



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**Profesor Danu Ariono**

**PERKEMBANGAN  
TEKNOLOGI PEMISAHAN DIFUSIONAL**

21 September 2019  
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

**Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**  
21 September 2019

**Profesor Danu Ariono**

**PERKEMBANGAN  
TEKNOLOGI PEMISAHAN DIFUSIONAL**



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PEMISAHAN DIFUSIONAL  
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,  
tanggal 21 September 2019.

#### Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

#### UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis  
Data katalog dalam terbitan

Danu Ariono  
PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PEMISAHAN DIFUSIONAL  
Disunting oleh Danu Ariono

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2019  
vi+44 h., 17,5 x 25 cm  
ISBN 978-602-6624-34-5  
1. Teknik Kimia 1. Danu Ariono

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang yang telah melimpahkan berkat dan rahmatnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini.

Penghargaan yang tinggi serta ucapan terima kasih kami sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, FGB-ITB, yang memberi kesempatan kepada kami untuk menyampaikan orasi ilmiah di Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB pada tanggal 21 September 2019.

Orasi ilmiah ini diberi judul “Perkembangan Teknologi Pemisahan Difusional”. Dalam orasi ilmiah ini disampaikan secara singkat perkembangan teknologi pemisahan difusional, terutama yang berlandaskan kepada kesetimbangan fasa, serta beberapa kontribusi penulis dalam pengembangan tersebut.

Penyampaian orasi ilmiah ini adalah sebagai salah satu bentuk pertanggungjawaban dan komitmen akademik atas jabatan Guru Besar dalam bidang Ilmu Proses Pemisahan.

Semoga tulisan ini dapat memberi wawasan dan inspirasi yang bermanfaat bagi pembaca.

Bandung 21 September 2019

Danu Ariono

## DAFTAR ISI

Kata Pengantar .....	iii
Daftar Isi .....	v
1. Pendahuluan .....	1
2. Teknologi Pemisahan dalam Industri .....	6
2.1. Distilasi reaktif .....	11
2.2. Penggunaan Larutan Ionik dalam Proses Absorpsi .....	12
2.3. Pengembangan Metode Evaluasi Unjuk Kerja Ekstraksi Cair-cair .....	17
3. Perkembangan Proses Pemisahan .....	19
3.1. <i>Cyclic Distillation</i> .....	22
3.2. <i>Internally heat integrated</i> .....	24
3.3. <i>Hybrid Distillation</i> .....	25
3.4. <i>Membrane distillation (MD)</i> .....	28
3.5. <i>HiGee distillation</i> .....	29
4. Integrasi Proses Pemisahan dengan Reaksi .....	32
5. Peningkatan Mutu Kapur dengan Reaktor Kontinyu Bersirkulasi	34
6. Hidroekstraksi untuk Peningkatan Mutu Garam .....	36
7. Penutup .....	43
8. Ucapan Terima Kasih .....	43
Daftar Pustaka .....	47
Curriculum Vitae .....	51

# PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PEMISAHAN DIFUSIONAL

## 1. PENDAHULUAN

Proses pemisahan merupakan suatu kegiatan memisahkan satu atau beberapa komponen yang ada dalam campuran. Proses pemisahan, diyakini telah dikenal oleh manusia ratusan tahun sebelum masehi. Proses pemisahan dan pemurnian yang telah lama dikenal adalah proses kristalisasi, distilasi, adsorpsi, absorpsi, dan ekstraksi. Dalam proses pemisahan, kristalisasi merupakan unit operasi tertua dalam portofolio teknik pemisahan. Hal ini dapat dimengerti karena prinsip dasar proses ini sangat sederhana yaitu hanya pemanasan atau evaporasi larutan hingga terjadi kristalisasi, selain itu juga dapat melalui proses pendinginan larutan.

Distilasi merupakan proses pemisahan yang paling banyak digunakan di industri. Proses ini juga merupakan proses pemisahan yang sudah lama dikenal. Proses ini, pada prinsipnya sama dengan proses evaporasi tetapi produk yang diambil adalah uap yang terkondensasi. Buku pertama yang menuliskan tentang proses distilasi adalah buku yang ditulis di Eropa yaitu buku "*Liber de Arte Distillandi Simplicia et Composite (Das Kleine Distillier-bunch)*" ditulis oleh Hieronymus Brunschwig di tahun 1500, buku "*The Art of Distillation*" ditulis oleh John French di tahun 1651 dan buku "*La Rectification de l'alcool*" oleh Ernest Sorel di tahun 1850.

Secara umum, suatu campuran yang berada dalam kesetimbangan fasa memiliki komposisi yang berbeda pada masing-masing fasa. Komposisi campuran tersebut juga berbeda dengan komposisi awal campuran sebelum dipisahkan. Oleh karena itu, jika suatu campuran dibuat menjadi dua fasa setimbang, maka terjadilah proses pemisahan. Proses pemisahan tradisional seperti distilasi, absorpsi, adsorpsi, ekstraksi dan lainnya terlaksana atas dasar prinsip tersebut. Proses pemisahan semacam ini dapat dikategorikan sebagai pemisahan berdasarkan kesetimbangan (*equilibrium separation*).

Selain itu, setiap senyawa memiliki kemampuan berdifusi yang berbeda dalam suatu medium. Oleh karena itu, jika suatu campuran dilewatkan suatu medium tertentu, maka selama perjalanannya komposisi campuran akan berubah dan tidak terjadi komposisi kesetimbangan. Proses pemisahan dengan membran berjalan berdasarkan prinsip tersebut. Proses pemisahan ini kemudian dikategorikan sebagai pemisahan non-kesetimbangan (*non-equilibrium separation*) atau pemisahan berdasarkan perbedaan laju difusi/laju perpindahan.

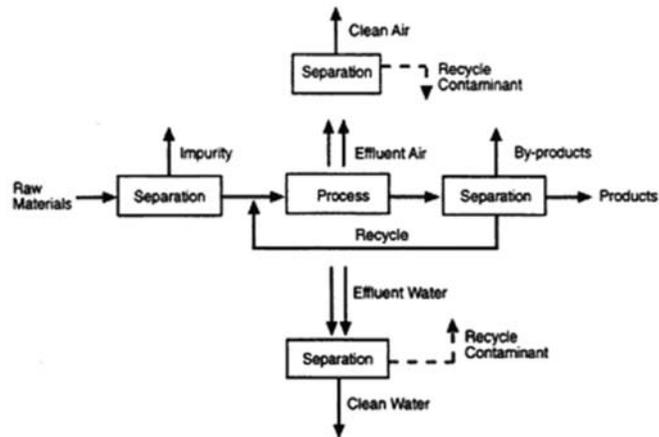
Berdasarkan perbedaan fenomena penyebab terjadinya proses pemisahan, maka proses pemisahan dapat diklasifikasikan dalam dua kategori, seperti yang disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Klasifikasi Proses Pemisahan

No.	KATEGORI	JENIS	CONTOH
1.	Pemisahan berdasarkan Kesetimbangan Fasa	Gas – Cair	Distilasi, Absorpsi
		Gas – Padat	Adsorpsi
		Cair – Cair	Ekstraksi Cair-Cair
		Cair - Padat	Kristalisasi
		Fluida Superkritik - Padat	<i>Supercritical Fluid Chromatography</i>
		Fluida Superkritik - Cair	<i>Supercritical Fluid Extraction</i>
2.	Pemisahan berdasarkan Laju Perpindahan	<i>Barrier Separation</i>	Ultrafiltrasi, Osmosa Balik
		<i>Field Separation</i>	Ultrasentrifugasi, Elektolisis

## 2. TEKNOLOGI PEMISAHAN DALAM INDUSTRI

Teknologi proses pemisahan merupakan bagian yang sangat penting dalam industri kimia. Secara umum, fungsi proses pemisahan di semua industri proses dapat dianggap sama, yaitu menghilangkan senyawa pengotor yang ada di bahan baku, memurnikan produk, serta menghilangkan kontaminan yang ada dalam limbah udara dan air. Pemisahan produk pada industri proses dapat menghasilkan produk samping dan aliran daur ulang (*recycle*), seperti diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Proses pemisahan dalam industri proses

Untuk sebagian besar proses, berbagai teknologi pemisahan tradisional telah dikembangkan sehingga saat ini telah tersedia banyak pilihan teknologi yang sesuai. Meskipun demikian, pengembangan teknologi pemisahan masih perlu dilakukan terutama dalam hal efisiensi energi, penggunaan bahan baku, dan efektivitas biaya. Pengembangan proses pemisahan yang berlandaskan kepada kesetimbangan fasa hingga saat ini masih berlanjut. Dalam kategori ini, absorpsi dan distilasi merupakan proses yang pengembangannya pesat. Hal ini karena keduanya merupakan proses yang banyak digunakan di industri dan belum ada terobosan proses yang mampu menggantikannya.

Hasil pengembangan proses pada distilasi antara lain adalah distilasi reaktif yang merupakan penggabungan proses distilasi dengan reaksi

kimia. Sementara itu, pengembangan pada proses absorpsi lebih mengarah kepada perbaikan sifat-sifat fisiko-kimiawi dari larutan penyerap agar diperoleh kesetimbangan gas-cair yang lebih menguntungkan. Untuk penyerapan  $\text{CO}_2$ , penggunaan cairan ionik lebih sesuai dibandingkan larutan yang mengandung senyawa organik. Selain pengembangan proses pemisahan, pengembangan metode perhitungan juga diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses pemisahan. Intensifikasi proses pemisahan juga merupakan pengembangan yang tak kalah penting. Intensifikasi proses pemisahan dapat dilakukan melalui integrasi suatu proses pemisahan dengan proses lain dalam satu unit operasi, terutama dengan proses reaksi kimia. Integrasi tersebut menjadikan rangkaian proses menjadi lebih efisien.

