



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH pH PADA PROSES PENYISIHAN AMONIA DARI AIR
LIMBAH MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN SERAT BERONGGA
MENGUNAKAN LARUTAN PENYERAP SUMBER AIR ALAMI**

SKRIPSI

DIANA BEAUTY

0706269716

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

DEPOK

DESEMBER 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH pH PADA PROSES PENYISIHAN AMONIA DARI AIR
LIMBAH MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN SERAT BERONGGA
MENGUNAKAN LARUTAN PENYERAP SUMBER AIR ALAMI**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik Kimia**

DIANA BEAUTY

0706269716

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

DEPOK

DESEMBER 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Diana Beauty

NPM : 0706269716

Tanda Tangan :

Tanggal : 11 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Diana Beauty
NPM : 0706269716
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh pH pada Proses Penyisihan Amonia dari Air Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Sumber Air Alami

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc, PhD. (.....)
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA (.....)
Penguji 2 : Ir. Eva Fathul Karamah, MT (.....)
Penguji 3 : Dr. Ir. Sukirno, MEng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Pertama-tama, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah mendampingi penulis dalam pembuatan skripsi ini. Berkat penyertaannya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh pH pada Proses Penyisihan Amonia dari Air Limbah Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Sumber Air Alami”** untuk memenuhi syarat kelulusan sebagai Sarjana Teknik. Secara khusus dan mendalam, penulis ingin mengucapkan terima kasih pula kepada **Bapak Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, Ph.D** yang selalu sabar dan bersedia meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam membimbing dan mengarahkan penyelesaian skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku Kepala Laboratorium Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia FTUI.
3. Mami Papi tersayang yang percaya penuh dengan kemampuan anak perempuan tertuanya ini. Men-*support* penuh dengan hati gembira, bahkan Mami dengan semangatnya menemani penulis dalam mencari kebaya kelulusan, bahkan sebelum skripsi selesai ditulis =p Love you, mom and dad.
4. Mank Ijal yang selalu ada di saat dibutuhkan, dimulai dari merangkai alat sampai pada *running* yang kerap kali membutuhkan bantuan dan keterampilan dari beliau.
5. Mbak Tiwi, selalu laboran dari Lab Intensifikasi Proses, yang setia menemani penulis dan rekan dalam mengumpulkan data, mengatasi kebocoran alat di sana-sini, dan juga membantu proses *running* dari awal hingga akhir penelitian.
6. Riezqa Andika, Rian Bastian, Ardi, Soni, Ian, Iryandi dan Mas Taufik yang telah menemani kegiatan *nge-lab* sehingga lebih menyenangkan, berwarna, dan penuh canda tawa. Juga Iyus, laboran lantai 4 DTK yang

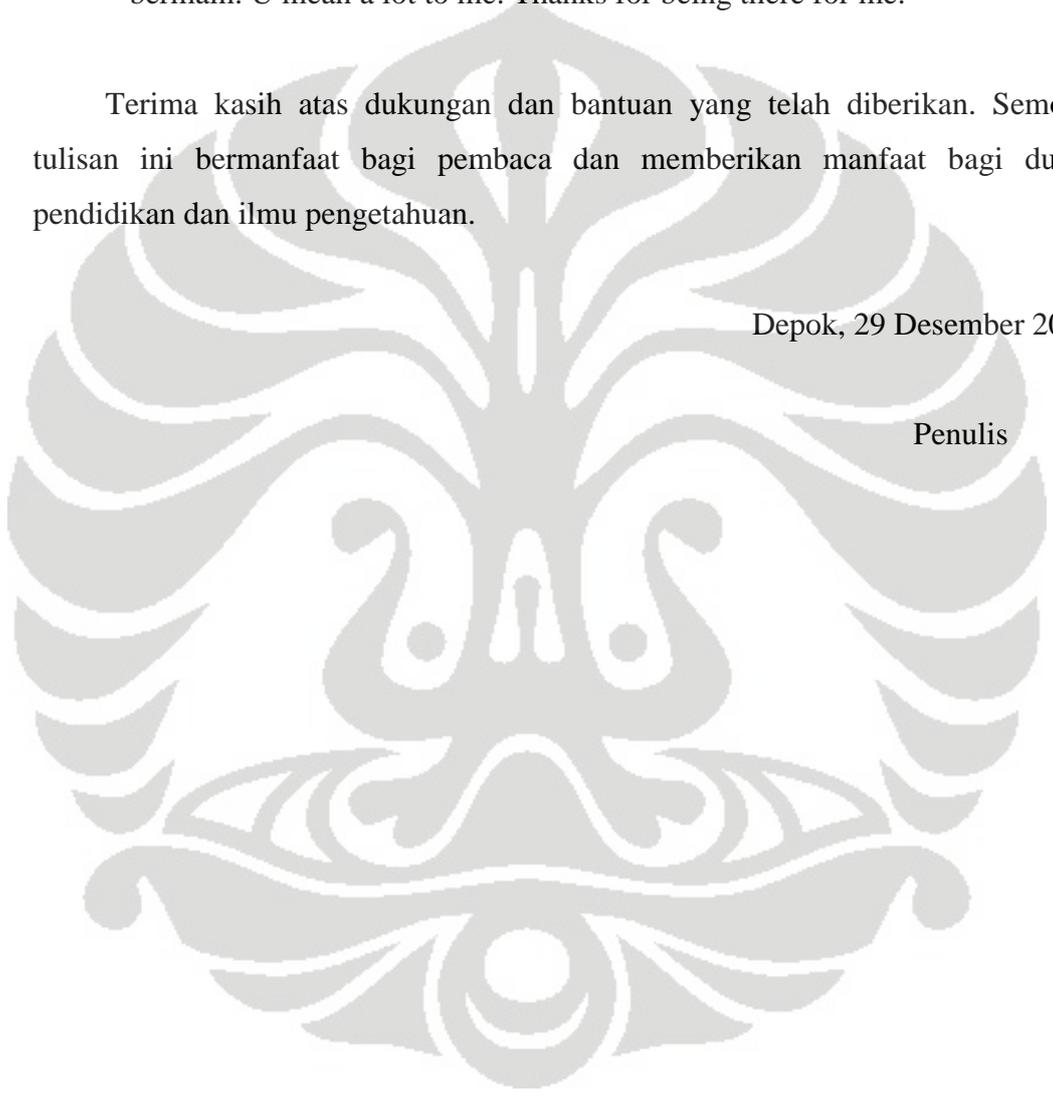
dengan murah hati meminjamkan panci untuk memasak air Ciater. Dan Nova, Erica serta Cynthia yang meramaikan penantian membosankan saat memasak air di lantai 4 =)

