

I.B.B.1.a.2.c.1.

ISSN : 1693 - 1750

PROSIDING



SEMINAR

TJIPTO UTOMO

VOLUME 2 TAHUN 2003

**PENINGKATAN PERANAN PENDIDIKAN TEKNIK KIMIA DALAM
PENGELOLAAN SUMBER DAYA ALAM INDONESIA**



Kamis, 21 Agustus 2003

Gedung Serba Guna ITENAS

Jl. P.H.H. Mustafa No. 23 Bandung

**Jurusan & Himpunan Mahasiswa
Teknik Kimia
Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung**



SEMINAR

TJIPTO UTOMO 2003



*Jurusan & Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia
Institut Teknologi Nasional Bandung*



KATA PENGANTAR

Seminar Tjipto Utomo 2003 merupakan seminar nasional kedua yang diadakan oleh Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Nasional Bandung. Seminar ini diselenggarakan sebagai forum diskusi ilmiah antara kalangan akademisi, peneliti, praktisi dan pemerhati bidang ilmu teknik kimia mengenai hasil-hasil penelitian maupun pengalaman teknis lainnya yang telah dicapai. Secara khusus penyelenggaraan seminar ini ditujukan untuk memberikan penghargaan dan penghormatan kepada Prof. Ir. Tjipto Utomo yang telah berjasa dalam mengabdikan ilmu dan hidup beliau dalam meningkatkan dan mengembangkan pendidikan tinggi khususnya bidang Teknik Kimia.

Hasil seleksi terhadap abstrak makalah yang masuk menetapkan jumlah makalah yang diterima sebanyak 32 judul. Makalah-makalah tersebut dibagi menjadi 5 kelompok makalah yaitu : A. Perpindahan Massa, Panas dan Momentum ; B. Teknologi Pemisahan ; C. Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis ; D. Teknologi Pengolahan Limbah dan Perlindungan Lingkungan ; E. Pengembangan Proses dan Industri.

Akhir kata Panitia Seminar Tjipto Utomo 2003 mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu terselenggaranya acara seminar ini. Dan kepada semua penyaji makalah dan peserta Seminar Tjipto Utomo 2003 kami mengucapkan ***selamat berseminar*** dan sampai jumpa lagi di Seminar Tjipto Utomo 2004

Bandung, Agustus 2003

Panitia STU 2003

SEMINAR

TJIPTO UTOMO 2003



*Jurusan & Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia
Institut Teknologi Nasional Bandung*



SUSUNAN PANITIA SEMINAR TJIPTO UTOMO 2003

Pelindung : **Rektor Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung**
Prof. Ir. H. Djuanda Suraatmadja

Tim Pengarah dan Reviewer Makalah:

Prof. Ir. H. Djuanda Suraatmadja (Rektor ITENAS)
Ir. H.M. Jusuf Mu'min (Pembantu Rektor II ITENAS)
Dr. Ir. H. Abdurrachim (Pembantu Rektor I ITENAS)
Ir. Suparman Juhanda, M.Eng (Dekan Fakultas Teknik Industri ITENAS)
Ir. Marthen Luther Doko, MT (Ketua Jurusan Teknik Kimia ITENAS)
Dr. Ir Danu Ariono (Staf Pengajar Jurusan Teknik Kimia ITB)
Prof. Dr. Juli Sumirat, MPH., PhD
(Staf Pengajar Jurusan Teknik Lingkungan ITENAS)
Ir. Carlina D.A, MT (Staf Pengajar Jurusan Teknik Kimia ITENAS)
Dicky Dermawan, ST., MT (Staf Pengajar Jurusan Teknik Kimia ITENAS)

Penanggung Jawab : **Ketua Jurusan Teknik Kimia ITENAS Bandung**

Ir. Marthen Luther Doko, MT

Ketua Umum : Ir. H.M. Jusuf Mu'min
Ketua Pelaksana : Ronny Kurniawan, ST., MT
Sekretaris : Haryono, ST
Bendahara : Dicky Dermawan, ST., MT

Koordinator Seksi-Seksi:

Acara & Protokoler : Ir. Carlina D.A, MT
David Budiman
Publikasi & Dokumentasi : Sarbini, ST
Agus Saptoru, ST
Aryo Sutantono

SEMINAR

TJIPTO UTOMO 2003



*Jurusan & Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia
Institut Teknologi Nasional Bandung*