## 2.1. Distilasi reaktif

Distilasi reaktif adalah kombinasi antara reaksi kimia dan proses distilasi yang terjadi dalam kolom tunggal. Proses ini merupakan salah satu aplikasi industri yang paling penting dari konsep reaktor multifungsi. Distilasi reaktif memiliki banyak kelebihan, terutama untuk reaksi yang dibatasi oleh kesetimbangan reaksi kimia. Distilasi reaktif merupakan salah satu teknologi yang paling menjanjikan dalam konsep proses pemisahan dan reaksi kimia yang terintegrasi karena desainnya yang sederhana serta dapat meningkatkan efisiensi proses. Dalam distilasi reaktif, reaksi dan distilasi berlangsung dalam zona yang sama pada

kolom distilasi, dimana reaktan terkonversi menjadi produk dan secara simultan produk dan reaktan yang belum terkoversi akan terpisah melalui prinsip distilasi. Distilasi reaktif sangat sesuai untuk proses eterifikasi, nitrasi, esterifikasi, transesterifikasi, kondensasi dan alilasi.

## 2.2. Penggunaan Larutan Ionik dalam Proses Absorpsi

Gas cerobong (*flue gas*) yang mengandung CO<sub>2</sub>, terutama dari pembangkit listrik, merupakan salah satu penyebab *global warming*. Oleh karena itu, penangkapan CO<sub>2</sub> dari gas cerobong perlu dilakukan. Salah satu proses pemisahan yang dapat digunakan untuk penangkapan CO<sub>2</sub> adalah absorpsi. Hingga saat ini, penyerapan CO<sub>2</sub> yang paling banyak digunakan adalah dengan larutan amina karena larutan amina memiliki kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> yang sangat tinggi. Namun, larutan amina juga memiliki kelemahan, antara lain memerlukan energi yang cukup besar untuk memotong ikatan kimia saat regenerasi dan bersifat korosif sehingga membatasi konsentrasi amina dalam larutan. Hal tersebut akan berdampak pada keterbatasan kemampuan kapasitas penyerapan. Larutan amina sebagai penyerap mengandung senyawa organik yang mudah menguap (*VOC: volatile organic compound*), sehingga uap senyawa organik tersebut dapat terlepas ke lingkungan dan pada temperatur tinggi senyawa organik tersebut dapat terdegradasi.

Pengembangan terkini dari proses absorpsi adalah penggunaan cairan ionik (*IL: ionic liquid*) untuk menggantikan larutan penyerap yang

mengandung senyawa organik mudah menguap, seperti larutan amina. Beberapa cairan ionik terbukti memiliki sifat yang dapat melarutkan CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang lebih tinggi dari pada larutan organik konvensional. Hal ini yang mendorong dilakukannya pengembangan larutan ionik sebagai penyerap CO<sub>2</sub> untuk diaplikasikan ke dalam proses absorpsi. Cairan ionik merupakan senyawa garam dalam keadaan cair. Namun, ada yang mendefinisikan lebih sederhana, dimana cairan ionik adalah cairan yang seluruh komponennya mengandung ion. Cairan ionik sering disebut juga sebagai elektrolit cair, leleh ionik, cairan ionik, garam leburan, garam cair, atau gelas ionik. Dalam beberapa hal, cairan ionik dibatasi hanya untuk garam yang titik leburnya di bawah 100°C. Salah satu keuntungan dari cairan ionik adalah tekanan uapnya sangat rendah, sehingga dapat dikatakan tidak mencemari udara.

Kelarutan CO<sub>2</sub> dalam cairan ionik ditentukan oleh jenis anion, walaupun ada juga pengaruh dari kation namun tidak sekuat anion. Cairan ionik yang mengandung anion [PF<sub>6</sub>-] atau [BF<sub>4</sub>-] dan berpasangan dengan kation 1-etil-3-methylimidazolium [EMIM] atau non-konvensional kation trihexyl (tetradecyl) phosphonium [P66614], terbukti dapat menangkap CO<sub>2</sub> dengan kuat. Interaksi antara molekul CO<sub>2</sub> dan anion, khususnya yang mengandung gugus alkil terfluorinasi, adalah faktor yang mendominasi dalam menentukan kelarutan. Cairan ionik 1-butyl-3-propylamineimidazolium tetrafluoroborate secara khusus dikembangkan untuk penyerapan CO<sub>2</sub>. Pemilihan kombinasi anion dan

kation yang berbeda dalam cairan ionik juga berpengaruh terhadap selektivitas dan sifat fisiknya. Kation organik dalam cairan ionik dapat diatur dengan mengubah panjang rantai atau dengan mengganti radikal.

Kendala utama dalam penerapan cairan ionik sebagai penyerap adalah rendahnya kapasitas penyerapan  $\text{CO}_2$ , jika tekanan parsial  $\text{CO}_2$  di bawah tekanan total. Hal ini menjadi masalah jika cairan ionik digunakan untuk penyerapan  $\text{CO}_2$  dari gas cerobong yang kandungan  $\text{CO}_2$  pada kisaran 10-15%. Secara umum, peningkatan tekanan dapat menaikkan kapasitas penyerapan  $\text{CO}_2$ , misalnya pada 10 bar terjadi peningkatan penyerapan 10 kali lipat. Namun, peningkatan tekanan bukan penyelesaian yang tepat karena kebutuhan energi yang semakin besar. Sebagai upaya untuk meningkatkan penyerapan  $\text{CO}_2$ , maka dilakukan kombinasi antara cairan ionik dengan gugus fungsional. Pemilihan gugus fungsional harus mempertimbangkan aspek termodinamika serta kinetika reaksi reversibel. Idealnya,  $\text{CO}_2$  terikat pada gugus fungsional dengan cepat dan tidak terlalu eksotermis, agar saat regenerasi, energi yang dibutuhkan rendah.

Cairan ionik untuk penangkapan  $\text{CO}_2$  memiliki viskositas yang tinggi bila dibandingkan dengan pelarut komersial. Difusivitas  $\text{CO}_2$  dalam cairan ionik kira-kira sama besarnya dengan pelarut komersial. Mekanisme penyerapan  $\text{CO}_2$  oleh cairan ionik adalah reaksi kimia dimana laju reaksinya bergantung kepada difusivitas  $\text{CO}_2$  sehingga viskositas merupakan salah satu faktor penting dalam pengembangan cairan ionik

untuk penyerapan  $\text{CO}_2$ . Selain itu, kehadiran pengotor, seperti  $\text{H}_2\text{S}$ , sangat menghambat kelarutan  $\text{CO}_2$  dalam cairan ionik. Oleh karena itu, harus dipertimbangkan dengan cermat kehadiran pengotor dalam memilih cairan ionik yang tepat/sesuai. Cairan ionik juga memiliki potensi sebagai pelarut dalam proses ekstraksi cair-cair dan distilasi ekstraktif. Cairan ionik juga menunjukkan selektivitas terhadap komponen dalam campuran. 1-Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (BMIM-PF6) adalah cairan ionik temperatur kamar yang dinilai sebagai pengganti yang layak untuk pelarut organik yang mudah menguap dalam pemisahan cair-cair.

### 2.3. Pengembangan Metode Evaluasi Unjuk Kerja Ekstraksi Cair-cair

Ekstraksi cair-cair merupakan proses pemisahan yang telah lama dikenal dalam industri proses kimia. Proses ini merupakan salah satu metode pemisahan campuran cair yang pada kondisi tertentu memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metode pemisahan lain. Keunggulan tersebut antara lain dapat dioperasikan pada kondisi ruang dan kebutuhan energi yang relatif kecil. Ekstraksi cair-cair telah digunakan di industri petroleum untuk penghilangan senyawa-senyawa aromatik, sulfur, lilin dan resin pada pembuatan minyak pelumas.