7. Aa yang dengan sabar menemani penulis belajar, mencari makan enak, jalan-jalan di saat otak penat, memberi semangat di saat *down* dan bosan, mencari *doggy* untuk dipeluk dan meminjamkan Iput sebagai teman bermain. U mean a lot to me. Thanks for being there for me.

Terima kasih atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, 29 Desember 2010

Penulis



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

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

Nama : Diana Beauty

NPM : 0706269716

Program Studi: Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian 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:

Pengaruh pH pada Proses Penyisihan Amonia dari Air Limbah Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Bahan Alam

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 : 11 Januari 2011

Yang menyatakan

(Diana Beauty)

ABSTRAK

Nama : Diana Beauty
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh pH pada Proses Penyisihan Amonia dari Air Limbah Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Bahan Alam

Kontaktor berbasis membran memiliki banyak keunggulan sebagai media kontak antara fasa cair dan cair, seperti luas permukaan kontak yang besar, kemudahan dalam *scale-up* dan pengkombinasian dengan proses lain, ramah lingkungan, serta efisien ruang. Salah satu aplikasi kontaktor membran adalah proses pemisahan amonia dari air limbah pada industri pupuk dan besi baja. Penelitian ini bertujuan mengetahui efektivitas kontaktor membran serat berongga dalam memisahkan amonia terlarut dari dalam air limbah menggunakan cairan penyerap sumber air alami dari Ciater. Variabel penelitian yang diterapkan adalah variasi pH absorben 2, 1 dan 0,7 serta variasi laju sirkulasi limbah 5, 4 dan 3,5 Lpm. Hasil evaluasi kontaktor membran menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa berbanding terbalik dengan nilai pH, namun berbanding lurus dengan laju sirkulasi limbah.

Kata kunci:

Amonia, kontaktor membran serat berongga, perpindahan massa, pH.

ABSTRACT

Name : Diana Beauty
Study Program : Chemical Engineering
Title : Effect of pH in Ammonia Removal from Waste Water Through Hollow Fiber Membrane Contactor Using Natural Water Source as Absorbent

Membrane based contactor has many advantages as a medium for liquid and liquid phase contact, such as larger surface area, easiness in scale-up and combining with other process, environmentally friendly and space efficient. One of the applications for membrane contactor is ammonia removal from waste water in fertilizer and steel industries. This study aims to determine the effectiveness of hollow fiber membrane contactor in removing dissolved ammonia from waste water using natural water source from Ciater as absorbent. Variables applied are absorbent's pH variation of 2, 1 and 0.7 and variations in wastewater circulation flow rate of 5, 4 and 3.5 Lpm. Evaluation results show that mass transfer coefficient is proportional to wastewater circulation flow rate, but inversely proportional to value of pH.

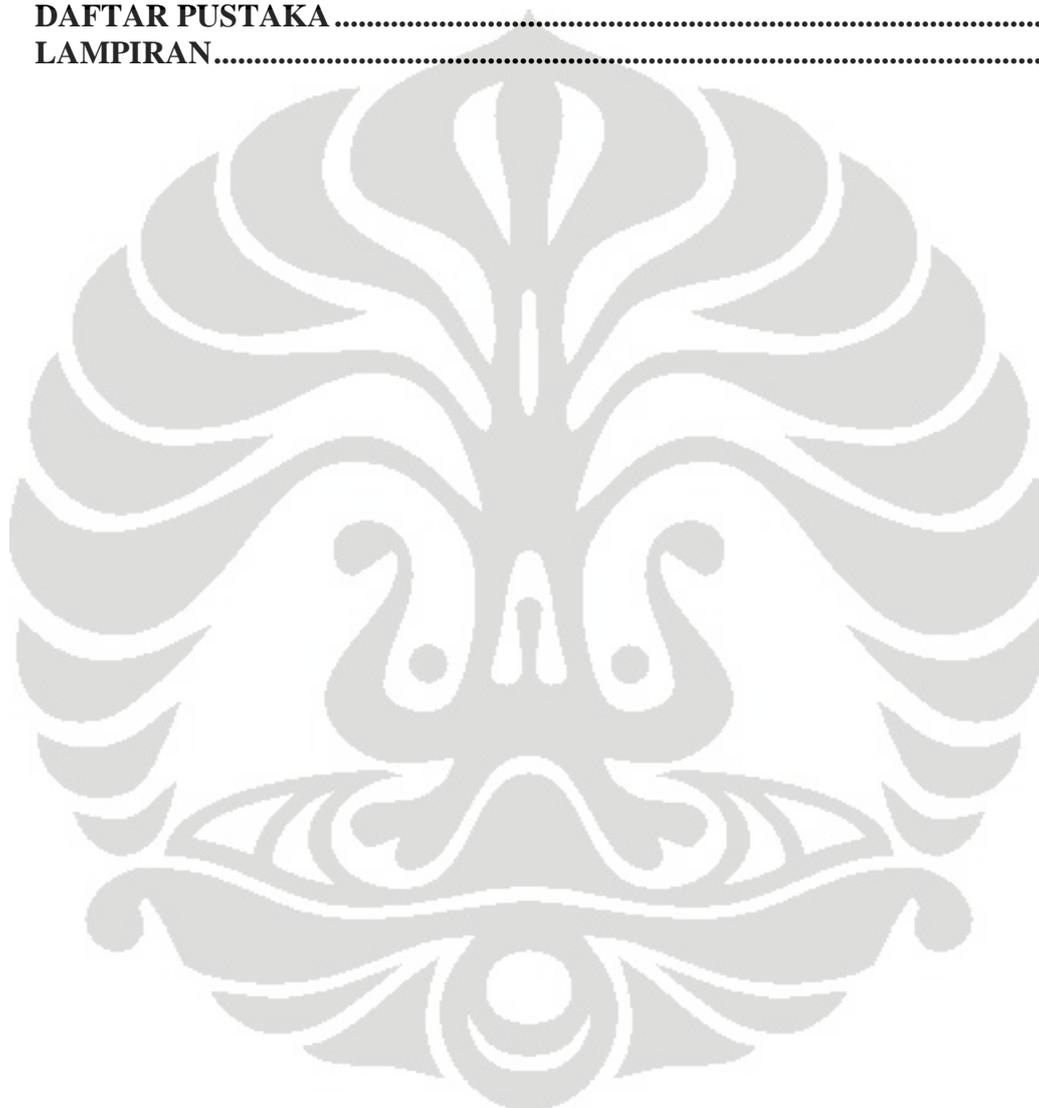
Key words:

Ammonia, hollow fiber membrane contactor, mass transfer, pH

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vii
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
BAB 1	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2	6
TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Amonia	6
2.1.1 Sumber Amonia	6
2.1.2 Identifikasi Amonia (reagen Nessler).....	7
2.1.3 Bahaya Amonia.....	8
2.1.4 <i>Ammonia Removal</i>	9
2.2 Kontaktor Membran Serat Berongga.....	12
2.2.1 Pendahuluan.....	12
2.2.2 Membran Polipropilen	13
2.2.3 Dasar Teori Perpindahan Massa Pada Membran	15
2.2.4 <i>State of The Art</i>	19
2.3 Perpindahan Massa Amonia terlarut dalam Air	20
2.4 Air Ciater sebagai Larutan Absorben	21
2.5 Produk Samping Proses Penyisihan Amonia	23
BAB 3	25
METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Pendahuluan	25
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2.1 Studi Literatur	25
3.2.2 Perangkaian dan Preparasi Alat	26
3.2.3 Preparasi Larutan Absorben.....	26
3.2.4 Preparasi Limbah Amonia	27
3.2.5 Uji Perpindahan Massa dan Hidrodinamika	27
3.2.6 Pengolahan Data dan Analisis Hasil.....	28
3.3 Peralatan dan Bahan yang Digunakan.....	29
3.4 Skema Peralatan	31
3.5 Prosedur Penelitian.....	32
3.6 Penentuan Koefisien Perpindahan Massa.....	32
3.7 Studi Hidrodinamika	34
BAB 4	36

HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Studi Perpindahan Massa	36
4.1.1 Pengaruh pH Absorben Terhadap Perpindahan Massa.....	37
4.1.2 Pengaruh Laju Alir Terhadap Koefisien Perpindahan Massa.....	40
4.2 Efisiensi Pemisahan Amonia Terlarut dalam Limbah Sintetis.....	41
4.3 Pengaruh Laju Alir dan pH Terhadap Fluks	43
4.5 Korelasi Perpindahan Massa	45
BAB 5	48
KESIMPULAN.....	48
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN.....	52



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kontakor membran serat berongga [5]	12
Gambar 2. 2 Struktur kimia polipropilena [11].....	14
Gambar 2. 3 Struktur kimia polipropilena isotaktik	14
Gambar 2. 4 Struktur kimia polipropilena ataktik	14
Gambar 2. 5 Struktur kimia polipropilena syndiotaktik	15
Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Membran Kontakor [13]	16
Gambar 2. 7 Peristiwa Absorpsi dan Desorpsi Amonia pada Membran [14].....	16
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3. 2 Skema Alat Penelitian	31
Gambar 4. 1 Variasi Koefisien Perpindahan Massa terhadap pH pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm	38
Gambar 4. 2 Variasi koefisien perpindahan massa keseluruhan, k_{ov} , terhadap pH pada Larutan Penyerap Air Ciater dan Asam Sulfat	39
Gambar 4. 3 Variasi Koefisien Perpindahan Massa terhadap Laju Alir pada pH 1 dalam Skala Logaritmik	40
Gambar 4. 4 Variasi %Penyisihan Amonia terhadap Waktu pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm.....	42
Gambar 4. 5 Variasi %Penyisihan Amonia terhadap Waktu pada pH Larutan Penyerap 1	42
Gambar 4. 6 Variasi Fluks terhadap Perubahan Laju Alir Limbah Amonia pada pH Absorben 1	44
Gambar 4. 7 Variasi Fluks terhadap Perubahan pH Absorben pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm.....	44
Gambar 4. 8 Variasi Bilangan Sherwood terhadap Bilangan Reynold pada pH Absorben 1 dalam Skala Logaritmik.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Baku Mutu Limbah Cair Kegiatan Industri	9
Tabel 2. 2 <i>State of the Art</i> Mengenai Pemisahan Amonia dari Air.....	19
Tabel 2. 3 Komposisi Ion Air Ciater [24]	22



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1	52
1. Perhitungan Preparasi Air Ciater	52
1.1 pH target = 2	52
1.2 pH target = 1	53
1.3 pH target = 0,7	53
1.4 Tegangan Permukaan.....	53
2. Perhitungan Preparasi Larutan Amonium Sulfat	55
LAMPIRAN 2	57
2. Data Pengamatan Perubahan Konsentrasi Amonia	57
2.1 Variasi pH absorben 2.....	57
2.2 Variasi pH absorben 1.....	57
2.3 Variasi pH absorben 0,7.....	59
3. Perhitungan <i>Slope</i> Perubahan Konsentrasi terhadap Waktu	59
3.1 Variasi pH absorben 2.....	60
3.2 Variasi pH absorben 1.....	60
3.3 Variasi pH absorben 0,7.....	62
4. Koefisien Perpindahan Massa (<i>k</i>)	63
4.1 Variasi pH absorben 2.....	63
4.2 Variasi pH absorben 1.....	64
4.3 Variasi pH absorben 0,7.....	64
5. Perhitungan Fluks	64
5.1 Variasi pH absorben 2.....	64
5.2 Variasi pH absorben 1.....	65
5.3 Variasi pH absorben 0,7.....	66
6. Perhitungan Bilangan Sherwood.....	66
7. Perhitungan Efisiensi Pemisahan.....	67
8. Perhitungan Bilangan Reynold	69

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan zat yang paling penting dalam kehidupan makhluk hidup setelah udara; dimana ada air, di situ terdapat kehidupan. Volume rata-rata kebutuhan air setiap individu perhari berkisar antara 150-200 liter, tergantung pada keadaan iklim, standar kehidupan, dan kebiasaan masyarakat.