- Humas & Kesekretariatan : Marinda Rahim, ST., MT
Dyah Setyo Pertiwi, ST., MT
Yenni, ST
Muhhamad Iqbal
- Makalah : Agus Saptoro, ST
Dyah Setyo Pertiwi, ST., MT
Febrian Dwi Prastyo
- Logistik : Jono Suhartono, ST
Azis Indra Hardiawan
- Konsumsi : Sirin Fairus, STP., MT
Irma Syarifah
- Pelaksana : Civitas akademika
Jurusan dan Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia
ITENAS

SEMINAR

TJIPTO UTOMO 2003



Jurusan & Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia
Institut Teknologi Nasional Bandung



DAFTAR MAKALAH

Keynote Speaker :

Kebijakan dan Langkah Pemerintah dalam Mengoptimalkan Pengelolaan Sumber Daya Alam Indonesia,

Dr. Purnomo Yusgiantoro, Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.

Plenary Paper :

1. *Pola Pendidikan Teknik Kimia dalam Mendorong Optimalisasi dan Efektivitas Pengelolaan Sumber Daya Alam Indonesia, Dr. Ir. Tatang H. Surawidjaya*, Staf Pengajar Departemen teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITB.
2. *Peranan Pendidikan Teknik Kimia dalam Industri Rancang Bangun dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam Indonesia, Ir. Triharyo Indrawan Soesilo, MChE* Direktur Operasi PT Rekayasa Industri, Jakarta.
3. *Sinergi Perguruan Tinggi Teknik dan Industri Berbasis Sumber Daya Alam Indonesia, Ir. Djatnika S. Puradinata*, Direktur Utama PT Medco Methanol Bunyu.

A. PERPINDAHAN MASSA, PANAS DAN MOMENTUM

- A.1. *Efisiensi Daya Listrik Pada Beberapa Beban Pendingin dengan Penerapan Sistem Konveksi Paksa : Studi Kasus Lemari Pendingin Rumah Tangga, Nelson Saksono*, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jakarta.
- A.2. ✓ *Koefisien Transfer Panas Pengembunan Campuran Uap dari Cairan Yang Tidak Campur pada Permukaan Pipa Vertikal, Ahmad M. Fuadi*, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- A.3. *Penentuan Konstanta Korelasi Perpindahan Panas untuk Perancangan Alat Pasteurisasi Susu Sederhana, Marinda Rahim, Ronny Kurniawan, Febrian Dwi Prastyo, Dinni Dwi Arvini* Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- A.4. *Proses Adsorpsi Chrom Menggunakan Kulit Kerang (Chitosan), Didik Purwanto, Agung Rasmito*, Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Adhi Tama, Surabaya.
- A.5. *Pengaruh Orifice dan Sudut Terhadap Aliran Fluida pada Saluran Tertutup, Sri Rahayu Gusmarwani, Andri Setiawan*, Jurusan Teknik Kimia, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional, Yogyakarta.

KOEFISIEN TRANSFER PANAS PENGEMBUNAN CAMPURAN UAP DARI CAIRAN YANG TIDAK CAMPUR PADA PERMUKAAN PIPA VERTIKAL

Ahmad M Fuadi

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A.Yani Tromol Pos I – Pabelan Kartasura – Surakarta, telpon (0271) 717417 ext.224
e-mail: fuadi60@yahoo.com

Abstrak

Peristiwa pengembunan merupakan peristiwa yang banyak dijumpai di industri-industri kimia. Peristiwa yang terjadi selama proses pengembunan sangat tergantung dari sifat dan kondisi uap yang diembunkan. Dengan beragamnya kondisi uap yang diembunkan, maka perlu dipahami peristiwa-peristiwa yang terjadi selama proses pengembunan untuk berbagai kondisi uap yang diembunkan. Penelitian ini mengamati peristiwa-peristiwa yang terjadi pada proses pengembunan campuran uap dari cairan yang tidak campur.

Akuades dan n-heksan diuapkan, uap yang terbentuk dicampur, kemudian diembunkan pada permukaan pipa vertikal yang berukuran panjang (z) 0,2 m, diameter luar pipa bagian dalam (di) 0,019 m, diameter dalam pipa bagian luar (do) 0,05 m. Air pendingin dialirkan dengan kecepatan tetap, berlawanan arah dengan aliran campuran uap. Setelah tercapai kondisi steady state, dilakukan pengamatan suhu uap masuk dan keluar, suhu pendingin air masuk dan keluar, suhu dinding pengembunan pada jarak 15 cm dari posisi uap masuk serta kecepatan mengembun masing-masing komponen.

