 (2), p. 214-218.

Cengel, Y.A., (2003), "Heat Transfer-A Practical Approach", 2nd ed, McGraw Hill Education, New York.

Chun, KR., and Seban, R.A., (1971), "Heat Transfer to Evaporating Films," *J. Heat Trans.*, 93, 391.

Cryder, D.S., and Gilliland, E.R. (1932), "Heat Transmission from Metal Surface to Boiling Liquids", *Ind. and Eng. Chem*, 24 (12), p. 1382-1387.

Davis, J.F., Tung, H.H., and Man, R.S.H. (1984), "Fractionation with Condensation and Evaporation in Wetted-Wall Columns", *AIChE J.*, 30 (2), p. 328-338.

Hewit, G.F., Shires, G.L. and Bott, T.R. (1994), *Process Heat Transfer*, CRC Pres, London.

Kern, D.Q., (1988), "Process Heat Transfer", McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Krupiczka, R., Rotkegel, A., and Ziobrowski, (2002), "Heat Transfer to Evaporating Liquid films Within A Vertical Tube", *Chemical Engineering and Processing*, 41,p.23-28.

McAdams, W.H., (1985), "Heat Transmission", 3rd ed, McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Palen, J.W., Wang, Q., and Chen, J.C. (1994), "Falling Film of Binary Mixtures", *AIChE J.*, 40 (2), p. 207-214.

Sandall, O.C., Hanna, O.T., and Ibanex, G.R., (1988), "Heating and Evaporation of Turbulent Falling Liquid Film", *AIChE J.*, 34 (3), p. 502-505.

Stroebe, G.W., Baker, E.M., and Badger, W.L. (1939), "Boiling-Film Heat Transfer Coefficient in a Long Tube Vertical Evaporator", *Ind. and Eng. Chem*, 31(2), p. 200-206.

Treybal, R.E.,(1985), "Mass Transfer Operation", 3rd ed, McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Yih, S.M., and Liu, J.L. (1983), "Prediction of Heat Transfer in Turbulent Falling Films with or without Interfacial Shear" *AIChE J.*, 29 (8), p. 903-909.

Yih, S.M., Yuan, C., and Li, C., (1986), 'Modeling and Mass Transport in Falling Liquid Films", in *Handbook of Heat and Mass Transfer*, Vol II, Gulf Publishing Company, Houston.

(2002), "Falling Film Evaporators in the Food Industry", www.cheresources.com