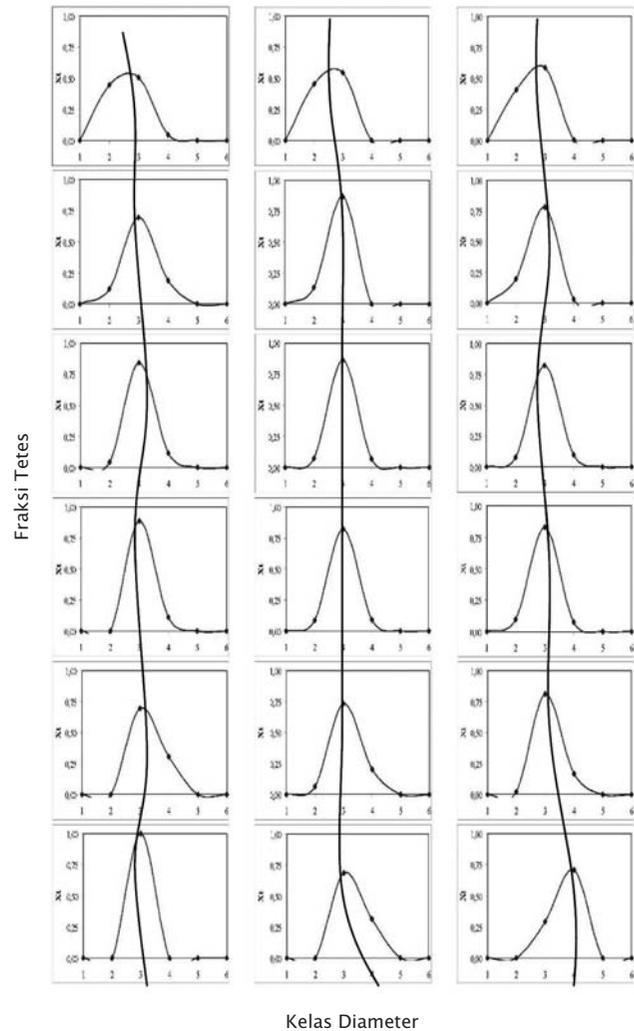
Pemisahan campuran fasa cair terjadi akibat perpindahan salah satu senyawa dalam campuran cair ke fasa cair lain yang tidak saling larut dan kontak dengan campuran cair tersebut. Agar proses berjalan dengan

cepat, kontak antara kedua cairan tersebut harus berlangsung dengan baik dengan cara memperluas area permukaan kontak dan memperkecil hambatan perpindahan massa. Hal ini dapat dicapai bila salah satu cairan terdispersi di dalam cairan yang lainnya. Cairan terdispersi dalam bentuk tetes, disebut fasa terdispersi, sedangkan cairan yang lainnya disebut fasa kontinyu. Proses ekstraksi cair-cair dapat dilaksanakan dalam berbagai alat pemroses yang dapat menghasilkan dispersi cairan dalam bentuk tetes ke dalam cairan lain yang mendispersikannya atau fasa kontinyu. Dinamika tetes dalam fasa kontinyu sangat berpengaruh terhadap besarnya area permukaan kontak serta besarnya hambatan perpindahan massa antara fasa kontinyu dan fasa terdispersi. Kemudahan massa berpindah dari fasa cairan yang satu ke cairan yang lainnya digambarkan dengan besaran koefisien perpindahan massa.

Kolom isian (*packing column*) memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan kolom kosong, misalnya kolom semprot (*spray column*). Kolom isian dapat mempertahankan tetes dalam ukuran yang kecil serta turbulensi yang tinggi, akibat tetes bergerak di sela-sela isian. Kedua hal tersebut menjadikan tetes memiliki area kontak yang luas dan nilai koefisien perpindahan massa yang tinggi. Dalam kolom isian, ukuran tetes tidak seragam akibat terjadi peristiwa penggabungan tetes dan pemecahan tetes dalam intensitas yang tinggi. Tetes yang tidak seragam berdampak pada besarnya area permukaan kontak dan koefisien perpindahan massa di dalam kolom yang bervariasi. Perancangan kolom

isian untuk ekstraksi cair-cair umumnya mengacu pada konsep satuan perpindahan (*transfer unit*), dimana pada konsep tersebut area kontak dianggap konstan sepanjang kolom, sehingga koefisien perpindahan massa  $k_L a$  nilainya dianggap konstan. Bila konsep satuan perpindahan digunakan untuk evaluasi unjuk kerja proses ekstraksi cair-cair dalam kolom isian, maka hasil yang diperoleh kurang memuaskan. Penyimpangan terjadi karena ukuran tetes dalam kolom dianggap konstan.

Hasil pengamatan yang diperlihatkan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa ukuran tetes dalam kolom isian tidak seragam. Dalam pengamatan, kelompok tetes pada suatu rentang diameter dikelompokkan ke dalam 6 kelas diameter yaitu  $d_1$  sampai dengan  $d_6$ , dimana harga  $d_1 < 0,5$  mm;  $0,5 < d_2 < 1,5$  mm;  $1,5 < d_3 < 2,5$  mm;  $2,5 < d_4 < 3,5$  mm;  $3,5 < d_5 < 4,5$  mm, dan  $d_6 > 4,5$  mm. Ketidakseragaman ini, mengharuskan analisis perpindahan massa ke dalam tetes dikoreksi dengan ukuran tetes yang distribusinya berubah. Laboratorium Proses Pemisahan Teknik Kimia FTI ITB melakukan pengembangan metode evaluasi unjuk kerja kolom ekstraksi air-cair dalam kolom isian yang mengacu kepada konsep satuan perpindahan (*transfer unit*). Konsep ini sudah umum dikenal, namun dikembangkan lebih lanjut dengan mempertimbangkan distribusi ukuran tetes yang dikelompokkan ke dalam enam kelas diameter tersebut di atas. Metode yang dikembangkan dapat memberikan akurasi yang baik dengan kisaran kesalahan 5 sampai 10%.



Gambar 2. Kurva distribusi diameter tetes dalam kolom isian pada berbagai kecepatan

### 3. PERKEMBANGAN PROSES PEMISAHAN

Dalam industri kimia, hingga saat ini distilasi masih menjadi pilihan pertama dalam proses pemisahan dari sekian banyak pilihan lain yang tersedia. Oleh karena itu, berbagai cara operasi dan kombinasi dengan proses pemisahan lain dilakukan agar proses distilasi menjadi lebih efektif dan efisien. Oleh sebab itu, perkembangan dalam proses distilasi merupakan cerminan perkembangan dibidang proses pemisahan.

Berikut adalah penjelasan tentang perkembangan teknologi distilasi terkini yang memiliki potensi kuat dalam penerapannya di industri proses. Teknologi distilasi ini masih mengalami pengembangan lebih lanjut terkait desain proses, pengendalian, dan aplikasinya.

#### 3.1. Cyclic Distillation

*Cyclic Distillation* merupakan proses distilasi yang pengoperasiannya berbeda dengan distilasi konvensional. Dalam sistem ini, pergerakan uap yang naik dan cairan yang turun dilakukan secara bergantian. Saat uap mengalir naik, cairan berhenti mengalir dan tinggal di tiap *tray*. Selanjutnya, pada saat cairan turun ke tahap di bawahnya, aliran uap dihentikan. Mekanisme tersebut menyebabkan aliran uap kontak dengan cairan yang diam di dalam *tray*, sedangkan pada saat cairan turun terjadi kontak dengan uap yang diam. Sistem ini dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, menurunkan kebutuhan energi, produktivitas dan kualitas produk yang lebih tinggi, serta hilang tekan di tiap *tray* lebih rendah.

### 3.2. Internally heat integrated

Pada distilasi konvensional, energi dalam jumlah cukup besar diperlukan pada reboiler. Energi tersebut kemudian dikeluarkan melalui kondensor dalam jumlah yang cukup besar pula. Karena temperatur reboiler lebih tinggi dari pada kondenser, maka energi tidak dapat dipindahkan dengan sendirinya dari kondensor ke reboiler. Untuk pengaliran energi tersebut, pada proses distilasi perlu dibantu dengan pompa panas. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara antara lain melalui sistem *Vapor Compression (VC)*, *Absorption Heat Pump (AHP)*, *Mechanical Vapor Recompression (MVR)*, dan *Thermal Vapor Recompression (TVR)*.

*Vapor Compression (VC)* dan *Absorption Heat Pump (AHP)*. VC adalah distilasi yang dilengkapi dengan pompa panas yang berfungsi untuk memindahkan panas yang dilepas oleh kondensor ke reboiler yang memerlukan panas. VC menggunakan pompa panas sistem kompresi mekanik, sedangkan AHP menggunakan sistem absorpsi. Sistem ini dapat menghemat penggunaan energi secara signifikan jika dibandingkan dengan distilasi konvensional.

*Mechanical Vapor Recompression (MVR)* dan *Thermal Vapor Recompression (TVR)*. MVR adalah sistem tercanggih untuk distilasi biner, yang dapat diterapkan untuk memisahkan komponen dengan titik didih berdekatan. Dalam MVR, uap yang ke luar di bagian atas kolom setelah dinaikkan tekanannya dalam kompresor diumpankan ke reboiler untuk

melepas panasnya, sehingga terkondensasi. Cairan bertekanan tinggi setelah melalui *JT-valve* sebagian dikembalikan sebagai refluk dan sebagian lainnya sebagai distilat. Dalam hal ini, sistem pompa panas juga melakukan fungsi kondensor, sehingga menghemat satu penukar panas dibandingkan dengan distilasi klasik. MVR memiliki efisiensi yang sedikit lebih tinggi dan biaya investasi yang lebih rendah daripada pompa panas klasik sistem VC. Namun, MVR memiliki keterbatasan yaitu distilat harus memenuhi persyaratan sebagai media perpindahan panas. Kendala ini sangat membatasi pemanfaatan teknologi MVR. Salah satu varian dari MVR adalah TVR, dimana kompresor digantikan oleh *steam ejector* yang menggunakan prinsip venturi. Hal ini menjadikan TVR sebagai sistem yang handal, kuat serta harga dan perawatan yang murah, karena tidak adanya bagian yang berputar. TVR telah banyak diimplementasikan di industri, namun *steam ejector* memiliki efisiensi yang rendah dalam mengubah energi mekanik. Oleh sebab itu, desain *steam ejector* adalah penentu tercapainya operasi yang ekonomis.