Nilai koefisien perpindahan massa, koefisien perpindahan panas di permukaan embunan uap dinyatakan dalam persamaan kelompok bilangan tidak berdimensi, untuk koefisien transfer massa:

$$\frac{kgP(Bm)z}{\rho D_{ab}} = 2453 \left(\frac{\rho v_g z}{\mu} \right)^{0,436} \left(\frac{\mu}{\rho D_{ab}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

, ralat rata-rata 21,5 %, untuk koefisien transfer panas:

$$\frac{h_g z}{k} = 36,348 \left(\frac{\rho v_g z}{\mu} \right)^{0,124} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}}$$

, ralat rata-rata 2,5 %, yang berlaku untuk Reynold uap antara 7400 sampai 14500. Nilai koefisien perpindahan panas pengembunan dinyatakan dalam bentuk:

$$h \left(\frac{\mu^2}{k^3 \rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,85 \left(\frac{4\Gamma}{\mu} \right)^{-\frac{1}{3}}, \text{ nilai koefisien transfer panas pengembunan}$$

dibandingkan dengan koefisien perpindahan panas pengembunan yang diajukan oleh Ogino ada perbedaan 18,3 %, jika dibandingkan dengan koefisien perpindahan panas pengembunan yang diajukan oleh Nusselt ada perbedaan 18,9 %.

Kata kunci/Key-words: pengembunan, uap tidak campur, koefisien perpindahan panas

1. Pendahuluan

Peristiwa pengembunan merupakan salah satu peristiwa yang banyak dijumpai didalam industri-industri kimia. Proses pengembunan merupakan proses perubahan dari fase uap menjadi fase cair tanpa disertai dengan terjadinya reaksi kimia.

Agar dapat merancang alat pengembun dengan baik, sangat diperlukan harga koefisien perpindahan panas pengembunan. Harga koefisien perpindahan panas pengembunan sangat dipengaruhi oleh kondisi uap yang akan diembunkan. Peristiwa yang menyertai proses pengembunan sangat beragam tergantung dari kondisi uap yang diembunkan. Beberapa kemungkinan uap yang diembunkan antara lain uap murni, campuran uap biner, campuran uap multi komponen, campuran uap biner dari cairan yang tidak campur, dan lain-lain.

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan peristiwa pengembunan telah banyak dilakukan. Nusselt (Kern,1950) telah mengembangkan persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan panas pengembunan uap murni. Kecepatan perpindahan uap murni ke lapisan batas embunan dianggap sangat cepat, sehingga proses pengembunan dikendalikan oleh perpindahan panas. Nilai rata-rata koefisien perpindahan panas pengembunan pada permukaan plat vertikal:

$$h = 0,943 \left(\frac{\rho(\rho - \rho_v) g \lambda k_f^3}{L \mu_f (T_g - T_v)} \right)^{0,25} \dots\dots\dots(1)$$

Pada peristiwa pengembunan campuran uap multi komponen perlu dipertimbangkan adanya mekanisme difusi pada perpindahan komponen dari fase uap ke lapisan embunan. Krisna dan Pancal (1975) menyatakan bahwa interaksi difusi antar uap berpengaruh terhadap kecepatan pengembunan. Pengaruh difusifitas senyawa komponen pada proses pengembunan campuran uap telah diteliti oleh Bendiyasa (1995).

Pada proses pengembunan, adanya gas yang tidak mengembun akan mempengaruhi nilai koefisien perpindahan panas pengembunan. Adanya gas yang tidak mengembun meskipun dalam jumlah sedikit dapat menyebabkan penurunan perpindahan panas pengembunan yang cukup besar (Sparrow dan Eckert, 1961).

Penelitian yang berkaitan dengan pengembunan uap biner dari cairan yang tidak campur pernah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain: Akers dan Turner (1962) melakukan penelitian pengembunan uap biner dari cairan yang tidak campur. Hasil pengamatannya menunjukkan adanya beberapa kemungkinan kelakuan dari embunan. Embunan yang terbentuk yang menempel pada permukaan pengembun bisa berupa *film condensation*, yaitu seluruh permukaan pengembun tertutup oleh lapisan embunan. Lapisan embunan ini pada hakekatnya akan memberikan hambatan termal yang bisa menghambat proses perpindahan panas. Di samping itu bisa juga berupa *dropwise condensation*, yaitu bila embunan yang terbentuk berupa tetesan-tetesan yang menempel pada permukaan pengembun. Pada *dropwise condensation* ini tidak seluruh permukaan pengembun tertutup oleh lapisan embunan, sehingga proses perpindahan panasnya lebih cepat dibanding pada *film condensation*. Pada kenyataan laju perpindahan panas pada *dropwise condensation* bisa mencapai 10 kali lipat kecepatan perpindahan panas pada *film condensation* (Holman, 1986). Ada kemungkinan juga embunan yang terbentuk berupa *channeling* , yaitu berupa saluran-saluran kecil.

