



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMISAHAN CAMPURAN AZEOTROP ETANOL-AIR
DAN ISOPROPIL ALKOHOL-AIR MELALUI PROSES
PERVAPORASI DENGAN MEMBRAN *THIN FILM*
COMPOSITE KOMERSIAL**

TESIS

IKA WAHYUNI

1006787735

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMISAHAN CAMPURAN AZEOTROP ETANOL-AIR
DAN ISOPROPIL ALKOHOL-AIR MELALUI PROSES
PERVAPORASI DENGAN MEMBRAN *THIN FILM*
COMPOSITE KOMERSIAL**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

IKA WAHYUNI

1006787735

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2012**

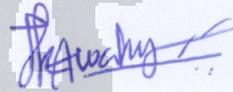
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ika Wahyuni

NPM : 1006787735

Tanda Tangan :



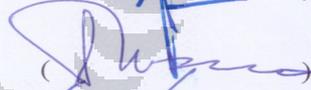
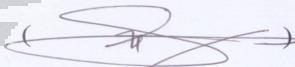
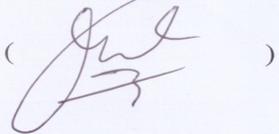
Tanggal : 4 Juli 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Ika Wahyuni
NPM : 1006787735
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Tesis : Studi Pemisahan Campuran Azeotrop
Etanol-Air Dan Isopropil Alkohol-Air
Melalui Proses Pervaporasi Dengan
Membran *Thin Film Composite* Komersial

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing	: Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA	()
Pembimbing	: Prof. Ir. Sutrasno K., M.Sc., PhD	()
Penguji	: Prof. Dr. Ir. M. Nasikin, M.Eng	()
Penguji	: Dr. Ir. Nelson Saksono, S.T., MT.	()
Penguji	: Dr. Ing. Donni Adinata, S.T., M.Eng.Sc.	()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik dan tepat waktu. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari sampai pada penyusunan makalah ini, sangatlah sulit untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA dan Prof. Ir. Sutrasno K., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- 2) Pihak UPT Balai Penelitian dan Pengembangan Biomaterial LIPI yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk melanjutkan sekolah ke jenjang magister ini;
- 3) Mas Aji, Iqbal, Alya, Papah, Mamah, Bapak, Ibu dan seluruh keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun materiil;
- 4) Christine dan Wiwie selaku rekan penelitian satu bimbingan yang banyak memberi dukungan dan informasi terkait;
- 5) Sahabat-sahabat seperjuangan S2 Tekim 2010 yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini; dan
- 6) Semua pihak yang telah membantu penyusunan tesis ini secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan tesis ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, 4 Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia dan LIPI, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ika Wahyuni
NPM : 1006787735
Program Studi : S2
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

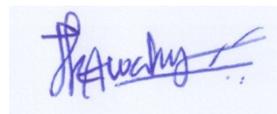
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**“Studi pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan isopropil alkohol-air
melalui proses pervaporasi dengan membran
Thin Film Composite komersial”**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Depok
Pada tanggal : 4 Juli 2012
Yang Menyatakan



(Ika Wahyuni)

ABSTRAK

Nama : Ika Wahyuni
Program Studi : Magister Teknik Kimia
Judul Seminar : Studi pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan isopropil alkohol-air melalui proses pervaporasi dengan membran *Thin Film Composite* komersial

Tesis ini membahas mengenai proses pemisahan dua jenis campuran alkohol, yaitu campuran etanol-air dan isopropil alkohol-air (IPA-air), melalui proses pervaporasi dengan menggunakan membran *Thin Film Composite* (TFC) komersial. Pengaruh temperatur umpan, konsentrasi umpan, dan tekanan pada sisi permeal diinvestigasi berkaitan dengan kinerja membran TFC komersial dalam proses pervaporasi tersebut. Untuk penentuan kondisi operasi, percobaan pervaporasi dilakukan pada temperatur umpan 35, 39, 44 °C dan tekanan pada sisi permeal sebesar 660, 510, 260 mmHg-a. Hasil studi menunjukkan bahwa untuk proses pervaporasi campuran etanol-air, kondisi operasi yang terbaik adalah pada temperatur umpan dan tekanan sisi permeal masing-masing 39°C dan 510 mmHg, dengan nilai fluks dan selektivitas masing-masing 0,085 kg/m².mnt dan 1,075. Sedangkan untuk proses pervaporasi campuran IPA-air, kondisi operasi yang terbaik adalah pada temperatur umpan dan tekanan sisi permeal masing-masing 39 °C dan 260 mmHg, dengan nilai fluks dan selektivitas masing-masing 0,0098 kg/m².mnt dan 1,361. Lebih lanjut, dilakukan percobaan PV campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air pada kondisi operasi optimum yang telah diperoleh sebelumnya. Hasil percobaan menunjukkan bahwa membran TFC hanya dapat menurunkan konsentrasi etanol di permeal dari 95,5 menjadi 94,3 %-b dan konsentrasi IPA dari 85,7 menjadi 83,5 %-b. Berdasarkan hasil tersebut, agar dapat dimanfaatkan sebagai membran pervaporasi, maka membran TFC harus direkayasa secara khusus dalam proses pembuatannya.

Kata kunci : Etanol, IPA, azeotrop, pervaporasi, membran, *Thin Film Composite*

ABSTRACT

Name : Ika Wahyuni
Study Program : Chemical Engineering
Title : Study of separation of ethanol-water and isopropyl alcohol-water azeotrop mixtures through pervaporation process by commercial Thin Film Composite (TFC) membrane

The separation of two alcohol mixtures, which are ethanol-water and isopropyl alcohol-water (IPA-water) mixtures, through pervaporation process by commercial Thin Film Composite (TFC) membrane is discussed in this thesis. Effect of feed temperature, downstream pressure, and feed composition are investigated regarding the performance of TFC membrane in the pervaporation process. A preliminary study was performed at various feed temperatures (35 – 44 °C) and downstream pressures (660, 510, 260 mmHg-a), to determine the optimum operational condition. The result showed that the optimum operating condition for the pervaporation of ethanol-water mixture was at 39 °C and 510 mmHg-a, with the value of permeate flux and selectivity, which were about 0.085 kg/m².min and 1.075. While the optimum operating condition for the pervaporation IPA-water mixture was at 39 °C and 260 mmHg-a, with the value of permeate flux and selectivity, which were about 0.0098 kg/m².min and 1.361. Furthermore, the pervaporation of ethanol-water and IPA-water azeotrope mixtures were done by utilizing the optimum operational condition from the previous study. The ethanol and IPA concentration in permeate obtained decreased from 95.5 and 85.7 % to 94.3 and 83.5 %-b, respectively. While, their concentration in retentate increased to 96.3 and 87.9 %-b.

Key words : ethanol, IPA, azeotrope, pervaporation, membrane, Thin Film Composite

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Alkohol dan Sifat-Sifatnya.....	6
2.1.1. Sifat Azeotrop dari Etanol dan IPA	8
2.1.2. Distilasi Azeotrop.....	8
2.1.3. Pemisahan Kimiawi	10
2.1.4. Distilasi Vakum.....	10
2.1.5. Distilasi Ekstraktif Dengan Penambahan Garam Terlarut	11
2.1.6. Proses Adsorpsi.....	11
2.3. Deskripsi Pervaporasi.....	12
2.4. Membran Pervaporasi	14
2.5. Material Membran Komposit Film Tipis (<i>Thin Film Composite/TFC</i>) Poliamida/Polisulfon/Poliester.....	16
2.5.1. Lapisan Tidak Berpori dalam Membran TFC	17
2.5.2. Lapisan Berpori	18
2.5.3. Lapisan Pendukung Poliester	19
2.6. Modul Membran Berbentuk Gulungan Spiral (<i>Spiral Wound</i>).....	19
2.7. Fenomena Perpindahan Dalam Proses Pervaporasi	20
2.6. Parameter Proses Pervaporasi	22
2.7. Pervaporasi berdasarkan parameter kelarutan Hansen dan diameter kinetik.....	24
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1. Rancangan Penelitian	25
3.2. Lokasi Penelitian	28
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	29
3.4.1. Bahan Penelitian.....	29
3.4.2. Pembagian Alat penelitian	29
3.3. Prosedur Penelitian.....	37
3.3.1. Persiapan Larutan Umpan	37
3.3.2. Proses Pervaporasi	38
3.3.3. Pengujian kadar alkohol.....	39

3.3.4. Pengujian sorpsi/Derajat <i>Swelling</i> membran TFC	40
3.3.5. Pengujian SEM membran TFC	40
3.4. Pengolahan Data Hasil Penelitian	41
3.4.1. Fluks Massa Permeat	41
3.4.2. Faktor Pemisahan (Selektivitas).....	41
3.4.3. Indeks Pemisahan Pervaporasi (<i>Pervaporation Separation Index/PSI</i>).....	42
3.4.4. Permeabilitas	42
3.4.5. Derajat <i>Swelling</i>	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1. Pervaporasi Campuran Etanol-Air	44
4.1.1. Pengaruh kondisi operasi pada pervaporasi campuran etanol-air 44	
4.1.2. Proses Pervaporasi Campuran Azeotrop Etanol-Air.....	59
4.2. Proses Pervaporasi Campuran IPA-Air.....	64
4.2.1. Penentuan Kondisi Operasi Pervaporasi Campuran IPA-Air	64
4.2.2. Proses Pervaporasi Campuran Azeotrop Isopropil Alkohol-Air (IPA-air)	75
4.3. Perbandingan Proses Pervaporasi Campuran Etanol-Air dan IPA-Air..	78
4.4. Karakterisasi Membran TFC.....	83
4.4.1. Pengujian Sorpsi Membran TFC Komersial	83
4.4.2. Analisis Membran dengan SEM	84
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	88
5.1. Kesimpulan	88
5.2. Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Skema proses dehidrasi etanol dengan distilasi azeotrop	9
Gambar 2.2.	Skema sistem dua fase yang dipisahkan oleh membran	12
Gambar 2.3.	Skema pemisahan dengan proses pervaporasi	14
Gambar 2.4.	Membran berdasarkan struktur morfologinya	15
Gambar 2.5.	Struktur membran TFC	17
Gambar 2.6.	Modul membran <i>spiral-wound</i>	20
Gambar 2.7.	Mekanisme solusi-difusi	21
Gambar 2.8.	Penggolongan bahan organik berdasarkan dua parameter kelarutan	25
Gambar 2.9.	Diameter kinetika dari beberapa pelarut organik dan air	26
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2.	Penangas air	30
Gambar 3.3.	Tangki umpan	30
Gambar 3.4.	Pompa sirkulasi	31
Gambar 3.5.	<i>Pressure gauge</i>	31
Gambar 3.6.	Membran osmosis balik berbahan dasar poliamida	32
Gambar 3.7.	Kondensor	32
Gambar 3.8.	Erlenmeyer 500 mL	32
Gambar 3.9.	Pompa vakum	33
Gambar 3.10.	<i>Refrigerated circulator</i>	34
Gambar 3.11.	Konektor membran dan <i>nipple</i>	34
Gambar 3.12.	Selang silikon dan polimer	34
Gambar 3.13.	<i>Valve</i>	35
Gambar 3.14.	Skema proses dan peralatan pervaporasi pervaporasi untuk pemurnian campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air	36
Gambar 3.15.	Alkoholmeter	37
Gambar 4.1.	Pengaruh temperatur umpan terhadap: (a) fluks permeat total; (b) fluks air; dan (c) fluks etanol pada tekanan 600, 510, dan 260 mmHg-a	46
Gambar 4.2.	Pengaruh temperatur umpan terhadap: (a) permeabilitas total; (b) permeabilitas air; dan (c) permeabilitas etanol pada tekanan 600, 510, dan 260 mmHg-a.	47
Gambar 4.3.	Pengaruh temperatur umpan terhadap nilai selektivitas campuran etanol-air 45 %-b.	49
Gambar 4.4.	Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi temperatur pada saat tekanan permeat yang digunakan (a) 600 mmHg-a; (b) 510 mmHg-a; (c) 260 mmHg-a	50
Gambar 4.5.	Profil konsentrasi etanol pada umpan, permeat, dan retentat sebagai fungsi temperatur umpan pada perlakuan tekanan sisi permeat: (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a	51
Gambar 4.6.	Persentase penurunan kadar etanol di permeat setelah pervaporasi	52
Gambar 4.7.	Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap kadar etanol di permeat untuk perlakuan temperatur umpan: (a) 35; (b) 39; (c) 44 °C	53

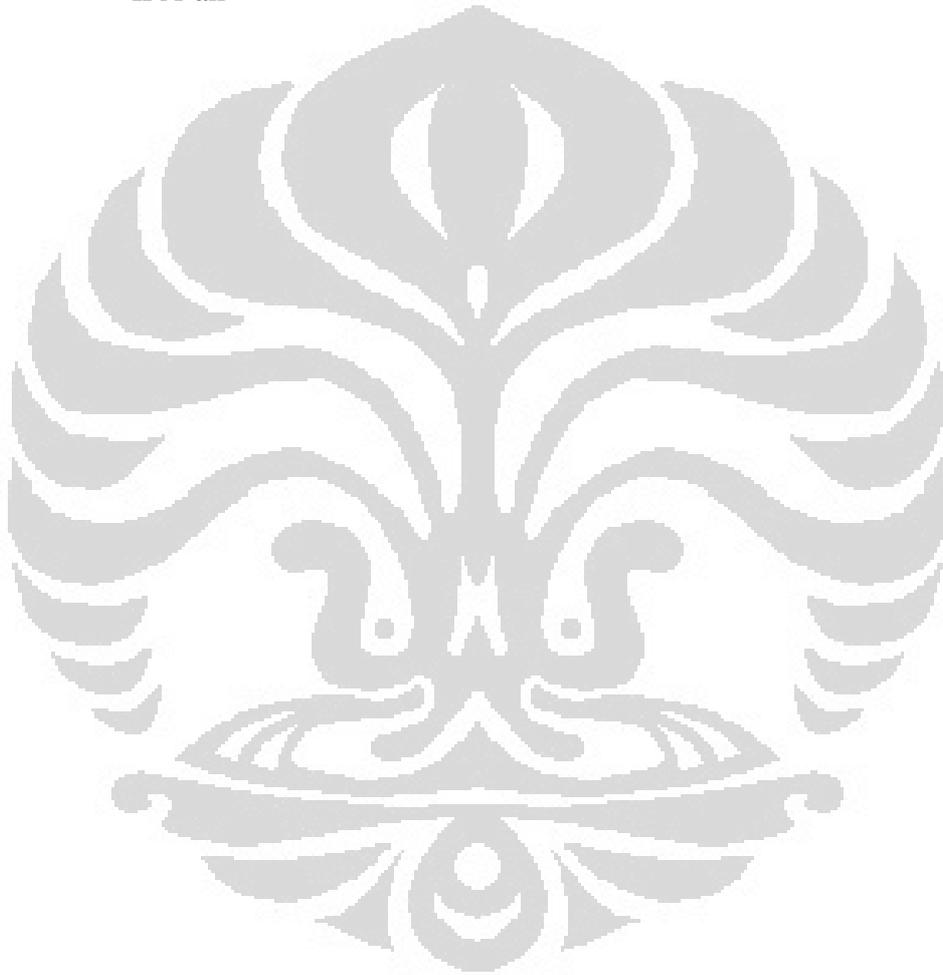
Gambar 4.8	Persentase penurunan kadar etanol di permeat setelah Pervaporasi	55
Gambar 4.9	Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap: (a) fluks air; dan (b) fluks etanol pada perlakuan temperatur umpan 35, 39, dan 44 °C	56
Gambar 4.10	Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada saat temperatur umpan yang digunakan (a) 35; (b) 39; (c) 44 °C	57
Gambar 4.11	Pengaruh komposisi etanol di umpan terhadap fluks total permeat, air, dan etanol	60
Gambar 4.12	Struktur kimia poliamida	60
Gambar 4.13	Pengaruh waktu pervaporasi terhadap: (a) konsentrasi etanol azeotrop; dan (b) konsentrasi etanol 80% di umpan, permeat, dan retentat	62
Gambar 4.14	Pengaruh temperatur umpan terhadap: (a) fluks permeat total; (b) fluks air; (c) fluks IPA pada perlakuan tekanan sisi permeat 600, 510, dan 260 mmHg-a	64
Gambar 4.15	Pengaruh temperatur umpan terhadap nilai selektivitas campuran IPA-air 45 %-b	66
Gambar 4.16	Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi temperatur pada saat tekanan permeat yang digunakan (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a	67
Gambar 4.17	Profil konsentrasi etanol pada umpan, permeat, dan retentat sebagai fungsi temperatur umpan pada perlakuan tekanan sisi permeat: (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a	68
Gambar 4.18	Persentase penurunan kadar etanol di permeat setelah Pervaporasi	69
Gambar 4.19	Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap: (a) fluks air; dan (b) fluks IPA pada perlakuan temperatur umpan 35, 39, dan 44 °C	70
Gambar 4.20	Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada saat temperatur umpan yang digunakan (a) 35; (b) 39; (c) 44 °C	71
Gambar 4.21	Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap kadar IPA di umpan, retentat, dan permeat untuk perlakuan temperatur umpan: (a) 35, (b) 39, (c) 44 °C	73
Gambar 4.22	Profil persentase penurunan kadar IPA di permeat setelah pervaporasi sebagai fungsi tekanan sisi permeat	74
Gambar 4.23	Pengaruh konsentrasi umpan IPA-air terhadap fluks total dan fluks permeasi parsial dari membran TFC	75
Gambar 4.24	Pengaruh waktu pervaporasi terhadap: (a) konsentrasi IPA azeotrop; dan (b) konsentrasi IPA 95 % di umpan, permeat, dan retentat	77
Gambar 4.25	Fluks total campuran etanol-air dan IPA-air	79
Gambar 4.26	Struktur molekul: (a) IPA dan (b) Etanol	80
Gambar 4.27	Nilai fluks air dan alkohol dari campuran etanol-air dan IPA-air	80

Gambar 4.28	Nilai selektivitas air terhadap alkohol dari campuran etanol-air dan IPA-air	82
Gambar 4.29	Variasi konsentrasi alkohol di permeat sebagai fungsi konsentrasi alkohol di umpan	83
Gambar 4.30	Derajat <i>swelling</i> membran TFC sebagai fungsi konsentrasi etanol dan IPA	83
Gambar 4.31	Struktur morfologi membran thin film composite berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester: (a) penampang melintang; (b) penampang permukaan membran	85
Gambar 4.32	Struktur morfologi membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester: (a) penampang melintang; (b) penampang permukaan membran	86



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat fisik etanol dan isopropil alkohol	7
Tabel 4.1. Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi campuran azeotrop etanol-air	61
Tabel 4.2. Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi campuran azeotrop IPA-air	77



BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan proposal tesis ini.

1.1. Latar Belakang

Salah satu senyawa kimia yang penting dalam kehidupan manusia adalah senyawa alkohol, diantaranya adalah etanol dan isopropil alkohol (IPA). Pada mulanya kedua alkohol ini dihasilkan dari minyak bumi. Akan tetapi seiring dengan meningkatnya harga minyak mentah dipasaran dan tingginya permintaan minyak dunia, maka mulai ada ketertarikan untuk memproduksi alkohol dari biomassa tumbuhan.

Etanol dan IPA dapat digunakan sebagai pelarut, bahan bakar, desinfektan, dan bahan baku sintesis senyawa kimia lain. Dalam aplikasinya tersebut, keduanya diperlukan dalam berbagai tingkat kemurnian, maka untuk meningkatkan konsentrasinya perlu ada proses pemurnian lebih lanjut. Umumnya, proses pemurnian alkohol dilakukan dengan distilasi sederhana. Akan tetapi seperti halnya pada etanol, distilasi hanya akan efektif untuk memisahkan campuran dengan kandungan etanol 10 – 85 % (Huang, Ramaswamy, Tschirner, & Ramarao, 2008). Sedangkan untuk konsentrasi di atas itu, etanol dan IPA akan membentuk sistem azeotrop dengan air, dan hanya dapat dipisahkan dengan adanya penambahan zat ketiga (*entrainer*) seperti benzena dan sikloheksana, sehingga akan membutuhkan adanya proses tambahan untuk memisahkan *entrainer* dari produk.

Salah satu proses pemisahan yang mulai banyak diminati oleh pihak industri sebagai alternatif dari distilasi adalah pemisahan dengan teknologi membran. Untuk banyak kasus, teknologi ini memberikan keuntungan ekonomis yang lebih baik, terutama karena lebih rendah biaya instalasi dan operasinya, serta tidak menimbulkan pencemaran lingkungan (Spillman, 1989). Pervaporasi merupakan contoh proses pemisahan dengan membran yang dapat diaplikasikan dalam proses dehidrasi pelarut dan pemisahan campuran organik. Proses ini

merupakan kombinasi dari proses permeasi membran dan evaporasi, dimana umpan yang berupa fasa cair akan diubah menjadi permeat berfasa uap dengan memanfaatkan tekanan vakum, gas pembawa, atau proses kondensasi dibagian sisi permeat (Pangarkar, 2009).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pervaporasi menguntungkan untuk sistem azeotrop dan campuran yang terdiri dari komponen dengan titik didih saling berdekatan, karena mekanisme pemisahannya yang berbeda dari distilasi (Baker, 2004; Chapman et al., 2008). Pemisahan campuran azeotrop seperti halnya campuran etanol-air dan IPA-air dengan membran didasarkan pada mekanisme solusi-difusi komponen umpan pada membran. Oleh karena itu, proses ini dapat menjadi proses alternatif yang menjanjikan untuk pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air.

Pemilihan jenis membran untuk sistem pervaporasi akan menentukan kinerja membran tersebut, yaitu selektivitas dan fluksnya (Mulder, 1991). Salah satu jenis dan material membran yang dapat digunakan untuk pemisahan etanol-air dan IPA-air melalui pervaporasi adalah membran simetri tidak berpori (*dense*) berbahan dasar poliamida. Membran ini memiliki sifat stabil pada suhu tinggi, sifat mekaniknya pun baik, serta tahan terhadap pelarut organik (Chan et al., 1998; Yamasaki et al., 1996). Akan tetapi, kinerja membran ini dalam pervaporasi masih memiliki kelemahan, yaitu apabila permeabilitasnya tinggi maka selektivitasnya menurun. Penelitian terdahulu melaporkan, bahwa proses dehidrasi alkohol pada berbagai kisaran konsentrasi air dengan membran poliamida tidak berpori menunjukkan tingkat selektivitas yang tinggi, akan tetapi nilai fluks permeasinya masih rendah (He, Chan, & Ng, 2001). Oleh karena itu, untuk meningkatkan laju permeasi tanpa mengorbankan selektivitasnya, maka struktur morfologi membran poliamida harus diubah dari membran simetris yang tebal dan tidak berpori menjadi struktur asimetris atau komposit (S.-H. Huang et al., 2006). Membran komposit memiliki keunggulan karena menawarkan nilai permeabilitas dan kekuatan mekanik yang tinggi, sedangkan selektivitas ditentukan oleh lapisan tipis tidak berpori.

Saat ini di Indonesia, membran komposit film tipis (*Thin Film Composite*/TFC) komersial berbahan dasar poliamida umumnya digunakan pada

proses pemisahan osmosis balik (RO) dan nanofiltrasi (NF). Membran ini lebih mudah diperoleh daripada membran komposit pervaporasi komersial seperti PERVAP[®] 2201 dan PERVAP[®] 2510. Akan tetapi, aplikasi membran TFC berbahan dasar poliamida pada proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air masih terbatas.

Oleh karena itu, berdasarkan latar belakang tersebut di atas maka pada penelitian ini akan dilakukan proses pervaporasi untuk pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air dengan menggunakan membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester.

1.2. Rumusan Masalah

Keberhasilan pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air melalui pervaporasi dengan menggunakan membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester sangat tergantung pada kinerja perpindahan komponen umpan dalam membran, yaitu berupa fluks permeat dan selektivitas. Kedua nilai ini tidak hanya dipengaruhi karakteristik membran TFC, tetapi juga oleh kondisi operasi seperti temperatur umpan, tekanan sisi permeat, dan komposisi umpan. Oleh karena itu perlu dipelajari lebih lanjut mengenai:

- Bagaimanakah pengaruh variasi temperatur umpan, tekanan sisi permeat, dan komposisi umpan terhadap nilai fluks permeat dan selektivitas serta tingkat kemurnian etanol dan IPA dalam pemisahan campuran etanol-air dan IPA-air melalui proses pervaporasi?
- Bagaimanakah nilai fluks permeat dan selektivitas, serta tingkat kemurnian etanol dan IPA dari proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk mempelajari proses pervaporasi dari pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air.

Tujuan khusus dari penelitian ini meliputi :

- Mengetahui pengaruh variasi temperatur umpan, tekanan sisi permeat, jenis alkohol dan komposisi umpan terhadap nilai fluks permeat dan selektivitas membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester, serta tingkat kemurnian etanol dan IPA pada permeat dan retentat.
- Mengetahui nilai fluks permeat dan selektivitas membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester, serta tingkat kemurnian etanol dan IPA dari pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air melalui proses pervaporasi.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan beberapa batasan sebagai berikut :

- Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI, Depok.
- Proses pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air dilakukan dalam unit pervaporasi dengan menggunakan kondisi vakum.
- Membran yang digunakan adalah membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester dengan modul gulungan spiral (*spiral wound*).
- Variabel yang divariasikan adalah temperatur (35, 39, 44 °C), tekanan sisi permeat (100, 250, 500 mmHg (a)), dan konsentrasi umpan.
- Sedangkan parameter yang dihitung adalah laju permeasi, faktor pemisahan, dan kadar etanol serta IPA yang dihasilkan.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada tesis ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini terdiri dari dasar teori penguapan, tinjauan penelitian terkini dari penguapan, model perpindahan massa proses penguapan, tinjauan tentang membran, dan pemilihan material membran.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini terdiri dari garis besar penelitian yang menampilkan diagram alir, alat dan bahan yang digunakan dalam proses disertai pembahasannya, dan prosedur yang akan digunakan untuk mencapai tujuan yang diinginkan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisis dan pembahasan dari hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang diperoleh dari hasil pembahasan dan saran-saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, dalam penelitian ini akan digunakan teknologi pervaporasi untuk pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air. Elemen utama dalam pencapaian pekerjaan ini terdiri atas material kerja berupa alkohol, yaitu campuran etanol-air dan IPA air, serta rangkaian alat proses pervaporasi yang dilengkapi dengan membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester.

Pembahasan pada bab ini dibagi menjadi enam bagian utama, yaitu pembahasan mengenai pengenalan alkohol, penjelasan mengenai teknologi pemisahan dengan membran, proses pemurnian alkohol dengan proses pervaporasi, membran pervaporasi, membran *Thin Film Composite* (TFC), fenomena perpindahan dan faktor-faktor yang mempengaruhi proses pervaporasi.

2.1. Alkohol dan Sifat-Sifatnya

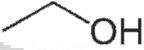
Dalam bidang kimia, alkohol merupakan istilah untuk senyawa organik dengan gugus fungsi hidroksil ($-OH$) yang berikatan dengan atom karbon. Senyawa ini berupa cairan bening dengan bau khas yang ringan, mudah menguap dan juga terbakar. Seri alkohol sederhana seperti etanol dan isopropil alkohol dapat digunakan sebagai pelarut, bahan baku untuk industri kimia dan farmasi, serta bahan desinfektan.

Alkohol yang paling sederhana seperti etanol atau etil alkohol merupakan senyawa alkohol dengan rumus molekul C_2H_5OH yang sangat larut dalam air. Sedangkan isopropil alkohol (IPA), yang disebut juga dengan isopropanol, 2-propanol, dan dimetil-karbinol, adalah senyawa kimia dengan rumus molekul C_3H_8O . IPA merupakan contoh sederhana dari alkohol sekunder, dimana atom karbon yang mengikat gugus hidroksil ($-OH$) juga berikatan dengan dua atom karbon lain. Tabel 2.1. menunjukkan sifat fisik dari senyawa etanol dan IPA.

Adanya gugus hidroksil pada etanol dan IPA menyebabkan senyawa ini bersifat polar dan dapat membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air. Alkohol

rantai pendek seperti etanol dan propanol mempunyai kelarutan tak terhingga dalam air karena pengaruh gugus hidroksil yang menyebabkan ikatan hidrogen jauh lebih besar daripada pengaruh sifat hidrofobik gugus alkenil.

Tabel 2.1. Sifat fisik etanol dan isopropil alkohol (IPA)

Properti	Etanol	IPA
Struktur molekul		
Rumus molekul	C_2H_6O	C_3H_8O
Massa molekul relatif (g/mol)	46,07	60,1
Titik beku ($^{\circ}C$)	-114,1	-88,5
Titik didih normal ($^{\circ}C$)	78,32	82,5
Densitas pada $20^{\circ}C$ (g/ml)	0,7893	0,786
Kelarutan dalam air	sangat larut	sangat larut
Viskositas pada $20^{\circ}C$ (cP)	1,17	2,4
Diameter kinetika (\AA)	4,3	4,7

Saat ini di Indonesia, etanol dan IPA juga mulai dimanfaatkan sebagai Bahan Bakar Nabati (BBN) dengan terbitnya Instruksi Presiden No.1 tahun 2006 yang menitikberatkan pada pemanfaatan biofuel sebagai bahan bakar alternatif pengganti BBM. Hal ini juga didukung dengan keluarnya SK Dirjen Minyak dan Gas Bumi No.3674/24/DJM/2006 pada tanggal 17 Maret 2006 yang mengizinkan pencampuran bioetanol ke dalam gasoline hingga 10% (Toharisman, 2008). Garjito (2006) melaporkan bahwa bioetanol dapat dicampur dengan bensin sebagai bahan penggerak motor (dengan perbandingan etanol : bensin 1 : 3).

Untuk pemanfaatan etanol dan IPA sebagai bahan bakar dan bahan baku farmasi, maka keduanya diperlukan dalam tingkat kemurnian yang lebih tinggi (95 – 99,5 %). Sebagian besar industri etanol menggunakan proses fermentasi dan menghasilkan produk dengan kadar etanol 8 – 12 %. Umumnya, untuk meningkatkan konsentrasi etanol dapat dilakukan dengan distilasi sederhana. Akan tetapi, distilasi akan efektif untuk memisahkan campuran dengan kandungan etanol 10 – 85 % (Huang et al., 2008). Sedangkan untuk konsentrasi di atas itu,

campuran etanol-air dan IPA-air sukar dipisahkan dengan proses destilasi sederhana karena terbentuk campuran azeotrop dengan air. Sehingga proses pemisahan dengan destilasi menjadi tidak ekonomis karena konsentrasi etanol umpan mendekati titik azeotrop, membutuhkan rasio refluks yang tinggi, dan peralatan tambahan.

2.1.1. Sifat Azeotrop dari Etanol dan IPA

Kata azeotrop berasal dari bahasa Yunani yang berarti “tidak berubah dengan pendidihan”. Campuran ini terdiri dari dua komponen cairan atau lebih dalam komposisi tertentu dan tidak dapat dipisahkan dengan proses distilasi sederhana. Saat campuran azeotrop dididihkan, uap yang terbentuk memiliki komposisi yang sama dengan cairannya. Karena komposisinya yang tidak berubah oleh pendidihan, azeotrop dikenal dengan istilah campuran didih tetap (*constant boiling mixture*) (Kusuma dan Dwiatmoko, 2009).

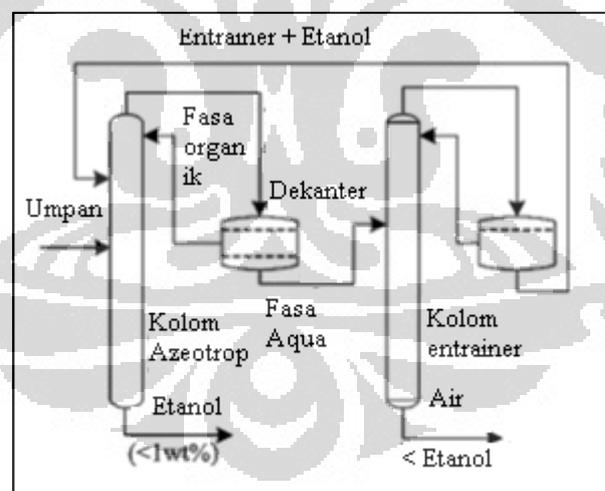
Setiap campuran azeotrop memiliki titik didih yang khas. Nilainya dapat lebih tinggi (azeotrop positif) ataupun lebih rendah (azeotrop negatif) dari titik didih komponen-komponennya. Campuran etanol-air dan IPA-air merupakan campuran azeotrop positif. Pada saat rasio etanol-air dalam campuran kurang lebih 95,6 %-b dan 4,4%-b maka akan terbentuk campuran azeotrop dengan titik didih azeotrop (78,15 °C) lebih rendah dari titik didih etanol (78,4 °C) dan air (100 °C) (Huang et al., 2008). Sedangkan IPA-air akan membentuk campuran azeotrop pada saat kadar IPA dalam campuran sebesar 85,3%-b. Proses dehidrasi alkohol secara konvensional yang umum digunakan adalah distilasi azeotrop, pemisahan kimiawi, distilasi vakum, distilasi ekstraktif, dan adsorpsi (Kusuma dan Dwiatmoko, 2009; Kumar et al., 2010).