### 3.3. Hybrid Distillation

Distilasi hibrid adalah kombinasi proses distilasi dan proses pemisahan lain, umumnya pemisahan dengan membran, sehingga membentuk sistem hibrid yang lebih efisien dari pada proses masing-masing yang berdiri sendiri. Distilasi konvensional yang beroperasi pada kondisi normal tidak efektif untuk memisahkan campuran azeotropik. Sistem hibrid distilasi dengan pemisahan membran sangat sesuai untuk

memisahkan campuran azeotropik. Berbagai kombinasi distilasi dan proses membran, antara lain *Distillation/Pervaporation Hybrid*, *Distillation/Reverse-Osmosis Hybrid* dan lainnya.

*Distillation/Pervaporation Hybrid* dapat dimanfaatkan dalam pemisahan campuran 75% benzen 25% sikloheksan untuk menghasilkan benzen dengan kemurnian tinggi, yaitu 99,5%. Karena pada 1 atm campuran tersebut membentuk azeotrop pada 55%-vol benzen, maka pemisahan secara klasik dilakukan dengan cara distilasi ekstraktif dengan *entrainer* furfural. Tersedianya membran yang selektif terhadap benzen memungkinkan pemisahan sistem hibrid distilasi-ekstraktif dan modul membran. Dengan sistem hibrid, terjadi penghematan penggunaan energi di reboiler sebesar 42,5% dan pengurangan laju sirkulasi pelarut sebesar 34,83%.

Dalam proses pemisahan campuran 21% asetonitril dan air, secara konvensional dipisahkan dengan *pressure swing distillation* pada dua tekanan yaitu 1 dan 7 bar, karena campuran pada 1 atm membentuk azeotrop pada 67% asetonitril. Melalui membran yang selektif terhadap air, maka dapat dibangun sistem pemisahan hibrida distilasi dan pemisahan membran. Modul membran diletakkan di antara dua kolom distilasi yang keduanya bertekanan 1 bar, yang menangani pemisahan pada komposisi di atas dan di bawah komposisi azeotropnya. Dengan adanya pemisahan membran yang diletakkan di antara kedua kolom distilasi, maka campuran dapat melintasi komposisi azeotropnya. Dengan

sistem hibrida, terjadi penghematan penggunaan energi di reboiler mencapai 38,55% jika dibandingkan dengan metode distilasi konvensional menggunakan *pressure swing distillation*. Kedua cara tersebut menghasilkan kemurnian dan perolehan yang sama yaitu 99,99%.

#### 3.4. Membrane distillation (MD)

*Membrane distillation (MD)*, atau distilasi membran, merupakan teknologi pemisahan baru untuk campuran yang biasanya dipisahkan dengan distilasi konvensional atau *reverse osmosis (RO)*. Gaya dorong distilasi membran adalah perbedaan tekanan uap yang melintasi membran hidrofobik. Distilasi membran banyak diaplikasikan dalam pemurnian air, misalnya desalinasi air laut, desalinasi air payau, pengolahan air proses, dan pemurnian air. Umpan cair panas kontak langsung dengan salah satu sisi membran dan tidak menembus ke dalam pori-pori yang kering. Penggunaan membran hidrofobik mencegah cairan hidrofilik memasuki pori-pori karena adanya tegangan antar muka. Uap pada permukaan cair di mulut pori akan melintasi membran akibat adanya tekanan uap yang lebih rendah di sisi permeat. Berbagai varian dapat dijumpai dalam distilasi membran antara lain *Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)*, *Air Gap Membrane Distillation (AGMD)*, *Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)*, dan *Vacuum Membrane Distillation (VMD)*.

*Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)*. Dalam DCMD, umpan

kontak langsung dengan permukaan sisi membran dan penguapan terjadi di permukaan sisi umpan. Uap akan melewati membran karena adanya beda tekanan uap di antara kedua sisi membran. Kemudian uap akan mengembun di dalam modul membran. Karena membran bersifat hidrofobik, umpan tidak dapat menembus membran dan hanya uap yang berada di dalam pori-pori membran. DCMD adalah konfigurasi paling sederhana, namun kehilangan panas melalui membran lebih tinggi dari pada konfigurasi lainnya. Dalam prakteknya, DCMD memberikan hasil terbaik untuk aplikasi di mana air adalah komponen yang melintasi membran dan larutan tidak mengandung komponen mudah menguap.

*Air Gap Membrane Distillation (AGMD)*. AGMD memiliki konfigurasi yang serupa dengan DCMD hanya di sisi permeate ada ruang yang dindingnya dingin, sehingga uap yang melintas membran akan terkondensasi akibat bersentuhan dengan dinding dingin. Sistem ini cocok untuk penghilangan komponen volatil dalam larutan karena permeat yang mencair tidak kontak dengan permukaan membran.

*Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)*. Dalam SGMD di sisi permeate mengalir gas inert yang berfungsi untuk membawa uap permeate yang kemudian dikondensasikan di luar modul membran. Kelemahan utama SGMD adalah bahwa penggunaan volume gas inert yang besar agar tekanan uap permeatnya kecil. Hal ini berdampak kepada kebutuhan kondensor yang besar.

*Vacuum Membrane Distillation (VMD)*. Pada VMD uap permeat akan

terhisap ke luar sisi permeat oleh pompa vakum, kemudian mengembun di luar modul. VMD cocok untuk menghilangkan komponen organik dari larutan akuatik.

### 3.5. *HiGee distillation*

Teknologi distilasi yang sangat berbeda dengan teknologi konvensional adalah *HiGee distillation*. Dalam sistem ini, kontak uap-cair tidak berada dalam medan gravitasi tetapi berada dalam medan sentrifugal yang tinggi. Proses distilasi tidak berlangsung dalam sebuah kolom tetapi dalam alat menyerupai *centrifuge* datar dan berputar. Pergerakan uap dan cair ke arah radial namun berlawanan arah. Uap bergerak menuju ke pusat putaran, sedangkan cairan bergerak ke arah dinding. Tingginya kecepatan uap dan cair mengakibatkan koefisien transfer massa jauh lebih tinggi dari pada sistem konvensional, sehingga cara ini memungkinkan perpindahan momentum, panas, dan massa yang bisa sangat luar biasa diintensifkan.

## 4. INTEGRASI PROSES PEMISAHAN DENGAN REAKSI

Dalam skala industri, secara umum proses reaksi kimia selalu dilanjutkan dengan proses pemisahan. Hal ini karena hampir tidak ada proses reaksi kimia yang menghasilkan produk sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan baik sebagai bahan antara maupun sebagai produk utama.

Berdasarkan perkembangan terbaru, berbagai prinsip dan konsep pemisahan diintegrasikan ke dalam konfigurasi reaktor, sehingga diperoleh unit yang kompak dan terintegrasi. Hal ini memungkinkan terjadinya pengurangan biaya investasi dan operasi, peningkatan konversi reaksi, serta berkurangnya produk samping. Teknologi ini sering disebut dengan nama teknologi Pemisahan Reaktif (*Reactive Separation*), walaupun ada juga yang mengistilahkan dengan reaktor multi-fungsional. Pengintegrasian ini diyakini akan memberi keuntungan secara ekonomi baik untuk proses yang telah ada maupun untuk proses baru. Pengintegrasian yang sangat penting dalam proses pemisahan reaktif adalah integrasi reaktor dengan distilasi, disebut dengan distilasi reaktif (*RD: reactive distillation*), dan integrasi reaktor dengan adsorpsi disebut dengan adsorpsi reaktif (*RA: reactive adsorption*). Pemisahan reaktif ini, memerlukan pengembangan dalam proses perancangan karena tinjauannya adalah dua proses yang terintegrasi dan saling mempengaruhi, bukan dua proses yang berurutan namun dalam satu wadah. Dengan berkembangnya kemampuan pemodelan sistem pemroses dan komputasinya, maka perancangan sistem pemisahan reaktif mudah dilakukan dan disimulasikan sehingga hasilnya dapat diperkirakan dengan tepat.

Distilasi reaktif adalah salah satu teknologi yang paling menjanjikan dari konsep integrasi pemisahan dan reaksi. Namun demikian, penerapan distilasi reaktif masih terkendala oleh rentang temperatur dan tekanan

yang sama untuk distilasi dan reaksi, urutan yang tepat kemudahan menguap dari komponen-komponen yang diolah, serta kesulitan dalam memberikan karakteristik waktu tinggal yang tepat. Dalam distilasi reaktif, reaksi dan pemisahan berlangsung dalam waktu dan ruang yang sama yaitu dalam kolom distilasi. Reaktan terkonversi menjadi produk dan terjadi proses pemisahan produk secara simultan sehingga daur ulang reaktan dapat dihindari. Distilasi reaktif lebih cocok untuk diterapkan pada proses reaksi katalisis heterogen, karena penerapan pada katalisis homogen terkendala dengan proses pemisahan katalisnya.