Untuk embunan yang membentuk *film-drop* nilai koefisien perpindahan panas pengembunannya didekati dengan persamaan:

$$h \left(\frac{\mu^2}{k^2 \rho^2 g} \right)^{1/3} = 1,47 \left(\frac{4\Gamma}{\mu} \right)^{-1/3} \dots\dots\dots(2)$$

Sedang untuk embunan yang membentuk *channeling*, koefisien perpindahan panas pengembunan didekati dengan :

$$h = \frac{a \lambda_A h_A + b \lambda_B h_B}{a \lambda_A + b \lambda_B} \dots\dots\dots(3)$$

Ogino dan kawan-kawan (1987) telah melakukan penelitian tentang proses pengembunan uap biner dari cairan yang tidak campur. Bahan yang dipakai adalah campuran air dan hidrokarbon (n-heptan dan n-pentan). Perhitungan nilai koefisien perpindahan panas pengembunan dilakukan pada kondisi aseptrop untuk cairan yang tidak campur. Pada analisisnya dianggap perbandingan fraksi berat sama dengan perbandingan fraksi volume. Akhirnya diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$h = \frac{a \lambda_A + b \lambda_B}{a \lambda_A / h_A + b \lambda_B / h_B} \dots\dots\dots(4)$$

Pada cairan yang tidak campur, tekanan uap tiap komponen adalah tekanan uap murninya, tidak dipengaruhi oleh komponen yang lain. Dengan demikian tekanan total system pada suhu tertentu adalah jumlah tekanan uap murni masing-masing cairan pada suhu tersebut. Titik didih campuran cairan yang tidak campur selalu lebih rendah dari titik didih masing-masing komponen penyusunnya.

Adapun penelitian ini bertujuan untuk menghitung koefisien perpindahan panas pengembunan campuran uap biner dari cairan yang tidak campur. Harga koefisien perpindahan panas pengembunan yang diperoleh dibandingkan dengan harga koefisien perpindahan panas pengembunan yang diajukan oleh Ogino dan Nusselt.

2. Metodologi

Kegiatan penelitian meliputi pengambilan data di laboratorium, evaluasi data dengan menggunakan model matematika untuk mendapatkan harga koefisien perpindahan panas pengembunan kemudian membandingkan dengan harga koefisien perpindahan panas pengembunan jika dievaluasi dengan persamaan yang diajukan oleh Ogino dan oleh Nusselt.

Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah aquades dan n- heksan. Aquades sebanyak 20 liter dimasukkan dalam tangki yang dilengkapi dengan pemanas listrik dengan daya sebesar 2000 watt. Sedang n-heksan dimasukkan ke dalam tangki yang dilengkapi dengan pemanas listrik sebesar 1500 watt. Pemanas untuk air dihidupkan terlebih dahulu , setelah kira-kira 30 menit pemanas untuk n-heksan juga dihidupkan

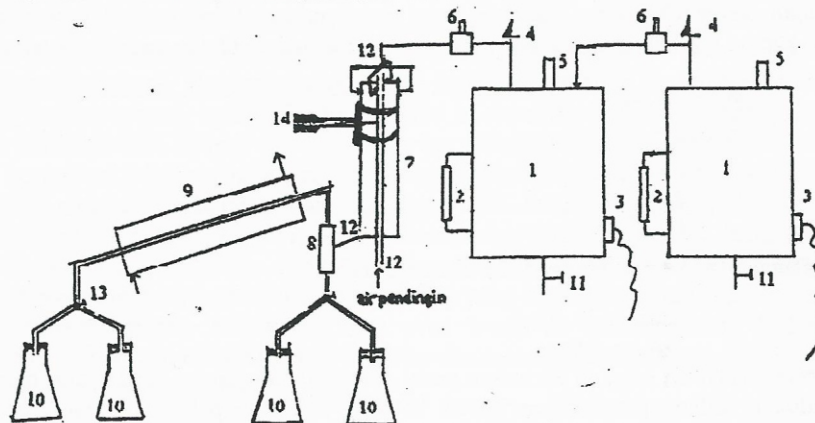
Uap yang terbentuk dari tangki pemanas n-heksan dialirkan kedalam tangki pemanas aquades. Campuran uap yang terbentuk dialirkan ke pengembun tegak yang berukuran panjang 20 cm melalui suatu pembagi arus yang ada di bagian atas. Air pendingin dialirkan berlawanan arah melalui pipa tambaga yang berdiameter 19 mm. Embunan yang terbentuk dari pengembun tegak (utama) ditampung dalam suatu