2.1.2. Distilasi Azeotrop

Distilasi azeotrop dilakukan dengan penambahan komponen ketiga yang disebut dengan *entrainer*. Fungsi dari *entrainer* adalah untuk mempengaruhi volatilitas salah satu komponen dalam campuran. Ketika *entrainer* ditambahkan ke dalam campuran azeotrop maka akan terbentuk *ternary azeotrope* yang

kemudian didistilasi sehingga akan didapatkan salah satu komponen murninya. Senyawa-senyawa seperti benzena, n-pentana, sikloheksana, heksana, n-heptana, isooktana, aseton, dietil eter, dan polimer dapat digunakan sebagai komponen ketiga dalam proses dehidrasi alkohol (Kumar et al., 2010).

Gambar 2.1. menunjukkan skema proses pemisahan air dari etanol dengan distilasi azeotrop. Dari gambar terlihat bahwa sistem terdiri dari dua kolom distilasi. Umpan etanol yang berasal dari kolom distilasi sederhana akan dipekatkan konsentrasinya pada kolom dehidrasi (kolom azeotrop) dengan penambahan *entrainer*. Penambahan komponen ketiga menyebabkan etanol keluar sebagai produk bawah, sedangkan uap air, pelarut, dan sebagian kecil etanol keluar pada produk atas. Produk atas dialirkan ke dalam dekanter dan dipisahkan menjadi menjadi dua fasa yaitu: (i) fasa organik yang terdiri dari campuran etanol-*entrainer* dan (ii) fasa aqua yang terdiri dari campuran air-*entrainer*. Fasa organik akan direfluks kembali ke kolom azeotrop, sedangkan fasa aqua akan dialirkan ke kolom pemisahan *entrainer* (Huang et al., 2008).



Gambar 2.1. Skema proses dehidrasi etanol dengan distilasi azeotrop (Huang et al., 2008).

Kelemahan dari metode pemisahan ini adalah biaya modal dan konsumsi energi yang tinggi, serta ketergantungan pada bahan kimia beracun seperti benzena (karsinogenik) dan sikloheksana (mudah terbakar). Hal ini menyebabkan proses ini menjadi kurang kompetitif. Oleh karena itu, untuk mendapatkan etanol

dan IPA dengan kemurnian tinggi diperlukan alternatif pemisahan yang dapat melampaui titik azeotrop keduanya.

2.1.3. Pemisahan Kimiawi

Metode pemisahan kimiawi yang paling konvensional adalah penambahan kalsium oksida (CaO) pada campuran azeotrop alkohol-air. Saat ini, metode ini masih digunakan pada skala laboratorium. Bahan kimia CaO akan bereaksi kuat dengan air membentuk senyawa non-volatil, kalsium hidroksida (Ca(OH)₂). Karena Ca(OH)₂ tidak mudah larut dalam alkohol, maka dapat dengan mudah dipisahkan dari alkohol, baik dengan distilasi langsung atau dengan dekantasi diikuti dengan filtrasi.

2.1.4. Distilasi Vakum

Konsentrasi azeotrop alkohol dipengaruhi oleh tekanan yang digunakan. Semakin rendah tekanan, maka konsentrasi alkohol dalam campuran alkohol-air semakin tinggi. Contoh kasus untuk etanol, pada tekanan 11,5 kPa etanol dan air tidak membentuk campuran azeotrop, sehingga secara teori komponen etanol dan air dapat dipisahkan dengan distilasi sederhana.

Pada teknik ini, distilasi dilakukan dengan menggunakan dua kolom yang bekerja pada tekanan yang berbeda. Kolom distilasi pertama bekerja pada tekanan di bawah atmosferik (vakum) dan akan menghasilkan campuran etanol-air dengan kadar lebih dari 95,5 %. Penentuan tekanan dan temperatur operasi dilakukan berdasarkan kurva hubungan tekanan dan temperatur untuk mendapatkan suatu komponen murni dari azeotrop. Kemudian, produk hasil atas didistilasi lagi pada tekanan atmosferis, sehingga menyisakan etanol murni pada bagian bawah kolom. Namun, metode ini tidak direkomendasikan karena konversinya yang kecil sehingga kurang ekonomis.

2.1.5. Distilasi Ekstraktif Dengan Penambahan Garam Terlarut

Ketika suatu garam dilarutkan dalam pelarut, garam akan meningkatkan titik didih dari pelarut tersebut atau menurunkan volatilitas pelarut. Jika garam tersebut larut dalam salah satu komponen dalam campuran azeotrop, namun tidak larut pada yang lain, volatilitas komponen dimana garam mampu larut akan turun, sedangkan komponen yang lain tidak akan terpengaruh. Dengan cara ini, dapat dilakukan pemecahan azeotrop alkohol-air dengan melarutkan kalium asetat, kemudian dilakukan distilasi.

2.1.6. Proses Adsorpsi

Proses dehidrasi alkohol dengan adsorpsi menggunakan *molecular sieve* yang akan menyerap air secara selektif berdasarkan perbedaan ukuran molekul antara alkohol dan air. *Molecular sieve* adalah material yang memiliki ukuran pori yang spesifik dan seragam. Contoh dari *molecular sieve* yang biasa digunakan pada pemisahan campuran azeotrop alkohol-air adalah kristal aluminasilikat yang memiliki tiga dimensi dengan silika dan alumina tetrahedral yang saling terhubung atau sering disebut zeolit sintetis.

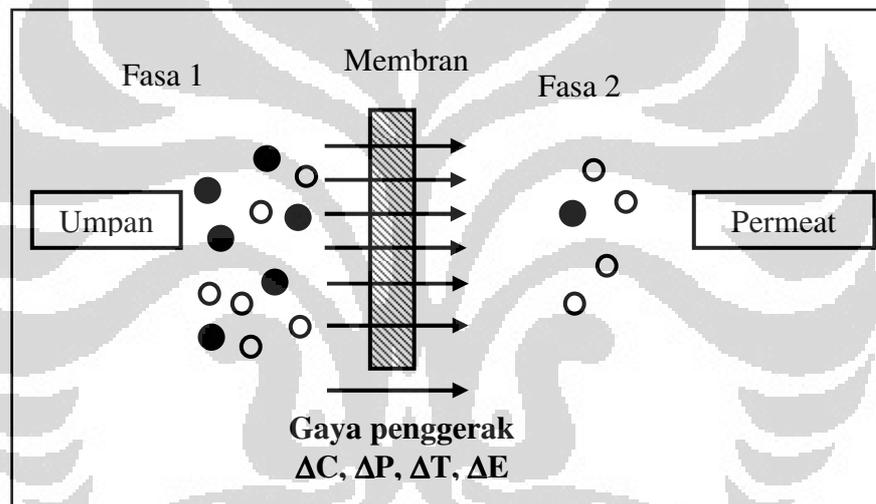
Proses adsorpsi dilakukan dengan menggunakan dua kolom yang bekerja bergantian dimana operasi berjalan di kolom yang satu dan regenerasi di kolom lainnya. Regenerasi dapat dilakukan dengan menjadikan kolom dalam kondisi vakum, dengan pemanasan, dan *purging* dengan gas inert. Air yang teradsorpsi dalam *molecular sieve* akan terdesorpsi kemudian terevaporasi. Uap hasil evaporasi kemudian di panaskan dalam *preheater* untuk kembali dimasukkan ke dalam kolom *stripper*.

2.2. Proses Pemisahan dengan Teknologi Membran

Penggunaan teknologi membran untuk pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air merupakan intensifikasi proses jika dibandingkan dengan proses distilasi sederhana maupun distilasi azeotrop. Membran secara umum didefinisikan sebagai suatu selaput tipis semi permeabel yang berfungsi sebagai rintangan (*barrier*) yang bersifat selektif di antara dua fasa, sehingga hanya komponen tertentu yang dapat menembus membran sedangkan komponen lainnya

akan tertahan (Mulder, 1991). Spesies utama yang ditolak oleh membran disebut *retentate* (retentat) atau *solute*, sementara spesies yang dilewati membran biasanya disebut *permeate* (permeat) atau *solvent*.

Kemampuan membran dalam pemisahan komponen suatu campuran dipengaruhi oleh sifat fisika dan kimia dari membran dan komponen tersebut. Proses pemisahan membran melibatkan umpan cair atau gas dan proses perpindahan di membran dapat terjadi dengan adanya gaya penggerak (*driving force*) seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2. Besar laju perpindahan komponen-komponen yang akan dipisahkan sebanding dengan besarnya gaya penggerak yang ada.



Gambar 2.2. Skema sistem dua fase yang dipisahkan oleh membran (Mulder, 1991)

2.3. Deskripsi Pervaporasi

Pervaporasi merupakan salah satu proses pemisahan dengan membran (permeasi) yang diikuti oleh proses evaporasi. Istilah pervaporasi pertama kali dikenalkan oleh Kober (1917) pada tahun 1917 untuk menggambarkan percobaan dialisis di laboratorium (Pangarkar, 2009). Kober menemukan fenomena bahwa cairan di dalam kantong koloid akan ter-evaporasi walaupun kantong dalam kondisi tertutup rapat. Melalui penelitian lebih lanjut, ia akhirnya menyimpulkan bahwa yang dikeluarkan oleh membran adalah uap dari larutan. Fenomena ini kemudian diterminologikan dengan pervaporasi.

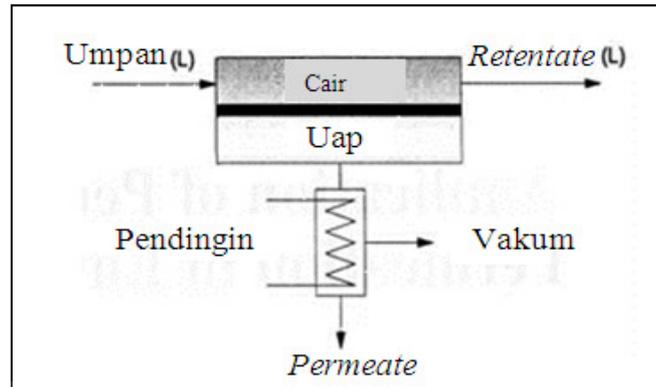
Aplikasi proses pervaporasi dalam bidang kimia diantaranya untuk: (1) proses dehidrasi campuran alkohol-air, organik-air, dan sistem air dan hidrokarbon terklorinasi; (2) pemisahan senyawa organik dari air; (3) pemisahan campuran organik-organik; (4) pemisahan produk yang rentan terhadap panas. Aplikasi lain yang cukup penting adalah untuk pemisahan campuran dengan titik didih berdekatan dan campuran azeotrop.

Kelebihan proses pervaporasi dibandingkan proses pemisahan konvensional (seperti distilasi, ekstraksi, dan lain-lain), adalah (Pangarkar, 2009):

- Biaya investasi dan operasi rendah.
- Dapat memisahkan campuran azeotrop
- Tidak membutuhkan zat aditif (*entrainer*) sehingga tidak ada kontaminasi.
- Konsumsi energi relatif lebih rendah sehingga lebih ekonomis
- Ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah.
- Mudah dioperasikan dan membutuhkan ruang lebih sedikit karena sistem lebih kompak.

Pervaporasi melibatkan: (1) umpan berupa komponen murni dan campuran homogen yang pada tekanan atmosfer memiliki fasa cair dan (2) permeat yang akan dipisahkan dalam bentuk uap sebagai akibat tekanan yang sangat rendah pada sisi permeat. Umpan yang akan dipisahkan dikontakkan dengan permukaan membran, sementara permeat dikeluarkan dalam bentuk uap pada sisi berlawanan menuju vakum lalu didinginkan (Kujawski, 2000). Sehingga, pada proses ini terjadi perubahan fasa komponen terpermeasi dari fasa cair ke fasa uap.

Gaya penggerak di dalam membran diperoleh dengan menurunkan aktivitas komponen yang dipisahkan pada bagian permeasi. Hal ini didapatkan dengan menurunkan tekanan parsial komponen sampai di bawah tekanan uap jenuhnya. Penurunan tekanan ini dapat dilakukan dengan menggunakan gas inert atau pompa vakum pada bagian permeat (Kujawski, 2000). Skema pemisahan dengan proses pervaporasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema pemisahan dengan proses pervaporasi (Kujawski, 2000)

2.4. Membran Pervaporasi

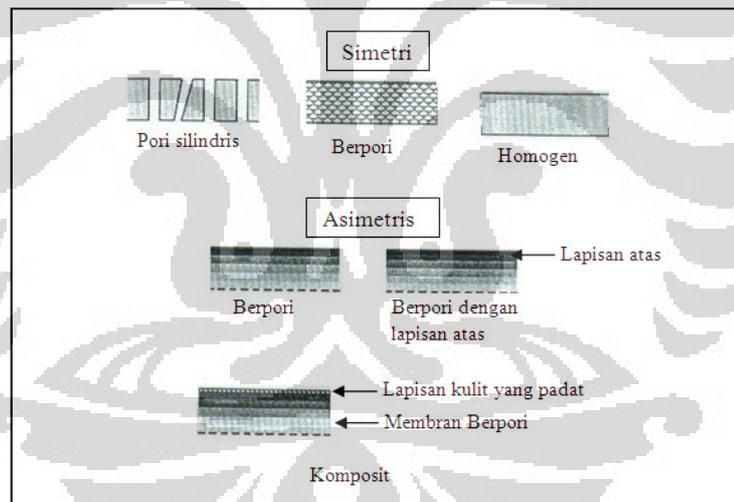
Salah satu parameter keberhasilan dalam proses pervaporasi campuran alkohol air adalah membran pervaporasi berkinerja tinggi. Pertimbangan pemilihan membran disesuaikan pada aplikasi penggunaan dan mekanisme perpindahan komponen dalam membran. Pada umumnya bahan dasar membran yang dapat digunakan sebagai membran pervaporasi adalah (a) membran organik yaitu membran yang terbuat dari polimer baik alami maupun sintesis, (b) membran anorganik yang terbuat dari bahan keramik atau zeolit, dan (c) membran komposit atau membran hibrid (Chapman et al., 2008; Wee, Tye, & Bhatia, 2008).

Membran polimer lebih banyak digunakan oleh industri daripada membran anorganik untuk memecah campuran azeotrop alkohol-air, karena proses pembuatannya lebih ekonomis dan sifatnya tidak rapuh. Karakteristik membran tersebut ditentukan oleh polimer penyusunnya. Polimer menggabungkan selektivitas penyerapan dan difusi yang tinggi, yang dipengaruhi oleh struktur inter- dan intra-molekulnya. Material ini biasanya tersusun atas rantai polimer yang kaku sehingga dapat berinteraksi ion-dipol atau membentuk ikatan hidrogen dengan air. Membran polimer hidrofilik akan bertindak sebagai saringan molekular yang tahan terhadap air dan lebih memilih menyerap molekul air dibandingkan molekul lain yang ada dalam aliran proses (Chapman et al., 2008).

Pada proses pervaporasi, interaksi antara polimer dengan umpan mempunyai peranan yang cukup penting pada tahap masuknya umpan ke permukaan membran. Cairan umpan yang memiliki afinitas tinggi terhadap

polimer, maka kelarutannya pada polimer akan semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi. Pemilihan polimer untuk membran pervaporasi juga harus mempertimbangkan kestabilan kimia, termal, dan efek permukaan seperti adsorpsi dan derajat kebasahan. Kemampuan mengembang (*swelling*) atau sorpsi polimer juga akan berpengaruh pada selektivitas dan fluks permeasi.

Membran polimer untuk pervaporasi jika dilihat berdasarkan strukturnya maka terbagi menjadi membran simetris, asimetris, dan komposit (Gambar 2.4.). Membran simetris merupakan membran dengan struktur lapisan atas sama dengan lapisan bawah (homogen) dengan ketebalan 10 – 200 μm . Membran ini dapat memiliki pori (*porous membrane*) atau tidak (*dense membrane*). Selektivitas membran tergantung pada ukuran porinya. Hambatan perpindahan massa pada membran tergantung pada ketebalannya. Jadi semakin tebal membran, semakin tinggi tahanannya dan laju permeasinya akan semakin rendah.



Gambar 2.4. Membran berdasarkan struktur morfologinya (Mulder, 1991)

Membran asimetrik merupakan membran yang memiliki dua lapisan yang saling berbeda. Lapisan atas berupa selaput tipis tidak berpori dengan ketebalan 0,1 – 0,5 μm dan aktif menyeleksi komponen dalam campuran. Sedangkan lapisan lainnya merupakan lapisan penyangga yang berpori dengan tebal 50 – 150 μm . Lapisan tipis merupakan tempat terjadinya pemisahan pada pervaporasi dan

berfungsi sebagai pembatas (*barrier*) aliran yang melalui membran, sedangkan lapisan penyangga berfungsi untuk kekuatan mekanik.

Membran komposit memiliki struktur seperti membran asimetri tetapi lapisan atas dan lapisan penyangganya terdiri dari polimer yang berbeda. Membran komposit dibuat dengan menuangkan polimer hidrofilik ke atas substrat berpori (Liu, Yu, Lee, & Lai, 2007). Karena tersusun dari jenis polimer yang berbeda maka setiap lapisan dapat dioptimasi secara terpisah. Membran komposit merupakan jenis membran pervaporasi yang banyak digunakan di industri kimia.

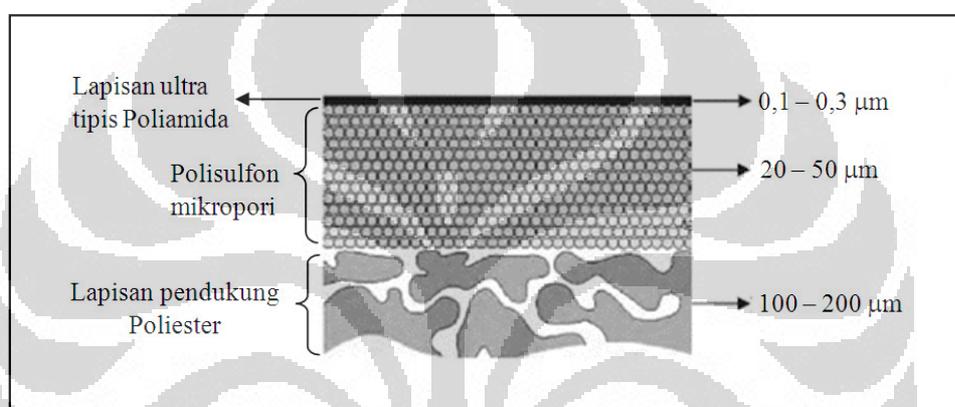
Pangarkar (2009) menyatakan bahwa membran pervaporasi yang ideal harus terdiri dari lapisan kulit yang sangat tipis tidak berpori (*dense layer*) yang didukung oleh lapisan penyangga (*support layer*) yang tidak berpori (Pangarkar, 2009). Pemilihan membran berstruktur asimetri ini bertujuan untuk memperoleh selektivitas yang tinggi dari membran tak berpori dan laju permeasi yang tinggi pada membran berpori. Lapisan penyangga menghasilkan kekuatan mekanik sedangkan lapisan atas berperan menghasilkan pemisahan yang efisien dari membran. Untuk mengatasi kekurangan dari membran polimer maka saat ini penelitian membran pervaporasi saat ini sudah berkembang dari polimer homogen ke membran komposit.

Komersialisasi dari proses pervaporasi diawali dengan pengembangan membran komposit asimetris terbuat dari poli(vinil)alkohol (PVA); yang terdiri dari lapisan penyangga polister yang berpori dan tidak ditenun (*non-woven*) serta dituangkan ke atas membran ultrafiltrasi (UF) berbahan dasar polisulfon (PS) atau poliakrilonitril (PAN). Salah satu contoh membran komposit komersial pertama untuk pervaporasi dikembangkan oleh *Gesellschaft fur Trenntechnik* (GFT) pada tahun 1980 (Baker, 2004). Membran ini terdiri dari lapisan tipis *crosslinked* PVA dan lapisan penyangga PAN.

2.5. Material Membran Komposit Film Tipis (*Thin Film Composite*/TFC) Poliamida/Polisulfon/Poliester.

Penelitian ini menggunakan membran Komposit Film Tipis (TFC) berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester yang dibuat oleh Woongjin Chemical Co. Membran TFC merupakan membran komposit yang terdiri dari tiga

lapisan (Dalwani, 2011). Modul yang digunakan biasanya berbentuk gulungan spiral (*spiral wound*). Komposisi kimia antara ketiga lapisan sangat berbeda dan inilah yang menjadi karakteristik utama dari membran TFC. Kelebihan membran ini dari membran asimetri biasa adalah masing-masing lapisan dapat dioptimasi berdasarkan ketahanan kimianya untuk mendapatkan sifat komposit yang diinginkan. Struktur membran TFC dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada penelitian kali ini, membran yang digunakan adalah membran TFC berbahan dasar polimer, yaitu poliamida/polisulfon/poliester.



Gambar 2.5. Struktur membran TFC (Dalwani, 2011)

2.5.1. Lapisan Tidak Berpori dalam Membran TFC

Lapisan atas merupakan lapisan sangat tipis (*ultra thin film*) dan tidak berpori dengan ketebalan 2000 Angstrom. Lapisan ini mampu melakukan pemisahan pada kedua sisinya sehingga berperan sebagai penghalang selektif dengan fluks dan kemampuan menahan partikel yang tinggi. Proses pemisahan bergantung pada perbedaan kemampuan difusi dan kelarutan, dimana sifat intrinsik dari bahan penyusun membran menentukan selektivitas dan permeabilitas membran.

Pada penelitian ini bahan dasar dari lapisan tipis tidak berpori pada membran TFC adalah senyawa diamina aromatik sederhana golongan poliamida. Penggunaan poliamida sebagai lapisan tidak berpori pada penelitian ini berdasarkan pada sifat hidrofilik yang dimilikinya sehingga dapat membentuk ikatan hidrogen dengan air (Semenova, Ohya, & Soontarapa, 1997). Membran

hidrofilik dirancang untuk dapat menarik molekul air ke permukaan membran dimana proses penguapan berlangsung. Molekul air tersebut akan berdifusi melalui membran dan menguap pada sisi permeat dengan bantuan vakum. Kemudian uap permeat tersebut dikondensasi oleh kondensor. Membran hidrofilik ini dapat digunakan untuk memecah campuran azeotrop (Baig, 2008).

Studi tentang penggunaan poliamida, sebagai material membran untuk PV sudah dilakukan sejak tahun 1990-an (Chan et al., 1998; Yamasaki et al., 1996). Poliamida memiliki sifat stabil pada suhu tinggi, sifat mekaniknya baik, dan tahan terhadap pelarut organik. Penelitian terdahulu melaporkan bahwa membran padat (*dense*) berbahan dasar poliamida menunjukkan tingkat selektivitas yang tinggi dalam proses dehidrasi alkohol pada berbagai kisaran konsentrasi air, akan tetapi nilai laju permealitasnya masih rendah (He et al., 2001). Untuk meningkatkan laju permealitas tanpa mengorbankan selektivitasnya, maka struktur morfologi membran harus diubah dari membran simetris yang tebal dan rapat menjadi struktur asimetris atau komposit (Huang et al., 2006). Hasil studi banding membran poliamida untuk proses PV campuran alkohol-air dengan membran komposit komersial PERVAP[®] 2201 dan PERVAP[®] 2510 dari bahan poli(vinil)alkohol (PVA)/Poliakrilonitril (PAN) yang diproduksi oleh Sulzer Chemtech serta membran lain menunjukkan bahwa membran poliamida memiliki kinerja yang lebih baik (Huang et al., 2008; Li et al., 2008; Liu et al., 2008).

2.5.2. Lapisan Berpori

Lapisan kedua merupakan sub lapisan berpori yang berfungsi sebagai lapisan penyangga bagi lapisan atas. Umumnya lapisan ini adalah membran asimetri untuk UF dan MF yang memiliki permukaan yang cukup halus untuk mencegah kerusakan lapisan tipis di atasnya. Pemilihan jenis membran mempengaruhi peristiwa yang terjadi dalam membran seperti stabilitas kimia, adsorpsi, dan pembersihan membran. Sub lapisan ini dibuat berdasarkan pertimbangan ukuran pori, ketahanan kompresi dan kekuatannya.

Pada penelitian ini bahan dasar dari material pendukung pada membran TFC adalah jenis polimer yang penting dalam UF yaitu polisulfon (PSf) dengan diameter pori kira-kira 150 Angstrom. Polimer ini memiliki stabilitas termal dan

kimia yang sangat baik yang dapat dilihat dari nilai Tg (T_g PSf = 190 °C. Bahan ini mempunyai ketahanan yang baik untuk tekanan operasi yang tinggi serta mempunyai sifat mekanik yang baik.

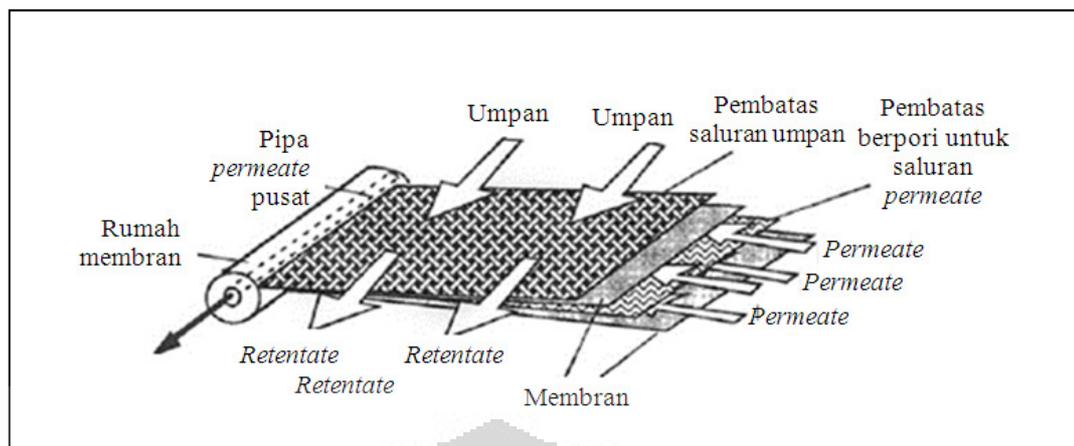
2.5.3. Lapisan Pendukung Poliester

Lapisan ketiga pada membran TFC merupakan bahan penguat yang tidak ditenun (*non-woven*) yang berfungsi sebagai kekuatan mekanik utama dari struktur komposit. Bahan dasar lapisan ini adalah poliester. Struktur poliester sangat *irregular* dan berpori sehingga tidak dapat langsung digunakan sebagai penyangga lapisan pertama, karenanya lapisan mikropori polisulfon dibuat di atas permukaan poliester.

2.6. Modul Membran Berbentuk Gulungan Spiral (*Spiral Wound*)

Modul adalah suatu unit terkecil dimana area membran dikemas. Modul merupakan pusat dari instalasi membran. Aliran umpan masuk ke dalam modul dengan komposisi dan laju alir tertentu. Umpan yang melewati membran akan terpisah berdasarkan ukuran dan bentuk molekulnya. Keluaran membran akan terbagi dua yaitu yang komponen yang tertahan disebut konsentrat atau retentat dan yang dapat menembus membran disebut permeat.

Modul *spiral-wound* merupakan sistem membran pelat dan bingkai yang terdiri dari 2 lembaran membran dan 2 pembatas (untuk saluran umpan dan saluran permeat) dan digulung pada sebuah pipa (Gambar 2.6.). Membran dan pembatas-saluran umpan direkatkan pada ketiga sisi tepi sehingga membentuk amplop. Umpan mengalir secara paralel pada sumbu silinder, sedangkan permeat mengalir mengelilingi spiral menuju ke pipa keluaran permeat. Untuk skala industri modul ini memiliki ukuran standar panjang 40 – 60 inci dan diameter 8 inci (Baker, 2004).



Gambar 2.6. Modul membran *spiral-wound* (Mulder, 1991)

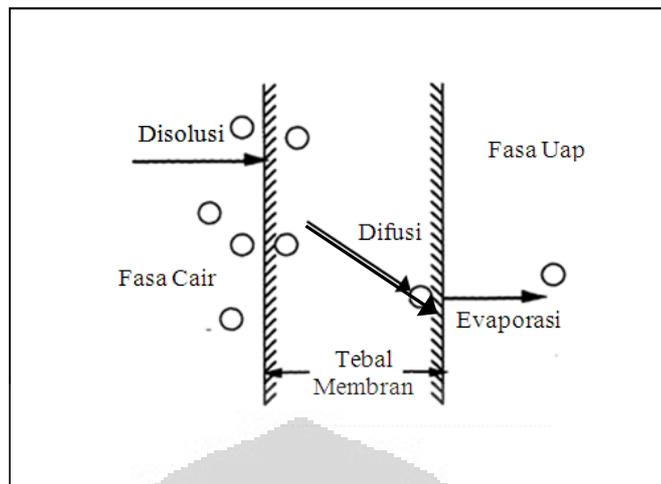
Modul ini umumnya merupakan material polimer komposit dan banyak digunakan untuk pemisahan cairan seperti pada proses RO dan UF. Kelebihan dari tipe membran datar adalah ketahanannya terhadap *fouling* dan mudah dibersihkan. Kelemahannya adalah pada kerapatan kemasannya yang kecil yaitu berkisar $300 - 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

2.7. Fenomena Perpindahan Dalam Proses Pervaporasi

Peristiwa perpindahan komponen melalui membran tidak berpori seperti halnya membran pervaporasi dapat dijelaskan melalui mekanisme pelarutan dan difusi (*solution-diffusion*) (Wijmans dan Baker, 1995). Mekanisme ini ditentukan oleh penyerapan (*sorption*) dan difusi yang selektif. Secara umum fenomena perpindahan dalam proses pervaporasi terjadi melalui tiga tahap (Feng, 1997; Pangarkar 2009; Wee et al., 2008) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.:

3. Adsorpsi selektif yang terjadi pada permukaan membran-umpan fasa cair.

Proses ini dipengaruhi oleh interaksi atau afinitas antara penetran dengan membran. Interaksi ini dinyatakan dengan sifat termodinamika yaitu parameter kelarutan (*solubility*). Tahap sorpsi merupakan tahap yang paling penting pada proses pervaporasi karena selanjutnya akan menentukan perpindahan yang selektif.



Gambar 2.7. Mekanisme solusi-difusi (Feng, 1997)

4. Difusi selektif melalui membran.

Tahap ini akan dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, dan berat molekul zat terlarut, serta ketersediaan ruang bebas inter/intra molekuler pada polimer. Laju difusi penetran melalui membran ditentukan oleh besarnya perbedaan potensial antara kedua sisi membran. Perbedaan potensial ini akan ditentukan oleh besarnya perbedaan tekanan parsial komponen-komponen campuran pada kedua sisi membran tersebut. Berdasarkan mekanisme ini, difusi melalui membran menjadi pembatas laju reaksi.

5. Desorpsi komponen ke fasa uap pada sisi permeat.

Desorpsi komponen pada sisi permeat berlangsung cepat dan non-selektif. Pada tahap ini penetran dikeluarkan dari membran dalam fasa uap. Perubahan fasa ini terjadi karena tekanan pada sisi permeat jauh lebih rendah daripada tekanan uap permeat. Difusivitas fasa uap pada tahap terakhir ini sangat tinggi sehingga tahap desorpsi menjadi paling tidak resisten dalam keseluruhan proses transportasi.

Model pelarutan dan difusi berasumsi bahwa tekanan di dalam membran seragam dan perbedaan potensial kimia pada mekanisme ini hanya digambarkan oleh perbedaan konsentrasi (Wee et al., 2008). Pada saat keadaan tunak, fenomena perpindahan pada proses penguapan akan mengikuti Hukum Ficks pada persamaan 2.1.

$$J_i = -D_i \left(\frac{dC_i}{dx} \right) \quad (2.1.)$$

dengan

- J_i = Fluks massa komponen i (kg/m².jam)
 D_i = koefisien difusifitas komponen i (m²/jam)
 C_i = konsentrasi komponen i (kg/m³)
 x = tebal membran (m)

Pada proses pervaporasi, konsentrasi cairan dapat dinyatakan sebagai tekanan parsial komponen sesuai dengan Hukum Henry seperti pada persamaan 2.2.

$$C_i = S_i P_i \quad (2.2.)$$

dengan

- S_i = koefisien kelarutan komponen i di dalam membran (cm³(STP)/cm³.bar).

Substitusi persamaan 2.3 ke persamaan 2.2 akan menghasilkan persamaan 2.4.

$$J_i = \frac{D_i S_i (P_{o,i} - P_{x,i})}{x} \quad (2.4.)$$

Hasil perkalian antara koefisien difusifitas (D) dan koefisien kelarutan (S) merupakan koefisien Permeabilitas (P).

$$P = S \times D \quad (2.5.)$$

P merupakan parameter perpindahan massa yang melewati membran. S merupakan parameter termodinamika yang menyatakan banyaknya penetran yang diserap oleh membran pada kesetimbangan. D merupakan parameter kinetika yang menyatakan seberapa cepat perpindahan penetran di dalam membran.

2.6. Parameter Proses Pervaporasi

Parameter-parameter yang mempengaruhi proses pemisahan dengan pervaporasi diantaranya adalah konsentrasi umpan, temperatur umpan, tekanan pada sisi permeat, dan jenis membran (Peng, Vane, & Liu, 2003).