Adsorpsi reaktif adalah integrasi proses adsorpsi dengan reaksi kimia, dimana proses adsorpsi dan reaksi kimia berada dalam satu unit operasi. Sistem ini dapat meningkatkan konversi reaksi. Sistem ini dapat digunakan untuk memperbaiki pengambilan (*recovery*) sulfur elemental dari gas asam (*acid gas/sour gas*). Pengambilan sulfur dari gas asam banyak dijumpai dalam industri pemrosesan gas alam dan pengilangan minyak bumi yang memproses bahan baku dengan kandungan sulfur yang tinggi. Salah satu cara pengambilan sulfur tersebut adalah melalui modifikasi proses *Claus*. Dalam proses ini, gas asam ( $H_2S$ ) dibakar dalam tungku katalitik sehingga terkonversi menjadi  $SO_2$  yang kemudian  $SO_2$  bereaksi dengan  $H_2S$  menghasilkan  $S$  dan  $H_2O$ . Selanjutnya, untuk mendapatkan sulfur, hasil pembakaran tersebut dikondensasikan sehingga diperoleh elemental sulfur. Karena reaksi di atas merupakan reaksi kesetimbangan, maka proses satu tahap konversi  $H_2S$  hanya pada kisaran 92%. Dengan

proses dua tahap konversi H<sub>2</sub>S meningkat menjadi lebih dari 96% dan jika digunakan tiga tahap konversinya di atas 98%. Penerapan sistem adsorpsi reaktif menggunakan unggun padat yang merupakan campuran katalis dan adsorben H<sub>2</sub>O. Dengan demikian, saat H<sub>2</sub>O terbentuk, langsung terserap oleh penyerap zeolite sehingga reaksi bergeser ke kanan. Hal yang harus menjadi perhatian dalam adsorpsi reaktif adalah pengembangan material yang sesuai untuk adsorben, karena adsorben akan berada pada kondisi temperatur dan tekanan reaksi.

## 5. PENINGKATAN MUTU KAPUR DENGAN REAKTOR KONTINYU BERSIRKULASI

Indonesia termasuk negara yang memiliki kandungan sumber daya alam mineral yang jumlahnya cukup besar. Salah satu sumber daya mineral yang dimiliki oleh Indonesia adalah batu kapur (*limestone*). Cadangan batu kapur di Indonesia tersebar di beberapa daerah seperti Sumatera, Jawa, Sulawesi, dan Kalimantan. Jika sumber daya alam tersebut dapat dimanfaatkan dengan optimal, maka industri kimia Indonesia akan mengalami kemajuan. Batu kapur adalah batuan karbonat yang mayoritas penyusunnya adalah kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) dan sisanya adalah campuran magnesium serta pengotor yang bervariasi (*clay*, senyawa silika, aluminium, dsb). Kandungan magnesium dalam batu kapur, sebagai MgCO<sub>3</sub>, dapat mencapai konsentrasi di atas 10%. Hingga saat ini, Indonesia masih mengimpor kalsium karbonat, CaCO<sub>3</sub>, kualitas

industri dalam jumlah yang cukup besar (sekitar 41.200 ton/tahun, atau mencapai USD 11,4 juta). Meskipun cadangan batu kapur di Indonesia besar yaitu mencapai lebih dari 2.000 milyar ton, namun kebanyakan batu kapur tersebut mengandung CaCO<sub>3</sub> dalam kadar yang rendah, di bawah 85%. Sementara itu, CaCO<sub>3</sub> untuk industri memerlukan tingkat kemurnian yang tinggi serta kadar magnesium yang rendah. Umumnya spesifikasi yang dipersyaratkan untuk kapur industri yaitu dengan kadar CaCO<sub>3</sub> di atas 95% dan kadar magnesium, sebagai MgO, maksimal 0,5%. Selain itu, ukuran partikel juga harus kecil, yaitu di bawah 1 µm.

Industri pengolahan batu kapur di Indonesia umumnya melakukan pemrosesan dengan cara sederhana untuk menghasilkan kapur tohor. Pada beberapa aplikasi, perlu dilakukan pemrosesan lebih lanjut untuk menghasilkan kapur padam. Pada tahap pertama, kapur tohor dihasilkan dari dekomposisi termal CaCO<sub>3</sub>. Melalui pembakaran batu kapur pada suhu 800-1000°C, yang reaksinya:



Kapur tohor, CaO, yang dihasilkan melalui reaksi di atas diharapkan memiliki sifat yang rapuh. Pada proses pembakaran tersebut, CaCO<sub>3</sub> akan melepas CO<sub>2</sub> sehingga berubah menjadi CaO yang sifatnya rapuh. Pada proses pembakaran yang sederhana, dapat terjadi proses pembakaran yang tidak sempurna, dimana ada bagian yang pembakarannya berlebihan sehingga kapur tohor yang dihasilkan menjadi kompak atau

tidak rapuh sedangkan di bagian lain ada yang belum terbakar atau  $\text{CaCO}_3$  yang belum bereaksi.

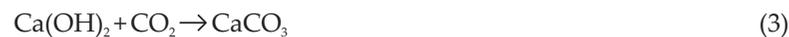
Tahap lanjutan adalah proses hidratisasi yaitu mereaksikan kapur tohor dengan air pada kondisi ruang, dengan pelepasan panas yang cukup besar, yang reaksinya:



Reaksi tersebut berjalan dalam bentuk pasta atau dalam bentuk slurry, karena kelarutan  $\text{Ca(OH)}_2$  dalam air sangat kecil. Pengotor magnesium dalam bentuk  $\text{MgCO}_3$  yang ada di batu kapur akan mengalami proses yang sama dengan  $\text{CaCO}_3$ . Akibatnya kapur padam yang dihasilkan masih mengandung pengotor terutama magnesium.

Sebagai upaya untuk meningkatkan nilai guna kapur tohor dan kapur padam hasil industri skala menengah dari bahan baku berupa batu kapur kualitas rendah, Laboratorium Proses Pemisahan Teknik Kimia FTI ITB, melakukan pengembangan teknologi pemisahan pengotor dengan cara kombinasi dengan reaksi kimia. Pengembangan tersebut bertujuan untuk menghasilkan kalsium karbonat,  $\text{CaCO}_3$ , dengan kemurnian yang tinggi sehingga memenuhi spesifikasi bahan baku industri.

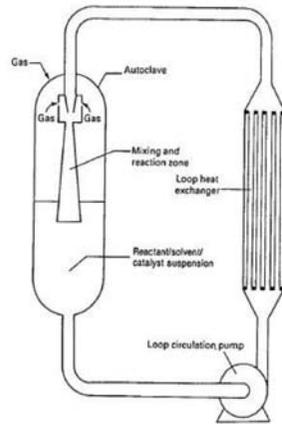
Kapur padam  $\text{Ca(OH)}_2$  jika direaksikan dengan gas  $\text{CO}_2$  akan kembali menjadi  $\text{CaCO}_3$ , melalui reaksi:



$\text{CaCO}_3$  yang terbentuk berupa butiran padat. Jika yang direaksikan

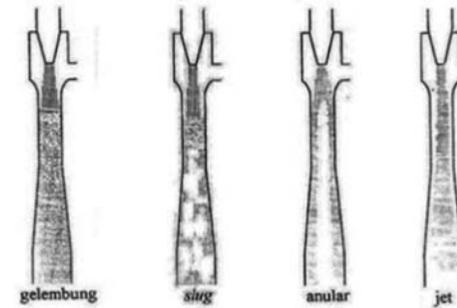
dengan  $\text{CO}_2$  adalah suspensi  $\text{Ca(OH)}_2$  dalam air, maka  $\text{CaCO}_3$  terbentuk akan mengendap/terpresipitasi dan kapur yang dihasilkan adalah PCC (*precipitated calcium carbonate*). Kemurnian  $\text{CaCO}_3$  yang tinggi dapat dihasilkan jika yang direaksikan dengan gas  $\text{CO}_2$  adalah larutan homogen  $\text{Ca(OH)}_2$ . Adanya perbedaan yang besar antara kelarutan  $\text{Ca(OH)}_2$  dan  $\text{Mg(OH)}_2$  dalam air, larutan homogen  $\text{Ca(OH)}_2$  hanya mengandung sangat sedikit  $\text{Mg(OH)}_2$ , dan saat presipitasi jumlah  $\text{MgCO}_3$  yang terbentuk sangat kecil yang secara teoritis dapat diperoleh kemurnian  $\text{CaCO}_3$  mendekati 99%.

Dua permasalahan yang muncul pada proses di atas adalah penggunaan air dalam jumlah yang sangat besar, karena kelarutan  $\text{Ca(OH)}_2$  hanya 1,2 gram/Liter dan jika menggunakan reaktor gelembung, pasokan gas  $\text{CO}_2$  harus berlebih. Oleh sebab itu, perlu dikembangkan suatu sistem pemroses yang dapat memanfaatkan kembali jumlah air yang berlebih serta pasokan gas  $\text{CO}_2$  yang sesuai kebutuhan. Permasalahan tersebut diselesaikan dengan sistem pemroses berupa Reaktor Venturi Bersirkulasi (RVB) yang diagramnya ditampilkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Reaktor Venturi Bersirkulasi

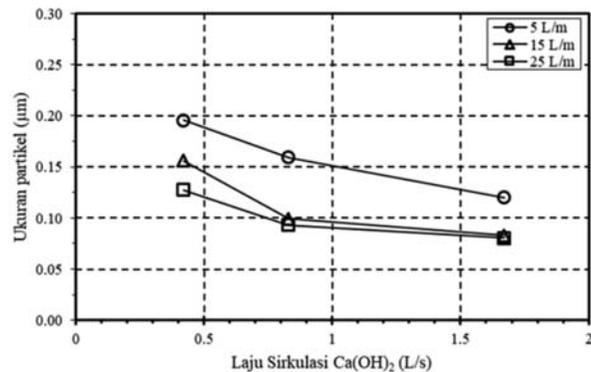
Dalam venturi, pada bagian difuser terdapat empat kemungkinan rejim aliran, dimana pada masing-masing rejim pola aliran gas dan cairnya berbeda. Keempat rejim aliran dalam venturi adalah *bubble flow* (aliran gelembung) dimana gelembung yang terbentuk memiliki diameter yang lebih kecil dari pada diameter tenggorokan venturi, *slug flow* dengan ukuran gelembung yang lebih besar dari pada diameter tenggorokan venturi tetapi daerah kontak gas-cair masih cukup halus, *annular flow* dimana aliran gas hanya di bagian tengah dari tenggorokan venturi, dan *jet flow* yaitu semburan cairan yang terbentuk dilontarkan ke luar melalui tenggorokan venturi. Pola aliran gas-cair dari keempat rejim tersebut, yaitu rejim anular, slug, gelembung, dan jet dapat dilihat pada Gambar 4. Masing-masing rejim aliran memiliki intensitas kontak antara gas dan cairan yang berbeda.