penampung sedang sisa uap yang tidak mengembun, diembunkan dengan menggunakan pendingin balik dan embunannya ditampung dalam suatu penampung. Penguapan diteruskan sampai kondisi *steady state* tercapai. Tercapainya kondisi *steady state* ditandai dengan suhu-suhu pada berbagai tempat yang diamati serta kecepatan pengembunan konstan (perubahan sedikit). Tempat-tempat yang diamati suhunya adalah: tempat gas masuk dan keluar, tempat air pendingin masuk dan keluar, serta pada permukaan pengembun pada jarak 15 cm dari permukaan atas.

Setelah kondisi *steady state* tercapai, data-data yang diperlukan diamati dan dicatat. Adapun data-data yang diperlukan antara lain: kecepatan campuran uap masuk pengembun (G), suhu uap masuk dan keluar pengembun (T_g), berat masing-masing embunan yang terbentuk (m), suhu pada permukaan pengembun (T_o), kecepatan air pendingin (W), suhu pendingin masuk dan keluar (T_p), serta tebal embunan (δ).

Kecepatan uap masuk diukur dengan cara menampung embunan yang terbentuk pada pengembun utama dan pengembun lanjut pada waktu tertentu. Pengukuran tebal lapisan embunan dilakukan dengan menggunakan mikrometer yang dilengkapi dengan jarum suntik dan dihubungkan dengan multi tester. Kecepatan aliran air pendingin diukur dengan cara menampung air pendingin selama waktu tertentu. Untuk mengetahui berapa kecepatan pengembunan untuk masing-masing zat dilakukan dengan cara sebagai berikut: embunan yang terbentuk dari embunan utama maupun pengembun lanjut masing-masing mengandung air dan n-heksan. Air dan n-heksan adalah dua cairan yang tidak saling melarutkan (kelarutannya sangat kecil, kelarutan n-heksan dalam air : 0,0145 % pada suhu 15°C) (Perry dan Chilton, 1973). Kedua cairan ini dipisahkan dengan menggunakan corong pemisah yang volumenya 250 ml. Air dan n-heksan yang telah terpisah masing-masing ditimbang beratnya dengan neraca analitis. Kecepatan uap masuk diasumsi sama dengan jumlah embunan yang terbentuk pada pengembun utama ditambah dengan jumlah embunan yang terbentuk pada pengembun lanjut.

Alat yang digunakan ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Pengembun

Keterangan:

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| 1. Tangki penguap | 8. Pemisah |
| 2. Level indicator | 9. Pengembun total |
| 3. Pemanas | 10. Penampung embunan |
| 4. Katub pengaman | 11. Kran pengeluaran |
| 5. Pemasukan bahan | 12. Tempat termokopel |
| 6. Pengatur tekanan | 13. Kran pemisah |
| 7. Pengembun | 14. Mikrometer |

Pada penelitian ini akan diajukan model matematika yang menganggap bahwa embunan air maupun embunan n-heksan yang terbentuk akan membentuk tebal lapisan yang sama, menempel pada permukaan pengembun. Kecepatan pengembunan antara air dan n-heksan tidak sama, sehingga besarnya luas permukaan yang ditempati oleh kedua embunan tersebut juga tidak sama. Berdasarkan anggapan ini, persamaan model dapat disusun dari neraca momentum, neraca massa, baik di fase uap maupun di fase cair dan neraca panas. Untuk menyederhanakan masalah, pada penelitian ini diambil beberapa asumsi yaitu:

- embunan air dan n-heksan menempel pada dinding pengembun
- kecepatan aliran embunan air dengan n-heksan sama
- kondisi *steady state*

Dari neraca momentum, setelah disederhanakan akan diperoleh persamaan:

$$\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} = -\frac{\rho g}{\mu} \dots \dots \dots (5)$$