1. Konsentrasi umpan

Perubahan konsentrasi umpan secara langsung berpengaruh terhadap fenomena sorpsi pada *interface* membran. Karakteristik perpindahan massa penetran di dalam membran sangat bergantung pada konsentrasi umpan karena difusi komponen penetran dipengaruhi oleh konsentrasi umpan. Aktivitas komponen dalam campuran akan berubah dengan berubahnya konsentrasi, sehingga akan mempengaruhi fluks massa dan selektivitas membran.

2. Temperatur umpan

Pengaruh temperatur terhadap laju permeasi ditunjukkan oleh persamaan Arrhenius berikut ini:

$$J = J_0 \exp(-E_p/RT) \quad (2.6)$$

dengan

J = Fluks permeasi (kg/m².jam)

J_0 = Faktor pre-eksponensial fluks permeasi (kg/m².jam)

E_p = Energi aktivasi permeasi (kJ/mol)

R = Konstanta umum gas (8,3144 x 10⁻³ kJ/mol.K)

T = Temperatur operasi (K)

Kenaikan temperatur akan menyebabkan kenaikan laju permeasi dan menurunkan selektivitas membran.

3. Tekanan pada sisi permeat

Gaya penggerak dalam pervaporasi adalah adanya perbedaan tekanan yang dihasilkan dengan menggunakan pompa vakum. Penambahan tekanan pada sisi permeat akan mengurangi gaya penggerak sehingga menurunkan fluks permeasi.

4. Material membran pervaporasi

Jenis material membran yang digunakan pada proses pervaporasi juga dapat mempengaruhi laju permeasi dan selektivitas. Ada beberapa jenis membran yang dapat digunakan untuk proses pervaporasi. Pemilihan membran

tergantung pada sifat kimia dari campuran larutan yang akan dipisahkan, juga kestabilan membran pada kondisi operasi. Sifat yang mempengaruhi laju permeasi diantaranya adalah sifat fisika dan sifat kimia.

Sifat fisik membran yang berpengaruh pada laju permeasi adalah ukuran pori. Semakin besar ukuran pori maka laju permeasinya makin besar.

Sifat kimia membran yang banyak berpengaruh pada laju permeasi adalah sifat hidrofilisitas, kristalinitas, dan polaritas. Sifat hidrofilisitas merupakan ukuran kemampuan untuk menyerap air. Sifat ini terutama berpengaruh pada mekanisme sorpsi dan difusi. Laju permeasi akan meningkat seiring dengan kenaikan sifat hidrofilisitas karena sorpsi yang meningkat karena adanya penyerapan air akan mengakibatkan pembengkakan membran.

Kristalinitas ditentukan pada saat pembentukan membran, makin besar derajat kristalinitas maka permeabilitas semakin rendah.

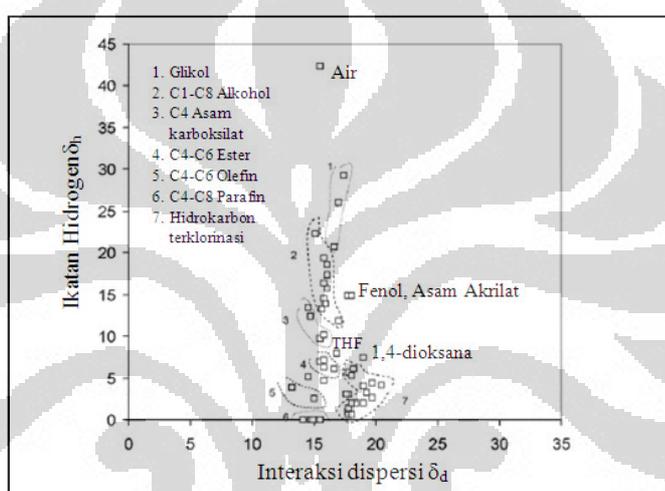
Sifat polaritas membran akan mempengaruhi interaksi penetrasi dengan membran. Jika kepolaran membran dan penetrasi hampir sama, maka permeabilitas tinggi karena ada gaya tarik antara keduanya.

2.7. Pervaporasi berdasarkan parameter kelarutan Hansen dan diameter kinetik.

Parameter kelarutan Hansen merupakan kerapatan energi kohesif, yang terdiri dari tiga komponen yaitu δ_h : kontribusi dari interaksi ikatan hidrogen; δ_p : kontribusi dari interaksi polar; dan δ_d : kontribusi dari interaksi dispersi. Sehingga parameter kelarutan dapat digambarkan sebagai vektor dari koordinat tiga dimensi (Shao dan Huang, 2007). Untuk campuran biner komponen A dan B, jarak dari ujung A ke B (ΔAB) merupakan indeks yang mengukur perbedaan dua spesi yang digambarkan sebagai vektor A dan B. Dengan memilih membran yang sesuai, faktor pemisahan dari dua spesi yang diperoleh sampai taraf tertentu dapat sebanding dengan jarak karakteristik. Penelitian dari parameter kelarutan ini menunjukkan bahwa untuk semua pelarut selain air menunjukkan bahwa komponen interaksi polar δ_p selalu lebih rendah daripada kontribusi dari interaksi dispersi δ_d . Oleh karena itu, parameter kelarutan dari semua pelarut digambarkan

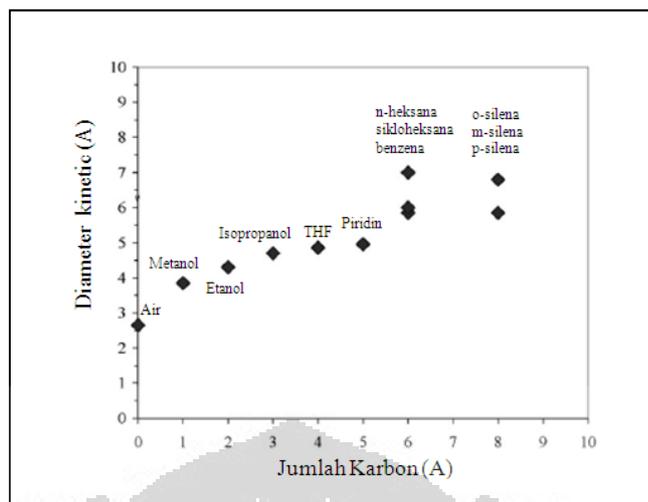
berdasarkan kontribusi δ_h dan δ_d (Gambar 2.7.). Perlakuan ini memungkinkan untuk membedakan pelarut menjadi beberapa golongan berdasarkan struktur kimia atau gugus fungsi.

Gambar 2.7. menunjukkan bahwa air memiliki ikatan hidrogen paling kuat diikuti oleh glikol, alkohol, asam, ester, hidrokarbon terklorinasi, dan lain-lain. Semakin besar perbedaan δ_h air dan pelarut maka proses dehidrasi pelarut dan pemisahan zat organik, khususnya hidrokarbon dan hidrokarbon terklorinasi dari air, mungkin dilakukan dengan pervaporasi.

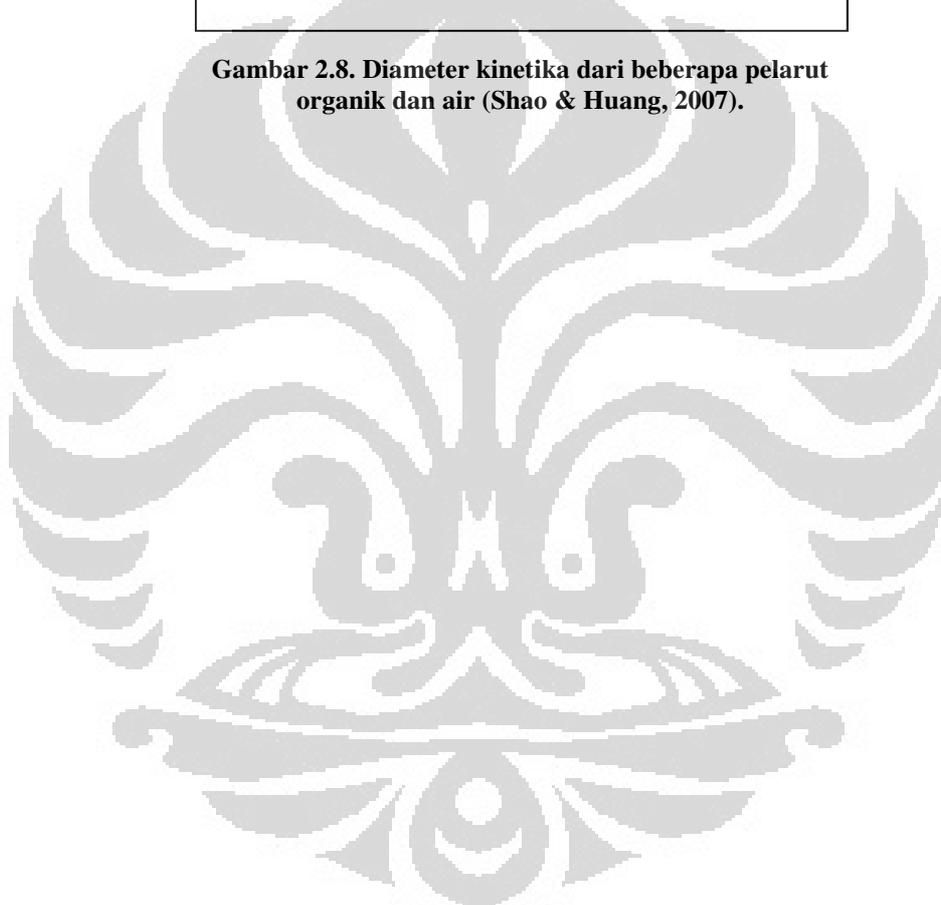


Gambar 2.8. Penggolongan bahan organik berdasarkan dua parameter kelarutan (Shao & Huang, 2007)

Interaksi dispersi dari zat organik nilainya sebanding dan sebagian besar berada di kisaran 15 – 20 MPa. Perbedaan interaksi dispersi zat organik dalam satu golongan semakin kecil. Oleh karena itu, pemisahan spesi-spesi ini terjadi diluar jangkauan kemampuan diskriminasi termodinamika membran. Koros (1995) dalam Shao dan Huang (2007) berpendapat bahwa pada situasi ini pemisahan dipengaruhi oleh respon kinetika dari membran terhadap perbedaan bentuk dan ukuran molekul pelarut (Shao dan Huang, 2007). Diameter kinetika dari beberapa pelarut ditunjukkan pada Gambar 2.8. Berdasarkan gambar dapat terlihat bahwa diameter kinetika air ($2,96 \text{ \AA}$) lebih kecil jika dibandingkan dengan diameter kinetika Etanol ($4,3 \text{ \AA}$) dan IPA ($4,7 \text{ \AA}$).



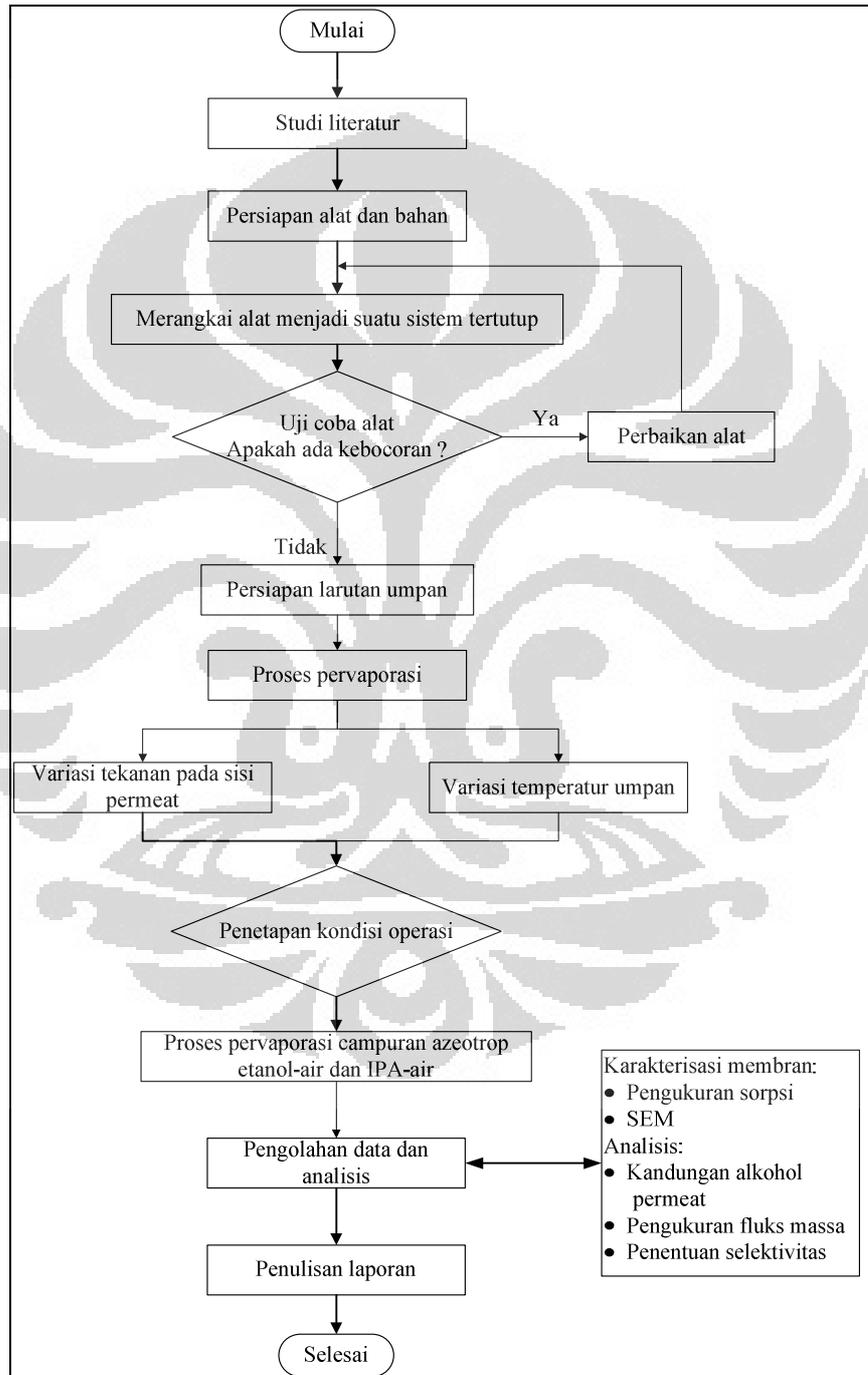
Gambar 2.8. Diameter kinetika dari beberapa pelarut organik dan air (Shao & Huang, 2007).



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Skema rancangan penelitian dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Proses Intensifikasi Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia - Depok dalam beberapa tahapan. Tahap pertama adalah studi literatur untuk mencari referensi mengenai pervaporasi, membran pervaporasi, membran film tipis gabungan (*Thin Film Composite/TFC*) berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester, dan prinsip pemisahan campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air dengan proses pervaporasi baik dari buku, jurnal, maupun artikel. Tahap kedua adalah tahap persiapan alat dan bahan yang terdiri dari alat untuk persiapan larutan umpan, proses pervaporasi, karakterisasi membran, dan analisis. Setiap komponen alat pervaporasi kemudian disusun menjadi suatu rangkaian tertutup yang melewati modul membran TFC. Selanjutnya untuk mengetahui kelayakan dari alat yang sudah disusun maka dilakukan uji kinerja alat. Uji awal ini dilakukan untuk memastikan tidak ada kebocoran pada alat. Tahap selanjutnya adalah persiapan larutan umpan etanol-air dan IPA-air sintetis.

Proses pervaporasi pendahuluan dilakukan dengan variasi temperatur umpan dan tekanan pada sisi permeal untuk mendapatkan kondisi operasi yang optimum. Kemudian kondisi tersebut diaplikasikan untuk pemurnian campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air. Setelah percobaan pervaporasi dilakukan karakterisasi membran yang terdiri dari pengukuran sorpsi (derajat *swelling*) dan uji Scanning Electron Microscopy (SEM). Kandungan alkohol umpan dan permeal dianalisis dengan alkoholmeter. Sedangkan kinerja membran untuk pemurnian campuran etanol-air dan IPA-air dengan metode pervaporasi dinilai berdasarkan fluks massa permeal dan selektivitas.

3.2. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Proses Intensifikasi Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1. Bahan Penelitian

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Etanol absolut p.a
- Etanol teknis.
- Isopropil alkohol absolut p.a.
- Isopropil alkohol teknis
- Aquades

3.4.2. Pembagian Alat penelitian

Alat-alat yang diperlukan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

a. Alat untuk sistem pervaporasi.

Alat-alat yang digunakan untuk pervaporasi diantaranya adalah tangki umpan, pompa sirkulasi, membran TFC, kondensor, erlenmeyer 500 mL, *pressure gauge*, penangas air, termometer, pompa vakum, *refrigerated circulator*, *gate valve*, *check valve*, konektor membran, selang silikon, dan selang polimer.

b. Alat untuk preparasi larutan umpan

Alat-alat yang digunakan untuk preparasi umpan diantaranya timbangan dan gelas piala.

c. Alat untuk karakterisasi membran.

Cawan petri, oven, neraca analitik, dan SEM.

d. Alat untuk analisis hasil pervaporasi.

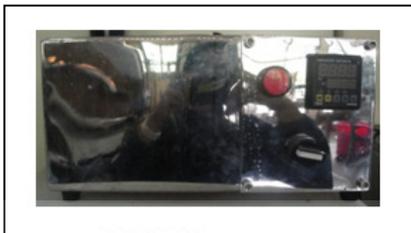
Gelas ukur, botol sampel, termometer, dan alkoholmeter.

3.4. Deskripsi Alat Penelitian

3.4.1. Sistem Pervaporasi

Alat-alat yang digunakan dalam rangkaian sistem pervaporasi diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Penangas air, merupakan alat untuk menaikkan temperatur campuran etanol-air dan IPA air sebelum kontak dengan membran (Gambar 3.2.).



Gambar 3.2. Penangas air

- b. Tangki umpan, adalah wadah plastik dengan kapasitas 3,5 L. Pada bagian tutupnya diberi lubang untuk termometer. Gambar tangki umpan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Tangki Umpan

- c. Pompa sirkulasi, seperti pada Gambar 3.4. adalah alat yang berfungsi untuk mengalirkan umpan etanol-air dan IPA-air ke dalam membran. Spesifikasi pompa tersebut adalah sebagai berikut:

Tipe	:	Pompa diafragma
Flow	:	0,5 GPM
Voltage	:	24 V DC
Ampere	:	0,6 A
P/F	:	80 PSI/0,75 LPM



Gambar 3.4. Pompa Sirkulasi

- d. *Pressure gauge* (PG), merupakan alat untuk mengukur tekanan pompa sirkulasi (0 – 80 psi) dan tekanan pompa vakum (0 – 76 cmHg (a)). Gambar alat ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. (a) Pressure Gauge; (b) Vacuum Gauge

- e. Membran pervaporasi, sebagai komponen utama dalam sistem pervaporasi. Membran yang digunakan adalah jenis TFC tipe RE70-1812-50GPD dengan bahan dasar poliamida/polisulfon/poliester. Membran ini merupakan membran komersial untuk proses osmosis balik (Gambar 3.6). Modul membran berbentuk gulungan spiral (*spiral wound*) dengan ukuran pori sebesar 3 – 5 Å dan bermuatan negatif (dapat menarik ion-ion negatif seperti air). Membran ini biasa digunakan dengan batasan operasi sebagai berikut :
- Tekanan operasi maksimum : 125 psi (0,86 Mpa).
 - Laju alir umpan maksimum : 2 gpm (0,45 m³/hr).
 - Suhu operasi maksimum : 113 °F (45 °C)
 - Batasan pH : 3 – 10.



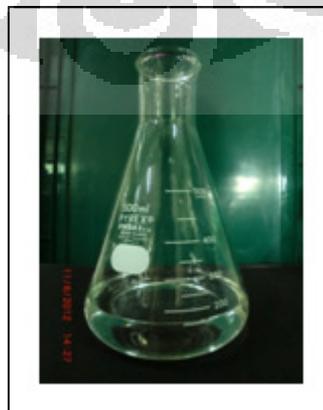
Gambar 3.6. Membran osmosis balik berbahan dasar poliamida

- f. Kondensor, adalah alat yang berfungsi untuk mengkodensasi produk uap hasil pemisahan di membran. Alat ini memiliki dimensi panjang 30 cm dan diameter 5 cm (Gambar 3.7).



Gambar 3.7. Kondensor

- g. Erlenmeyer 500 mL, seperti pada Gambar 3.8. berfungsi sebagai wadah penampung permeat air hasil kondensasi. Permeat yang ditampung dalam wadah ini sudah siap untuk dianalisa kemurnian dan fluks massanya.



Gambar 3.8. Erlenmeyer 500 mL

- h. Pompa Vakum, merupakan alat untuk menghasilkan gaya penggerak dalam proses pervinginasi (Gambar 3.9.). Pompa ini dihubungkan dengan bagian permeal yaitu kondensor sehingga tekanan uap di sisi permeal akan lebih rendah dibandingkan dengan tekanan parsial umpan. Berikut adalah spesifikasinya:

Tipe	:	1 stage vacuum pump
Model	:	VE 115
Free Air Displacement	:	1,5 CFM
Vakum	:	5 Pa
Voltase	:	220 V/50 Hz
Motor HP	:	1/4 HP
Kapasitas oli	:	310 mL



Gambar 3.9. Pompa Vakum

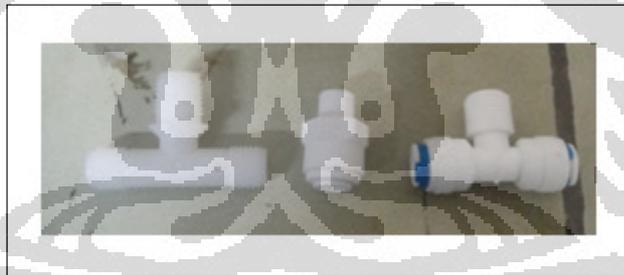
- i. *Refrigerated circulator* (Termosirkulator), merupakan alat yang berfungsi untuk mendinginkan air sirkulasi pada kondensor (Gambar 3.10). Spesifikasi alat pendingin ini adalah sebagai berikut:

Model	:	LCB-R08
Rentang temperatur	:	-30 – 90 °C
Voltase	:	220 V/50 Hz
Daya pendinginan	:	1/4 HP
Kapasitas	:	8 L



Gambar 3.10. Refrigerated circulator

- j. Konektor membran dan nipple, merupakan alat yang terbuat dari plastik dengan diameter $\frac{1}{4}$ inci sesuai dengan ukuran selang membran yang digunakan (Gambar 3.11). Fungsi kedua alat ini adalah sebagai penghubung antara membran dengan *pressure gauge* dan kondensor. Nipple yang digunakan berbentuk T dan dilengkapi dengan ulir pada tiga sisinya.



Gambar 3.11. Konektor membran dan nipple

- k. Selang silikon dan selang polikarbonat (Gambar 3.12.)



Gambar 3.12. Selang silikon dan polimer

1. *Valve* yang digunakan pada penelitian ini ada dua yaitu *check valve* (Gambar 3.13a.) dan *gate valve* (Gambar 3.13b.).

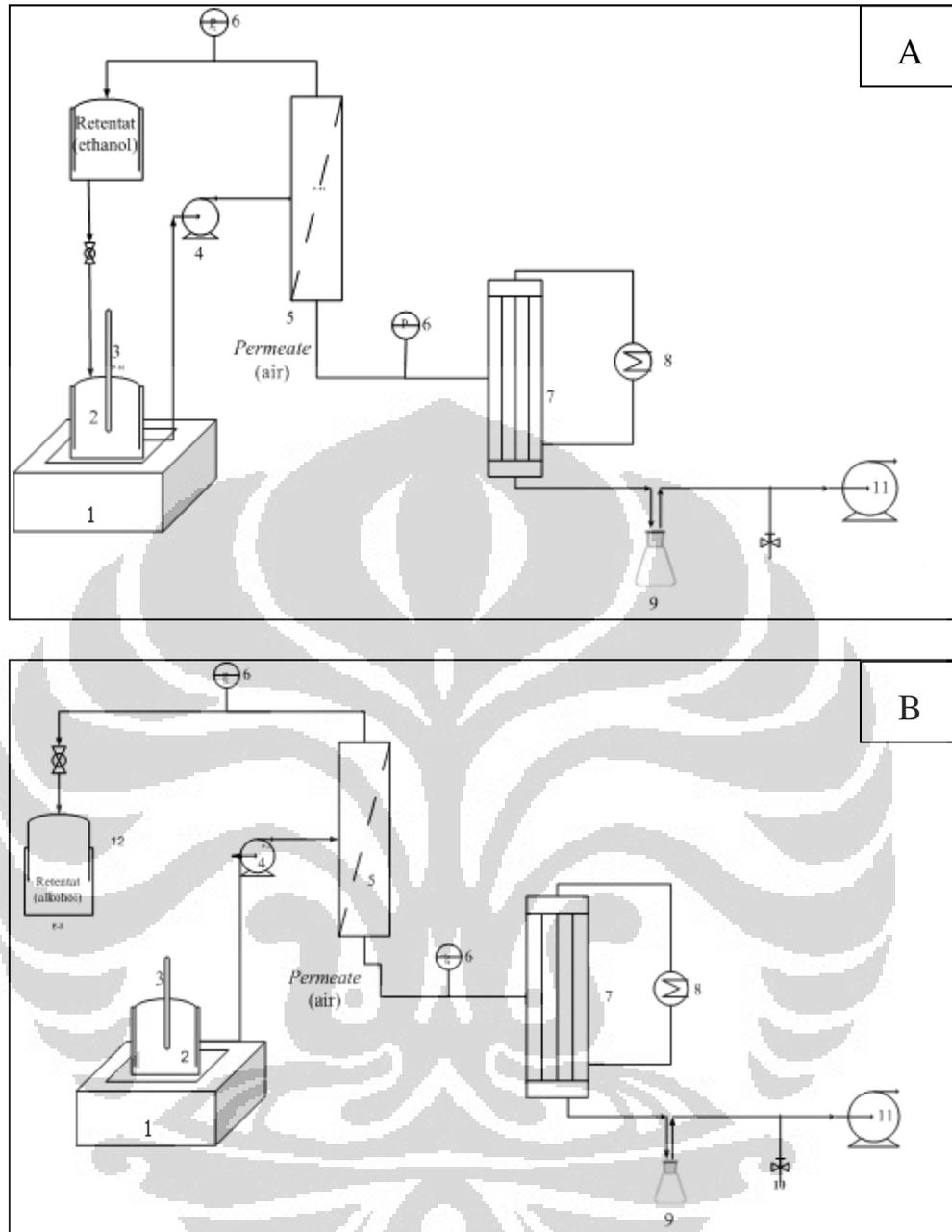


Gambar 3.13. (a) *check valve*; (b) *gate valve*

Alat-alat utama yang digunakan dalam sistem pervaporasi tersebut selanjutnya dirangkai menjadi suatu rangkaian siklus umpan yang melewati modul membran TFC. Adapun skema alat dan proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air masing-masing ditunjukkan pada gambar 3.15a. dan 3.15b.

Pada sistem pervaporasi etanol-air (A), umpan yang mengandung campuran etanol-air akan dialirkan oleh pompa sirkulasi (4) dari wadah umpan (1) melalui membran (5). Aliran yang tertolak membran (retentat) akan disirkulasikan kembali ke wadah umpan. Permeat yang telah melewati membran akan dikondensasikan oleh kondensor (7). Gaya penggerak pada percobaan ini dihasilkan oleh pompa vakum (12) pada sisi permeat. Temperatur umpan diatur oleh thermostat pada penangas air (1) dan nilai suhu pada umpan dibaca oleh termometer (3). Tekanan pada sisi permeat diatur oleh *gate valve* (11).

Pada sistem pervaporasi IPA-air (B), umpan IPA-air, akan dialirkan oleh pompa sirkulasi (4) dari wadah umpan (1) melalui membran (5). Akan tetapi, aliran yang tertolak membran (retentat) tidak disirkulasikan kembali ke wadah umpan melainkan di tampung pada tangki retentat (12). Selanjutnya proses sama dengan sistem A.



Keterangan :

- | | |
|--------------------|--|
| 1. Penangas Air | 8. Termosirkulator |
| 2. Tangki umpan | 9. Erlenmeyer 500 mL untuk wadah permeat |
| 3. Termometer | 10. Gate valve |
| 4. Pompa sirkulasi | 11. Pompa vakum |
| 5. Membran TFC | 12. Tangki retentat |
| 6. Pressure gauge | |
| 7. Kondensor | |

Gambar 3.14. Skema proses dan peralatan pervaporasi untuk pemurnian campuran azeotrop: (A) etanol-air dan (B) IPA-air

3.4.2. Alat Analisis Hasil Pervaporasi

Alat yang digunakan untuk analisis hasil pervaporasi adalah alkoholmeter. Alat ini berfungsi untuk menentukan kadar alkohol (0 – 100%) dalam air, dimana presentase alkohol yang terukur terdapat dalam % volume dan % berat (Gambar 3.16). Alat ini hanya dapat digunakan untuk campuran yang terdiri dari alkohol murni dan air. Alat ini tidak dapat digunakan untuk mengukur kadar alkohol bila terdapat gula, karbohidrat atau bahan lain terdapat dalam air.



Gambar 3.15. Alkoholmeter

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Persiapan Larutan Umpan

Larutan umpan yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran etanol-air dan IPA-air sintetis yang dibuat dari cairan teknis. Adapun persiapan larutan umpan dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Timbang cairan etanol teknis (96%) dengan neraca analitik dan campurkan dengan aquades dalam gelas piala sehingga diperoleh konsentrasi etanol 50 %-b.
- Masukkan campuran etanol air ke dalam tangki umpan.
- Cara yang sama dilakukan untuk membuat konsentrasi umpan 85 dan 95 %-b.

3.3.2. Proses Pervaporasi

Proses pervaporasi dilakukan untuk umpan *batch* dalam rangkaian alat yang disusun sesuai Gambar 3.16, dengan menggunakan larutan umpan (i) etanol-air dan (ii) isopropil alkohol. Proses pervaporasi dibagi menjadi dua yaitu:

a. Penentuan kondisi operasi

Pada tahapan ini, dilakukan percobaan pervaporasi untuk menentukan kondisi operasi yang akan digunakan dalam pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air. Percobaan dilakukan dengan komposisi umpan 45 % pada berbagai temperatur umpan dan tekanan sisi permeat.

Prosedur proses pervaporasi adalah sebagai berikut:

- Siapkan alat dan bahan yang dibutuhkan.
- Periksa sistem peralatan apakah mengalami kebocoran saat kondisi vakum pada sisi permeat.
- Isi tangki umpan dengan umpan campuran etanol-air atau IPA-air 45 %-b sampai volumenya 3,4 L.
- Masukkan tangki umpan ke dalam penangas air.
- Panaskan umpan dalam penangas air dengan variasi suhu 35, 39, dan 44 °C.
- Setelah suhu umpan stabil, alirkan umpan ke dalam modul membran dengan menyalakan pompa sirkulasi pada tekanan 30 PSI untuk umpan etanol-air dan 80 PSI untuk umpan IPA-air.
- Atur tekanan vakum pada sisi permeat dengan variasi 260, 510, dan 660 mmHg-a.
- Kondensasi produk uap pada kondensor sehingga diperoleh produk dalam fasa cair.
- Tampung produk cair (permeat) dalam erlenmeyer setiap 10 menit dan 30 menit setelah pervaporasi berlangsung masing-masing selama 30 menit untuk campuran etanol-air dan 90 menit untuk campuran IPA-air.
- Timbang permeat sampai kondisi tunak atau berat konstan dan ukur volumenya.
- Analisis komposisi alkohol pada permeat dengan alkoholmeter.

b. Pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air

Pada tahap ini dilakukan percobaan pervaporasi dengan variasi komposisi umpan. Prosedur proses pervaporasi pada tahap ini adalah sebagai berikut:

- Siapkan alat dan bahan yang dibutuhkan.
- Periksa sistem peralatan apakah mengalami kebocoran saat kondisi vakum pada sisi permeat.
- Isi tangki umpan dengan umpan azeotrop sampai volumenya 3,4 L.
- Masukkan tangki umpan ke dalam penangas air.
- Panaskan umpan etanol-air dalam penangas air pada temperatur 39 °C dan umpan IPA-air pada 44 °C.
- Setelah suhu umpan stabil, alirkan umpan ke dalam modul membran dengan menyalakan pompa sirkulasi pada tekanan 30 PSI untuk umpan etanol-air dan 80 PSI untuk umpan IPA-air.
- Atur tekanan vakum pada sisi permeat untuk campuran etanol-air pada kondisi 510 mmHg-a dan campuran IPA-air pada kondisi 260 mmHg-a.
- Kondensasi produk uap pada kondensor sehingga diperoleh produk dalam fasa cair.
- Lakukan proses pervaporasi campuran etanol-air dan IPA-air selama 3 jam.
- Tampung produk cair (permeat) dalam erlenmeyer setiap 60 menit.
- Timbang permeat sampai kondisi tunak atau berat konstan dan ukur volumenya.
- Analisis komposisi alkohol pada permeat dengan alkoholmeter.