Gambar 4. Pola aliran gas-cair dalam venturi (gelembung, slug, anular, dan jet)

Terbentuknya rejim aliran ditentukan oleh perbandingan antara laju cairan dan laju uap dalam venturi. Laju uap yang terhisap sangat bergantung kepada laju cairan, diameter tenggorokan, serta diameter lubang isap. Oleh sebab itu, pengaturan rejim aliran dapat dilakukan dengan mengatur diameter serta jumlah lubang isap pada venturi. Daerah terjadinya keempat rejim aliran dapat ditentukan dari hubungan antara bilangan Weber [ $We = d_m \rho U_L^2 / \sigma$ ] terhadap perbandingan kecepatan gas terhadap kecepatan cairan [ $U_G / U_L$ ]. Perbedaan rejim aliran menyebabkan laju pertumbuhan kristal  $\text{CaCO}_3$  juga berbeda. Perbedaan tersebut dapat dimanfaatkan untuk mengatur ukuran kristal yang diinginkan. Pengaruh sirkulasi larutan  $\text{Ca(OH)}_2$  akan menentukan rejim aliran dalam venturi dan juga menentukan ukuran  $\text{CaCO}_3$  yang dihasilkan, seperti ditampilkan dalam Gambar 5. Penggunaan Reaktor Venturi Bersirkulasi dapat meningkatkan kadar kapur dari 86-90% menjadi kalsium karbonat

presipitat (*PCC*, *presipitated calcium carbonate*) dengan kemurnian yang tinggi yaitu 99 % dan ukuran maksimumnya 0.20  $\mu\text{m}$ . Dengan penggunaan Reaktor Venturi Bersirkulasi, air yang digunakan sebagai pelarut  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dapat digunakan kembali setelah presipitat  $\text{CaCO}_3$  yang terbentuk dipisahkan kembali.



Gambar 5. Pengaruh laju sirkulasi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  terhadap ukuran partikel  $\text{CaCO}_3$

## 6. HIDROEKSTRAKSI UNTUK PENINGKATAN MUTU GARAM

Garam dengan kadar  $\text{NaCl}$  tinggi, di atas 95%, diperlukan oleh beberapa industri antara lain industri tekstil, perminyakan, *Chlor Alkali Plant*, industri farmasi, dan industri aneka pangan. Pada tahun 2016, impor garam Indonesia mencapai 1,7 juta ton/tahun untuk industri kimia dan 0,35 juta ton/tahun untuk industri pangan. Indonesia memiliki potensi yang besar untuk memproduksi garam dalam jumlah yang besar.

Namun, kualitas garam rakyat yang dihasilkan belum dapat memenuhi spesifikasi yang diperlukan oleh industri. Ketidakmurnian garam rakyat disebabkan oleh kandungan garam pengotor seperti  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  dan pengotor lainnya dalam kadar yang lebih kecil.

Hidroekstraksi merupakan salah satu metode pemisahan yang dikembangkan untuk menyingkirkan pengotor garam dengan cara fluidisasi butiran padatan garam halus oleh larutan garam jenuh. Garam umpan yang halus merupakan garam dengan kadar  $\text{NaCl}$  rendah yang ingin dimurnikan. Metode hidroekstraksi memiliki efektivitas pemurnian yang tinggi, karena metode ini dapat memisahkan pengotor yang terjebak dalam kisi kristal maupun yang berada di permukaan kristal garam.

Pada proses hidroekstraksi ini, larutan garam jenuh kontak dengan butiran garam sehingga terjadi peristiwa pelarutan partikel-partikel pengotor yang dapat larut. Pengaliran larutan garam jenuh dengan laju tertentu dapat memisahkan partikel-partikel pengotor sesuai dengan beratnya, di mana partikel dengan berat yang lebih ringan akan terbawa oleh aliran fluida sedangkan partikel yang lebih berat akan dapat mempertahankan posisinya dan tidak terbawa oleh aliran. Pemberian gaya geser (*shear-force*) pada butiran garam dapat membuka struktur kristal pada bagian terlemah, yaitu bagian di mana pengotor terjebak, sehingga menyebabkan cacat pada struktur kristal garam sehingga kristal garam tersebut akan terbuka tanpa menghancurkan kristal tersebut. Pengotor yang terjebak dalam kristal garam berada di permukaan luar

kristal sehingga akan terpisah pada saat proses pencucian. Proses *shear-crushing* ini dilakukan melalui pengaliran larutan garam jenuh dari bagian bawah tumpukan butiran garam pada laju yang memungkinkan gaya gesernya membuka permukaan yang lemah dari kristal garam. Proses hidroekstraksi garam rakyat dengan ukuran sekitar 700  $\mu\text{m}$ , kadar NaCl di bawah 90% dapat meningkatkan kadar NaCl menjadi di atas 96% sehingga ditinjau dari kadar NaCl, telah memenuhi spesifikasi untuk garam industri.

## 7. PENUTUP

Prinsip dasar pemisahan difusional adalah kesetimbangan fasa dan laju difusi melintasi media pemisah. Keduanya memiliki sifat-sifat yang spesifik dan khas yang bergantung kepada komponen-komponen yang dipisahkan. Khusus untuk pemisahan yang berlandaskan kepada kesetimbangan fasa, umumnya salah satu fasa terutama fasa cair dan padat dapat diatur dan diubah sifat-sifat fisiko-kimiawinya melalui berbagai teknik yang telah dikenal selama ini. Oleh karena itu, walaupun teknologi, sistem dan konfigurasi pemrosesnya sudah berkembang jauh, pengembangan dalam proses pemisahan masih tetap diperlukan untuk menyesuaikan komponen-komponen yang dipisahkan. Dalam kenyataannya, dengan berjalannya waktu komponen-komponen yang dipisahkan semakin kompleks, hal ini menuntut adanya perkembangan teknologi pemisahan yang terus menerus. Penerapan teknologi

pemisahan hibrida, terutama antara pemisahan yang berdasarkan kesetimbangan fasa dan yang berdasarkan non-kesetimbangan fasa, merupakan tantangan tersendiri dalam teknologi pemisahan.

Perkembangan yang nyata dan terjadi saat ini di Indonesia adalah meningkatnya pengolahan bahan baku yang berasal dari sumber nabati. Secara khusus, penelitian dan pengembangan industri berbasis kelapa sawit, akhir-akhir ini sangat pesat perkembangannya. Selain itu, Indonesia memiliki keaneka ragaman hayati yang luar biasa, sehingga potensi untuk menghasilkan produk-produk olahan berbasis nabati sangat besar. Komponen-komponen yang harus dipisahkan dalam bahan nabati memiliki struktur kimiawi yang berbeda dengan yang telah biasa ditangani, sehingga penanganan dalam proses pemisahannya juga memiliki karakteristik tersendiri. Walaupun prinsip dasar pemisahannya sama, namun komponen-komponen yang dipisahkan memiliki sifat dan perilaku yang khas. Hal ini memberi tantangan tersendiri bagi pengembangan proses pemisahan.

## 8. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, ijinkan kami menyampaikan ucapan terima kasih kepada beberapa pihak yang memberikan dukungan kami.