Batasan-batasan sumber air yang bersih dan aman dikonsumsi antara lain [1]:

- a. Bebas dari kontaminasi kuman atau bibit penyakit
- b. Bebas dari substansi kimia yang berbahaya dan racun
- c. Tidak berasa dan tidak berbau
- d. Dapat dipergunakan untuk mencukupi kebutuhan domestik dan rumah tangga.
- e. Memenuhi standar minimal yang ditentukan oleh WHO atau Departemen Kesehatan RI.

Namun seiring pertumbuhan sektor industri dan ekonomi suatu negara, sumber air bersih semakin sulit ditemui. Air dinyatakan tercemar bila mengandung bibit penyakit, parasit, bahan-bahan kimia yang berbahaya, dan sampah atau limbah industri.

Berikut standar-standar untuk kelayakan air minum yang berlaku di Indonesia menurut Permenkes RI No. 01/Birhubmas/I/1975:

- a. Standar fisik : suhu, warna, bau, rasa, kekeruhan.
- b. Standar biologis : kuman parasit, patogen, bakteri golongan koli.
- c. Standar kimia : pH, jumlah zat padat, dan bahan kimia lain.
- d. Standar radioaktif : radioaktif yang mungkin ada dalam air

Limbah cair industri mengandung bahan pencemar yang bersifat racun dan berbahaya yang dikenal dengan sebutan B3 (bahan beracun dan berbahaya). Bahan ini dirumuskan sebagai bahan yang dalam jumlah relatif sedikit tetapi memiliki potensi untuk mencemarkan dan merusak kehidupan dan sumber daya.

Apabila ditinjau secara kimia, bahan-bahan tersebut mengandung 60.000 jenis bahan kimia dari 5 juta bahan kimia yang sudah dikenal.

Salah satu kontaminan yang kerap ditemui adalah amonia. Amonia bebas merupakan hasil proses dekomposisi benda-benda organik. Keberadaan amonia bebas dalam sumber air menunjukkan adanya pencemaran oleh kotoran binatang atau manusia.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk memproses limbah amonia (*ammonia removal*); beberapa di antaranya adalah *ammonia stripping*, *biological nitrification-denitrification*, *breakpoint chlorination* dan *biological treatment*. Adapun metode yang relatif baru untuk pemisahan amonia adalah penggunaan kontaktor membran serat berongga.

Sebuah membran kontaktor adalah alat yang mencapai perpindahan massa gas/ cair atau cair/ cair tanpa dispersi antara satu fase ke dalam fasa lainnya. Hal ini dilakukan dengan melewati cairan pada sisi yang berlawanan dari *microporous membrane*. Dengan pengendalian perbedaan tekanan antar cairan secara hati-hati, salah satu dari cairan akan tertahan dalam pori-pori membran sehingga cairan/permukaan fluida tertahan pada mulut setiap pori. Pendekatan ini menawarkan sejumlah keunggulan penting atas kontaktor konvensional fase terdispersi, termasuk tidak adanya emulsi, tidak terjadi banjir pada laju alir tinggi, tidak dibutuhkan perbedaan densitas larutan dan, secara mengejutkan, luas daerah *interface* yang tinggi. Aliran liquid yang memasuki serat berongga juga bersifat laminar sehingga hidrodinamika liquid dapat diketahui dengan baik. Hal ini menghasilkan perhitungan yang akurat dari koefisien perpindahan massa fisik pada sisi serat. Aplikasi dari model kontaktor ini telah diinvestigasi pada absorpsi gas CO₂ ke dalam air dan larutan NaOH. Hasil percobaan menunjukkan keberhasilan yang tinggi dalam menentukan berbagai sifat fisis-kimia dari gas maupun liquid. Aplikasi model kontaktor membran serat berongga mungkin dapat diperluas ke sistem gas-liquid terkatalisasi [2].

Jika ditinjau dari luas permukaan kontak, membran memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan kolom konvensional. Jika kolom absorber dengan jenis *packed column* memiliki luas permukaan 30-300 m²/m³, maka kontaktor membran dapat mencapai luas permukaan 1.600-6.600

m^2/m^3 . Bahkan kontaktor membran serat berongga (*hollow fiber membrane*) memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar, yaitu di atas $33.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Teknologi membran selama ini telah digunakan secara luas pada proses fermentasi, farmasi, pengolahan limbah cair, manufaktur semikonduktor, minuman berkarbonasi, ekstraksi protein, ekstraksi ion logam, penghilangan VOC (*volatile organic compound*) dari limbah gas dan distilasi osmotik.

Kelebihan lainnya dari penggunaan kontaktor membran serat berongga adalah [3]:

1. Fleksibel dalam proses operasional. Hal tersebut dikarenakan laju alir gas dan cairan dapat divariasikan secara bebas sehingga berbagai kendala dalam proses operasional membran seperti *flooding*, *foaming*, dan *entrainment* dapat dicegah.
2. Lebih ekonomis karena konsumsi energi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan kolom konvensional.
3. *Hold up* pelarutnya rendah, sangat efisien untuk pelarut yang mahal.
4. *Scale-up* mudah dilakukan karena modul membran fleksibel untuk disusun.
5. Mudah untuk memprediksi kinerja kontaktor membran karena wilayah *interfacial* konstan dan tidak bergantung pada kondisi operasi seperti suhu dan tekanan.