3.3.3. Pengujian kadar alkohol

Analisis meliputi pengukuran kadar alkohol permeat dengan menggunakan alkoholmeter. Prosedur pengukuran kadar alkohol dengan alat ini adalah sebagai berikut:

- Kalibrasi alkoholmeter dengan membuat larutan standar etanol dan IPA konsentrasi 1 – 100 %-b (dapat dilihat pada Lampiran A).

- Tuangkan sampel kedalam gelas ukur dengan dengan diameter sekurang-kurangnya 1,5 – 2 cm lebih lebar dari diameter alat.
- Lakukan pengukuran pada kondisi suhu 20 °C.
- Celupkan alat kedalam sampel. Apabila pada larutan terdapat alkohol, maka alat ini akan mengembang.
- Baca nilai kadar alkohol dari angka yang terlihat tepat di bawah meniskus permukaan larutan.
- Catat nilai hasil pembacaan
- Berhati-hati dalam penggunaannya karena alkoholmeter mudah pecah dan keringkan kembali setelah digunakan.

3.3.4. Pengujian sorpsi/Derajat *Swelling* membran TFC

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui ketahanan membran terhadap air, etanol, dan IPA pada berbagai konsentrasi larutan perendam dan suhu perendaman. Selain itu data ini memberikan data mengenai mudah tidaknya penyerapan air oleh membran. Prosedur pengujian sorpsi adalah sebagai berikut:

- Timbang berat kering membran.
- Celupkan lembaran membran ke dalam cawan petri yang telah berisi larutan perendam dengan variasi air, etanol dan IPA.
- Lakukan perendaman selama 24 jam pada temperatur ruang.
- Angkat membran dan seka dengan tisu untuk menghilangkan cairan yang menempel pada permukaan membran, kemudian timbang membran basah tersebut.

3.3.5. Pengujian SEM membran TFC

Morfologi permukaan dan penampang melintang membran akan diamati dengan menggunakan alat *scanning electrone microscopy* (SEM JEOL JSM 6510) dengan perbesaran 50, 100, dan 500 kali. Uji SEM dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi - Fakultas Teknik UI.

3.4. Pengolahan Data Hasil Penelitian

Data-data yang diambil dalam penelitian diolah sehingga diketahui nilai fluks massa permeat, selektivitas membran, indeks pervaporasi (*pervaporation separation index*), dan derajat *swelling* membran.

3.4.1. Fluks Massa Permeat

Fluks massa adalah jumlah penetran yang dapat melewati membran permeabel per satuan luas penampang per satuan waktu. Data massa permeat diperoleh dari pengukuran selama selang waktu tertentu. Fluks massa dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$J = \frac{1}{A} \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (3.1)$$

dengan :

J = fluks ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{jam}$)

A = luas penampang membran (m^2)

t = waktu pengambilan sampel (jam)

Nilai dm/dt diperoleh dari kemiringan (*slope*) kurva hubungan massa permeat (m) terhadap waktu (t) pervaporasi pada keadaan tunak.

3.4.2. Faktor Pemisahan (Selektivitas)

Selektivitas membran dapat diperoleh dengan alkoholmeter atau uji kromatografi gas. Sampel yang diuji adalah komposisi umpan alkohol-air yang digunakan dan komposisi permeat yang diperoleh pada akhir pervaporasi. Parameter yang diukur adalah faktor pemisahan dan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\alpha_{A/B} = \frac{(y_A/y_B)_{\text{permeat}}}{(x_A/x_B)_{\text{umpan}}} \quad (3.2)$$

dengan :

y_A = Fraksi komponen uap air

y_B = Fraksi komponen uap etanol

x_A = Fraksi komponen cairan air

x_B = Fraksi komponen cairan etanol

Nilai selektivitas α lebih besar dari satu. Jika laju permeasi komponen A yang melalui membran lebih besar dari komponen B, maka faktor pemisahan dituliskan sebagai $\alpha_{A/B}$. Sebaliknya jika laju permeasi komponen B lebih besar, maka faktor separasi ditulis sebagai $\alpha_{B/A}$. Jika $\alpha_{A/B} = \alpha_{B/A} = 1$, berarti tidak terjadi pemisahan oleh membran.

3.4.3. Indeks Pemisahan Pervaporasi (*Pervaporation Separation Index/PSI*)

Indeks Pemisahan Pervaporasi (PSI) merupakan parameter gabungan yang digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja membran secara keseluruhan dalam proses pervaporasi. PSI dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$PSI = J \times \alpha \quad (3.6)$$

dengan,

PSI = Indeks Pemisahan Pervaporasi

J = Fluks Permeat ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$)

α = Selektivitas

Untuk kasus pemisahan dengan menggunakan membran berpori, maka nilai PSI tetap bisa tinggi walaupun tidak terjadi pemisahan ($\alpha = 1$), karena tergantung nilai fluksnya. Oleh karena itu, pada kasus ini nilai PSI didefinisikan kembali dengan persamaan sebagai berikut:

$$PSI = J(\alpha - 1) \quad (3.7)$$

3.4.4. Permeabilitas

Permeabilitas membran menyatakan parameter perpindahan massa yang melewati membran, dan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = J \frac{x}{\Delta P} \quad (3.8)$$

dengan,

P = permeailitas (kg/m.mmHg.mnt)

J = fuks (kg/m².mnt)

x = ketebalan membran (m)

ΔP = beda tekanan antara sisi umpan dan permeat (mmHg)

3.4.5. Derajat *Swelling*

Derajat *swelling* dihitung dengan membandingkan berat membran dalam keadaan *swelling* dan berat membran kering dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = \frac{W_s - W_d}{W_d} \quad (3.8.)$$

dengan:

S = Derajat *swelling*

W_s = Berat basah membran (g)

W_d = Berat kering membran (g)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja membran komposit film tipis (*Thin Film Composite/TFC*) dalam pervaporasi campuran etanol-air dan isopropil alkohol-air (IPA-air) serta untuk mengetahui pengaruh dari kondisi operasi seperti temperatur umpan dan tekanan pada sisi permeat terhadap kinerja membran dalam proses tersebut. Pada bab ini dibahas mengenai hal-hal yang diperoleh baik dari proses percobaan maupun hasil data percobaan pervaporasi.

4.1. Pervaporasi Campuran Etanol-Air

4.1.1. Pengaruh kondisi operasi pada pervaporasi campuran etanol-air

Kinerja suatu membran dalam melewatkan suatu komponen, khususnya membran untuk proses pervaporasi ditentukan oleh dua parameter, yaitu fluks permeat dan selektivitasnya. Kedua parameter ini sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti temperatur umpan dan tekanan sisi permeat.

Dalam proses membran, laju permeasi menggambarkan kemampuan cairan umpan untuk menembus membran. Sedangkan selektivitas menggambarkan kemampuan membran untuk memisahkan suatu komponen dari campurannya. Laju permeasi harus cukup besar sehingga biaya operasi dapat ditekan. Sedangkan selektivitas dikehendaki setinggi mungkin. Akan tetapi kedua parameter ini umumnya berbanding terbalik satu sama lain. Makin besar laju permeasi atau fluks maka selektivitas akan semakin kecil begitu juga sebaliknya.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan percobaan pervaporasi campuran etanol-air pada berbagai temperatur umpan (35, 39, dan 44 °C) dan tekanan sisi permeat (660, 510, dan 260 mmHg-a). Percobaan ini bertujuan untuk menentukan kondisi operasi pervaporasi yang akan digunakan pada pemisahan campuran azeotrop etanol-air. Campuran umpan yang digunakan adalah larutan etanol dengan konsentrasi sebesar 45%. Luas permukaan aktif membran adalah 0,5 m² (Ariyanti, 2009). Pada percobaan ini data yang diambil dari eksperimen adalah volume, massa, dan kadar etanol pada umpan, permeat dan retentat. Unjuk kerja pemisahan dari kedua campuran tersebut diinvestigasi berdasarkan nilai

fluks (J), faktor pemisahan/selektivitas, dan kadar etanol di permeat setelah proses pervaporasi.

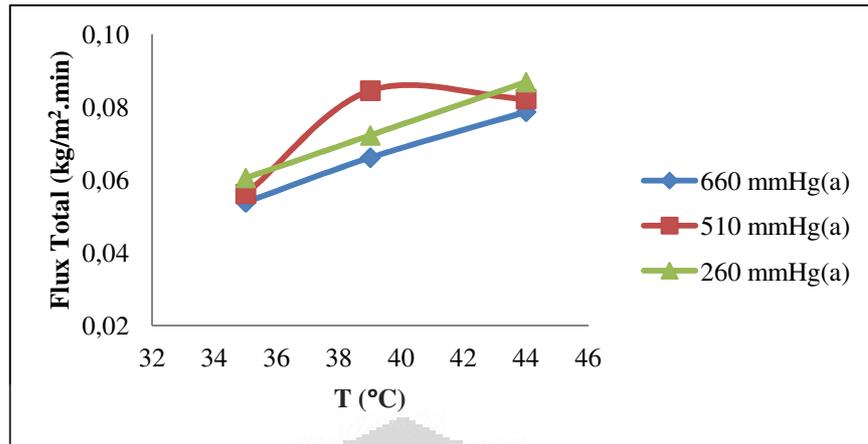
4.1.1.1. Pengaruh Temperatur Umpan

Pengaruh temperatur umpan terhadap nilai laju permeasi (fluks), faktor pemisahan (α), dan konsentrasi air di permeat pada percobaan pervaporasi larutan umpan etanol 45%, akan dibahas pada paragraf-paragraf di bawah ini.

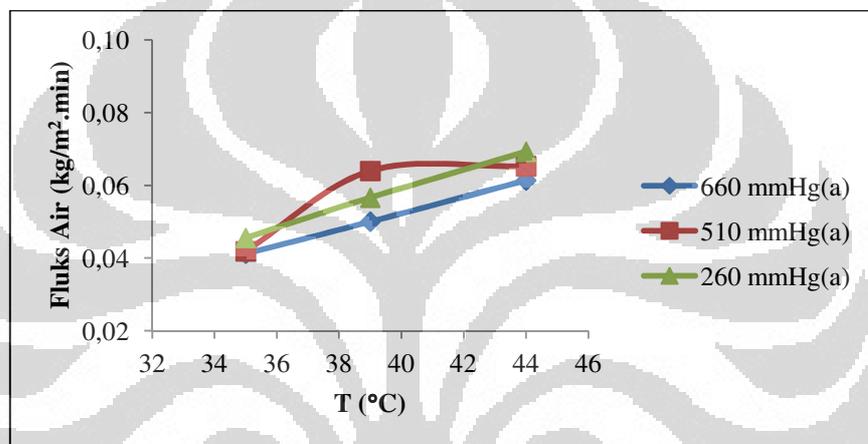
Profil nilai fluks permeat campuran etanol–air sebagai fungsi dari temperatur umpan dapat dilihat pada Gambar 4.1, yang secara jelas menunjukkan kenaikan temperatur umpan yang berdampak pada kenaikan nilai fluks total, fluks air, dan fluks etanol pada saat tekanan yang digunakan sebesar 600 mmHg-a dan 260 mmHg-a. Akan tetapi, pola tersebut tidak terjadi pada nilai fluks total dan fluks air pada kondisi 510 mmHg. Nilai kedua fluks tersebut menurun pada temperatur 44 °C.

Berdasarkan teori *free volume*, molekul penetran dapat berdifusi dari satu tempat ke tempat lain jika ada ruang kosong atau *free volume* yang cukup (Mulder, 1991). Adanya pergerakan panas di dalam bagian amorf polimer akan menghasilkan perbesaran *free volume* pada polimer membran. Ketika terjadi kenaikan temperatur, frekuensi dan amplitudo dari rantai polimer membran meningkat dengan cepat dan menambah ruang kosong tersebut. Oleh karena itu, laju difusi dari masing-masing molekul penetran meningkat pada suhu tinggi dan menghasilkan nilai fluks permeasi yang tinggi pula (Bakhsi et al., 2006).

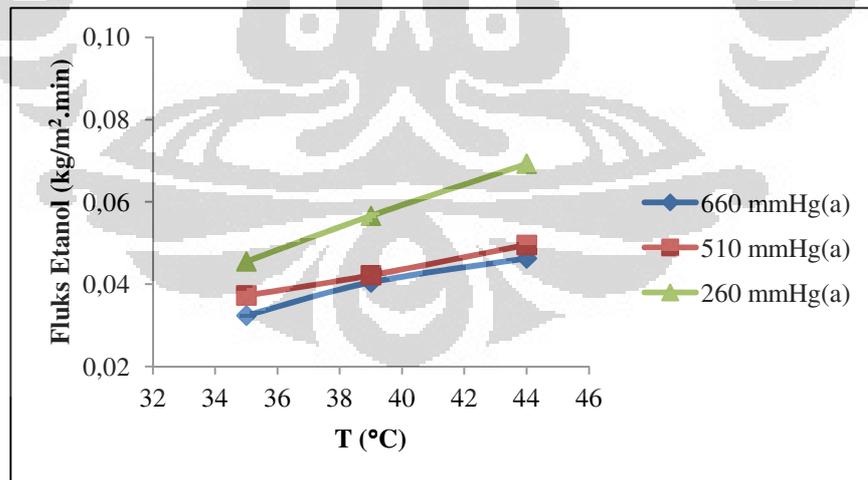
Pada Gambar 4.1. juga ditunjukkan nilai fluks air dan etanol pada permeat. Pola nilai fluks air menyerupai fluks totalnya, yang berarti juga bahwa membran lebih bersifat permeabel terhadap air sehingga lebih banyak air yang menembus membran.



(a)



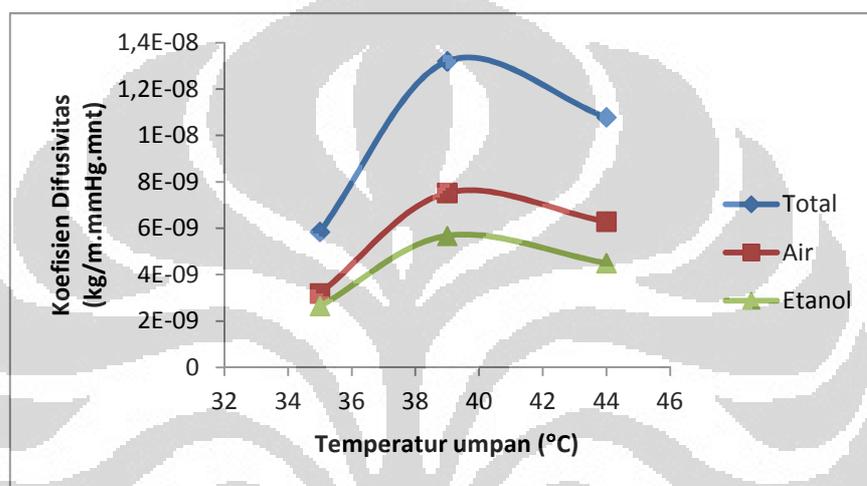
(b)



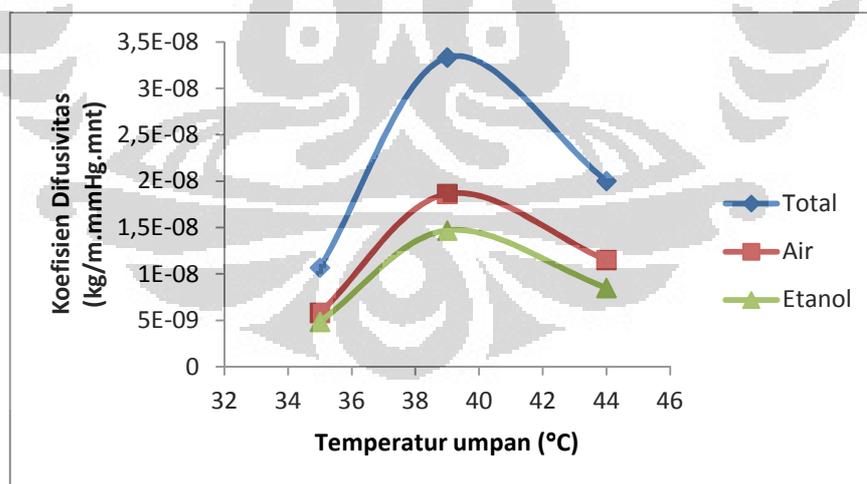
(c)

Gambar 4.1. Pengaruh temperatur umpan terhadap: (a) fluks permeat total; (b) fluks air; dan (c) fluks etanol pada tekanan 600, 510, dan 260 mmHg-a

Seperti telah diungkapkan pada paragraf-paragraf sebelumnya, bahwa kenaikan temperatur dapat memperbesar ruang kosong dalam polimer membran. Dalam pervaporasi molekul penetran dapat berdifusi melalui ruang kosong ini. Oleh karena itu, perlu dikaji pula mengenai kecenderungan peningkatan laju permeasi dengan meningkatnya temperatur umpan. Nilai koefisien difusivitas dari campuran etanol-air sebagai fungsi dari temperatur pada berbagai tekanan sisi permeat ditunjukkan pada gambar 4.2.

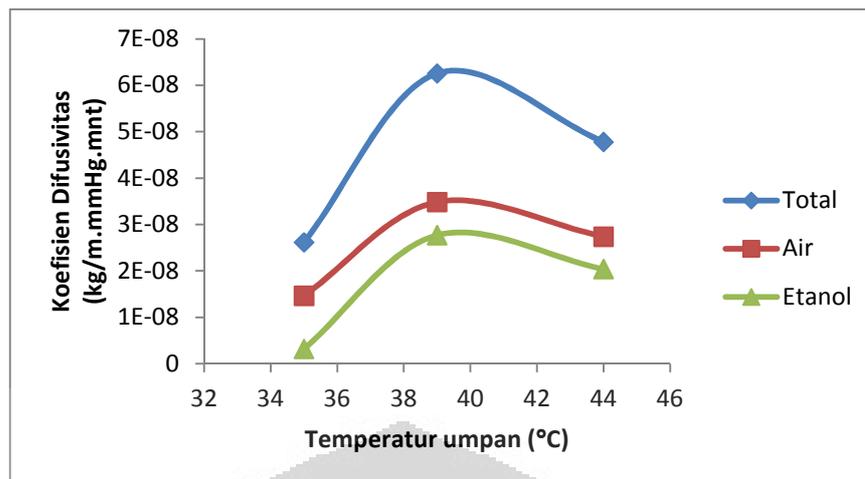


(a)



(b)

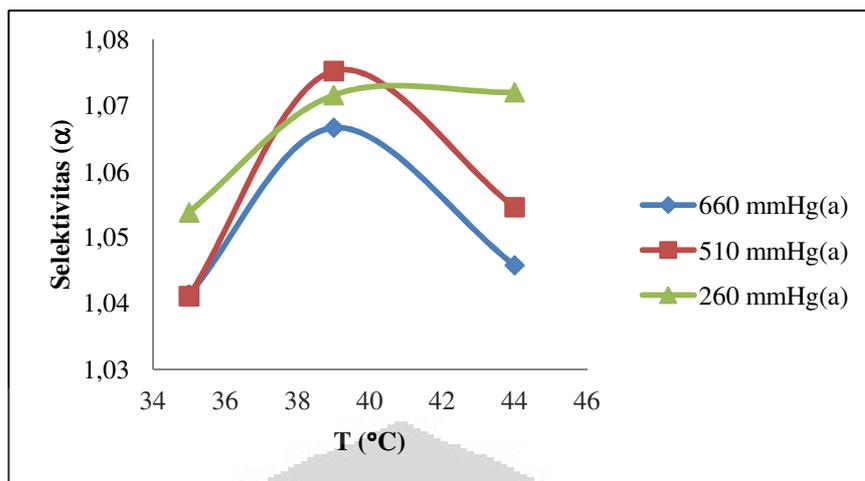
Gambar 4.2. Pengaruh temperatur umpan terhadap: (a) permeabilitas total; (b) permeabilitas air; dan (c) permeabilitas etanol pada tekanan 600, 510, dan 260 mmHg-a



Gambar 4.2. (Lanjutan)

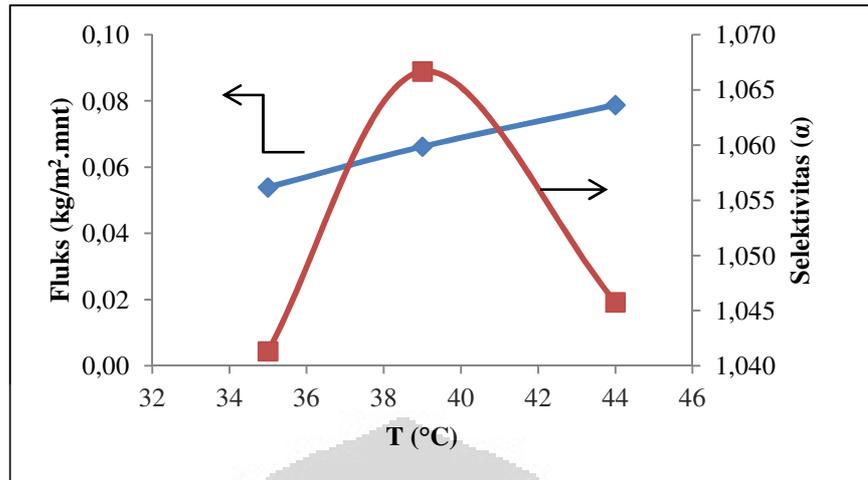
Pada Gambar 4.2. ditunjukkan bahwa nilai difusivitas total, air, dan etanol meningkat seiring kenaikan temperatur umpan, yang akan mencapai optimum pada 39 °C. Hal ini dipengaruhi oleh kemampuan penetrasi untuk berinteraksi dengan membran yang akan melemah ketika temperatur umpan meningkat. Sehingga adsorpsi selektif di permukaan membran menjadi berkurang. Hal ini berdampak pada nilai koefisien difusivitas, sehingga nilainya menjadi turun pada kondisi 44 °C.

Pengaruh temperatur terhadap selektivitas membran ditunjukkan pada Gambar 4.3. Nilai selektivitas akan naik sebanding dengan kenaikan temperatur operasi dan selanjutnya akan mengalami penurunan kembali pada kisaran suhu sebesar 44 °C. Semakin tinggi temperatur umpan yang melewati membran, maka akan menyebabkan fluks air meningkat juga dan pada akhirnya material membran menjadi bersifat plastis, sedemikian rupa sehingga molekul-molekul etanol dapat ikut menembus membran dan menyebabkan menurunnya selektivitas (Ghazali, 1997).

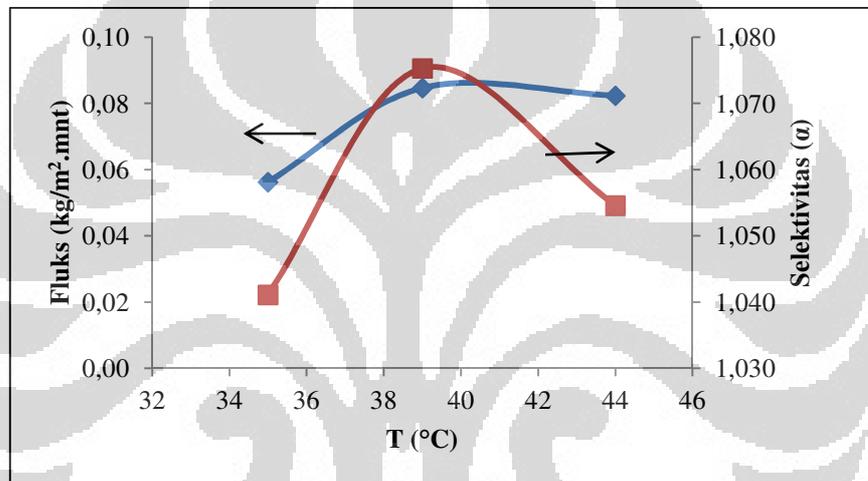


Gambar 4.3. Pengaruh temperatur umpan terhadap nilai selektivitas campuran etanol-air 45%-b.

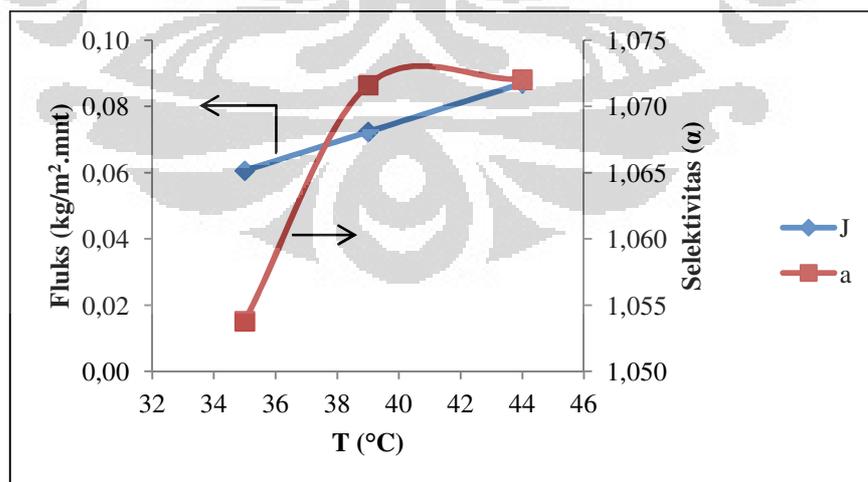
Untuk menentukan kondisi operasi dari proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air, maka pada Gambar 4.4. dapat dilihat tentang hubungan antara nilai fluks dan selektivitas pada harga-harga temperatur umpan yang digunakan (35, 39, dan 44 °C). Ketika tekanan sisi permeal yang digunakan adalah 660 mmHg-a, nilai fluks dan selektivitas yang tinggi diperoleh pada temperatur umpan 39°C, yaitu masing-masing sebesar 0,066 kg/m².mnt dan 1,067 (perhitungan dapat dilihat pada Lampiran B). Pola tersebut juga terjadi baik pada tekanan 510 mmHg-a dan 260 mmHg-a. Nilai fluks dan selektivitas pada temperatur umpan 39 °C untuk tekanan 510 mmHg adalah sebesar 0,085 kg/m².mnt dan 1,075. Sedangkan untuk tekanan 260 mmHg,(a) nilai fluks dan selektivitasnya adalah 0,072 kg/m².mnt dan 1.072. Kondisi optimum yang dipilih untuk proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air adalah kondisi dengan nilai fluks yang tinggi pada saat nilai selektivitas juga cukup tinggi.



(a)



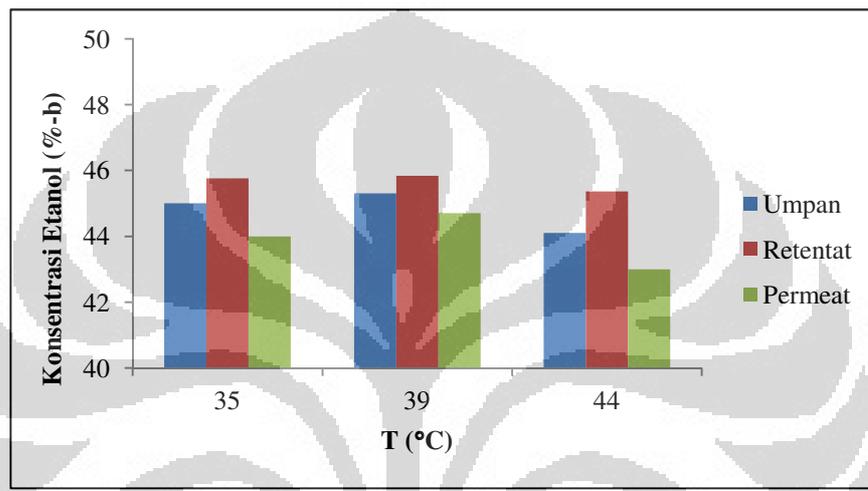
(b)



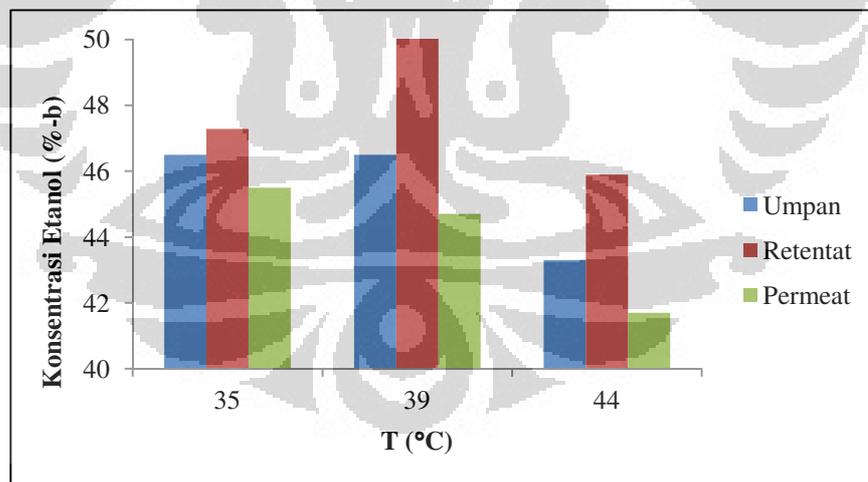
(c)

Gambar 4.4. Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi temperatur pada saat tekanan permeal yang digunakan (a) 660 mmHg-a; (b) 510 mmHg-a; (c) 260 mmHg-a

Dari Gambar 4.4. tersebut dapat diketahui bahwa proses pervaporasi etanol–air pada suhu 39 °C ternyata memberikan nilai fluks dan selektivitas yang optimum dibandingkan dengan temperatur yang lain. Hal ini ternyata didukung pula oleh hasil kadar etanol dipermeat. Gambar 4.5. menyajikan kadar etanol di sisi retentat dan permeat untuk proses pervaporasi pada suhu operasi 35, 39, dan 44 °C.

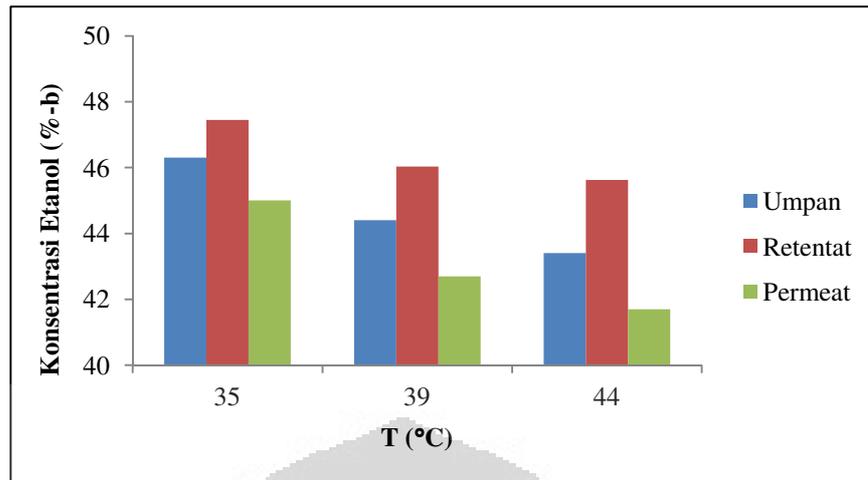


(a)



(b)

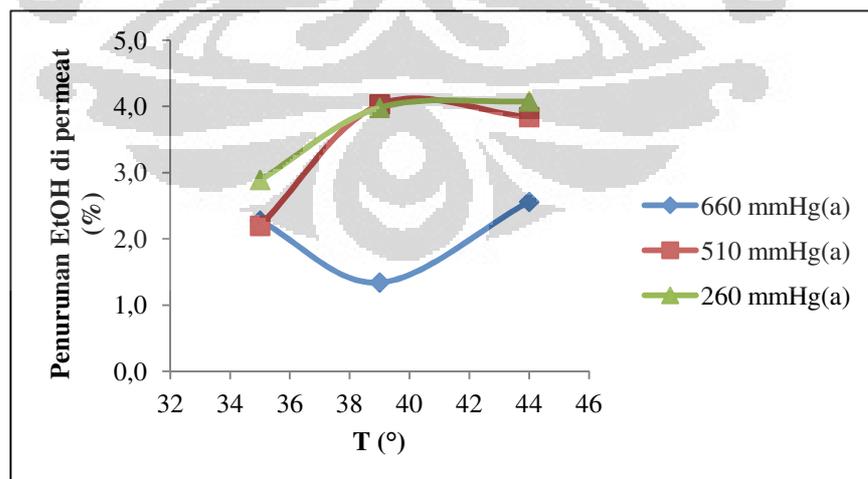
Gambar 4.5. Profil konsentrasi etanol pada umpan, permeat, dan retentat sebagai fungsi temperatur umpan pada perlakuan tekanan sisi permeat: (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a.



(c)

Gambar 4.5. (Lanjutan)

Dari gambar 4.5. dapat diketahui bahwa nilai konsentrasi etanol di permeat mencapai optimum pada kondisi 39 °C dengan perlakuan tekanan 510 mmHg-a, yaitu sebesar 50,05 %-b. Dari data yang diperoleh pada Gambar 4.4., maka dapat dihitung pula nilai penurunan kadar etanol di permeat pada berbagai variasi temperatur. Profil dari penurunannya sebagai fungsi temperatur umpan dapat dilihat pada Gambar 4.6. di bawah ini. Penurunan etanol yang terbesar ternyata terjadi pada saat temperatur umpan 39 dan 44 °C, yaitu sebesar 4,03 dan 4,08 %.