Dengan menganggap sifat fisis tetap, kemudian persamaan (5) diintegrasikan dua kali maka diperoleh:

$$V_z = -\frac{\rho g}{2\mu}x^2 + c_1x + c_2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

dengan kondisi batas:

$$x=0 \longrightarrow V_z = 0 \quad \dots\dots\dots(a)$$

$$x=\delta \longrightarrow \frac{dV_z}{dx} = \frac{dV_s}{dx} \quad \dots\dots\dots(b)$$

Tegangan geser pada batas cairan dengan gas adalah:

$$\tau_s = \mu \frac{dV_s}{dx}, \text{ jadi } \frac{dV_s}{dx} = \frac{\tau_s}{\mu} \quad \dots\dots\dots(7)$$

Dari kondisi-kondisi batas tersebut akhirnya diperoleh persamaan untuk distribusi kecepatan kondensat :

$$V_z = -\frac{\rho g}{2\mu}x^2 + \left(\frac{\rho g}{\mu}\delta + \frac{\tau_s}{\mu} \right)x \quad \dots\dots\dots(8)$$

dengan $\tau_s = 0,332 \text{Re}_z^{1,5} \left(\frac{\mu_g^2}{\rho g z} \right)$ (Asano,dkk.,1979).....(9)

Dari neraca massa , akhirnya diperoleh kecepatan perpindahan massa :

$$N_i = K_{gi} (P_i - P_s) \quad \dots\dots\dots(10)$$

Lapisan embunan terbentuk karena ada uap yang mengembun. Tebal lapisan embunan semakin ke bawah semakin tebal, karena tambahan uap yang mengembun. Jumlah embunan pada jarak tertentu adalah:

$$m = \int_0^\delta \rho V_z dx \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{m}{\rho} = \int_0^\delta V_z dx \quad \dots\dots\dots(12)$$

substitusi V_z dari persamaan (6) ke persamaan (12), akan diperoleh:

$$\frac{m}{\rho} = \frac{\rho g \delta^3}{3\mu} + \frac{\tau_s}{2\mu} \delta^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

Untuk memperoleh distribusi suhu di embunan perlu dibuat neraca panas. Panas yang mengalir ke arah x terjadi secara konduksi, sedang perpindahan panas ke arah z dianggap hanya terjadi secara konveksi. Dengan demikian akan diperoleh persamaan diferensial sebagai berikut:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C V_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(14)$$

dengan kondisi batas:

pada $z=0$; $T=T_{dew}$ (c)

pada $x=0$; $h_p(T_p-T_o)=-kdT/dx$ (d)

pada $x=\delta$; $q=h_g(T_g-T)+\sum \lambda N_i$ (e)

Banyaknya gas yang mengembun sama dengan banyaknya tambahan embunan di fase cair.

$$-\frac{dG}{dz} = N_i \quad \dots\dots\dots(15)$$

Di samping neraca panas di embunan juga perlu dibuat neraca panas di fase uap. Pada uap akan terjadi perpindahan panas secara konveksi ke arah embunan yang disebabkan adanya perbedaan suhu di fase uap dan suhu di permukaan cairan. Perbedaan suhu ini menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan uap di fase uap dengan tekanan uap di permukaan cairan. Perbedaan tekanan ini merupakan daya dorong terjadinya perpindahan massa. Jumlah massa yang dipindahkan dirumuskan dengan persamaan (11).

Semakin ke bawah suhu gas akan semakin turun, yang disebabkan oleh panas konveksi ke cairan. Setelah dibuat neraca massa akhirnya diperoleh persamaan distribusi suhu di fase uap:

$$\frac{dGT_g}{dz} = -\frac{h_g}{C} (T_g - T_s) \quad \dots\dots\dots(16)$$

Pada penelitian ini sebagai pendingin digunakan air yang mengalir berlawanan arah dengan aliran uap. Air pendingin masuk dari bawah, selama mengalir akan menerima panas. Persamaan diferensial untuk suhu air pendingin:

$$WC_w \frac{dT_p}{dz} = -h_p(T_0 - T_p) \dots\dots\dots(17)$$

Dari persamaan-persamaan yang diperoleh diselesaikan dengan pemrograman komputer. Pada awal perhitungan ($z=0$) suhu permukaan diambil sama dengan suhu gas masuk. Tekanan uap pada suhu dinding lebih rendah daripada tekanan uap di fase uap, sehingga pada dinding akan terbentuk embunan. Dengan menggunakan persamaan (13), tebal embunan yang terbentuk dapat dihitung. Tebal embunan dibagi menjadi n bagian yang masing-masing tebalnya sama dengan dx . Distribusi kecepatan pada embunan dapat dihitung dengan persamaan (8). Distribusi suhu pada embunan diperoleh dari penyelesaian persamaan neraca panas dengan cara implisit (Gerald & Wheatley, 1984).