Namun kelemahan yang sering dialami oleh teknologi membran adalah terjadinya *fouling* (tertutupnya permukaan membran karena adanya polarisasi konsentrasi) yang dapat mengurangi efisiensi dan umur operasi membran sehingga biaya periodik penggantian membran juga harus diperhitungkan [4].

Membran yang digunakan sebagai kontaktor gas-cair dalam penelitian ini merupakan membran serat berongga (*hollow fiber membrane*). Membran ini secara komersial memiliki pori yang kasar antara $5\text{-}20 \mu\text{m}$ dengan ketebalan $\pm 2\text{mm}$. Prinsip dasar sistem membran sebagai kontaktor adalah difusi dari *feed* berkonsentrasi tinggi pada bagian selongsong (*shell side*) melewati pori-pori membran (*lumen side*) ke dalam larutan absorben. Gaya penggerak (*driving force*) difusi ini adalah perbedaan konsentrasi. Perpindahan massa akan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis membran, bentuk modul, sifat fluida, dan karakteristik aliran fluida dalam modul [5].

Pada penelitian ini, fasa cair yang digunakan sebagai kontaktor cair-cair pada proses pemisahan amonia adalah air asam yang berasal dari sumber mata air Ciater, Jawa Barat. Kriteria pemilihan absorben cair adalah [3]:

1. Tegangan permukaan

Pelarut dengan tegangan permukaan yang rendah memiliki kecenderungan untuk meresap ke dalam pori-pori membran sehingga membran akan terbasahi (*wetted*). Idealnya pelarut tidak dapat membasahi membran (*non-wetted*), dimana pori-pori membran masih terisi oleh gas meskipun pada tekanan pelarut yang tinggi. Hambatan perpindahan massa pada kondisi *non-wetted* lebih kecil dibandingkan dengan kondisi *wetted*, maka kondisi *non-wetted* akan memiliki laju perpindahan massa yang lebih besar daripada kondisi *wetted*.

2. Kesesuaian sifat kimia pelarut dengan material membran.

Kesesuaian sifat kimia pelarut merupakan faktor penting yang menentukan stabilitas dan umur pemakaian dari modul membran. Senyawa H₂O yang terkandung di dalam air Ciater menjadikannya absorben polar yang mampu berikatan dengan NH₃ polar.

3. Tekanan uap rendah dan stabilitas termal yang baik.

Jika pelarut bersifat *volatile* maka uapnya akan mengisi pori-pori membran dan masuk ke dalam fasa gas sehingga dapat meningkatkan hambatan perpindahan massa total. Hal itu menyebabkan pelarut dengan tekanan uap yang rendah lebih disukai. Selain itu, pelarut juga harus memiliki kestabilan secara termal dan kimiawi yang baik pada temperatur yang tinggi sehingga tidak mudah terdegradasi akibat suhu tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Menemukan larutan penyerap sumber air alami yang dapat digunakan dalam proses penyisihan amonia dari air limbah.
2. Mengetahui kondisi operasi optimal proses penyisihan amonia dari limbah melalui kontaktor membran serat berongga.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk:

1. Mengetahui besarnya potensi air Ciater sebagai larutan penyerap sumber air alami dalam proses penyisihan amonia.
2. Mengetahui besarnya efisiensi pemisahan amonia dari air limbah pada modul membran serat berongga pada berbagai variasi yang diterapkan.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan membran polipropilena berjumlah 16 serat pada modul kontaktor berukuran ½ inci sebagai kontaktor cair-cair.
2. Menggunakan air Ciater sebagai absorben amonia.
3. Limbah yang digunakan merupakan limbah sintesis berkonsentrasi 180 ppm yang dibuat dengan melarutkan amonium sulfat dengan air.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah penelitian ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori pendukung tentang amonia, kontaktor membran serat berongga, proses perpindahan massa, serta absorben air Ciater.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menampilkan prosedur penelitian, diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, perangkaian alat, dan metode yang digunakan dalam pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi analisis dan pembahasan dari hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN

Berisi tentang kesimpulan dari analisis dan pembahasan dari hasil penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Amonia

2.1.1 Sumber Amonia

Amonia adalah gas tidak berwarna dengan bau yang sangat tajam dan mengganggu. Ia ditemukan dalam jumlah sangat kecil di atmosfer, dihasilkan dari pembusukan hewan dan sayuran. Amonia dan garam amonium juga ditemukan dalam jumlah kecil dalam air hujan, sedangkan amonium klorida dan amonium sulfat ditemukan di daerah vulkanik. Ginjal manusia juga mengeluarkan NH_3 untuk menetralkan kelebihan asam. Dan garam amonium juga ditemukan didistribusikan melalui semua tanah yang subur dan dalam air laut.

Beberapa sumber limbah amonia antara lain [6]:

- Industri besi dan baja

Produksi besi dari bijih nya melibatkan reaksi reduksi kuat dalam *blast furnace*. Air pendingin mau tidak mau akan terkontaminasi dengan produk amonia dan sianida. Produksi kokas dari batubara pada pabrik tungku juga memerlukan air pendingin dalam pemisahan produk samping. Pencemar yang berasal dari limbah produk gasifikasi meliputi benzena, naftalena, antrasena, sianida, amonia, fenol dan kresol bersama-sama dengan berbagai senyawa organik yang lebih kompleks yang dikenal sebagai hidrokarbon polisiklik aromatik (PAH).

- Industri kimia organik kompleks

Berbagai industri manufaktur menggunakan bahan kimia organik kompleks. Beberapa di antaranya adalah pestisida, farmasi, cat dan pewarna, petrokimia, deterjen, plastik, kertas, dan sebagainya. Limbah industri tersebut tercemar oleh bahan baku, produk samping, bahan produk dalam bentuk larut atau partikulat, agen-agen pencuci dan pembersih, pelarut dan produk penambah nilai seperti *plasticizer*.