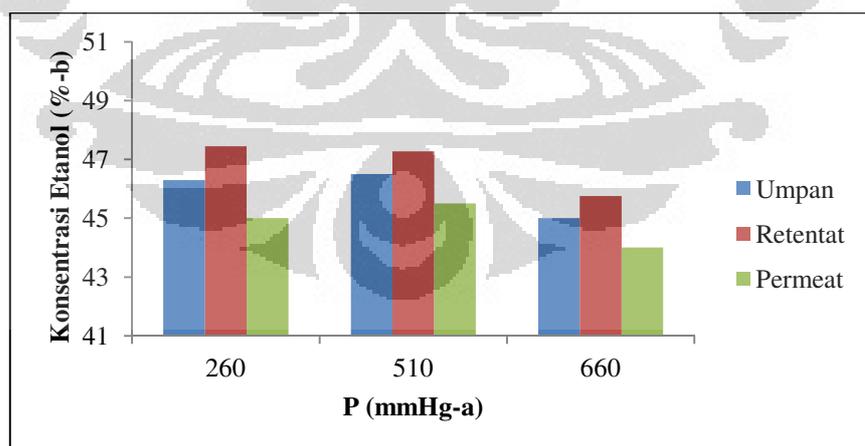


Gambar 4.6. Persentase penurunan kadar etanol di permeat setelah pervaporasi

4.1.1.2. Pengaruh Tekanan Sisi Permeat

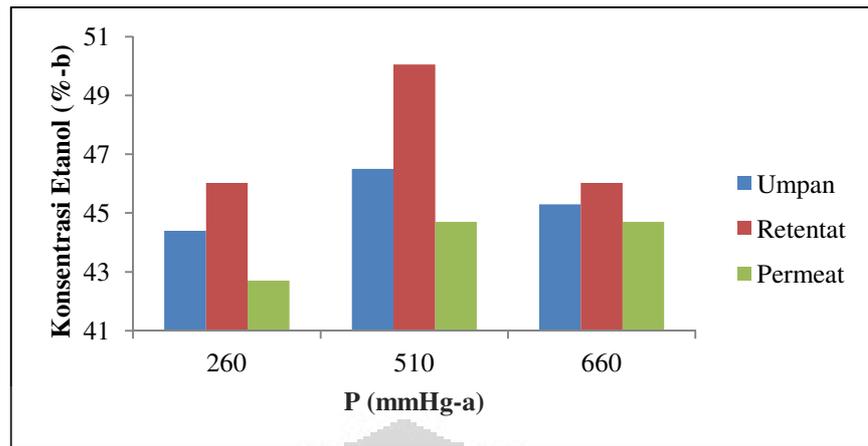
Parameter kinerja membran juga dipengaruhi oleh tekanan sisi permeat yang digunakan. Perubahan pada tekanan sisi permeat akan menghasilkan perbedaan tekanan uap pada kedua sisi membran, sehingga dihasilkan gaya penggerak yang akan mempengaruhi difusi komponen melalui membran. Oleh karena itu, pada paragraf-paragraf di bawah ini akan dibahas mengenai pengaruh variasi tekanan sisi permeat terhadap nilai fluks, selektivitas, dan kadar etanol di permeat.

Pada Gambar 4.6., sekali lagi ditunjukkan pengaruh tekanan sisi permeat terhadap perubahan kadar etanol. Pola yang sama terjadi pada perlakuan temperatur umpan 35 dan 39 °C (Gambar 4.7(a) dan 4.7(b)); dimana kadar etanol di permeat meningkat seiring dengan kenaikan tekanan sisi permeat yang mencapai nilai maksimum pada 510 mmHg-a. Pada tekanan di atas 510 mmHg, kadar etanol di permeat kembali menurun mendekati kadar etanol mula-mula. Akan tetapi pada perlakuan temperatur umpan 44 °C, semakin tinggi tekanan maka semakin tinggi kadar etanolnya. Kadar etanol tertinggi diperoleh pada saat kondisi 510 mmHg-a untuk perlakuan temperatur umpan 39 °C yaitu sebesar 50,05%-b.

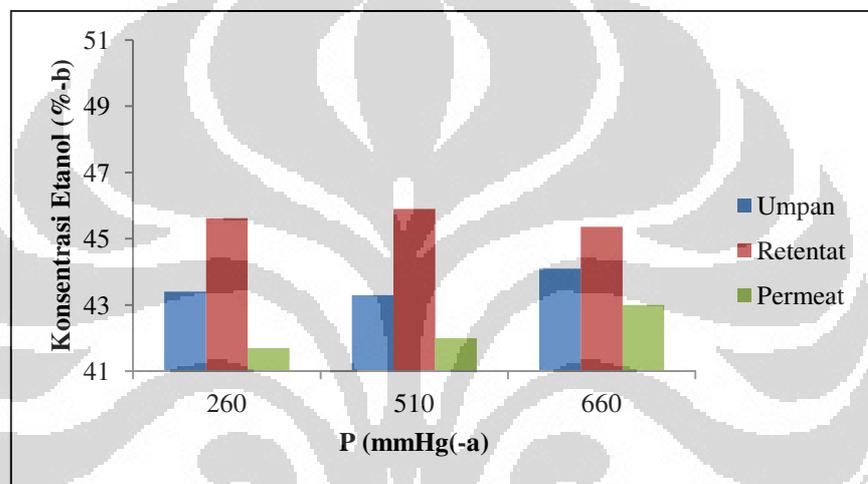


(a)

Gambar 4.7. Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap kadar etanol di permeat untuk perlakuan temperatur umpan: (a) 35; (b) 39; (c) 44 °C.



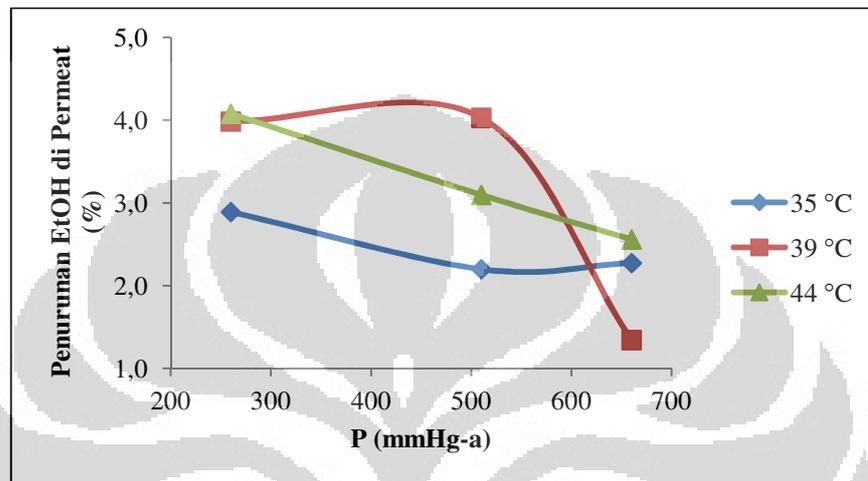
(b)



Gambar 4.7. (Lanjutan)

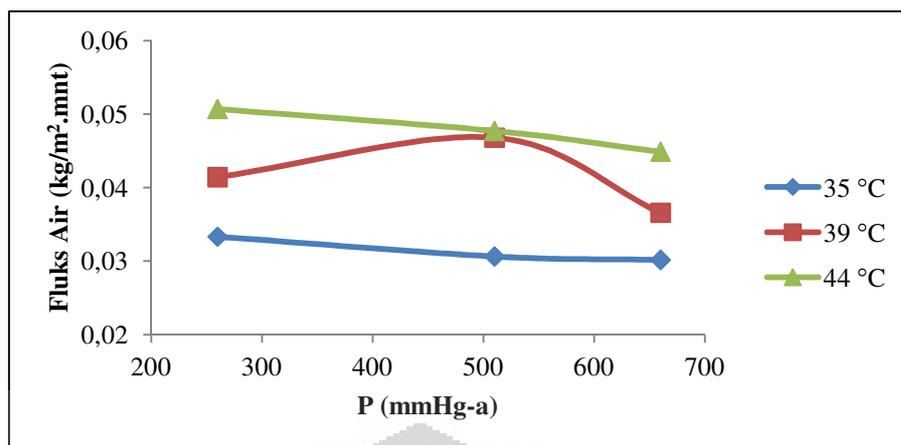
Hubungan selektivitas membran terhadap air dengan tekanan sisi permeat lebih disebabkan oleh selektivitas aliran di permukaan membran. Aliran permukaan terjadi karena adanya molekul yang teradsorpsi ke dinding membran. Semakin tinggi tekanan sisi permeat yang digunakan, maka jumlah molekul air yang diadsorpsi semakin banyak. Namun, adanya interaksi antara molekul etanol dan air dapat meningkatkan adsorpsi etanol ke dalam membran yang akhirnya berdampak pada menurunnya selektivitas membran. Selain itu, semakin banyak air yang teradsorpsi maka dapat pula meningkatkan koefisien difusi permukaan dari etanol. Kedua hal tersebut menyebabkan peningkatan kadar etanol di permeat. Pada saat tekanan sisi permeat mencapai tekanan uap jenuh campuran, maka kontribusi aliran permukaan menjadi tidak berpengaruh, dan yang terjadi hanya perpindahan cairan tanpa adanya selektivitas (Akihiro et al., 1996).

Persentase penurunan kadar etanol di permeat dapat dilihat pada Gambar. 4.8. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa persentasi penurunan etanol di permeat terbesar terjadi pada saat kondisi 260 dan 510 mmHg-a, yaitu masing-masing sebesar 4,08 dan 4,03 %.

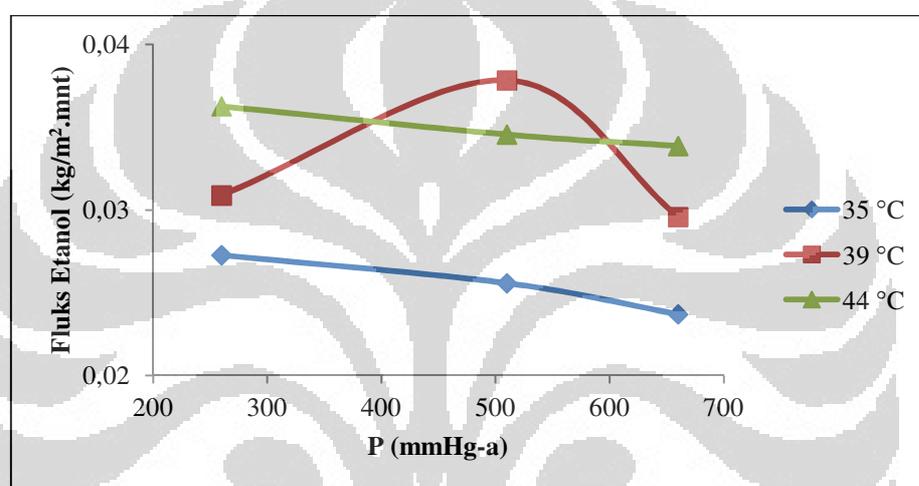


Gambar 4.8. Persentase penurunan kadar etanol di permeat setelah pervaporasi

Gambar 4.9. menunjukkan pengaruh dari tekanan sisi permeat terhadap fluks air dan etanol pada perlakuan temperatur 35,39, dan 44 °C. Baik pada gambar (a) maupun (b) terlihat adanya hubungan dalam bentuk parabola dan linear antara tekanan dengan fluks air dan etanol. Semakin tinggi tekanan yang digunakan maka nilai fluks air dan etanol turun secara linear pada perlakuan temperatur umpan 35 dan 44 °C. Sedangkan pada perlakuan 39 °C, pengaruh tekanan sisi permeat terhadap kedua fluks membentuk kurva parabola. Pada masing-masing kondisi, fluks air meningkat seiring dengan naiknya temperatur umpan



(a)



(b)

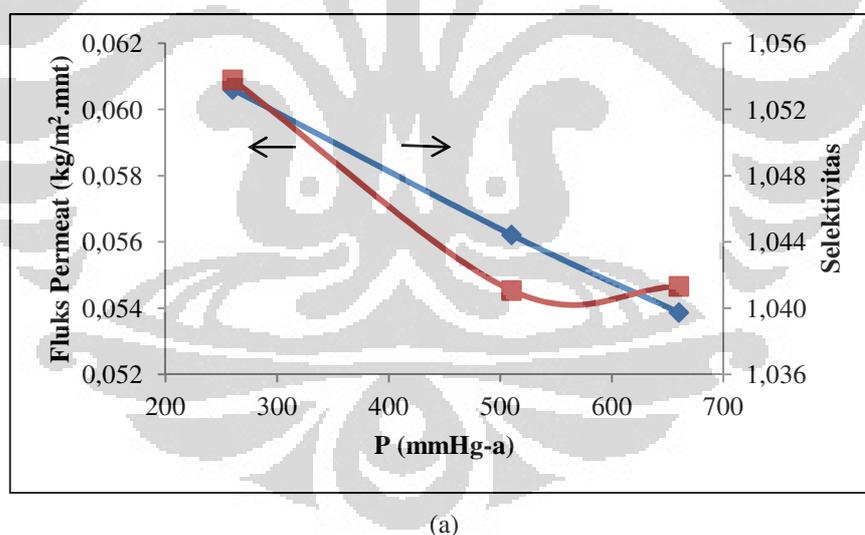
Gambar 4.9. Pengaruh tekanan sisi permeal terhadap: (a) fluks air; dan (b) fluks etanol pada perlakuan temperatur umpan 35, 39, dan 44 °C.

Semakin tinggi tekanan sisi permeal maka fluks air akan menurun. Menurut Widodo (2004), faktor yang sangat mempengaruhi hal tersebut adalah nilai tekanan uap air yang jauh lebih rendah dibandingkan etanol sehingga peningkatan tekanan sisi permeal memberikan efek yang lebih signifikan terhadap penurunan fluks air (Widodo et al., 2004). Mekanisme perpindahan dalam penguapan setelah adsorpsi dan difusi adalah proses penguapan pada sisi permeal, yang berlangsung lebih cepat dari kedua proses sebelumnya. Peningkatan tekanan sisi permeal ternyata menurunkan laju penguapan air sehingga gradien konsentrasi air di kedua sisi membran menjadi kecil dan menyebabkan menurunnya fluks air.

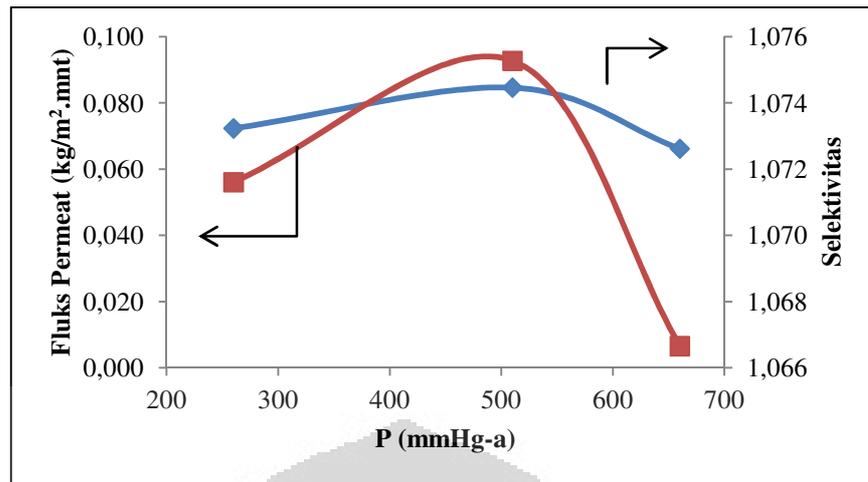
Pola yang serupa juga terjadi pada fluks etanol, dimana kenaikan tekanan di sisi permeal menyebabkan penurunan nilai fluks. Walaupun secara keseluruhan

nilai fluks etanol masih lebih rendah daripada fluks air, karena tekanan uap etanol jauh lebih tinggi daripada air. Seperti telah diungkapkan sebelumnya, bahwa ketika membran sudah dibasahi oleh air maka etanol akan semakin mudah menembus membran (Akihiro, 1996). Fenomena ini terjadi karena adanya interaksi antara molekul-molekul etanol dan air yang membentuk ikatan hidrogen, sehingga memperbesar kelarutan etanol dalam air (Fessenden dan Fessenden, 1986). Walaupun diameter kinetika etanol ($4,3 \text{ \AA}$) lebih besar daripada air ($2,96 \text{ \AA}$), namun karena kelarutannya dalam air relatif sangat besar maka hal ini mengakibatkan molekul etanol terbawa bersama air dan ikut terevaporasi menjadi fasa uap di permeat. Akibatnya terjadi penurunan selektivitas karena meningkatnya konsentrasi etanol di permeat.

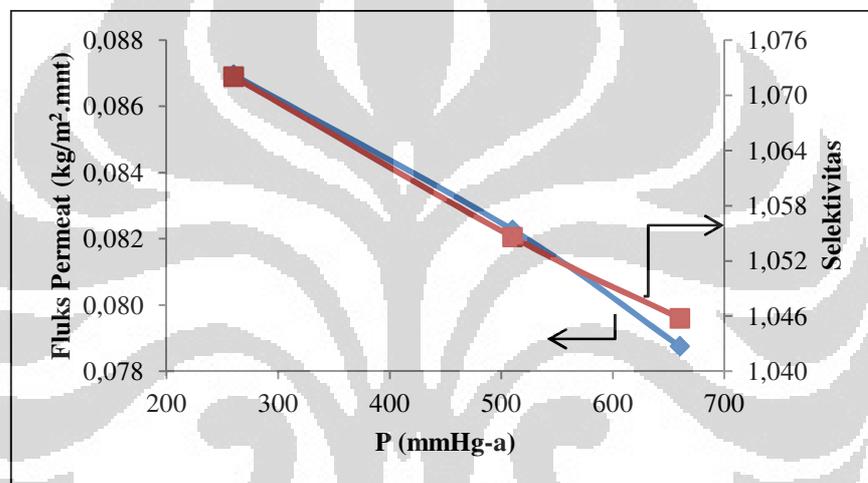
Untuk dapat menentukan kondisi operasi berupa tekanan sisi permeat dari proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air, maka pada Gambar 4.10 ditunjukkan hubungan antara nilai fluks total dan selektivitas, masing-masing pada kondisi 260, 510, dan 660 mmHg-a.



Gambar 4.10. Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada saat temperatur umpan yang digunakan (a) 35; (b) 39; (c) 44°C.



(b)



(c)

Gambar 4.10. (Lanjutan)

Berdasarkan gambar 4.10. dapat diketahui bahwa hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada berbagai perlakuan temperatur umpan, dimana kenaikan tekanan menyebabkan penurunan fluks dan selektivitas proses. Kondisi yang memberikan unjuk kerja pevaporasi yang optimum fluks dan selektivitas optimum adalah pada saat 510 mmHg-a. Pada kondisi tersebut nilai fluks masih cukup tinggi tapi juga membran masih bersifat selektif. Nilai fluks permeat dan selektivitas membran pada kondisi optimum tersebut adalah 0,085 kg/m².mmt dan 1,075.

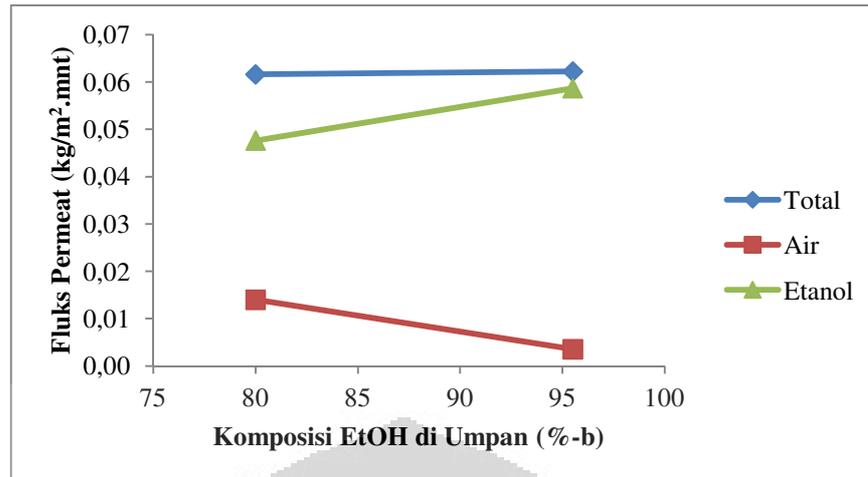
4.1.2. Proses Pervaporasi Campuran Azeotrop Etanol-Air

Etanol membentuk sistem azeotrop dengan air pada konsentrasi etanol sebesar 95,5 %-b. Pada konsentrasi ini campuran etanol-air tidak dapat dipisahkan dengan proses distilasi biasa. Oleh karena itu, pada proses pervaporasi kali ini diinvestigasi kinerja membran TFC komersial yang berbahan dasar poliamida/polisulfon/polyester untuk pemisahan campuran azeotrop etanol-air.

Dalam percobaan ini juga dilakukan pervaporasi campuran etanol-air dengan konsentrasi etanol sebesar 80% sebagai pembanding. Perbandingan ini dilakukan untuk meneliti pengaruh konsentrasi umpan terhadap nilai fluks permeat, selektivitas membran, indeks pervaporasi (separation pervaporation index/PSI) dan kadar etanol di permeat. Berdasarkan hasil proses pervaporasi pada penelitian pendahuluan maka kondisi operasi yang digunakan adalah 39 °C dan 510 mmHg-a. Sistem pervaporasi yang digunakan menggunakan sistem A seperti ditunjukkan pada Gambar 3.15.(a). Pada sistem ini etanol dari retentat dikembalikan ke umpan. Proses dilakukan dalam waktu masing-masing 21 menit. Dari data percobaan (pada Lampiran B.3, tabel B.5) terlihat bahwa pemisahan campuran azeotrop dengan kadar awal 95,5 % dapat menaikkan kadar etanol di retentat menjadi 96,3 %.

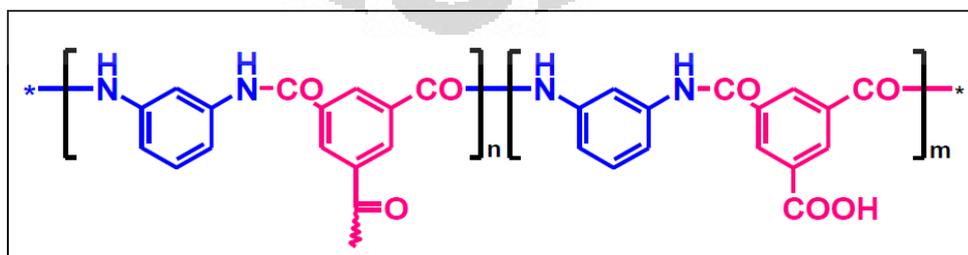
4.1.2.1. Pengaruh Komposisi Umpan Terhadap Kinerja Membran TFC Komersial.

Membran TFC komersial yang digunakan pada penelitian ini merupakan jenis membran RO yang bersifat hidrofilik. Sifat hidrofilik inilah yang menyebabkan membran ini bersifat selektif dan permeabel terhadap molekul air (Fransisca, 2006). Pengaruh dari komposisi etanol di umpan terhadap produktivitas dan selektivitas membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Pengaruh komposisi etanol di umpan terhadap fluks total permeat, air, dan etanol.

Pada Gambar 4.11. dapat dilihat bahwa nilai fluks parsial air akan menurun dengan meningkatnya konsentrasi etanol di umpan. Umumnya, nilai fluks terhadap konsentrasi air dapat dinyatakan melalui interaksi antara molekul polimer membran dan molekul yang terpermeasi. Penurunan nilai fluks air dan etanol disebabkan oleh perubahan jumlah molekul air dan etanol yang teradsorpsi di permukaan membran. Semakin sedikit molekul yang teradsorpsi maka nilai fluksnya semakin kecil. Tahap adsorpsi yang selektif di permukaan membran dipengaruhi oleh interaksi atau afinitas air dan etanol sebagai penetran ke dalam membran. Interaksi ini dinyatakan dengan parameter kelarutan. (Feng, 1997; Pangarkar 2009; Wee et al., 2008). Lapisan selektif membran komposit yang digunakan pada penelitian ini adalah polyamida yang memiliki gugus amida (Gambar 4.12).



Gambar 4.12. Struktur kimia lapisan tipis poliamida (Lau et al., 2011)

Berdasarkan struktur kimianya maka poliamida dapat berinteraksi dengan molekul air melalui ikatan hidrogen. Pada campuran azeotrop etanol-air, konsentrasi air di dalam larutan lebih rendah daripada dalam campuran etanol-air 80%-b. Semakin rendah konsentrasi air di umpan, maka jumlah molekul air yang berinteraksi dengan lapisan selektif membran pada campuran azeotrop menjadi berkurang. Oleh karena itu, jumlah molekul air yang terserap ke dalam membran menjadi lebih sedikit dan menyebabkan derajat pengembangan membran pada lapisan permukaan membran menjadi lebih rendah. Akibatnya, semakin sedikit molekul air yang dapat melalui membran yang mengembang tersebut dan fluks permeasi air menjadi turun.

Gambar 4.11. juga menjelaskan tentang terjadinya kenaikan fluks etanol dengan menurunnya konsentrasi air di umpan. Hal ini dapat terjadi karena adanya efek plastisasi air terhadap membran polimer. Adanya efek plastisasi polimer akan menyebabkan perbesaran pori membran sehingga etanol yang memiliki ukuran molekul lebih besar daripada air pun dapat melewati membran. Semakin banyaknya etanol yang menembus membran menyebabkan fluks etanol meningkat seiring dengan naiknya konsentrasi etanol di umpan. Oleh karena itu, pada saat konsentrasi etanol tinggi membran TFC komersial ini menjadi lebih selektif terhadap etanol dan meningkatkan nilai selektivitas membran. Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi (*pervaporation separation index/PSI*) dari proses pervaporasi campuran azeotrop-air ini dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi campuran azeotrop etanol-air

Konsentrasi (%-b)	α	PSI	% Penurunan EtOH di Permeat
80	1,161	0,072	3,38
95,5	1,267	0,079	1,26

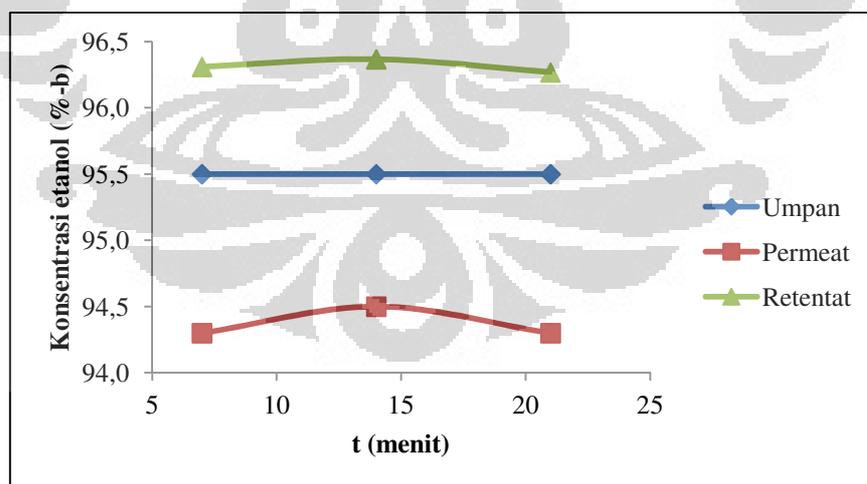
Tabel 4.1. menunjukkan bahwa nilai selektivitas air terhadap etanol untuk pemisahan campuran azeotrop adalah sebesar 1,267, yang dapat diartikan bahwa pemisahan yang terjadi sangat kecil sekali. Feng dan Huang (1997),

menyatakan bahwa pada saat nilai $\alpha = 1$, maka tidak terjadi pemisahan (Feng & Huang, 1997). Hal ini diperkuat dengan hasil perhitungan persentase penurunan etanol di permeat yang cukup kecil, yaitu sebesar 1,26 %.

Karena umumnya nilai selektivitas dan fluks permeat saling berlawanan, maka diperkenalkan parameter gabungan untuk mengevaluasi unjuk kerja dari proses pervaporasi yaitu indeks pervaporasi (PSI). Dari hasil perhitungan diperoleh nilai PSI yang sangat rendah, yaitu sebesar $0,079 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$. Hal ini menunjukkan bahwa proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dengan membran TFC komersial kurang efektif.

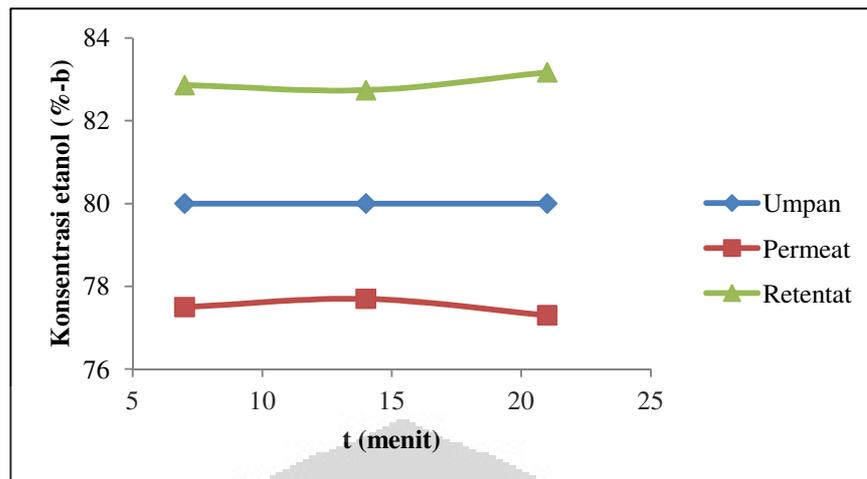
4.1.2.2. Pengaruh Waktu Pervaporasi Terhadap Kadar Etanol di Permeat dan Selektivitas

Profil konsentrasi etanol di permeat sebagai fungsi waktu diperlihatkan pada Gambar 4.13. Semakin lama waktu operasi seharusnya kadar etanol di permeat semakin menurun. Akan tetapi, hasil dari proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air maupun campuran etanol-air 80% ternyata tidak memberikan penurunan yang signifikan terhadap kadar etanol di permeat.



(a)

Gambar 4.13. Pengaruh waktu pervaporasi terhadap: (a) konsentrasi etanol azeotrop; dan (b) konsentrasi etanol 80% di umpan, permeat, dan retentat.



(b)

Gambar 4.13. (Lanjutan)

Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13(a)., pemisahan campuran azeotrop dengan kadar awal 95,5 % dapat menaikkan kadar etanol di retentat menjadi 96,3 %-b, selama 25 menit proses pervaporasi. Jika dibandingkan dengan proses distilasi sederhana, maka proses pervaporasi ini sudah berhasil melewati titik azeotrop dari campuran etanol-air. Walaupun kenaikan kadar etanol di retentat tersebut masih sangat kecil. Penurunan kadar etanol di permeat pun hanya berada pada rentang 1,06 – 1,27 %. Hal ini menunjukkan bahwa masih ada molekul etanol yang dapat menembus membran karena interaksi etanol dengan air lebih kuat daripada air dengan membran, sehingga menimbulkan adanya efek *coupling*. Dengan adanya efek ini menyebabkan nilai fluks etanol meningkat dan selektivitas membran terhadap air menjadi rendah.

Tingkat kemurnian etanol di retentat untuk proses pervaporasi campuran etanol-air 80 % lebih tinggi, karena dapat menaikkan konsentrasi etanol di retentat menjadi 83,2 %-b. Penurunan kadar etanol 80% juga lebih besar daripada etanol azeotrop, yaitu berkisar 2,96 – 3,49%. Berdasarkan data tersebut, maka dapat dinyatakan bahwa pemisahan campuran etanol-air dengan membran TFC komersial, pada konsentrasi etanol tinggi, adalah kurang selektif karena adanya efek *coupling*.

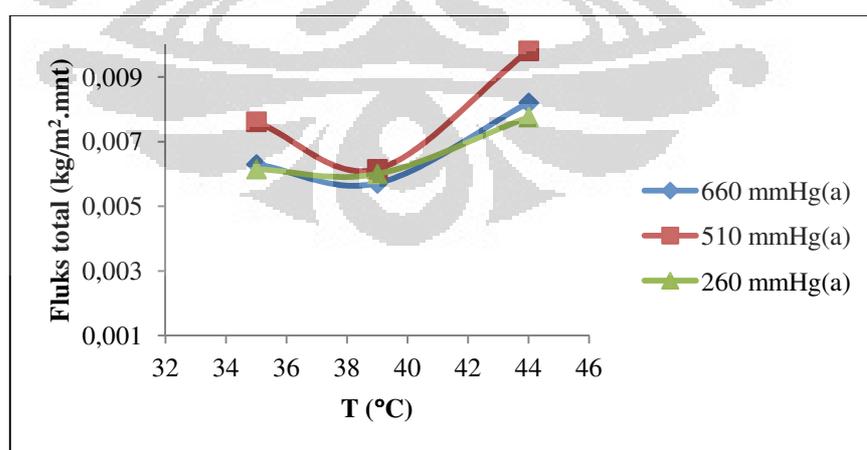
4.2. Proses Pervaporasi Campuran IPA-Air

4.2.1. Penentuan Kondisi Operasi Pervaporasi Campuran IPA-Air

Sebagai perbandingan dari proses pervaporasi etanol-air, maka dilakukan pula pervaporasi campuran IPA-air. Oleh karena itu, serupa dengan campuran etanol-air, perlu dilakukan percobaan untuk menentukan kondisi operasi optimum dalam pervaporasi campuran IPA-air. Campuran umpan yang digunakan adalah larutan IPA teknis dengan konsentrasi 45% dan proses pervaporasi dilakukan pada berbagai variasi temperatur umpan (35, 39, dan 44 °C) dan tekanan sisi permeat (660, 510, dan 260 mmHg-a). Pada percobaan ini data yang diambil dari eksperimen adalah volume, massa, dan kadar etanol pada umpan, permeat dan retentat. Unjuk kerja pemisahan dari kedua campuran tersebut diinvestigasi berdasarkan nilai fluks (J), faktor pemisahan/selektivitas, dan kadar etanol di permeat setelah proses pervaporasi.