Kenaikan suhu pendingin diperoleh dari penyelesaian persamaan neraca panas pendingin dengan cara Euler, demikian juga penyelesaian persamaan neraca panas untuk gas. Penentuan nilai koefisien perpindahan panas (h_g) serta koefisien perpindahan massa (k_g) dilakukan dengan metode Hook-Jeeves (Rudd dan Watson, 1968).

Data-data yang diperoleh dari percobaan juga digunakan untuk mengevaluasi koefisien perpindahan panas pengembunan dengan menggunakan persamaan yang diajukan oleh Ogino dan oleh Nusselt.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini aliran pendingin dibuat tetap sekitar 82 ml/menit. Data hasil percobaan menunjukkan bahwa semakin besar fraksi mol uap yang masuk, maka kecepatan pengembunannya juga semakin besar. Hal ini disebabkan semakin besar mol uap yang masuk, maka tekanan parsial uapnya akan semakin besar. Dengan demikian beda tekanan di fase uap dengan tekanan di permukaan pengembun akan semakin besar. Semakin besar perbedaannya berarti semakin besar daya dorongnya, sehingga uap yang mengembun semakin banyak. Dengan menggunakan model matematika yang diajukan dan berdasarkan data yang diperoleh dari percobaan, maka nilai k_g dan nilai h_g dapat diperoleh. Perhitungan nilai-nilai ini dengan menggunakan minimasi SSE dengan cara Hook-Jeeves. Nilai-nilai yang dioptimasi antara lain kecepatan air mengembun, kecepatan n -heksan mengembun, suhu uap keluar, suhu dinding pada jarak 15 cm dari uap masuk, serta tebal embunan pada jarak 5 cm dari uap masuk. Dari hasil evaluasi menunjukkan bahwa model yang diajukan dapat mewakili peristiwa pengembunan uap biner dari cairan yang tidak campur. Hal ini ditunjukkan dengan hasil perhitungan yang mempunyai kecenderungan yang sama dengan data percobaan. Di samping itu perbedaan hasil perhitungan dengan data yang diamati berkisar 26 %.

Nilai koefisien transfer massa (k_g) dan nilai koefisien transfer panas (h_g) dari hasil optimasi dinyatakan dalam bentuk kelompok bilangan tidak berdimensi sebagai berikut:

- untuk koefisien transfer massa:

$$\frac{k_g P(Bm)z}{\rho D_{ab}} = 2453 \left(\frac{\rho v_g z}{\mu} \right)^{0,436} \left(\frac{\mu}{\rho D_{ab}} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(18)$$

, ralat rata-rata 21,5 %,

- untuk koefisien transfer panas:

$$\frac{h_g z}{k} = 36,348 \left(\frac{\rho v_g z}{\mu} \right)^{0,124} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(19)$$

, ralat rata-rata 2,5 %, yang berlaku untuk Reynold uap antara 7400 sampai 14500.

Koefisien transfer panas pengembunan dihitung dengan persamaan;

$$h = \frac{k}{\delta} \dots\dots\dots(20)$$

Dengan menggunakan persamaan (20), nilai koefisien pengembunan dapat diperoleh. Nilai koefisien perpindahan panas pengembunan dituliskan dalam bentuk kelompok bilangan tidak berdimensi:

$$h \left(\frac{\mu^2}{k^3 \rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,85 \left(\frac{4\Gamma}{\mu} \right)^{-\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(21),$$

Persamaan (21) dibandingkan dengan persamaan yang diajukan oleh Ogino (4) dan dengan persamaan yang diajukan oleh Nusselt (1), hasilnya ditunjukkan pada tabel I.