- Industri makanan

Air limbah yang dihasilkan dari pertanian dan operasi makanan memiliki karakteristik khas yang membedakannya dari air limbah pada umumnya; ia bersifat *biodegradable* dan tidak beracun, namun memiliki konsentrasi hasil penguraian makanan yang cukup tinggi.

2.1.2 Identifikasi Amonia (reagen Nessler)

Pemilihan metode identifikasi amonia didasarkan pada perkiraan kadar amonia dalam sampel. Bila pada sampel diperkirakan terkandung lebih dari 50,0 mg NH₃-N/L maka digunakan titrasi dengan standar asam sulfat; bila kadar amonia berkisar antara 0,06 sampai 50,0 mg NH₃-N/L, konsentrasinya dapat ditentukan dengan menggunakan metode Nessler; sedangkan penentuan kadar amonia di atas 50,0 mg NH₃-N/L dengan metode Nessler akan membutuhkan pengenceran terlebih dahulu.

Garam amonia dan amonium dapat segera terdeteksi, setiap menit, dengan penambahan larutan Nessler yang memberikan warna kuning mencolok dalam keberadaan garam amonia dan amonium yang paling sedikit sekalipun.

Reagen Nessler dinamakan sesuai dengan penemunya, Julius Neßler. Ia adalah larutan 0,09 mol/L potassium tetraiodomercurate(II) (K₂[HgI₄]) dalam 2,5 mol/L potassium hydroxide. Dalam keberadaan amonia konsentrasi tinggi, endapan coklat dapat terbentuk, sesuai dengan hukum Beer-Lambert. Intensitas warna yang terjadi berbanding lurus dengan konsentrasi NH₃ yang terdapat dalam sampel, yang kemudian ditentukan secara spektrofotometris [7]. Sensitivitasnya sebagai uji noda adalah sekitar 0,3 µg NH₃ dalam 2 µL.



Reagen Nessler disiapkan dari kalium iodida dan raksa(II) iodida. Larutan panas terkonsentrasi dari merkuri (II) klorida ditambahkan pada larutan kalium iodida terkonsentrasi, sampai endapan raksa(II) iodida berhenti melarut. Cairan ini lalu disaring, dan kalium hidroksida dan sedikit larutan raksa(II) klorida ditambahkan. Larutan yang dihasilkan kemudian didinginkan dan diencerkan sampai pada konsentrasi yang dibutuhkan. Reagen Nessler digunakan pada tabung Nessler.

Namun reagen Nessler tidak dipersiapkan secara mandiri pada penelitian ini. Sebaliknya, digunakan sebuah ammonia meter digital dengan merk dagang Palintest UK yang sudah dilengkapi dengan *tube-tube* Nessler untuk mempercepat proses identifikasi amonia secara lebih akurat.

2.1.3 Bahaya Amonia

Amonia adalah bahan yang sangat berbahaya untuk diurus. Paparan terhadap uap amonia dalam konsentrasi tinggi dapat menjadi fatal. Efek ini dikarenakan kelarutannya yang tinggi mengakibatkan korosi yang parah pada membran berlendir yang terkena kontak langsung dengan uap amonia.

Limbah amonia sering kali dikeluarkan dalam bentuk gas. Apabila limbah ini dibuang langsung ke udara ambien dan langsung dimanfaatkan oleh manusia untuk bernafas, maka hal ini akan mempengaruhi kualitas udara ambien dan mengurangi derajat kesehatan manusia. Gas amonia adalah suatu gas yang tidak berwarna, dan menimbulkan bau yang sangat kuat. Dalam udara, ammonia dapat bertahan selama kurang lebih satu minggu. Gas amonia yang terhirup melalui pernapasan dapat mengakibatkan iritasi yang kuat terhadap sistem pernapasan bagian atas, yaitu daerah hidung hingga tenggorokan. Terpapar gas amonia pada tingkatan tertentu dapat menyebabkan gangguan fungsi paru-paru dan sensitivitas indera penciuman [6].

Efek jangka pendek dari paparan amonia terhadap kesehatan manusia berdasarkan MSDS nya antara lain:

- Iritasi terhadap saluran pernapasan, hidung, tenggorokan dan mata pada 400-700 ppm
- Kematian pada 5.000 ppm
- Kontak dengan mata menimbulkan iritasi hingga kebutaan total
- Kontak dengan kulit dapat menyebabkan luka bakar (*frostbite*)

Sementara efek jangka panjang (kronis) dari menghirup uap amonia pada jangka panjang mengakibatkan iritasi pada hidung, tenggorokan dan paru-paru. Nilai ambang batas yang ditetapkan oleh ACGIH 1987-88 adalah 25 ppm (18 mg/m^3), dan STEL 35 ppm (27 mg/m^3).

U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) telah menetapkan batas paparan selama 15 menit untuk gas ammonia sebesar 35 ppm by volume di udara lingkungan dan batas eksposur 8 jam untuk 25 ppm by volume. NIOSH baru-baru ini mengurangi IDLH (*Immediately Dangerous to Life and Health*) dari 500 ke 300 ppm berdasarkan pada interpretasi yang lebih konservatif dari riset pada tahun 1943. IDLH adalah tingkat di mana seorang pekerja yang sehat dapat diekspos selama 30 menit tanpa menderita efek kesehatan *irreversible*. Organisasi-organisasi lain memiliki berbagai tingkat eksposur yang berbeda. *U.S. Navy Standards* memperbolehkan konsentrasi maksimum untuk eksposur kontinu selama 60 hari: 25 ppm/1 jam: 400 ppm. Ambang bau ammonia rata-rata adalah 5 ppm, jauh di bawah bahaya atau kerusakan. Berikut adalah salah satu baku mutu limbah cair bagi kegiatan industri terkait konsentrasi ammonia yang dikeluarkan oleh Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia:

Tabel 2. 1 Baku Mutu Limbah Cair Kegiatan Industri [8]