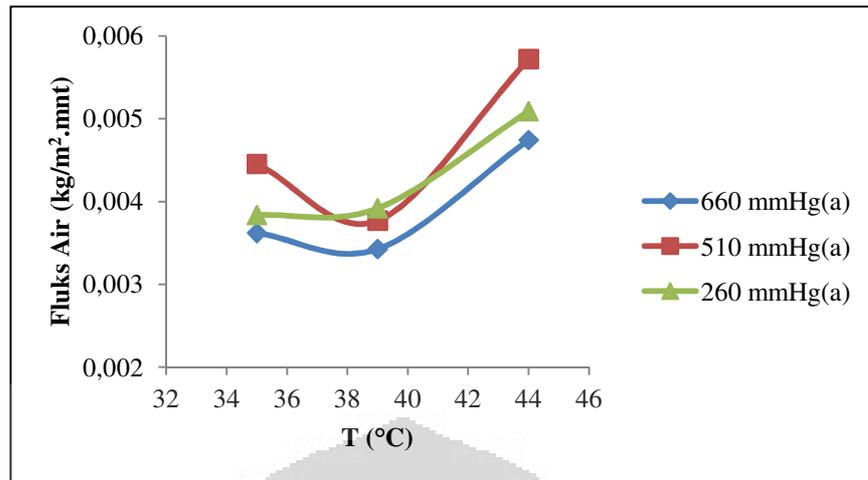
4.2.1.1. Penentuan Temperatur Umpan

Profil nilai fluks permeat campuran IPA-air sebagai fungsi dari temperatur umpan dapat dilihat pada Gambar 4.14, yang secara jelas menunjukkan bahwa pola nilai fluks air menyerupai fluks totalnya.

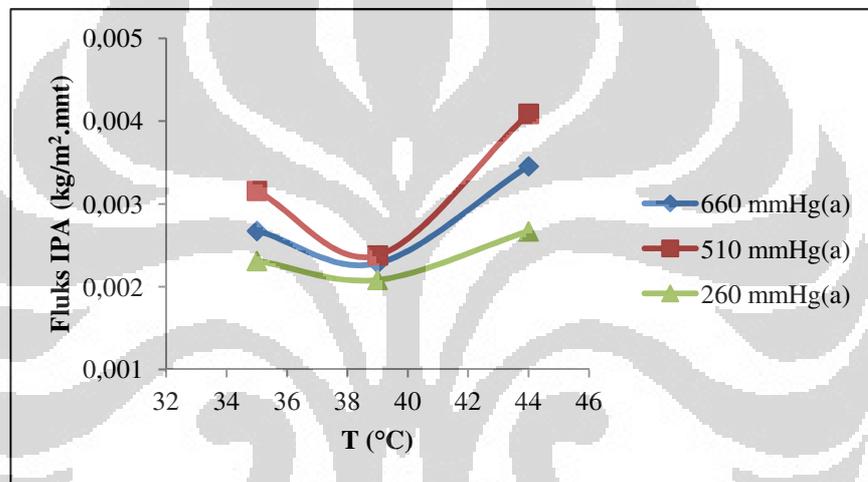


(a)

Gambar 4.14. Pengaruh temperatur umpan terhadap : (a) fluks permeat total; (b) fluks air; (c) fluks IPA pada perlakuan tekanan sisi permeat 600, 510, dan 260 mmHg-a.



(b)



(c)

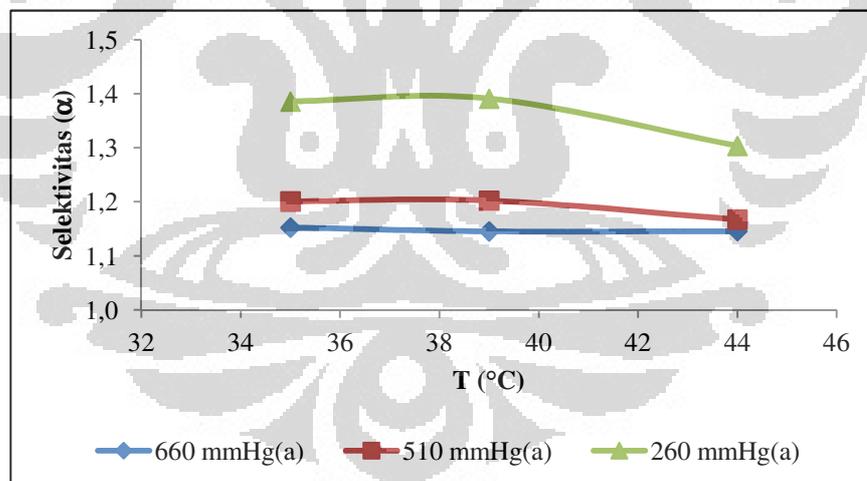
Gambar 4.14. (Lanjutan)

Pada Gambar 4.14 (a). dapat dilihat tentang hubungan antara temperatur umpan dengan nilai fluks total permeat pada perlakuan tekanan yang digunakan (260, 510, dan 660 mmHg-a). Umumnya, semakin tinggi temperatur umpan maka nilai fluks akan semakin tinggi pula, namun pada percobaan ini nilai fluks total menurun pada kondisi 39 °C. Menurut Xie et al. (2011), ketika temperatur umpan meningkat maka tekanan uap air di sisi umpan meningkat secara eksponensial (Xie et al.,2011). Dengan mengatur kondisi konstan pada tekanan di sisi permeat, maka adanya kenaikan tekanan uap di sisi umpan akan meningkatkan gaya penggerak pada membran, yang akhirnya berdampak pada kenaikan nilai fluks air. Selain itu, kenaikan temperatur umpan dapat menyebabkan material membran yang merupakan polimer berubah fasa dari keadaan *glassy* menjadi *rubbery*. Pada

fasa ini, pori membran akan membesar dan menyebabkan *swelling*. Akibatnya molekul air yang berukuran lebih kecil daripada IPA dapat berdifusi dengan mudah melalui pori ini dan meningkatkan fluks air.

Molekul IPA ternyata tidak dapat menembus membran dengan mudah, karena memiliki diameter kinetika lebih besar daripada air. Hal ini dijelaskan pada Gambar 4.14(c) dengan nilai fluks IPA yang lebih rendah daripada fluks air. Oleh karena itu, penurunan nilai fluks total pada kondisi 39 °C untuk setiap perlakuan tekanan sisi permeat adalah karena rendahnya nilai fluks IPA pada kondisi tersebut, sehingga mempengaruhi keseluruhan nilai fluks permeat.

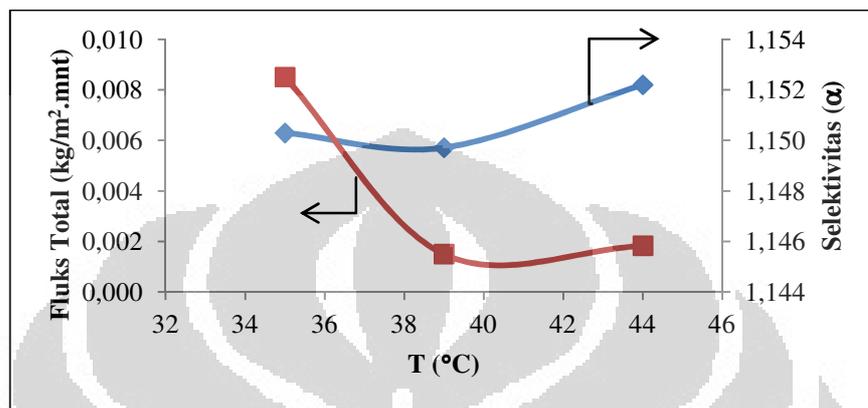
Gambar 4.15. menunjukkan pengaruh temperatur terhadap selektivitas dari campuran IPA-air. Nilai selektivitas akan menurun seiring dengan kenaikan temperatur operasi pada semua perlakuan tekanan sisi permeat. Semakin tinggi temperatur umpan yang melewati membran maka akan menyebabkan fluks air meningkat dan membran makin bersifat plastis, sehingga molekul IPA dapat ikut menembus membran dan menyebabkan menurunnya selektivitas (Ghazali, 1997).



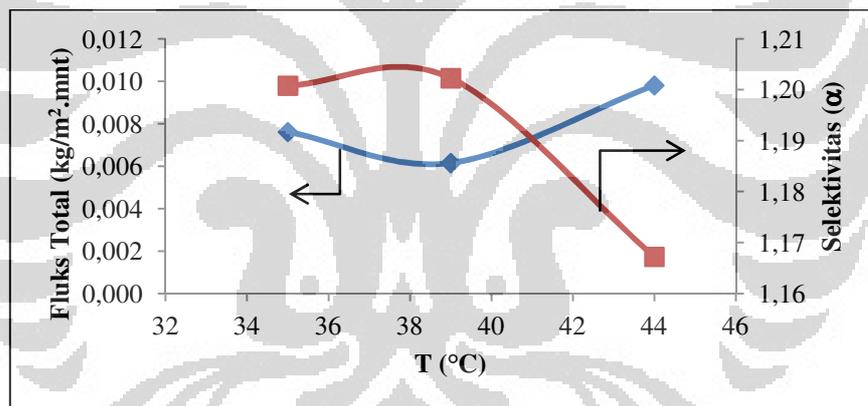
Gambar 4.15. Pengaruh temperatur umpan terhadap nilai selektivitas campuran IPA-air 45 %-b.

Untuk dapat menentukan kondisi operasi dari proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air, maka pada Gambar 4.16. juga diperlihatkan hubungan antara nilai fluks dan selektivitas pada harga-harga temperatur umpan yang digunakan (35, 39, dan 44 °C). Ketika tekanan sisi permeat yang digunakan adalah 660 mmHg-a, nilai fluks tertinggi diperoleh pada kondisi 44 °C, yaitu

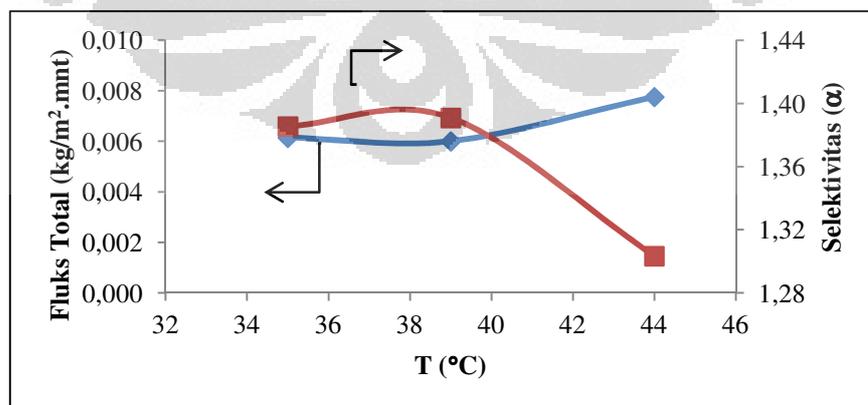
sebesar $0,0082 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$. Namun, pada kondisi ini nilai selektivitasnya rendah. Pada kondisi 39°C nilai fluks dan selektivitasnya cukup baik, yaitu sebesar $0,061 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$ dan $1,202$. Sedangkan untuk tekanan 260 mmHg , (a) nilai fluks dan selektivitasnya adalah $0,060 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$ dan $1,391$.



(a)



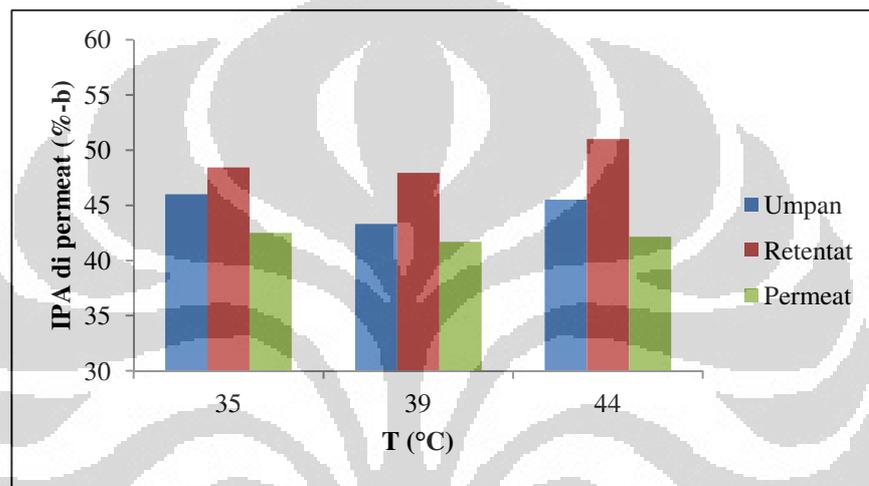
(b)



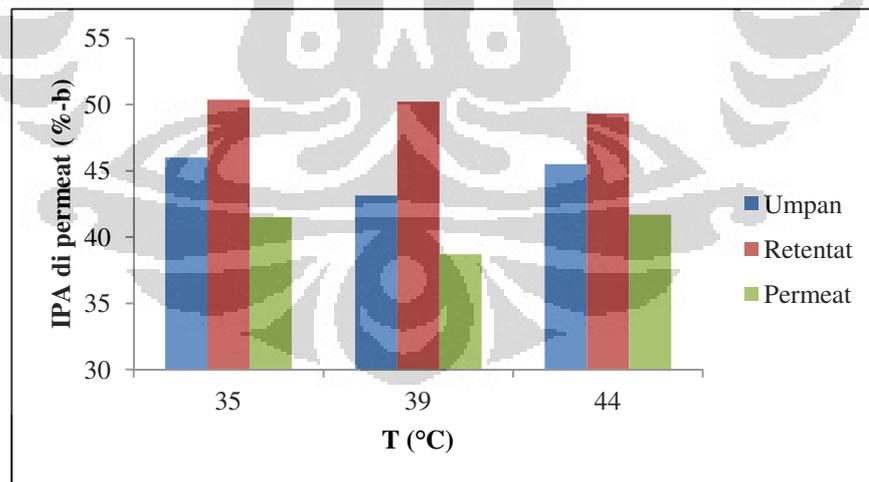
(c)

Gambar 4.16. Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi temperatur pada saat tekanan permeat yang digunakan (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a

Dari Gambar 4.16. juga dapat diketahui bahwa untuk proses pervaporasi IPA-air, kondisi 39 °C ternyata memberikan nilai fluks dan selektivitas paling optimum daripada kondisi yang lain. Hal ini didukung pula dengan hasil kadar IPA di sisi permeat. Gambar 4.17 menyajikan kadar etanol di retentat dan permeat setelah proses pervaporasi pada kondisi 35, 39, dan 44 °C. Pada masing-masing kondisi terjadi kenaikan konsentrasi IPA pada retentat dan juga penurunan konsentrasi IPA pada permeat dari konsentrasi awalnya.

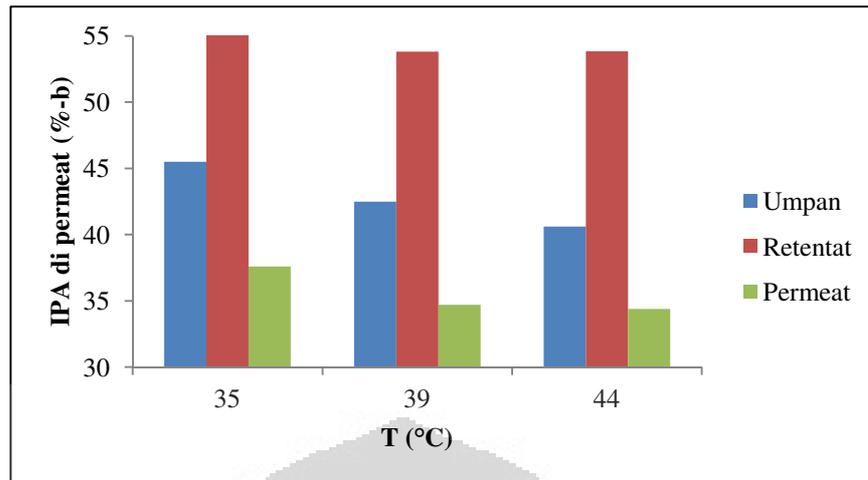


(a)



(b)

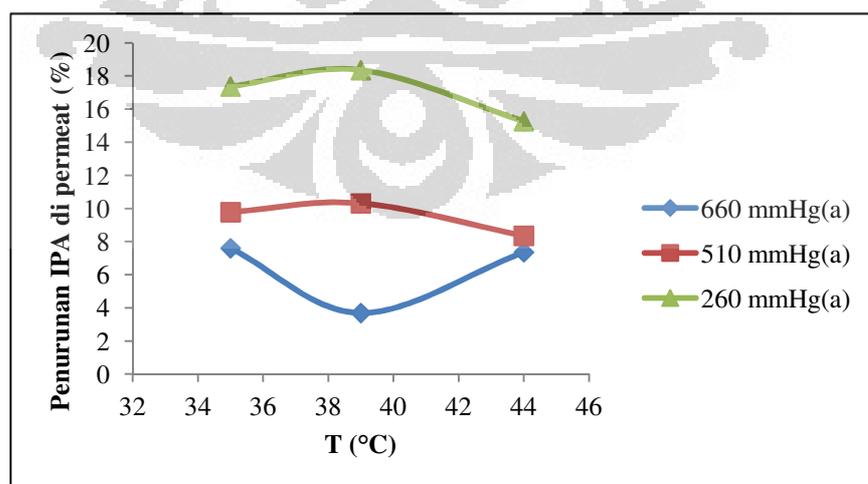
Gambar 4.17. Profil konsentrasi etanol pada umpan, permeat, dan retentat sebagai fungsi temperatur umpan pada perlakuan tekanan sisi permeat: (a) 660; (b) 510; (c) 260 mmHg-a.



(c)

Gambar 4.17. (Lanjutan)

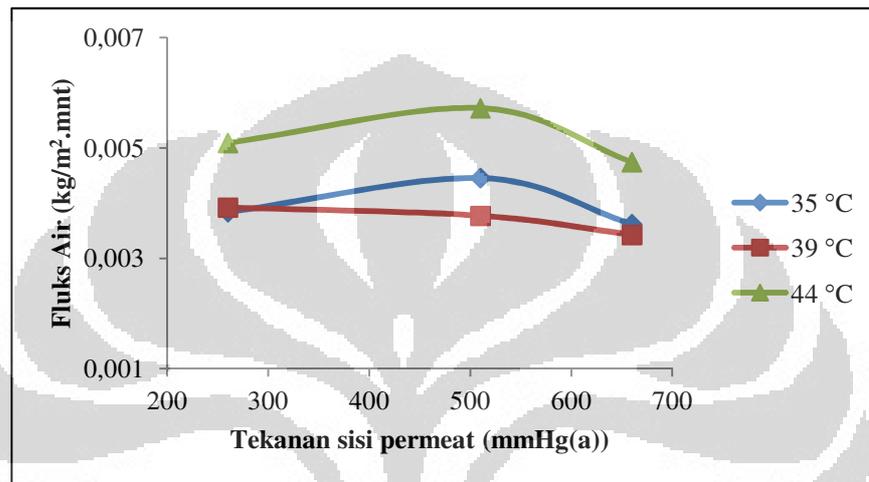
Berdasarkan data yang ditampilkan pada gambar 4.17. tersebut, dapat dilihat bahwa pada kondisi 39 °C, konsentrasi IPA di retentat pada setiap perlakuan tekanan sisi permeat memiliki nilai cukup tinggi, khususnya pada saat tekanan yang digunakan 260 mmHg-a yaitu sebesar 53,80 %. Dari data yang diperoleh pada Gambar 4.17., maka dapat dihitung nilai penurunan kadar IPA di permeat. Profil dari penurunannya sebagai fungsi temperatur umpan dapat dilihat pada Gambar 4.18. Penurunan kadar IPA terbesar terjadi pada saat temperatur umpan 39 °C, yaitu sebesar 18,35 %.



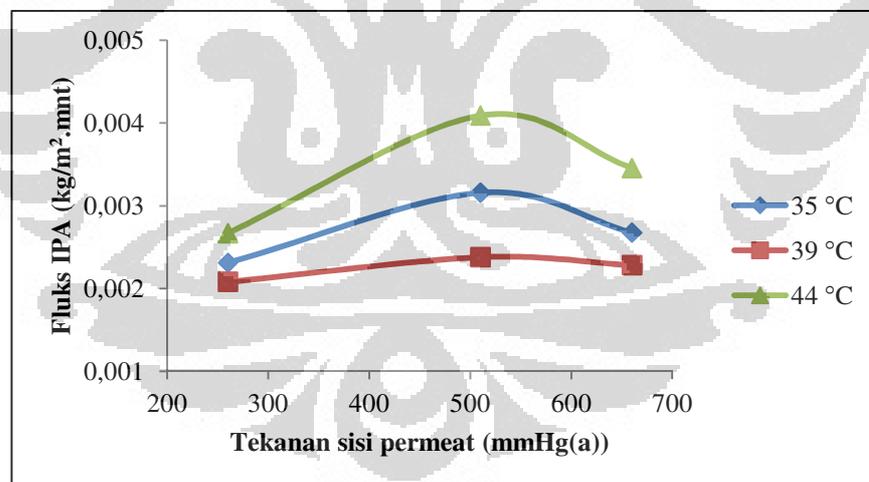
Gambar 4.18. Persentase penurunan kadar IPA di permeat setelah pervaporasi

4.2.1.2. Penentuan Tekanan Sisi Permeat

Seperti halnya pada etanol maka pada percobaan pervaporasi untuk menentukan kondisi operasi IPA juga dilakukan variasi tekanan sisi permeat. Gambar 4.19. menunjukkan pengaruh dari tekanan sisi permeat terhadap fluks air dan IPA pada berbagai perlakuan temperatur umpan.



(a)



(b)

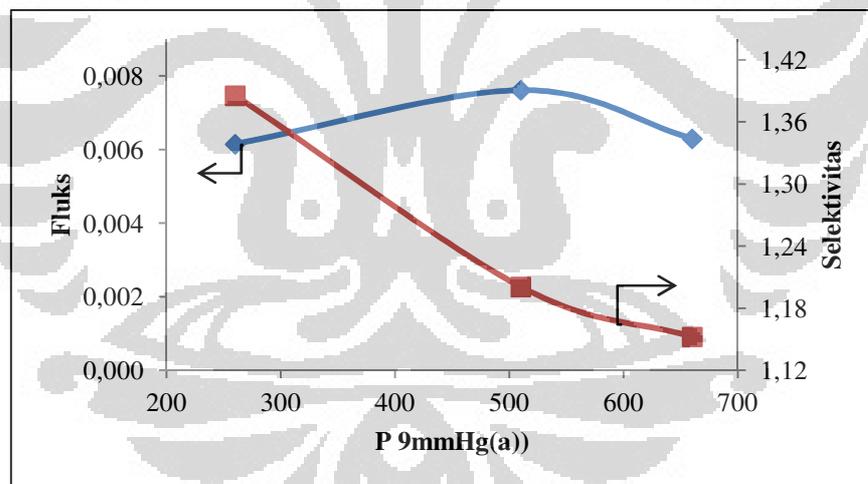
Gambar 4.19. Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap: (a) fluks air; dan (b) fluks IPA pada perlakuan temperatur umpan 35, 39, dan 44 °C.

Gambar 4.19. menunjukkan pengaruh dari tekanan sisi permeat terhadap fluks air dan IPA pada berbagai perlakuan temperatur (35, 39, dan 44 °C). Baik pada gambar (a) maupun (b) terlihat adanya hubungan dalam bentuk parabola dan linear antara tekanan dengan fluks air dan etanol. Semakin tinggi tekanan yang

digunakan maka nilai fluks air turun secara linear pada perlakuan temperatur umpan 39. Sedangkan pada perlakuan 35 dan 44 °C , seiring dengan kenaikan tekanan sisi permeat kedua fluks menyebabkan meningkat sampai pada kondisi 510 mmHg-a tetapi kemudian nilainya kembali menurun.

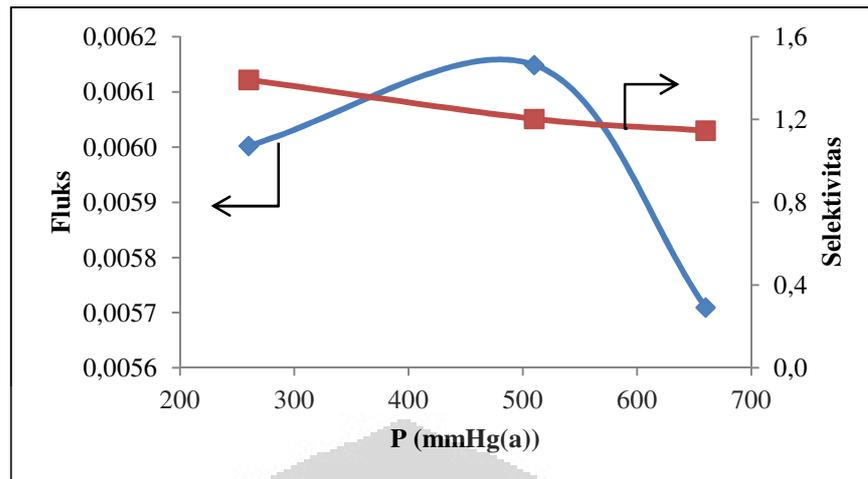
Secara teori, nilai fluks maksimum dicapai pada saat tekanan permeat nol absolut (Xie et al., 2011). Umumnya semakin rendah tekanan permeat maka fluks airnya meningkat karena pengaruh gaya penggerak terhadap molekul yang berdifusi ke dalam membran tinggi. Penurunan nilai fluks air dan IPA dipengaruhi oleh perubahan jumlah kedua molekul yang teradsorpsi di permukaan membran. Semakin sedikit molekul yang teradsorpsi maka nilai fluksnya semakin kecil.

Untuk dapat menentukan kondisi operasi berupa tekanan sisi permeat dari proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air, maka pada Gambar 4.20. menunjukkan hubungan antara nilai fluks total dan selektivitas pada kondisi 260, 510, dan 660 mmHg-a.

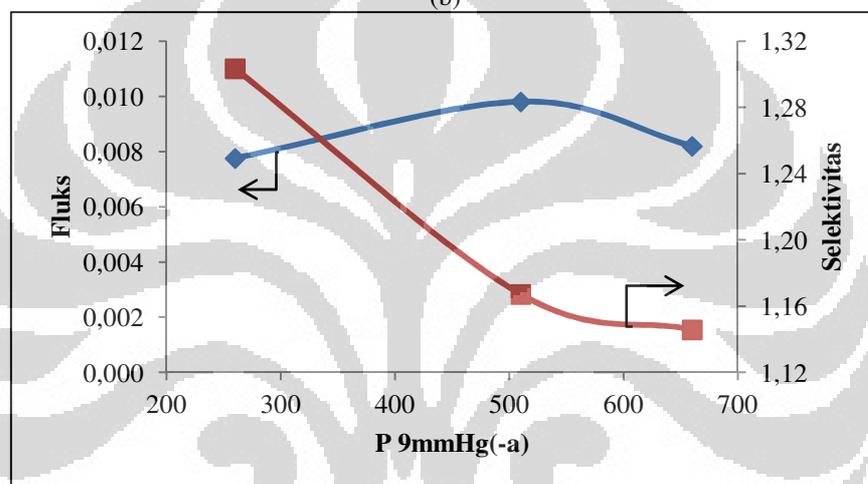


(a)

Gambar 4.20. Hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada saat temperatur umpan yang digunakan (a) 35; (b) 39; (c) 44°C.



(b)

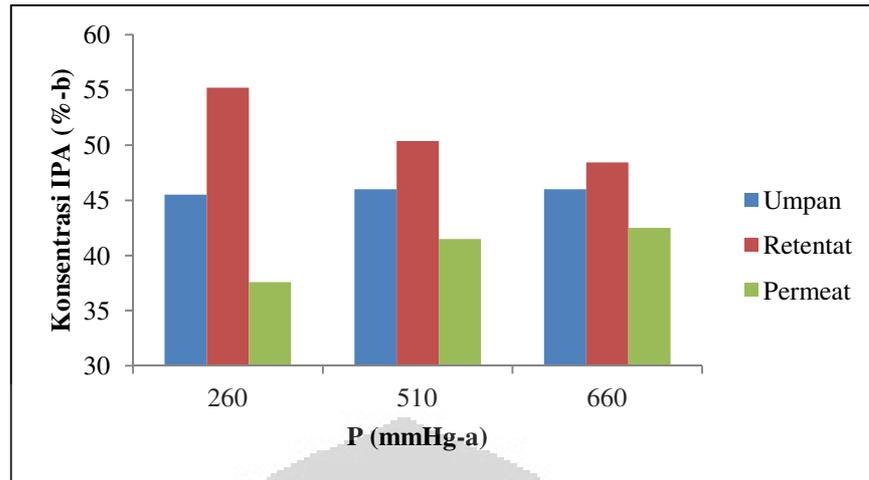


(c)

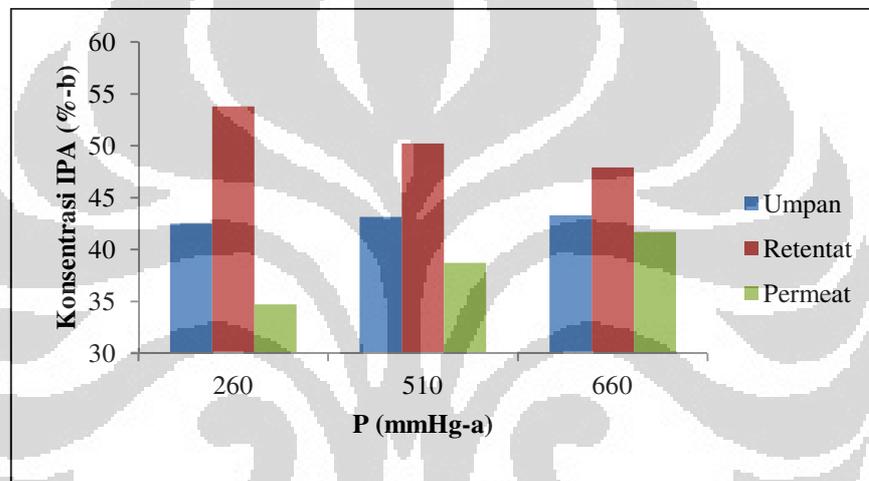
Gambar 4.20. (Lanjutan)

Berdasarkan gambar 4.20(a), (b), dan (c). dapat diketahui bahwa hubungan fluks dan selektivitas sebagai fungsi tekanan sisi permeat pada berbagai perlakuan temperatur umpan. Pada semua perlakuan temperatur umpan, nilai selektivitas tertinggi diperoleh pada kondisi 260 mmHg-a. Oleh karena itu, unjuk kerja pervaporasi yang optimum adalah pada kondisi 260 mmHg-a, dengan nilai fluks permeat dan selektivitas membran masing-masing adalah 0,0061 kg/m².mnt dan 1,202.

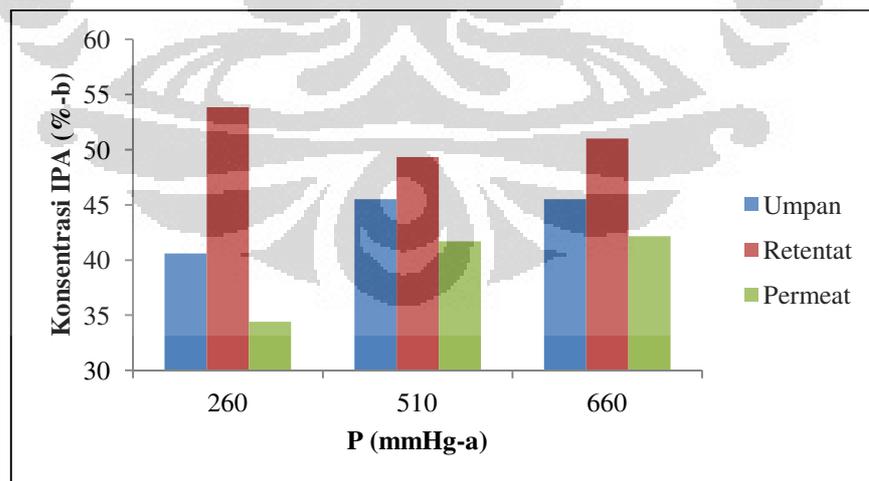
Hal ini didukung pula dengan hasil kadar IPA dipermeat seperti ditunjukkan pada. Gambar 4.21. Pada masing-masing kondisi terjadi kenaikan konsentrasi IPA pada retentat dan juga penurunan konsentrasi IPA pada permeat dari konsentrasi awalnya.