- Ir. Wibowo Suryo Ms.ChE (alm) yang mengajak kami bergabung menjadi dosen di Teknik Kimia ITB pada tahun 1979,
- Prof. Sudarno Harjosuparto (alm) dan Prof. Saswinadi Sasmojo, guru

dan mentor kami yang mendidik kami menjadi dosen/pendidik di Teknik Kimia ITB,

- Dr. Tatang H Soerawidjaja dan Prof. Herri Susanto yang menjadi rekan seperjuangan dalam mengelola Jurusan Teknik Kimia saat kami menjabat sebagai Sekretaris dan Ketua Jurusan Teknik Kimia ITB,
- Prof. I. Gede Wenten, Ketua Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Proses Teknik Kimia yang senantiasa memberi nasehat, mendorong, dan membantu kami hingga menduduki jabatan Guru Besar.
- Rekan sejawat di Komunitas Teknik Kimia ITB yang saling bahu membahu memajukan pendidikan Teknik Kimia di ITB,
- Dr. Putu Teta P Aryanti, Dr. Khoiruddin, Dr. A.N Hakim, Anita K Wardhani, ST.MT, dan S. Widodo ST, MT kelompok peneliti di Laboratorium Proses Hilir, Pusat Penelitian Biosains dan Bioteknologi yang telah memberi dukungan kepada kami,
- Prof. Subagjo atas kerja sama yang baik dalam tim pembimbingan mahasiswa program doktor,
- Prof. Dwiwahju Sasongko, yang telah banyak mencurahkan tenaga dan pikiran dalam mendukung kami ke jabatan Guru Besar,
- Dr. Ika A Kartika dari Laboratorium Teknologi Proses, Fateta Institut Pertanian Bogor, atas kerja sama riset ekstraksi minyak nabati,
- Kedua orang tua kami (alm) yang telah membimbing dan mendidik

kami serta kedua mertua kami (alm) yang senantiasa memberikan dukungan keluarga kami,

- Yang tidak kalah penting, kepada istri tercinta yang setia memberi dukungan dan mendampingi dalam keadaan suka dan duka juga anak-anak, menantu-menantu dan cucu yang selalu membuat kehidupan ini menjadi ceria dan bermakna.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Anton A. Kiss, "*Distillation technology - still young and full of breakthrough opportunities*", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, DOI: 10.1002/jctb.4262, 89, 4, April 2014, 479-498.
2. Cramers, P. H. M. R.; Smit, T.; Leuteritz, G. M.; van Dierendonck, L. L.; Beenackers, A. A. C. M., "*Hydrodynamics and local mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors*", Chemical Engineering Journal, 53, 1993, 67-73.
3. Cramers, P. H. M. R.; van Dierendonck, L. L.; Beenackers A. A. C. M., "*Influence of the gas density on the gas entrainment rate and gas holdup in loop-Venturi reactors*", Chemical Engineering Science, 47, 1992, 2251-2256.
4. Danu Ariono, Dwiwahju Sasongko dan Priyono Kusumo "*Dinamika Tetes dalam Kolom Isian*", Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia 2006, Palembang, 19-20 Juli 2006.

5. Danu Ariono, Mubiar Purwasasmita, Dwiwahju Sasongko dan Priyono Kusumo, "Pengembangan Model Ekstraksi Cair-Cair dalam Kolom Isian", Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia (SNTKI) 2009, Bandung, 19-20 Oktober 2009.
6. D. Wappel, G. Gronald, R. Kalb c, J. Draxler, "Ionic liquids for post-combustion CO<sub>2</sub> absorption", International Journal of Greenhouse Gas Control, DOI: 10.1016/j.ijggc.2009.11.012, 4, 2010, 486-494.
7. Junhua Huang, dan Thomas Rüther, "Why are Ionic Liquids Attractive for CO<sub>2</sub> Absorption? An Overview", Australian Journal Chemistry, DOI: 10.1071/CH08559, 62, 2009, 298-308.
8. Ömer Yildirim, Anton A. Kiss, Nicole Hüser, Katharina Leßmann, dan Eugeny Y. Kenig, "Reactive absorption in chemical process industry: A review on current Activities", The Chemical Engineering Journal, DOI: 10.1016/j.cej.2012.09.121, December, 2012.
9. Sedivy, V.M., "Purification of Salt for Chemical and Human Consumption", Industrial Minerals, 1996, 1-20.

## CURRICULUM VITAE



Nama : **DANU ARIONO**  
 Tmpt. & tgl. lhr.: Yogyakarta, 7 Januari 1954  
 Kel. Keahlian : Perancangan dan Pengembangan  
 Proses Teknik Kimia  
 Alamat Kantor : Jl. Ganesa 10 Bandung  
 Nama Istri : Carlina N Ariono  
 Nama Anak : 1. Andre Widhiananto Ariono  
 2. Adrian Dwiananto Ariono

### I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Diplome de Docteur Ingenieur, specialite Genie Chimique, Universite de Technologie de Compiegne, France.
- Sarjana Teknik, Departemen Teknologi Kimia, Institut Teknologi Bandung.

### II. RIWAYAT PEKERJAAN DI ITB

- Sekretaris Jurusan Teknik Kimia, FTI, ITB, Periode: 1989-1992.
- Ketua Jurusan Teknik Kimia, FTI, ITB, Periode: 1992-1995.
- Kepala Laboratorium Proses Pemisahan dan Pemurnian FTI ITB, sejak 1989.
- Ketua Implementasi Program Magister Teknik Kimia ITB, 1992 - 1997.
- Penanggung Jawab Pengembangan "Program Double Degree" Magister Teknik Kimia ITB dengan RUG (University of

Groningen), Kerjasama ITB dan RUG, 1999-2002.

- Penanggung Jawab Pengembangan “Program Double Degree” Magister Teknik Kimia ITB dengan University of Magdeburg, 1999-2001.
- Anggota Komisi dan Koordinator Sub-Program pada Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur ITB, sejak 2017.
- Anggota Senat Fakultas Teknologi Industri ITB, sejak 2019.
- Anggota Senat ITB, sejak 2019.

### III. PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 20 th, Pemerintah Republik Indonesia.
- Satyalancana Karya Satya 30 th, Pemerintah Republik Indonesia.
- Pengabdian 25 th, Institut Teknologi Bandung.
- Pengabdian 35 th, Institut Teknologi Bandung.
- Penghargaan bidang Pengajaran 2017 Institut Teknologi Bandung.

### IV. RIWAYAT JABATAN

- Asisten Ahli Madya, 1 Nopember 1979
- Asisten Ahli, 1 April 1982
- Lektor Muda, 1 Oktober 1985
- Lektor Madya, 1 Oktober 1987
- Lektor, 1 Juli 1992
- Lektor Kepala, 1 Januari 2001
- Profesor/Guru Besar, 1 Desember 2018.

### V. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/a, 1 Nopember 1979
- Penata Muda, III/a, 1 Pebruari 1981
- Penata Muda Tingkat I, III/b, 1 April 1982
- Penata, III/c, 1 Oktober 1985
- Penata Tingkat 1, III/d, 1 Oktober 1987
- Pembina, IV/a, 1 Oktober 1992
- Pembina Tingkat I, IV/b, 1 April 2019.

### VI. PUBLIKASI, 2010-sekarang

1. Agus Mirwan dan **Danu Ariono**, "*Dinamika Tetes Ekstraksi Cair-Cair Sistem Air-Metil Keton (MEK)-Heksan dalam Kolom Isian*", Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol. 9 No. 3 Desember 2010, 99-105.
2. Iwan Ridwan, **Danu Ariono**, "*Pemodelan Perpindahan Massa Ekstraksi Kolom Isian dengan Distribusi Ukuran Tetesan*", Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol. 10 No. 2 Agustus 2011, 95-101.
3. Ika Amalia Kartika, Sri Yuliani, **Danu Ariono**, Sugiarto, "*Transesterifikasi In Situ Biji Jarak: Pengaruh Kadar Air dan Ukuran Partikel Bahan Terhadap Rendemen dan Kualitas Biodiesel*", Jurnal Teknologi Pertanian AGRITECH, Volume 31, No. 3, Agustus 2011.
4. **Danu Ariono**, Joanna Malaon Soetanto, Adi Kurniawan, "*Penerapan Perubahan Ukuran Tetes dalam Evaluasi Unjuk Kerja Kolom Isian Ekstraksi Cair-Cair*", Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia (SNTKI) 2012, Depok, 20-24 September 2012.
5. Amalia Kartiaka, I., Yani, M., **Ariono, D.**, Evon, Ph., Rigal, L.,

- "Biodiesel Production from *Jatropha* Seeds: Solvent Extraction and In Situ Transesterification in A Single Step", *Journal Fuel* Volume 106, 2013, Pages 111-117.
6. P.T.P. Aryanti, Subagjo, **D. Ariono**, I.G Wenten, "Fouling and rejection characteristic of humic substances in polysulfone ultrafiltration membrane", *Journal of Membran Science and Research*, Volume 1, Issue 1, 2015, page 41-45.
  7. **D. Ariono.**, Khoiruddin., D. Prabandari, R., R. Wulandari., I.G. Wenten, "Preparation and Characterization of Polysulfone/PEG Heterogeneous Ion Exchange Membrane for Reverse Electrodialysis (RED)", *Proceeding International Conference on Energy Sciences (ICES 2016)*, July 25-27, 2016, Bandung, Indonesia.
  8. **D. Ariono** and Anita Kusuma Wardani, "Review of Membrane Oxygen Enrichment for Efficient Combustion", *Proceeding International Conference on Energy Sciences (ICES 2016)*, July 25-27, 2016, Bandung, Indonesia.
  9. **Danu Ariono**, Mubiar Purwasasmita, Khoirrudin and I Gede Wenten, "Integrated Processes for Desalination and Salt Production", *Proceeding The 5<sup>th</sup> International Conference on Education, Concept, and Application of Green Technology 2016 (EIC)*, October 5, 2016, Semarang, Indonesia.
  10. **Danu Ariono**, Khoiruddin, Subagjo and I Gede Wenten, "The Effect of Heterogeneity on Ion-Exchange Membrane Properties", *Proceedings The 2<sup>nd</sup> International Conference of Materials Research Society of Indonesia (MRS-ID Meeting)*, October 24-26, 2016, Bandung,