Parameter	Beban Pencemaran Maksimum (kg/ton)		
	Pupuk Urea	Pupuk Nitrogen Lain	Amonia
COD	3,00	3,00	0,30
TSS	1,50	3,00	0,15
Minyak dan Lemak	0,30	0,30	0,03
NH ₃ -N	0,75	1,50	0,30
TKN	1,50	2,25	-
pH	6,0-1,0	6,0-1,0	6,0-1,0
Debit air limbah maksimum	15 m ³ per ton produk	15 m ³ per ton produk	15 m ³ per ton produk

2.1.4 Ammonia Removal

Berbagai metode telah dikembangkan untuk memproses limbah ammonia (*ammonia removal*); beberapa di antaranya adalah *ammonia stripping*, *biological nitrification-denitrification*, *breakpoint chlorination* dan *biological treatment*. Adapun metode yang relatif baru untuk pemisahan ammonia adalah penggunaan kontaktor membran serat berongga.

2.1.4.1 Ammonia Stripping

Dalam aliran limbah, ion amonium berada dalam kesetimbangan dengan amonia [9]:



- Di bawah pH 7, semua amonia akan larut dalam ion amonium
- Di atas pH 12, semua amonia akan berada dalam keadaan gas terlarut
- Di antara pH 7-12, baik ion amonium maupun gas amonia berada dalam sistem yang sama

Persentase gas terlarut akan naik seiring dengan bertambahnya pH dan suhu. Dimana suhu dan pH adalah faktor yang disukai dalam penghilangan amonia. *Stripping* udara konvensional untuk pemisahan amonia mengeksploitasi volatilitas dari amonia bebas. Desain yang paling umum digunakan adalah pH 11 dengan suhu air yang rendah atau memanaskan air ke sekitar 120°F (dengan *heat recovery*) dan pH sekitar 9,5. Hal ini ditujukan untuk mengubah mayoritas NH_4^+ menjadi NH_3 terlarut yang kemudian akan siap untuk di-*stripping* pada *packed tower* konvensional.

Stripping sederhana telah dikritik karena melepaskan amonia ke atmosfer, dan telah diganggu oleh pengendapan kalsium karbonat dan menghasilkan *fouling* dari bahan *packing*. Satu kemungkinan modifikasi dari proses *stripping* melibatkan *loop* tertutup dengan udara *recycle* antara *stripper* udara dengan menara *scrubbing* asam. Dalam sistem ini, amonia tidak dikeluarkan ke atmosfer tetapi diserap dan dinetralisir oleh asam sulfat untuk membuat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Bahkan dalam proses tertutup ini, penggunaan pH tinggi masih menghasilkan masalah CaCO_3 , pengendapan, *fouling*, dan pembuangan lumpur.

2.1.4.2 Klorinasi

Klorinasi adalah proses penambahan klorin ke dalam air sebagai metode pemurnian air untuk membuatnya layak dikonsumsi manusia sebagai air minum. Air yang telah diklorinasi efektif dalam mencegah penyebaran penyakit yang menular melalui media air.

Klorinasi dari persediaan air minum publik pada awalnya menemui penolakan karena orang-orang khawatir akan efek kesehatan dari praktik ini. Walaupun demikian, penggunaan klorin telah mengurangi penyebaran penyakit yang ditularkan melalui air karena ia efektif melawan hampir semua bakteri dan virus, serta amuba [10].

Klorinasi menghancurkan bakteri penyebab penyakit, parasit dan organisme mikro lainnya. Klorinasi juga menghilangkan besi terlarut, mangan dan asam sulfat dari air. Klorinasi dapat digunakan pula untuk membersihkan air di kolam renang dan sebagai tahap desinfeksi dalam pengolahan limbah.

Jika klorin ditambahkan ke dalam air, ia bereaksi dan membentuk suatu campuran kesetimbangan klorin, *hypochlorous acid* dan asam klorida yang bergantung pada pH.



Kemudian *hypochlorous acid* terdisosiasi sebagian menjadi hidrogen dan ion hipoklorit:



Dalam larutan asam, senyawa utama adalah Cl_2 dan HOCl , sedangkan dalam larutan basa hanya terdapat ClO^- . Konsentrasi ClO_2^- , ClO_3^- , ClO_4^- yang sangat kecil juga ditemukan.

Desinfeksi dengan klorinasi dapat menjadi masalah dalam beberapa kondisi. Klorin dapat bereaksi dengan senyawa organik alami yang ditemukan dalam persediaan air dan menghasilkan senyawa berbahaya, yang dikenal sebagai produk samping desinfeksi atau *disinfection byproducts* (DBPs). DBPs yang paling umum adalah trihalomethanes (THMs) dan asam haloacetic (HAAs). Karena potensi karsinogenik senyawa ini, peraturan federal di Amerika Serikat meminta pengawasan rutin dari konsentrasi senyawa tersebut dalam sistem distribusi air kota. Namun Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menyatakan

bahwa: "Risiko kesehatan dari DBPs sangat kecil dibandingkan dengan desinfeksi yang tidak memadai."

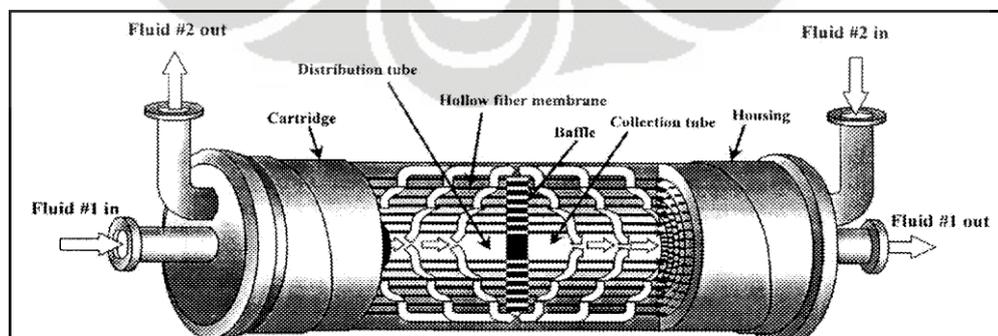
Terdapat kekhawatiran lain mengenai klorin, termasuk sifat volatilnya yang menyebabkan ia terlalu cepat menghilang dari sistem air, dan masalah estetika seperti rasa dan bau.