(a)



(b)

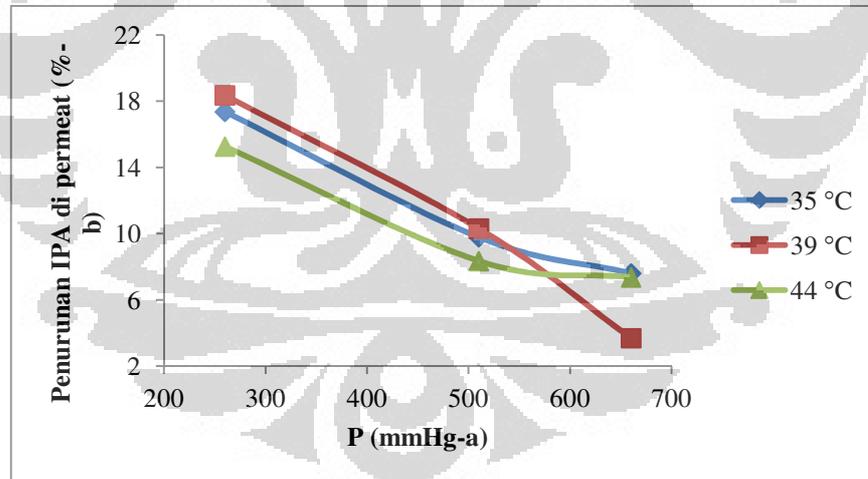


(c)

Gambar 4.21. Pengaruh tekanan sisi permeat terhadap kadar IPA di umpan, retentat, dan permeat untuk perlakuan temperatur umpan: (a) 35; (b) 39; (c) 44 °C

Gambar 4.21. menunjukkan pengaruh tekanan sisi permeat terhadap perubahan kadar IPA retentat dan permeat dibandingkan dengan umpan. Secara umum, pada semua kondisi terjadi kenaikan kadar IPA di retentat dan penurunan kadar IPA di permeat. Pola yang sama terjadi pada perlakuan temperatur umpan 35 dan 39 °C (Gambar 4.21(a) dan 4.21(b)); dimana kadar IPA di retentat menurun seiring dengan kenaikan tekanan sisi permeat Akan tetapi pada perlakuan temperatur umpan 44 °C, kadar IPA di permeat menurun sampai tekanan 510 mmHg-a dan kemudian naik kembali. Kadar etanol tertinggi di retentat diperoleh pada saat kondisi 260 mmHg-a untuk perlakuan temperatur umpan 39 °C yaitu sebesar 53,80%.

Dari data yang diperoleh pada Gambar 4.22., maka dapat dihitung nilai penurunan kadar IPA di permeat. Profil dari penurunannya sebagai fungsi temperatur umpan dapat dilihat pada Gambar 4.22. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa persentase penurunan etanol di permeat terbesar terjadi pada saat kondisi 260 mmHg-a, yaitu sebesar 18,35 %.



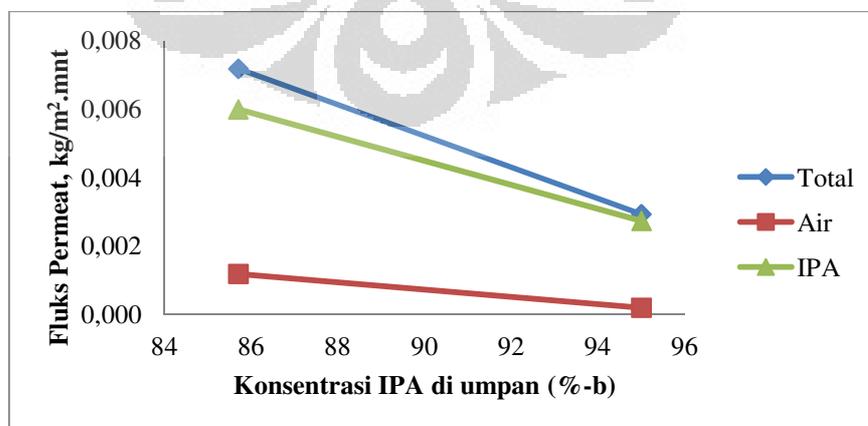
Gambar 4.22. Profil persentase penurunan kadar IPA di permeat setelah pervaporasi sebagai fungsi tekanan sisi permeat

4.2.2. Proses Pervaporasi Campuran Azeotrop Isopropil Alkohol-Air (IPA-air)

Seperti halnya pada etanol maka IPA juga membentuk sistem azeotrop dengan air, yaitu pada saat kadar IPA dalam campuran sebesar 85,7 %-b. Oleh karena itu, pada percobaan ini dilakukan pemisahan campuran azeotrop IPA-air dengan menggunakan membran TFC komersial yang berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester. Dalam percobaan ini juga dilakukan pervaporasi campuran IPA-air dengan konsentrasi IPA sebesar 95% sebagai pembanding. Berdasarkan hasil proses pervaporasi pada bab sebelumnya, maka kondisi operasi yang digunakan untuk pemisahan azeotrop IPA-air adalah pada 39 °C dan 260 mmHg-a. Sistem pervaporasi yang digunakan menggunakan sistem B seperti ditunjukkan pada Gambar 3.15.(b). Pada sistem ini IPA dari retentat tidak dikembalikan ke umpan. Proses dilakukan dalam waktu masing-masing 3 jam. Dari data percobaan (pada Lampiran B.4, tabel B.7) diketahui bahwa pemisahan campuran azeotrop dengan kadar awal 85,7 % hanya dapat menurunkan kadar IPA di permeat menjadi 83,5 %.

4.1.2.3. Pengaruh Komposisi Umpan Terhadap Kinerja Membran TFC Komersial.

Hasil unjuk kerja membran TFC dalam proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23. Pengaruh konsentrasi umpan IPA-air terhadap fluks total dan fluks permeasi parsial dari membran TFC.

Umumnya, membran TFC komersial akan mengembang dengan meningkatnya konsentrasi air di umpan, sehingga menghasilkan afinitas yang lebih kuat antara lapisan selektif poliamida dengan molekul air dibandingkan dengan molekul IPA. Gambar 4.23. menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi IPA, maka nilai fluks total, air, dan IPA menurun. Kadar air pada campuran azeotrop IPA-air lebih tinggi daripada campuran IPA-air 95% sehingga nilai fluks permealnya juga lebih tinggi. Ghazali (2001), menyatakan bahwa saat konsentrasi air dalam umpan lebih besar, maka area amorf pada membran menjadi semakin mengembang (Ghazali, 2001). Hal ini mengakibatkan rantai polimer menjadi lebih fleksibel dan menghasilkan lebih banyak ruang bebas untuk terjadinya difusi. Pada kondisi ini, perpindahan secara difusi membutuhkan energi lebih rendah sehingga fluks air meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi air di dalam umpan. Pada kondisi tersebut, laju permeasi IPA lebih menyerupai laju permeasi total. Hal ini menunjukkan bahwa membran TFC juga bersifat permeabel terhadap IPA, karena konsentrasi IPA yang digunakan cukup tinggi sehingga membran menjadi kurang selektif terhadap air.

Gambar 4.23. juga menunjukkan bahwa terjadi kenaikan fluks IPA dengan menurunnya konsentrasi air di umpan. Hal ini disebabkan oleh adanya efek plastisasi air terhadap membran polimer. Adanya efek plastisasi polimer akan menyebabkan pori membran melunak dan membesar, akibatnya IPA yang memiliki ukuran molekul lebih besar daripada air pun dapat melewati membran. Akan tetapi, karena ukurannya yang besar menyebabkan IPA lebih lama tertahan di dalam lapisan selektif poliamida dan akibatnya molekul air sukar menembus membran (Li et al., 2008). Oleh karena itu, nilai fluksnya menurun.

Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi (*pervaporation separation index/PSI*) dari proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air ini dapat dilihat pada Tabel 4.2. Nilai selektivitas membran TFC komersial dari campuran IPA-air dengan komposisi IPA di umpan 85,5 dan 95 % pada rentang 1,164 – 1,285.

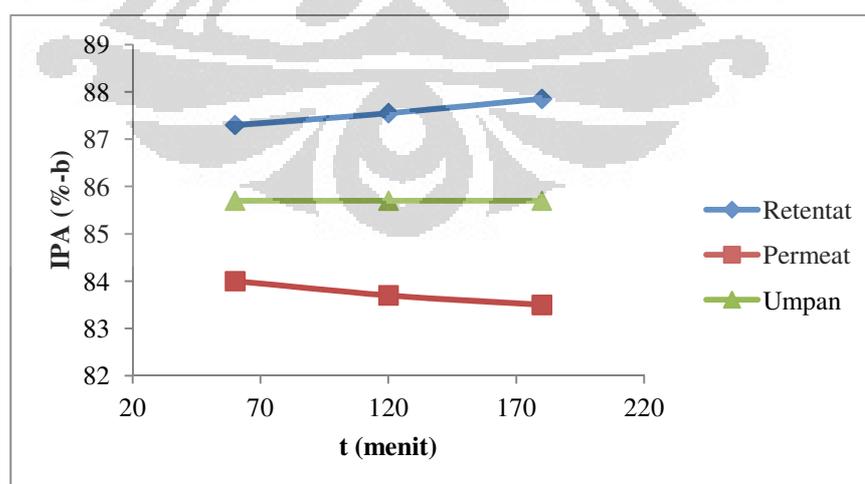
Tabel 4.2. Nilai selektivitas dan indeks pervaporasi campuran azeotrop IPA-air

Konsentrasi (%-b)	α	PSI	% Penurunan IPA di Permeat
85,7	1,164	0,0084	2,29
95	1,285	0,0038	1,40

Feng dan Huang (1997) menyatakan bahwa pada saat nilai $\alpha = 1$, maka tidak terjadi pemisahan (Feng & Huang, 1997). Oleh karena itu, dalam proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air hanya diperoleh persentase penurunan IPA di permeat yang cukup kecil, yaitu sebesar 2,29 %. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai PSI yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,0084 kg/m².mnt. Hal ini menunjukkan bahwa proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air dengan membran TFC komersial kurang efektif.

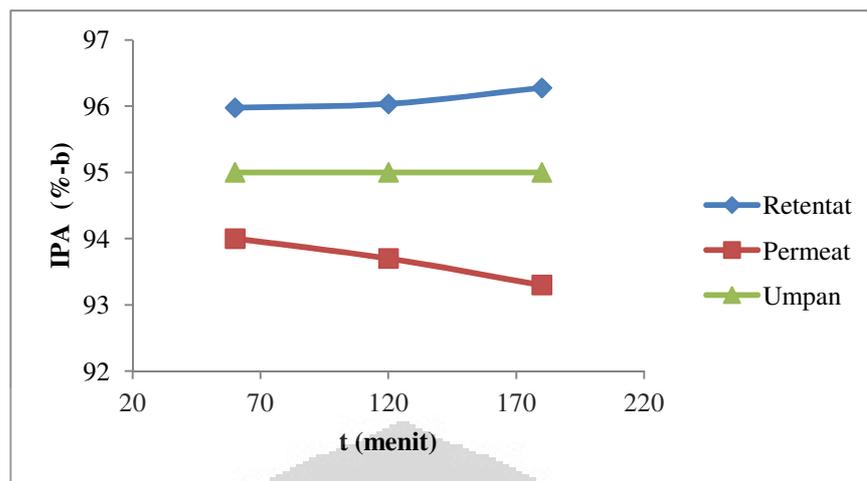
4.1.2.4. Pengaruh Waktu Pervaporasi Terhadap Kadar IPA di Permeat dan Selektivitas

Gambar 4.24. menunjukkan profil konsentrasi IPA di permeat sebagai fungsi waktu.



(a)

Gambar 4.24. Pengaruh waktu pervaporasi terhadap: (a) konsentrasi IPA azeotrop; dan (b) konsentrasi IPA 95% di umpan, permeat, dan retentat.



(b)

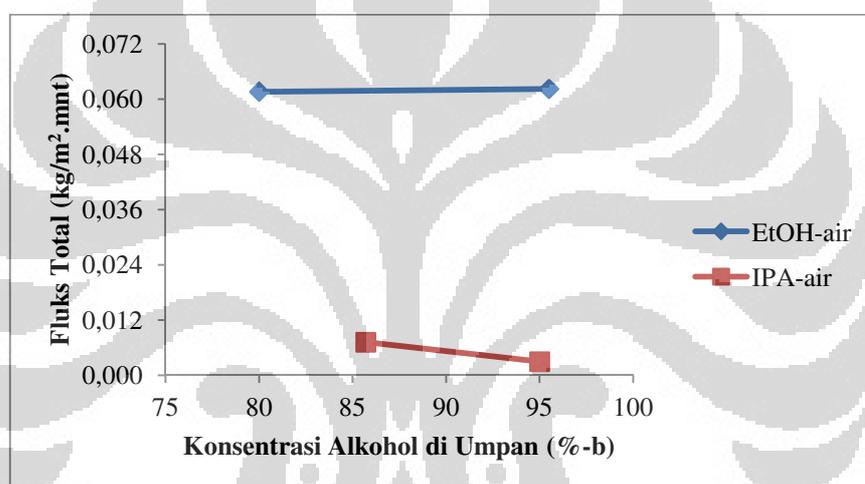
Gambar 4.24. (Lanjutan)

Gambar 4.24(a) dan (b) menunjukkan bahwa semakin lama waktu operasi, kadar IPA di permeat semakin menurun baik untuk konsentrasi umpan 85,7 maupun 95 %. Akan tetapi penurunan yang terjadi tidak signifikan. Pemisahan campuran azeotrop IPA-air dengan kadar awal 85,7 % dapat menaikkan kadar IPA di retentat menjadi 87,9 %-b, selama 180 menit proses pervaporasi. Pada proses pervaporasi ini kemurnian IPA di retentat berhasil melewati titik azeotropnya. Walaupun kenaikan kadar IPA di retentat tersebut juga masih sangat kecil. Penurunan kadar IPA di permeat pun hanya berada pada rentang 1,98 – 2,57 %. Hasil ini menunjukkan bahwa masih ada IPA yang dapat menembus membran, karena selain ada efek interaksi membran dengan air, ternyata IPA juga dapat berinteraksi dengan membran. Dengan adanya efek ini menyebabkan nilai fluks IPA lebih tinggi daripada fluks air dan selektivitas membran terhadap air menjadi rendah.

4.3. Perbandingan Proses Pervaporasi Campuran Etanol-Air dan IPA-Air

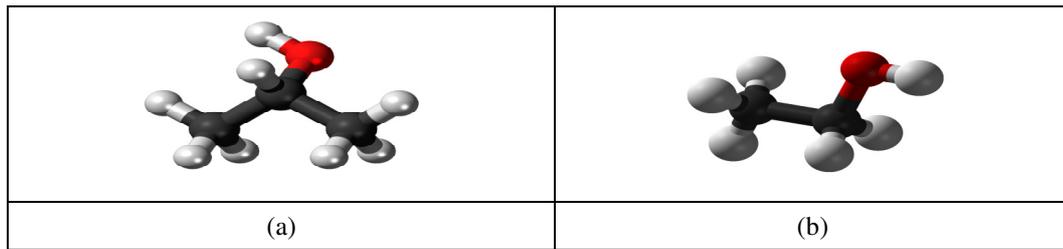
Berdasarkan hasil yang telah dipaparkan pada paragraf-paragraf sebelumnya, ternyata ada perbedaan unjuk kerja pervaporasi antara campuran azeotrop etanol-air dan IPA-air. Gambar 4.25. di bawah ini, menunjukkan pengaruh dari konsentrasi etanol dan IPA terhadap fluks total permeat yang melalui membran TFC komersial berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester.

Satu hal yang menjadi catatan dari gambar 4.25. adalah, bahwa proses pervaporasi campuran azeotrop etanol-air pada penelitian ini dilakukan pada kondisi yang berbeda dengan campuran azeotrop IPA-air. Oleh karena itu, agar unjuk kerja dari kedua sistem alkohol tersebut dapat dibandingkan, maka percobaan dilakukan menggunakan umpan dengan konsentrasi yang sama, yaitu pada rentang 80 – 95 %-b. Pada kondisi pervaporasi 39 °C dan 510 mmHg-a, fluks total dari campuran etanol-air berada pada rentang 0,0616 – 0,0622 kg/m².mnt. Sedangkan, fluks total campuran IPA-air pada kondisi 39 °C dan 260 mmHg-a adalah sebesar 0,0072 – 0,0029 kg/m².mnt.



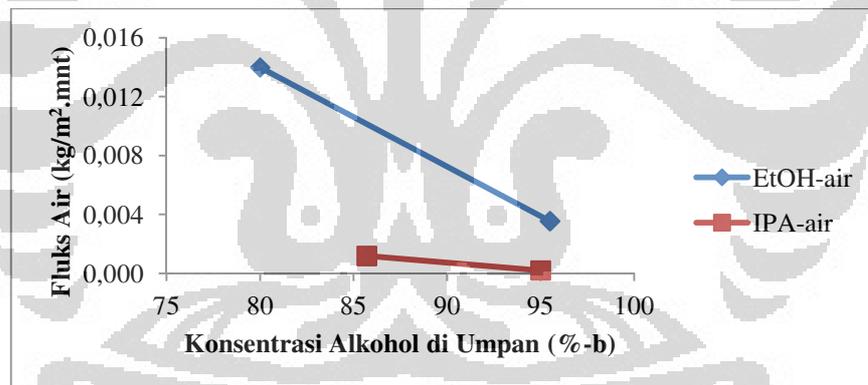
Gambar 4.25. Fluks total campuran etanol-air dan IPA-air

Gambar 4.25 di atas menunjukkan bahwa, nilai fluks total campuran etanol-air lebih tinggi daripada campuran IPA-air pada berbagai konsentrasi alkohol. Keberadaan molekul etanol dan IPA di dalam umpan berdampak pada kemampuan membran untuk menyerap air, sehingga mempengaruhi nilai fluksnya. Perbedaan nilai fluks ini disebabkan oleh perbedaan ukuran molekul etanol dan IPA serta kemampuan kedua molekul tersebut untuk berinteraksi dengan polimer membran (Molina et al., 2002). Gambar 4.26. di bawah ini menunjukkan struktur molekul dari etanol dan IPA.

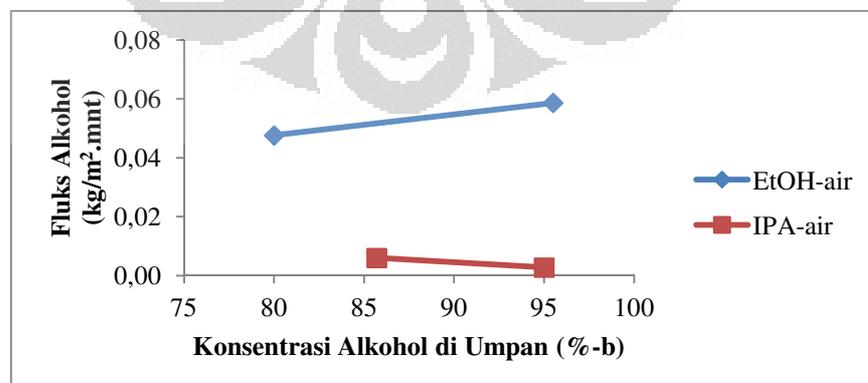


Gambar 4.26. Struktur molekul: (a) IPA dan (b) Etanol

Berdasarkan gambar 4.26., diketahui bahwa IPA memiliki ukuran molekul lebih besar daripada etanol. Karenanya, proses difusinya ke dalam membran terhalang. Selain itu, adanya gugus metil ketiga pada struktur molekul IPA mengurangi sifat hidrofilitasnya, sehingga penyerapan molekul ini ke dalam membran lebih rendah daripada etanol. Perbedaan kemampuan menembus membran dari kedua molekul alkohol ini ditunjukkan dalam profil fluks air dan alkohol sebagai fungsi konsentrasi pada Gambar 4.27.



(a)



(b)

Gambar 4.27. Nilai fluks air dan alkohol dari campuran etanol-air dan IPA-air

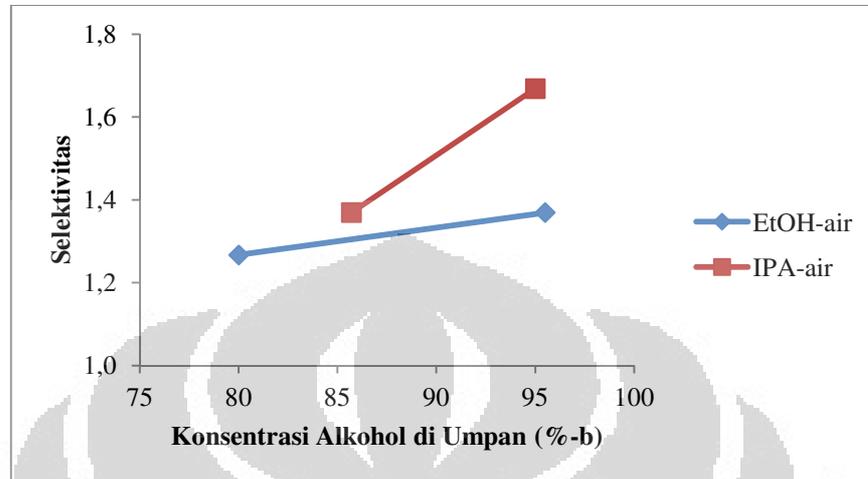
Gambar 4.27(a). menunjukkan bahwa, fluks air pada campuran etanol-air menurun sangat signifikan dengan meningkatnya kadar etanol pada umpan. Hal ini disertai pula dengan meningkatnya fluks etanol, yaitu dari . 0,0476 menjadi 0,0587 kg/m².mnt. Seiring dengan menurunnya kadar etanol dalam campuran, maka kadar airnya pun menurun. Akibatnya gaya penggerak untuk perpindahan air berkurang dan fluks air akan menurun pula. Selain itu, dengan menurunnya kadar air dalam campuran maka efek plastisasi air terhadap membran berkurang dan menyebabkan derajat pengembangan membran menurun. Dengan kata lain, volume bebas polimer mengecil sehingga laju difusi air menurun dan mengakibatkan fluksnya menurun.

Pada etanol konsentrasi tinggi ternyata nilai fluksnya meningkat, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.27(b) di halaman sebelumnya. Hal ini mungkin disebabkan oleh fenomena *coupling*, yaitu fenomena dimana laju difusi molekul yang lebih mudah berdifusi melewati membran (air) diperlambat oleh molekul lainnya (etanol), sedangkan laju difusi molekul yang lebih lambat (etanol) dipercepat oleh molekul air (Lestari, 2006). Fenomena ini berkaitan dengan pengaruh ikatan hidrogen yang cukup kuat antara molekul etanol dan air, sehingga memperbesar kelarutan etanol dalam air. Air yang sedikit pada campuran telah berhasil mempebesar volume bebas pada membran dan berdifusi, sehingga membran semakin bersifat plastis. Molekul air yang berdifusi tersebut cenderung menarik molekul etanol untuk ikut berdifusi dan menyebabkan fluks etanolnya meningkat.

Hal seperti pada campuran etanol-air di atas tidak terjadi pada campuran IPA-air. Fluks IPA ternyata menurun dengan bertambahnya kadar IPA di dalam campuran. Seperti telah dijelaskan di atas bahwa hal tersebut dipengaruhi oleh ukuran diameter kinetika molekul IPA yang lebih besar sehingga memperlambat laju difusinya melewati membran. Oleh karena itu, nilai fluks IPA lebih rendah dari pada fluks etanol.

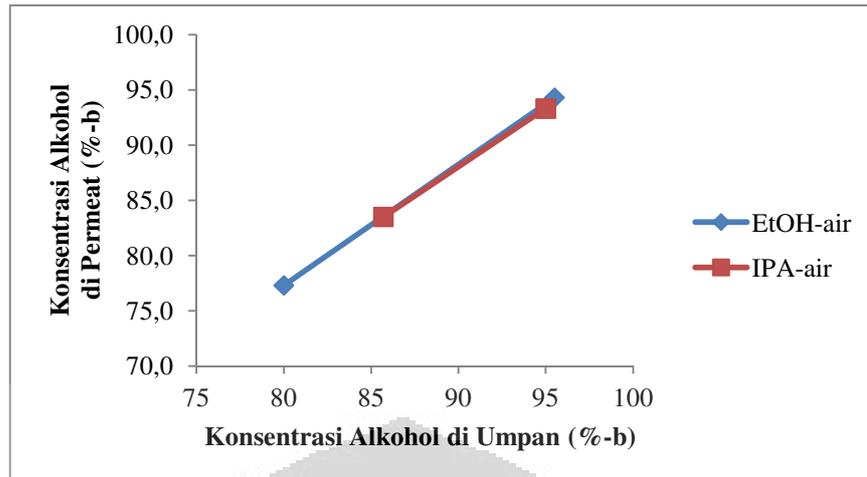
Gambar 4.28. di bawah ini, menunjukkan bahwa nilai selektivitas air terhadap IPA meningkat dari 1,3693 menjadi 1,6684 pada saat konsentrasi IPA naik dari 85,5 menjadi 95 %-b. Sedangkan nilai selektivitas air terhadap etanol

menurun dari 1,2669 menjadi 1,1613, pada saat konsentrasi etanol naik dari 80 menjadi 95,5 %-b.



Gambar 4.28. Nilai selektivitas air terhadap alkohol dari campuran etanol-air dan IPA-air.

Rendahnya pengaruh dari fenomena *coupling* dan lebih lemahnya ikatan hidrogen antara molekul IPA dengan air daripada etanol dengan air, berdampak pada nilai selektivitasnya. Sesuai dengan perkiraan, bahwa nilai selektivitas air terhadap alkohol pada campuran IPA-air lebih tinggi daripada campuran etanol-air. Seperti dapat dilihat pada Gambar 4.28., nilai selektivitas air terhadap etanol maupun IPA pada konsentrasi tinggi hanya berada pada rentang 1,2669 – 1,6684. Oleh karena itu, konsentrasi alkohol di permeat hanya berkurang sedikit dari konsentrasi mula-mula (Gambar 4.29.)

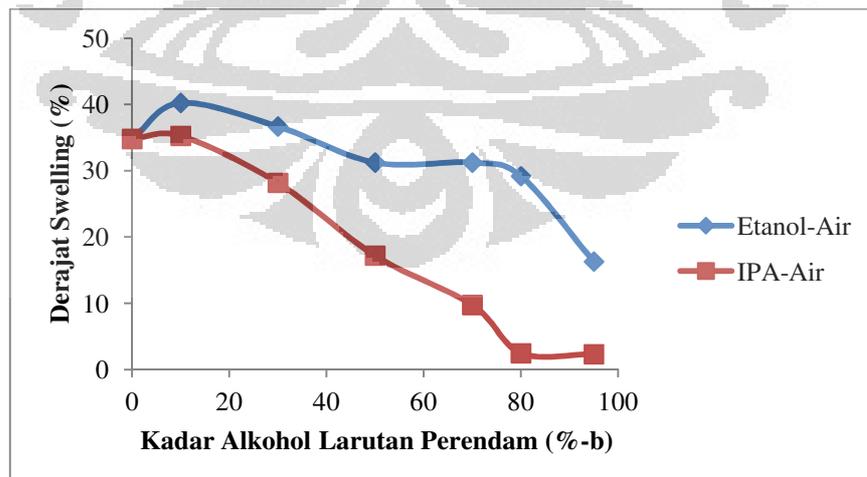


Gambar 4.29. Variasi konsentrasi alkohol di permeat sebagai fungsi konsentrasi alkohol di umpan.

4.4. Karakterisasi Membran TFC

4.4.1. Pengujian Sorpsi Membran TFC Komersial

Kemampuan *swelling* dari suatu membran dapat mempengaruhi unjuk kerja membran pervaporasi. Sifat ini dipengaruhi oleh jenis dan proses pembuatan membran. Gambar 4.30. menunjukkan profil derajat *swelling* (DS) dari membran TFC komersial berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester dalam campuran etanol-air dan IPA-air berbagai konsentrasi.



Gambar 4.30. Derajat *swelling* membran TFC sebagai fungsi konsentrasi etanol dan IPA

Pada Gambar 4.30. di atas, dapat dilihat bahwa, campuran etanol-air dan IPA-air dapat mengembangkan membran TFC berbasis dasar poliamida/polisulfon/poliester pada berbagai konsentrasi. Semakin tinggi konsentrasi etanol dan IPA, maka DS-nya akan menurun. Perilaku ini sesuai dengan perkiraan, karena lapisan selektif poliamida pada membran TFC bersifat hidrofilik. Sehingga air cenderung diserap oleh membran daripada etanol dan IPA.

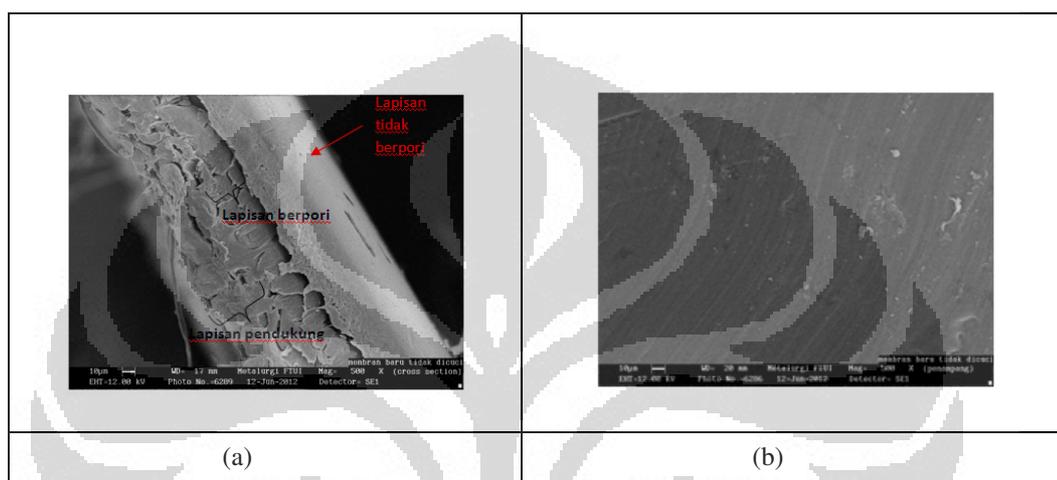
Derajat *swelling* campuran etanol-air pada berbagai konsentrasi lebih tinggi daripada campuran IPA-air (Gambar 4.29.). Hasil menunjukkan bahwa, pada konsentrasi etanol dan IPA rendah, maka perbedaan nilai DS dari membran TFC dalam kedua campuran cukup kecil. Sedangkan pada konsentrasi di atas 10 %-b, perbedaan nilai DS semakin besar dengan meningkatnya konsentrasi alkohol. Hal ini terjadi karena afinitas lapisan selektif poliamida terhadap campuran etanol-air lebih kuat daripada terhadap campuran IPA-air.

Oleh karena itu, membran ini dapat digunakan sebagai membran untuk pemisahan etanol khususnya pada konsentrasi di bawah 10 %. Karena pada konsentrasi rendah etanol dapat dipisahkan dengan selektif dari campuran etanol-air. Sedangkan untuk campuran IPA-air, membran TFC komersial ini dapat lebih selektif melewatkan air pada berbagai rentang konsentrasi dibandingkan dengan campuran etanol-air. Akan tetapi, berdasarkan hasil yang telah dipaparkan pada paragraf-paragraf sebelumnya nilai selektivitas dari kedua campuran tersebut sangat rendah. Hal ini mungkin dipengaruhi oleh proses pembuatan membran TFC ini. Deng et al (1994) menyatakan bahwa, ketika membran asimetrik poliamida yang selektif terhadap air dilaminasi dengan polidimetilsiloksan (PDMS), maka membran menjadi lebih selektif terhadap permeasi air. Adanya membran PDMS di atas membran poliamida dapat mencegahnya untuk mengembang karena larutan umpan dan meningkatkan selektivitasnya (Deng et al., 1994).

4.4.2. Analisis Membran dengan SEM

Salah satu faktor yang berpengaruh pada kinerja perpindahan umpan cair pada proses pervaporasi adalah sifat morfologinya. Oleh karena itu, sifat morfologi membran TFC poliamida/polisulfon/poliester dianalisa dengan *Scanning*

Elektron Microscope (SEM). Membran diimersi ke dalam larutan nitrogen cair dan dipatahkan menjadi dimensi yang lebih kecil yang sesuai dengan alat SEM. Selanjutnya, sampel tersebut dipercikkan emas dengan *SEM sputter coater* sehingga gambar morfologi membran dapat ditangkap oleh SEM. Berdasarkan hasil analisis SEM, diperoleh struktur morfologi TFC baik penampang melintang maupun penampang permukaan membran (Gambar 4.31).