Tabel I. Hasil Perhitungan Koefisien Pengembunan

No. Perc.	Persamaan 1 (KJ/m ² dt K)	Persamaan 4 (KJ/m ² dt K)	Persamaan 21 (KJ/m ² dt K)
A1	2,255	2,082	2,717
A2	2,544	2,074	2,717
A3	2,241	2,058	2,700
B1	2,314	2,190	2,883
B2	2,318	2,178	2,873
B3	2,238	2,147	2,804
C1	2,312	2,335	2,888
C2	2,300	2,332	2,904
C3	2,293	2,319	2,884
D1	2,270	2,269	2,871
D2	2,282	2,268	2,875
D3	2,277	2,245	2,865
E1	2,233	2,370	2,861
E2	2,245	2,375	2,865
E3	2,248	2,374	2,865
F1	2,236	2,389	2,865
F2	2,235	2,388	2,857
F3	2,222	2,388	2,865

Dari tabel I menunjukkan bahwa hasil perhitungan koefisien perpindahan panas pengembunan, jika dibandingkan dengan persamaan yang diajukan oleh Nusselt (1) ada perbedaan sebesar 18,9 % sedang bila dibandingkan dengan persamaan Ogino (4) ada perbedaan sebesar 18,3 %.

4. Kesimpulan

Dari hasil percobaan dan perhitungan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Model matematika yang disusun dapat mewakili proses pengembunan campuran uap biner dari cairan yang tidak campur
- Persamaan yang diajukan Nusselt untuk mencari koefisien perpindahan panas pengembunan uap murni bisa digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan panas pengembunan untuk campuran uap biner dari cairan yang tidak campur

5. Daftar Notasi

a	:	fraksi massa komponen	[A]
b	:	fraksi massa komponen	[B]
C	:	kapasitas panas	[kJ/kmol, K]
C _w	:	kapasitas panas air	[kJ/kmol, K]
G	:	kecepatan alir fase gas	[kmol/m, dt]
H	:	koefisien pengembunan	[kJ/m ² dt, K]
h _g	:	koefisien perpindahan panas gas	[kJ/m ² dt, K]
h _p	:	koefisien perpindahan panas pendingin	[kJ/m ² dt, K]
k	:	konduktifitas panas	[kJ/m dt, K]
k _g	:	koefisien perpindahan massa uap	[kmol/m ² dt]
m	:	jumlah embunan	[kmol/mdt]
q	:	perpindahan panas secara konduksi	[kJ/m ²]
Re	:	bilangan Reynolds	
Sc	:	bilangan Schimdt	
Sh	:	bilangan Sherwood	
T	:	suhu embunan	[K]
T _g	:	suhu gas	[K]
T _w	:	suhu pendingin	[K]
V	:	kecepatan embunan	[m/dt]
W	:	kecepatan air pendingin	[kg/dt]
ρ	:	densiyas	[kg/m ³]

μ	:	viskositas	[kg/mdt]
τ	:	gaya geser	[kg/mdt ²]
λ	:	panas laten penguapan	[kj/kg]
Γ	:	kecepatan aliran embunan	[kg/mdt]
δ	:	tebal embunan	[m]

6. Daftar Pustaka

1. Akears, W.W., and Turner, M.M., 1962, "Condensation of Vapors of Immiscible Liquids", A.I.Ch.E. Journal, 8, 587-589.
2. Bendiyasa, I.M., 1995, "Penguapan Parsial Sistem Multi Komponen n-Heksan-Etanol-Udara", Media Teknik, 1.79-84.
3. Bendiyasa, I.M., 1996, "Penguapan Parsial Sistem Multikomponen nButanol -Etanol-Udara", Laporan Penelitian, Fakultas Teknik, UGM.
4. Gerald, C.f. and Wheatly, P.O., 1984, "Applied Numerical Analysis", 3rd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.
5. Holman, J.P., 1986, "Heat Transfer", 6 ed., p.p. 450-460, Mc Graw Hill, Kogakusa, Ltd., Tokyo.
6. Kern, D.Q., 1950, "Process Heat Transfer", Mc Graw-Hill, Kogakusa, Ltd., Tokyo.
7. Kosuge, H., Mamyoda, T. and Asano, K. 1993, "Simultaneous of Binary Vapor Mixture on a Vertical flat Plate", Journal Chem. Eng. Japan, Vol. 26, 3, pp. 315-317.
8. Krishna, R., and Panchal, C.B., 1977, "Condensation of Binary Vapor Mixture in The Presence of an Inert Gas", Chem. Eng. sci., vol. 32, 741-745.
9. Ogino, F., Kanzaki, S., and Mizushima, T., 1978, "Condensation of Binary Vapors of Immiscible Liquids", Int. J. Heat Mass Transfer, 31, 245-250.
10. Perry, R.H., and Chilton, C.H., 1973, "Chemical Engineer's Hand Book", McGrawHill, Kogakusa, Ltd., Tokyo.
11. Sinnott, R.K., 1989, "Chemical Engineering", vol 6, Pergamon Press, New York.