- Indonesia.
11. I. Amalia Kartika., P. Evon., M.Cerny., O. Suparno., D. Hermawan., **D. Ariono.**, L. Rigal, "Simultaneous Solvent Extraction and Transesterification of *Jatropha* Oil for Biodiesel Production and Potential application of the obtained cakes for binderless particleboard", *Fuel* Volume 181, 1 October 2016, Pages 870-877.
  12. **D. Ariono.**, P.T.P. Aryanti., A.N. Hakim., S.Subagjo., I.G. Wenten "Determination of Thermodynamic Properties of Polysulfone/PEG Membrane Solutions Based on FLory-Huggins Model", *Proceeding The 3<sup>rd</sup> International Seminar on Fundamental And Application of Chemical Engineering (ISFAChe)*, November 1-2, 2016, Surabaya Indonesia.
  13. P.T.P. Aryanti, S.R. Joscarita, A.K. Wardani, S., Subagjo, **D. Ariono** and I.G. Wenten, "The Influence of PEG400 and Acetone on Polysulfone Membrane Morphology and Fouling Behavior", *Journal of Engineering and Technological Sciences* Volume 48, Issue 2, 2016.
  14. **Danu Ariono**, Mubiar Purwasasmita, I Gede Wenten, "Brine Effluents: Characteristics, Environmental Impacts, and Theirs Handling", *Journal of Engineering and Technological Sciences* Volume 48, Issue 4, 2016.
  15. **Danu Ariono**, Khoiruddin & I Gede Wenten, "Heterogeneous Structure and Its Effect on Properties and Electrochemical Behaviour of Ion-Exchange Membrane", *Materials Research Express* Volume 4, Issue 2, February 2017.
  16. **Danu Ariono** and A.K. Wardani, "Review of hydrophilic PP

- membrane for organic waste removal*", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering 2016, AIP Conference Proceedings Volume 1840, Issue 1, May 24, 2017.
17. **D. Ariono**, A.N. Hakim, and I.G. Wenten, "*Experimental Investigation and Numerical Analysis of SO<sub>2</sub> Removal using Polypropylene Membrane Contactor*", Proceeding International Conference on Computational in Science and Engineering (ICCSE) July 10-12, 2017, Bandung, Indonesia.
  18. **Danu Ariono** and Anita Kusuma Wardani, "*Analysis of Fouling Mechanism in Polysulfone Based Ultrafiltration Membrane during Peat Water Filtration*", Proceeding International Conference on Computational in Science and Engineering (ICCSE), July 10-12, 2017, Bandung, Indonesia.
  19. **Danu Ariono**, Veronica Japri, Setyo Widodo, "*Neraca Populasi Fasa dalam Evaluasi Ekstraksi Cair-Cair pada Kolom Isian*", Majalah ilmiah Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi (LPMGB), Volume 51, No. 2, Agustus 2017.
  20. **Danu Ariono**, Maxs Christian, Philip Irfan, Sri Mulyani Suharno, dan Aisya Tamara, "*Pengaruh Penambahan Ekstrak Bahan Alami Terhadap Laju Oksidasi Minyak Kelapa*", Reaktor Chemical Engineering Journal Volume 17 No. 3 September 2017, hal. 157-165.
  21. **D. Ariono**, A.S. Chandranegara, S.Widodo, Khoiruddin, I.G. Wenten, "*Flue Gas Carbon Capture using Hollow Fiber Membrane*

*Diffuser-Separator*", Proceeding Mineral Processing and Technology International Conference (mineprocet), October 23-24, 2017, Jakarta, Indonesia.

22. **D. Ariono**, S. Widodo, Khoiruddin, A.K. Wardani, I. G Wenten, "*The influence of Operating Parameter on Membrane Performance in Used Lube Oil Processing*", The 7<sup>th</sup> Nanoscience and Nanotechnology Symposium (NNS 2017), Bandung, October 22<sup>nd</sup>-24<sup>nd</sup>, 2017.
23. Khoirudin, **Danu Ariono**, Subagjo & I Gede Wenten, "*Surface modification of ion-exchange membranes: Methods, Characteristic and performances*", Journal of Applied Polymer Science Volume 134, Issue 48, 20 December 2017.
24. **Ariono, D.**, Wardani, A.K., "*Hydrophilic polypropylene membrane for Biomedical application*", Advanced Science Letters Volume 23, Issue 6, 2017, Pages 5713-5715.
25. **Ariono, D.**, Khoiruddin, Subagjo, Wenten, I.G., "*The influence of polymerization degree on morphology and electrochemical properties of PVC-based heterogeneous ion-exchange membrane*", Advanced Science Letters Volume 23, Issue 6, 2017, Pages 5762-5764.
26. Ika Amalia Kartika, Desita Dwi Kurnia Sari, Auredelia Febriani Pahan, Ono Suparno, **Danu Ariono**, "*Ekstraksi Minyak dan Resin Nyamplung dengan Campuran Pelarut Heksan-Etanol*", Jurnal Teknologi Industri Pertanian, Volume 27, No. 2, 2017. hal 161-171
27. **D. Ariono** and Khoiruddin, "*Improving Ion-Exchange Membrane Properties by The Role of Nanoparticles*", AIP Conference

- Proceedings, Volume 1788, Issue 1, 2017.
28. **D. Ariono**, P.T.P. Aryanti, S. Subagjo and I.G. Wenten, "*The Effect of Polymer Concentration on Flux Stability of Polysulfone Membrane*", AIP Conference Proceedings, Volume 1788, Issue 1, 2017.
  29. **D. Ariono** and Anita Kusuma Wardani, "*Modification and Application of Hydrophilic Polypropylene Membrane*", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol 214, 2017.
  30. **D. Ariono**, A K Wardan, S Widodo, Putu T P Aryanti and I G Wenten, "*Fouling mechanism in Ultrafiltration of Vegetable Oil*", Journal Materials Research Express, Volume 5, Issue 3, March 2018.
  31. I. Amalia Kartika, M Cerny, V. Vandenbossche, L. Rigal, C. Sablayrolles, C. Vialle, O. Suparno, **D. Ariono**, Ph. Evon, "*Direct Calophyllum Oil Extraction and Resin Separation with a Binary Solvent of n-Hexane and Methanol Mixture*", Journal Fuel, Volume 221, 2018, Page 159-164.
  32. **Ariono, D.**, Aryanti, P.T.P., Wardani, A.K., Wenten, I.G., "*Analysis of protein separation mechanism in charged ultrafiltration membrane*", Journal of Engineering and Technological Sciences Volume 50, Issue 2, 2018.
  33. S Widodo, Khoiruddin, **D. Ariono**, Subagjo and I G Wenten "*Membrane Separation for Non-Aqueous Solution*", IOP Conference Series: Material Science and Engineering Vol 285, 2018.
  34. **Danu Ariono**, Utjok W R Siagian, Anita K Wardani, Ahmad N

- Hakim and I Gede Wenten, "*SO<sub>2</sub> Removal from The Flue Gas by Hollow Fibre Membrane Contactor*", MATEC Web of Conferences Vol 156, 2018.
35. **D. Ariono**, A.K. Wardani, P.T.P. Aryanti, and I.G. Wenten, "*Investigation of Solute Diffusion through Polyvinyl Alcohol Polyallylamine Ultrafiltration Membrane*", Asean Journal of Chemical Engineering, Vol 18, No. 2, 2018, Page 70–80.
  36. **Ariono, D.**, A.K. Wardani, P.T.P. Aryanti, A.N. Hakim, and I G. Wenten, "*Determination of Fouling Mechanism in Ultrafiltration of Electroplating Wastewater*", Jurnal Teknologi, Vol 80 No. 3-2, 201.
  37. **Ariono, D.**, P.T.P. Aryanti, A.K. Wardani, and I G. Wenten, "*Fouling characteristics of humic substances on tight polysulfone-based ultrafiltration membrane*", Membrane Water Treatment, Vol 9 No. 5, 2018, Page 353-361.
  38. K. Khoiruddin, **D. Ariono**, S. Subagjo, and I G. Wenten, "*Effect of hydrophilic additive and PVC polymerization degree on morphology and electrochemical properties of PVC-based heterogeneous cation-exchange membrane*", Journal of Applied Polymer Science, Vol 135 No. 39, 2018.
  39. Widodo, S., **D. Ariono**, K. Khoiruddin, A. N. Hakim, and I G. Wenten, "*Recent advances in waste lube oils processing technologies*", Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol 37 No. 6, 2018, Page 1867-1881.
  40. Hakim, A. N., K. Khoiruddin, **D. Ariono**, and I. G. Wenten "*Ionic Separation in Electrodeionization System: Mass Transfer Mechanism*

*and Factor Affecting Separation Performance*" Separation & Purification Reviews, 2019, Page 1-23.

41. Wardani, A.K., **D. Ariono**, Subagjo, and I G. Wenten "*Hydrophilic modification of polypropylene ultrafiltration membrane by air-assisted polydopamine coating*", Polymers for Advanced Technologies, Vol 30 No. 4, 2019, Page 1148-1155.
42. Wardani, A. K., **D. Ariono**, Y. Yespin, D. R. Sihotang, and I G. Wenten, "*Preparation of hydrophilic polypropylene membrane by acid dipping technique*", Materials Research Express, Vol 6 No. 7, 2019.
43. Khoiruddin, K., **D. Ariono**, S. Subagjo, and I. G. Wenten, "*Electrochemical Properties of Chemically Treated Polyvinylchloride-Based Heterogeneous Cation-Exchange Membrane*", Polymer Engineering & Science, Vol 59 No. S1, 2019, Page E219-E226.