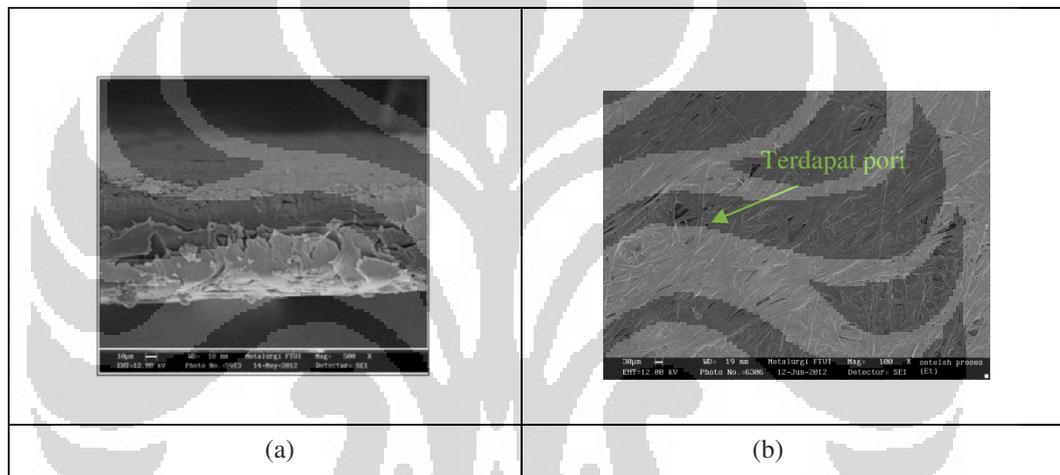
Gambar 4.31. Struktur morfologi membran *thin film composite* berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester: (a) penampang melintang; (b) penampang permukaan membran.

Gambar penampang melintang membran (Gambar 4.30.(a)) menunjukkan bahwa membran TFC yang digunakan pada penelitian ini merupakan membran komposit yang terdiri dari tiga lapisan yaitu: (i) lapisan aktif yang sangat tipis dan tidak berpori berbahan dasar poliamida; (ii) sub lapisan berpori sebagai lapisan penyangga bagi lapisan tipis di atasnya yang berbahan dasar polisulfon; dan (iii) lapisan penguat yang tidak ditenun berbahan dasar poliester. Sedangkan gambar penampang permukaan membran menunjukkan lapisan tidak berpori poliamida pada lapisan atas membran TFC. Lapisan tersebut bersifat selektif dan berfungsi sebagai tempat terjadinya pemisahan campuran etanol-air dan IPA-air. Sedangkan sub lapisan berpori berfungsi untuk meningkatkan laju permeasi kedua campuran tersebut.

Mekanisme perpindahan pada membran polimer yang tidak berpori, seperti pada lapisan aktif membran TFC, dapat dijelaskan dengan mekanisme

pelarutan dan difusi (*solution-diffusion*) (Wijmans & Baker, 1995). Pada permukaan membran poliamida akan terjadi adsorpsi selektif terhadap molekul etanol atau IPA dan air. Interaksi antara penetran (etanol, IPA, dan air) dengan material membran dinyatakan dengan parameter kelarutan (*solubility*). Tahap sorpsi ini penting karena selanjutnya akan menentukan perpindahan yang selektif. Semakin rapat pori membran, maka pemisahan dengan mekanisme ini akan menghasilkan permeabilitas yang rendah dan selektivitas tinggi.

Gambar 4.32. menunjukkan morfologi membran setelah proses pervingorasi pada penampang melintang dan permukaan membran.



Gambar 4.32. Struktur morfologi membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester setelah proses pervingorasi: (a) penampang melintang; (b) penampang permukaan membran.

Dari gambar penampang permukaan membran (Gambar 4.32.(b)) dapat dilihat bahwa telah terjadi perubahan pada permukaan membran setelah proses pervingorasi, yaitu telah terjadi perbesaran ruang kosong setelah proses pervingorasi. Hal ini dapat terjadi karena dua faktor, yaitu: (a) pengaruh temperatur dan (2) interaksi antara polimer membran dengan komponen umpan.

Perubahan temperatur pada membran karena pemanasan oleh larutan umpan yang melewatinya, dapat menyebabkan perubahan struktur membran. Adanya pergerakan panas dari rantai polimer di bagian amorf menyebabkan terbentuknya ruang kosong di antara makromolekul penyusun polimer membran. Ketika temperatur semakin meningkat, pergerakan panas ini semakin merusak dan

mengakibatkan perbesaran ruang kosong dalam membran. Seperti telah diungkapkan pada bab 3, temperatur operasi maksimum dari membran TFC yang berbahan dasar poliamida ini adalah 45 °C. Ketika membran dipanaskan pada rentang temperatur 39 – 44 °C, maka akan terjadi perubahan fasa membran dari *glassy* ke *rubbery*. Pada fasa *rubbery*, ruang kosong dalam membran akan bertambah dan menyebabkan *swelling*. Kemampuan *swelling* yang terlalu besar dari komponen umpan dapat meningkatkan fluks total permeat, seperti pada penelitian ini. Perbesaran ruang kosong yang terbentuk pada fasa *rubbery*, seperti pada Gambar 4.32(b), tidak akan mengecil kembali, sehingga akan bersifat permanen walaupun temperatur dalam membran sudah menurun.

Sedangkan faktor lain yang mungkin mempengaruhi perbesaran ruang kosong membran adalah adanya interaksi antara komponen umpan, yaitu etanol dan IPA, dengan polimer membran. Ketika lapisan selektif poliamida kontak dengan senyawa yang memiliki parameter kelarutan yang hampir sama, maka polimer rantai lurus dengan berat molekul rendah akan larut atau akan terjadi *swelling* pada rantai polimer yang telah berikatan silang (Agrawal dan Singh, 2011). *Swelling* polimer ini dapat berlangsung ekstrim, sehingga menyebabkan plastisasi polimer dan perbesaran ruang kosong diantara makromolekul penyusun polimer.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil percobaan dan analisis data hasil pengamatan bisa disimpulkan beberapa hal berikut ini:

- Kinerja membran TFC, yaitu nilai fluks dan selektivitas, lebih baik dalam proses pervaporasi campuran azeotrop IPA-air daripada etanol-air. Hal ini ditunjukkan dengan hasil pervaporasi azeotrop IPA-air yang dapat menurunkan kadar IPA di permeat dari 85,7 menjadi 83,5 %-b dan meningkatkan kadar IPA di retentat menjadi 87,9 %-b, dengan nilai fluks permeat dan selektivitas sebesar 0,0098 kg/m².mnt dan 1,277. Sedangkan pervaporasi campuran azeotrop etanol-air ternyata hanya dapat menurunkan kadar etanol di permeat dari 95,5 menjadi 94,3 %-b dan meningkatkan kadar etanol di retentat menjadi 96,3 %-b, dengan nilai fluks permeat dan selektivitas sebesar 0,079 kg/m².mnt dan 1,267.
- Nilai fluks dan selektivitas dari proses pervaporasi campuran etanol-air dan IPA-air ternyata dipengaruhi oleh komposisi umpan yang digunakan dan kondisi operasi, seperti temperatur umpan dan tekanan sisi permeat.

5.2. Saran

Kemampuan membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester sebagai membran pervaporasi ternyata masih kurang baik. Hal ini dipengaruhi oleh kemampuan membran ini yang kurang kuat dalam berinteraksi dengan air, sehingga masih ada etanol yang dapat menembus membran. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya, dapat disarankan untuk melakukan:

- Rekayasa secara khusus pada membran TFC berbahan dasar poliamida/polisulfon/poliester dalam proses pembuatannya sehingga dapat meningkatkan selektivitasnya tanpa menurunkan nilai fluks.
- Pemisahan campuran etanol-air atau IPA-air dengan membran yang lebih memiliki gugus -OH, seperti membran PVA, sehingga lebih selektif terhadap air.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, V. K., Singh, P. S. (2012). Alcohol-induced change of “reverse osmosis” polyamide membrane surface. *Journal of Applied Polymer Science*, 124, E290-E299.
- Akihiro, Y., Tyagi, R.K., Fouda, A., Matsuura, T. (1996). Effect of evaporation time on the pervaporation characteristics through homogeneous aromatic polyamide membranes. II. Pervaporation performances for ethanol/water mixture. *Journal of Applied Polymer Science*, 60, 5, 743-748.
- Ariyanti, D. (2009). Studi Metode Autoflush: Pengendalian Scaling Pada Sistem Membran Reverse Osmosis Skala Rumah Tangga. Program Pasca Sarjana UNDIP. Semarang.
- Baig, F. U. (2008). Pervaporation. In A. G. F. Norman N. Li, W. S. Winston Ho and T. Matsuura (Ed.), *Advanced Membrane Technology and Applications* (pp. 469-488). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Baker, R. W. (2004). *Membrane Technology and Applications*. California: John Wiley & Sons Ltd.
- Bakhsi, A., Mohammadi, T., Ghaffari, O., Aroujalian, A. (2006). Effect of operating conditions on pervaporation of methanol-water mixtures: Part 2. *Journal of Membrane Technology*, 2006(12), 7-11.
- Chan, W.-H., Ng, C.-F., Lam-Leung, S.-Y., & He, X. (1998). Pervaporation of aqueous ethanol solution through poly(amidesulfonamide)s (PASAs) membranes. *Polymer*, 39(12), 2461-2467.
- Chapman, P. D., Oliveira, T., Livingston, A. G., & Li, K. (2008). Membranes for the dehydration of solvents by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 318(1-2), 5-37.
- Dalwani, M. R. (2011). *Thin film composite nanofiltration membranes for extreme conditions* (Dissertation), University of Twente, The Netherlands.
- Deng, S., Shiyao, B., Sourirajan, S., Matsuura, T. (1994). A Study of polydimethylsiloxane/aromatic polyamide laminated membranes for separation of acetic acid/water mixtures by pervaporation process. *Sep. Sci. Technology*, 29, 1209.
- Feng, X. a. H., Robert Y. M. (1997). Liquid Separation by Membrane Pervaporation: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(4), 1048-1066.
- Fessenden, R.J., Fessenden, J.S. (1986). Kimia Organik Jilid 1 (p.27) (Aloysius Hadyana Pudjaatmaka, Penerjemah). Jakarta: Penerbit Erlangga
- Garjito. (2006). Pengaruh Penambahan Bioetanol Terhadap Karakter Bahan Bakar Motor. Tesis. Tidak dipublikasikan. Sekolah Pasca Sarjana UGM. Yogyakarta.
- Ghazali, M., Hashim, Huat, T.S. (2001). Azeotropic Separation of Isopropanol-Water Mixtures By Pervaporation Using A Locally Produced Chitosan-Based Membrane. 15th Symposium of Malaysian Chemical Engineers SOMChE 2001. pp.553-560.

- He, X., Chan, W.-H., & Ng, C.-F. (2001). Water-alcohol separation by pervaporation through zeolite-modified poly(amidesulfonamide). *Journal of Applied Polymer Science*, 82(6), 1323-1329.
- Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U. W., & Ramarao, B. V. (2008). A review of separation technologies in current and future biorefineries. *Separation and Purification Technology*, 62(1), 1-21.
- Huang, S.-H., Li, C.-L., Hu, C.-C., Tsai, H. A., Lee, K.-R., & Lai, J.-Y. (2006). Polyamide thin-film composite membranes prepared by interfacial polymerization for pervaporation separation. *Desalination*, 200(1-3), 387-389.
- Huang, S.-H., Lin, W.-L., Liaw, D.-J., Li, C.-L., Kao, S.-T., Wang, D.-M., Lai, J.-Y. (2008). Characterization, transport and sorption properties of poly(thiol ester amide) thin-film composite pervaporation membranes. *Journal of Membrane Science*, 322(1), 139-145.
- Kujawski, W. (2000). Application of Pervaporation and Vapor Permeation in Environmental Protection. *Polish Journal of Environmental Studies*, 9(1), 13-26.
- Kusuma, D.S., Dwiatmoko, A.A. (2009). Pemurnian Etanol Untuk Bahan Bakar. *Berita IPTEK*, 47(1), 48-56.
- Lau, W.-J., Ismail, A.-F., Misdan, N., & Kassim, M.-A. (2011). A recent progress in thin film composite membrane: a review. *Desalination*, 287, 190-199.
- Lestari, D. (2006). Studi penambahan mineral lempung dan zeolit untuk meningkatkan unjuk kerja membran pervaporasi. Tesis. Program Studi Teknik Kimia ITB. Bandung.
- Li, C.-L., Huang, S.-H., Liaw, D.-J., Lee, K.-R., & Lai, J.-Y. (2008). Interfacial polymerized thin-film composite membranes for pervaporation separation of aqueous isopropanol solution. *Separation and Purification Technology*, 62(3), 694-701.
- Liu, Y.-L., Yu, C.-H., & Lai, J.-Y. (2008). Poly(tetrafluoroethylene)/polyamide thin-film composite membranes via interfacial polymerization for pervaporation dehydration on an isopropanol aqueous solution. *Journal of Membrane Science*, 315(1-2), 106-115.
- Liu, Y.-L., Yu, C.-H., Lee, K.-R., & Lai, J.-Y. (2007). Chitosan/poly(tetrafluoroethylene) composite membranes using in pervaporation dehydration processes. *Journal of Membrane Science*, 287(2), 230-236.
- Molina, J. M., Vatai, G., & Bekassy-Molnar, E. (2002). Comparison of pervaporation of different alcohols from water on CMG-OM-010 and 1060-SULZER membranes. *Desalination*, 149(1-3), 89-94.
- Mulder, M. (1991). *Basic Principles of Membrane Technology*. Netherland: Kluwer Academic Publishers.
- Pangarkar, V. G., & Pal, S. (2009). *Pervaporation: Theory, Practice, and Applications in the Chemical and Allied Industries*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Peng, M., Vane, L. M., & Liu, S. X. (2003). Recent advances in VOCs removal from water by pervaporation. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1-3), 69-90.

- Semenova, S. I., Ohya, H., & Soontarapa, K. (1997). Hydrophilic membranes for pervaporation: An analytical review. *Desalination*, 110(3), 251-286.
- Shao, P., & Huang, R. Y. M. (2007). Polymeric membrane pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 287(2), 162-179.
- Spillman, Robert W., (1989). Economics of Gas Separation Membranes. *Chemical Engineering Progress*. 41-62.
- Toharisman, A. 2010. Sekali lagi : Etanol dari Tebu. <http://sugarresearch.org>. Diakses pada tanggal 22 Desember 2011.
- Wee, S.-L., Tye, C.-T., & Bhatia, S. (2008). Membrane separation process—Pervaporation through zeolite membrane. *Separation and Purification Technology*, 63(3), 500-516.
- Widodo, S., Widiasta, I.N., Wenten, I.G. (2004). Pengembangan Teknologi Pervaporasi Untuk Produksi Etanol Absolut. Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses. 1-6.
- Wijmans, J. G., & Baker, R. W. (1995). The solution-diffusion model: a review. *Journal of Membrane Science*, 107(1–2), 1-21.
- Xie, Zongli, Ng, D, Hoang, Manh, Duong, T and Gray, Stephen R. (2011). Separation of aqueous salt solution by pervaporation through hybrid organic-inorganic membrane: effect of operating conditions. *Desalination*, 273 (1). pp. 220-225.
- Yamasaki, A., Tyagi, R. K., Fouda, A., & Matsuura, T. (1996). Effect of evaporation time on the pervaporation characteristics through homogeneous aromatic polyamide membranes. II. Pervaporation performances for ethanol/water mixture. *Journal of Applied Polymer Science*, 60(5), 743-748.

Lampiran A: Kalibrasi Alkoholmeter

A.1. Larutan Standar Etanol 10 - 100 %-b

Hasil kalibrasi di tunjukkan pada tabel A.1 di bawah ini.

Tabel A.1. Kalibrasi alkoholmeter dengan larutan standar etanol

Konsentrasi (%)	W etanol (gram)	W air(gram)	Konsentrasi Etanol (%)	
			Perhitungan	Kalibrasi
10	10,01	90,05	10,00	10,00
20	20,06	80,25	20,00	19,00
30	30,02	70,04	30,00	30,00
40	40,00	60,02	39,99	40,00
50	50,00	50,05	49,98	50,05
60	60,02	40,01	60,00	60,00
70	70,05	30,10	69,95	70,05
80	80,07	20,02	80,00	80,05
90	90,04	10,27	89,76	90,10
100			100,00	100,00

A.2. Larutan Standar IPA 10 - 100 %-b

Hasil kalibrasi di tunjukkan pada tabel A.2 di bawah ini.

Tabel A.2. Kalibrasi alkoholmeter dengan larutan standar IPA

Konsentrasi (%)	Walkohol (gram)	W air (gram)	Konsentrasi IPA (%)	
			Perhitungan	Kalibrasi
10	10,04	90,02	10,03	10,00
20	20,05	80,08	20,02	19,97
30	30,09	70,11	30,03	31,00
40	40,07	60,15	39,98	43,00
50	50,03	50,05	49,99	53,00
60	60,02	40,05	59,98	63,50
70	70,04	30,06	69,97	73,00
80	80,05	20,04	79,98	84,00
90	90,01	10,03	89,97	94,10
100	100,00	0,00	100,00	100,00

Lampiran B: Data Penelitian dan Pengolahan Data

B.1. Penentuan Fluks untuk Penentuan Kondisi Operasi

Fluks pervaporasi diperoleh dari hasil perhitungan memanfaatkan data slope dm/dt pada kurva hubungan massa permeal terhadap waktu pervaporasi.

Tabel B.1. Fluks pervaporasi pada berbagai variasi temperatur umpan dan tekanan sisi permeal campuran etanol-air

T	P	A (m ²)	dm/dt (kg/mnt)	J (kg/m ² .mnt)		
				Total	Air	Etanol
35 °C	100	0,5	0,019	0,027	0,015	0,012
	250	0,5	0,019	0,028	0,015	0,013
	500	0,5	0,021	0,031	0,017	0,014
39 °C	100	0,5	0,024	0,034	0,019	0,015
	250	0,5	0,031	0,046	0,026	0,020
	500	0,5	0,025	0,036	0,021	0,016
44 °C	100	0,5	0,027	0,040	0,023	0,017
	250	0,5	0,029	0,042	0,024	0,018
	500	0,5	0,031	0,045	0,026	0,019

Tabel B.2. Fluks pervaporasi pada berbagai variasi temperatur umpan dan tekanan sisi permeal campuran IPA-air

T °C	P mmHg-a	A (m ²)	dm/dt (kg/mnt)	J (kg/m ² .mnt)		
				Total	Air	Etanol
35	660	0,5	0,0043	0,0063	0,0036	0,0027
	510	0,5	0,0052	0,0076	0,0045	0,0032
	260	0,5	0,0042	0,0061	0,0038	0,0023
39	660	0,5	0,0039	0,0057	0,0034	0,0023
	510	0,5	0,0042	0,0061	0,0038	0,0024
	260	0,5	0,0041	0,0060	0,0039	0,0021
44	660	0,5	0,0056	0,0082	0,0047	0,0035
	510	0,5	0,0067	0,0098	0,0057	0,0041
	260	0,5	0,0053	0,0078	0,0051	0,0027

B.2. Penentuan Selektivitas untuk Penentuan Kondisi Operasi

Selektivitas pervaporasi diperoleh dari pengolahan data analisis umpan dan permeat menggunakan alkoholmeter. Data hasil analisis dengan alkoholmeter ditunjukkan pada tabel B.3.

Tabel B.3. Selektivitas pada berbagai variasi temperatur umpan dan tekanan sisi permeat campuran etanol-air

T	P	Umpan		Permeat		Y_{air}/Y_{etanol}	X_{air}/X_{etanol}	α
		X_{etanol}	X_{air}	Y_{etanol}	Y_{air}			
35 °C	660	0,46	0,54	0,44	0,56	1,273	1,195	1,065
	510	0,48	0,52	0,46	0,55	1,198	1,089	1,100
	260	0,47	0,53	0,45	0,55	1,208	1,130	1,069
39 °C	660	0,46	0,54	0,44	0,56	1,257	1,171	1,074
	510	0,46	0,54	0,44	0,56	1,268	1,156	1,096
	260	0,44	0,56	0,43	0,57	1,326	1,270	1,044
44 °C	660	0,44	0,56	0,43	0,57	1,342	1,264	1,062
	510	0,44	0,56	0,43	0,58	1,353	1,253	1,079
	260	0,45	0,55	0,42	0,58	1,398	1,214	1,152

Tabel B.4. Selektivitas pada berbagai variasi temperatur umpan dan tekanan sisi permeat campuran IPA-air

T °C	P mmHg-a	Retentat	X_{air}	Permeat		Y_{air}/Y_{IPA}	X_{air}/X_{IPA}	α
		X_{IPA}		Y_{IPA}	Y_{air}			
35	660	0,48	0,52	0,43	0,58	1,353	1,174	1,153
	510	0,50	0,50	0,42	0,59	1,410	1,174	1,201
	260	0,55	0,45	0,38	0,62	1,660	1,198	1,386
39	660	0,48	0,52	0,40	0,60	1,500	1,309	1,146
	510	0,50	0,50	0,39	0,61	1,584	1,317	1,202
	260	0,54	0,46	0,35	0,65	1,882	1,353	1,391
44	660	0,51	0,49	0,42	0,58	1,372	1,198	1,146
	510	0,49	0,51	0,42	0,58	1,398	1,198	1,167
	260	0,54	0,46	0,34	0,66	1,907	1,463	1,303

B.3. Pervaporasi Campuran Azeotrop Etanol-Air

Tabel B.5. Fluks pervaporasi campuran azeotrop etanol-air

T (°C)	P (mmHg)	Konsentrasi (%-b)			J		
		Umpan	Retentat	Permeat	Total	Air	Etanol
39	510	80,000	83,2	77,300	0,0616	0,0140	0,0476
		95,500	96,3	94,300	0,0622	0,0035	0,0587

Tabel B.6. Selektivitas campuran azeotrop etanol-air

T (°C)	P (mmHg)	Konsentrasi	t (min)	Umpan		Permeat		α	Rata-rata	PSI	% Penurunan EtOH di Permeat
				X_{etanol}	X_{air}	Y_{etanol}	Y_{air}				
39	510	80	7	0,800	0,200	0,775	0,225	1,161	1,161	0,079	3,38
			14	0,800	0,200	0,777	0,223	1,148			
			21	0,800	0,200	0,773	0,227	1,175			
		95,5	7	0,955	0,045	0,943	0,057	1,283	1,267	0,072	1,26
			14	0,955	0,045	0,945	0,055	1,235			
			21	0,955	0,045	0,943	0,057	1,283			

B.4. Pervaporasi Campuran Azeotrop IPA-Air

Tabel B.7. Fluks pervaporasi campuran azeotrop IPA-air

T (°C)	P (mmHg)	Konsentrasi (%-b)			J		
		Umpan	Retentat	Permeat	Total	Air	IPA
39	260	85,7	87,9	83,500	0,0072	0,0012	0,0060
		95	96,3	93,300	0,0029	0,0002	0,0027

Tabel B.8. Selektivitas campuran azeotrop IPA-air

T (°C)	P (mmHg)	Konsentrasi	t (min)	Umpan		Permeat		α	Rata-rata	PSI	% Penurunan IPA di Permeat
				X _{IPA}	X _{air}	Y _{IPA}	Y _{air}				
39	260	85,7	60	0,857	0,143	0,840	0,160	1,142	1,164	0,0084	2,29
			120	0,857	0,143	0,837	0,163	1,167			
			180	0,857	0,143	0,835	0,165	1,184			
		95	60	0,950	0,050	0,940	0,060	1,213	1,285	0,0038	1,40
			120	0,950	0,050	0,937	0,063	1,277			
			180	0,950	0,050	0,933	0,067	1,364			

B.5. Penentuan Derajat *Swelling*

Tabel B.9. Derajat *Swelling* dalam etanol berbagai konsentrasi

Konsentrasi Etanol (%-b)	W_{awal}	$W_{swelling}$	S	$S_{rata-rata}$
	(g)	(g)	(%)	(%)
0	0,177	0,238	34,79	34,79
10	0,182	0,258	41,87	40,22
	0,177	0,245	38,57	
30	0,189	0,260	37,53	36,67
	0,164	0,222	35,80	
50	0,182	0,249	36,67	31,38
	0,166	0,209	26,08	
70	0,181	0,237	31,45	31,23
	0,179	0,235	31,01	
80	0,176	0,230	31,08	29,18
	0,171	0,218	27,28	

Tabel B.10. Derajat *Swelling* dalam IPA berbagai konsentrasi

Konsentrasi IPA (%-b)	W_{awal}	$W_{swelling}$	S	$S_{rata-rata}$
	(g)	(g)	(%)	(%)
0	0,177	0,238	34,79	34,79
10	0,171	0,230	34,56	35,26
	0,173	0,235	35,96	
30	0,176	0,231	31,10	28,17
	0,170	0,212	25,25	
50	0,177	0,210	18,47	17,18
	0,177	0,205	15,88	
70	0,172	0,192	11,67	9,74
	0,185	0,199	7,80	
80	0,171	0,178	3,79	2,46
	0,169	0,171	1,12	
95	0,173	0,177	2,66	2,31
	0,174	0,177	1,96	

Lampiran C: Contoh Perhitungan

C.1. Konsentrasi Umpan Etanol dan IPA

Etanol dan IPA yang digunakan adalah etanol dan IPA teknis dengan konsentrasi 96 %. Untuk membuat larutan umpan etanol 45 %-b maka digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$W_{etanol} \times X_{etanol} = W_{umpan} \times X_{umpan}$$

dengan,

W_{etanol} = Berat etanol teknis

X_{etanol} = Fraksi berat etanol teknis (%-b)

W_{umpan} = Berat etanol umpan

X_{umpan} = Fraksi berat etanol umpan (%-b)

Contoh:

Untuk membuat etanol dengan konsentrasi 45 %-b sebanyak 3,5 kg maka diperlukan etanol teknis sebanyak:

$$W_{etanol} = \frac{W_{umpan} \times X_{umpan}}{X_{etanol}}$$

$$W_{etanol} = \frac{3,5 \text{ kg} \times 0,45}{0,96} = 1,64 \text{ kg}$$

Berat etanol teknis yang diperlukan = 1,64 kg

Berat air yang ditambahkan = 3,5 - 1,64 = 1,86 kg

C.2. Penentuan Fluks Massa

Fluks massa permeat dihitung dari berat per satuan luas waktu setelah kondisi tunak tercapai atau fluks massa tidak berubah selama pertambahan waktu. Nilai ini diperoleh dari hasil perhitungan dengan memanfaatkan data slope dm/dt pada kurva hubungan massa permeat terhadap waktu pervaporasi.

Fluks dihitung dengan persamaan berikut:

$$J = \frac{1}{A} \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (3.1.)$$

dengan :

J = fluks (kg/m².jam)

A= luas penampang membran (m²)

t = waktu pengambilan sampel (jam)

Contoh:

Perhitungan diambil pada pervaaporasi larutan etanol 45 %-b dengan kondisi 35 °C dan 660 mmHg-a

Run 1

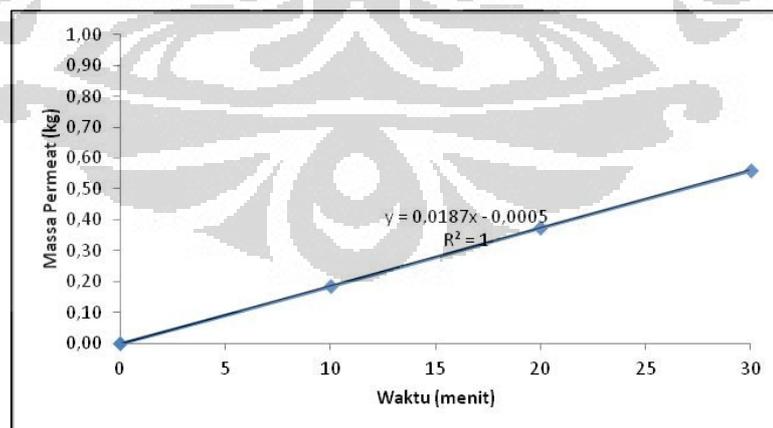
Temperatur Percobaan : 35 °C

Tekanan sisi permeat : 660 mmHg-a

Konsentrasi umpan : 45 %

Data Percobaan

Waktu (menit)	Massa permeat (kg)
0	0,000
10	0,185
20	0,375
30	0,560



Gambar C.1. Kurva hubungan waktu dengan massa permeat untuk kondisi 35 °C dan 100 mmHg-a

$$\frac{dm}{dt} = 0,0187 \frac{kg}{mnt}$$

$$A = 0,5 \text{ m}^2$$

$$\text{maka: } J = \frac{0,0187}{0,5} = 0,0274 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{mnt}$$

C.3. Selektivitas

Selektivitas dihitung dengan persamaan berikut:

$$\alpha_{A/B} = \frac{(y_A/y_B)_{\text{permeat}}}{(x_A/x_B)_{\text{umpan}}} \quad (3.2.)$$

dengan :

y_A = Fraksi komponen uap air

y_B = Fraksi komponen uap etanol

x_A = Fraksi komponen cairan air

x_B = Fraksi komponen cairan etanol

Contoh:

Selektivitas terhadap air untuk pervaporasi dengan membran TFC komersial pada kondisi 35 °C dan 660 mmHg-a.

Umpan:

%-b etanol = 45,6 %

%-b air = 44,4 %

Permeat:

%-b etanol = 44,0 %

%-b air = 56,0 %

Maka selektivitas air terhadap etanol adalah:

$$\alpha = \frac{56/44}{44,4/45,6} = 1,065$$

C.4. Indeks Pervaporasi

Indeks Pemisahan Pervaporasi (PSI) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$PSI = J(\alpha - 1) \quad (3.6)$$

dengan,

PSI = Indeks Pemisahan Pervaporasi

J = Fluks Permeat ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{mnt}$)

α = Selektivitas

Contoh:

Nilai PSI untuk pervaporasi campuran azeotrop etanol-air dengan membran TFC komersial pada kondisi 39 °C dan 510 mmHg-a.

$$PSI = 0,0622 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{mnt}} \times 1,161 = 0,017 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{mnt}}$$

C.5. Permeabilitas dan Difusivitas Membran

Koefisien permeabilitas membran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$P = J \frac{x}{\Delta P} \quad (3.8)$$

dengan,

P = permeabilitas ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{mmHg} \cdot \text{mnt}$)

J = fuks ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{mnt}$)

x = ketebalan membran (m)

ΔP = beda tekanan antara sisi umpan dan permeat (mmHg)

Contoh koefisien permeabilitas pada kondisi 39 °C dan 510 mmHg-a.

Diketahui:

$$J = 0,046 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{mnt}$$

$$x = 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\Delta P = 250 \text{ mmHg}$$

maka koefisien permeabilitas membran adalah:

$$P = 0,046 \frac{3 \times 10^{-5}}{250} = 5,49846e - 9 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{mmHg} \cdot \text{mnt}$$

Tabel C.1. Koefisien Permeabilitas membran

T (°C)	Fluks (kg/m ² mnt)	Tebal membran (m)	Tekanan sisi umpan (mmHg)	Tekanan sisi permeat (mmHg)	ΔP (mmHg)	Permeabilitas
35	0,027	0,00003	760	660	100	8,21256E-09
35	0,028	0,00003	760	510	250	3,35529E-09
35	0,031	0,00003	760	260	500	1,83575E-09
39	0,034	0,00003	760	660	100	1,03206E-08
39	0,046	0,00003	760	510	250	5,49846E-09
39	0,036	0,00003	760	260	500	2,1783E-09
44	0,040	0,00003	760	660	100	1,19455E-08
44	0,042	0,00003	760	510	250	5,00659E-09
44	0,045	0,00003	760	260	500	2,69653E-09

Koefisien difusivitas membran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$D = \frac{P}{S}$$

dengan:

D = difusivitas membran (kg/m.mmHg.mnt)

P = permeabilitas membran (kg/m.mmHg.mnt)

S = Sorpsi

Contoh koefisien difusivitas pada kondisi 39 °C dan 510 mmHg-a.

Diketahui:

$$P = 5,49846 \times 10^{-8} \text{ kg/m.mmHg.mnt}$$

$$S = 0,165$$

maka koefisien difusivitas membran adalah:

$$D = \frac{5,49846 \times 10^{-8}}{0,165} = 3,3324e - 8 \text{ kg/m. mmHg. mnt}$$

Tabel C.2. Koefisien Difusivitas Membran

P (mmHg)	T (°Ct)	Permeabilitas	Sorpsi	Difusivitas
260	35	1,836E-09	0,314	5,84633E-09
260	39	2,178E-09	0,165	1,32018E-08
260	44	2,697E-09	0,250	1,07861E-08
510	35	3,355E-09	0,314	1,06856E-08
510	39	5,498E-09	0,165	3,3324E-08
510	44	5,007E-09	0,250	2,00264E-08
660	35	8,213E-09	0,314	2,61547E-08
660	39	1,032E-08	0,165	6,25491E-08
660	44	1,195E-08	0,250	4,77822E-08

C.6. Derajat Swelling

Derajat *swelling* dihitung dengan membandingkan berat air dalam membran dan berat membran kering dengan persamaan berikut:

$$S = \frac{W_s - W_d}{W_d} \quad (3.7.)$$

dengan:

- S = Derajat swelling
- W_s = Berat basah membran (g)
- W_d = Berat kering membran (g)

Contoh:

Percobaan derajat *swelling* pada konsentrasi etanol 10 %-b.

$$W_s = 0,2582 \text{ g}$$

$$W_d = 0,1820 \text{ g}$$

maka:

$$S = \left(\frac{0,2582 - 0,1820}{0,1820} \right) \times 100 = 41,86 \%$$