2.2 Kontaktor Membran Serat Berongga

2.2.1 Pendahuluan

Kontaktor membran adalah teknologi pemisahan dengan menggunakan membran sebagai alat kontak. Ada dua jenis kontaktor membran, yaitu kontaktor membran gas-cair dan kontaktor membran cair-cair. Kontaktor membran yang digunakan pada pemisahan amonia adalah kontaktor membran cair-cair. Pada umumnya, membran yang digunakan dalam kontaktor membran cair-cair adalah membran berpori (*microporous membrane*), dimana membran berfungsi sebagai pembatas antara dua jenis liquid. Jika membran hidrofobik digunakan, maka cairan tidak akan membasahi pori sehingga pori akan diisi oleh gas (*non wetted membrane*). Sebaliknya, jika digunakan membran hidrofilik maka cairan akan membasahi pori sehingga pori akan diisi oleh cairan (*wetted membrane*) [11].

Driving force untuk pemisahan amonia cair-cair melalui kontaktor membran adalah perbedaan konsentrasi amonia antara *feed* dan cairan absorben. Untuk pemisahan yang efisien amonia harus berada dalam bentuk volatilnya. Hal ini dilakukan dengan cara mengoperasikan keseluruhan sistem dalam kondisi basa. Skema sebuah kontaktor membran serat berongga beserta cara kerjanya dapat dilihat pada gambar berikut ini:



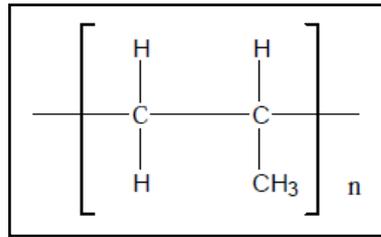
Gambar 2. 1 Kontaktor membran serat berongga [4]

Membran memiliki ketebalan yang berbeda-beda, ada yang tebal dan ada juga yang tipis, serta ada yang homogen dan heterogen. Ditinjau dari bahannya, membran terdiri dari bahan alami dan bahan sintetis. Bahan alami adalah bahan yang berasal dari alam seperti *pulp* dan kapas, sedangkan bahan sintetis dibuat dari bahan kimia seperti polimer. Membran berfungsi memisahkan material berdasarkan ukuran dan bentuk molekul, menahan komponen dari umpan yang mempunyai ukuran lebih besar pada pori-pori membran dan melewatkan komponen yang mempunyai ukuran yang lebih kecil. Larutan yang mengandung komponen yang tertahan disebut *konsentrat* dan larutan yang mengalir disebut *permeat*. Filtrasi dengan menggunakan membran selain berfungsi sebagai sarana pemisahan juga berfungsi sebagai sarana pemekatan dan pemurnian dari suatu larutan yang dilewatkan pada membran tersebut.

Teknik pemisahan dengan membran umumnya didasarkan pada ukuran partikel dan berat molekul dengan gaya dorong berupa beda tekan, medan listrik dan beda konsentrasi. Proses pemisahan dengan membran yang memakai gaya dorong berupa beda tekan umumnya dikelompokkan menjadi empat jenis, diantaranya *mikromembran*, *ultramembran*, *nanomembran* dan *reverse osmosis* [12].

2.2.2 Membran Polipropilen

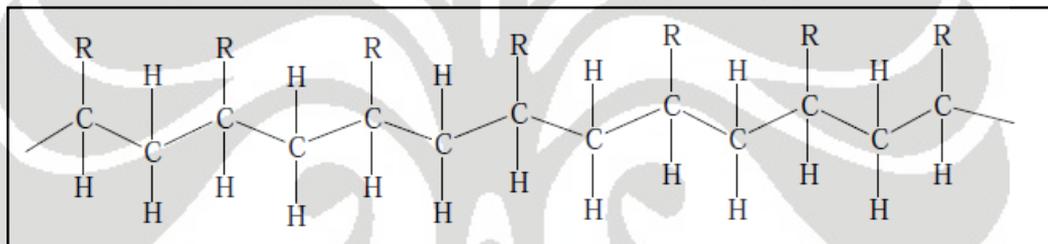
Membran yang biasanya digunakan untuk kontaktor membran adalah polipropilena hidrofobik atau PTFE. Polimer memiliki kemampuan mengizinkan uap atau gas melewati membran, dan benar-benar menolak fase cair. Ia juga memiliki ketahanan mekanik yang baik. Komponen volatil ditransportasikan melalui membran dan dilucuti baik oleh gas *carrier* ataupun diabsorpsi secara langsung dalam cairan yang sesuai (asam) yang mengalir di sepanjang permukaan membran. Membran polipropilena memiliki struktur kimia seperti gambar berikut:



Gambar 2. 2 Struktur kimia polipropilena [11]

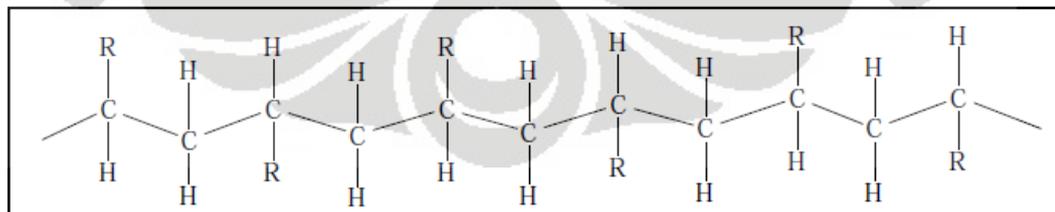
Gugus metil pada rantai atom polipropilena dapat berada pada susunan rantai atom C yang berbeda-beda. Oleh karena itu, posisi gugus metil pada struktur polimer akan mempengaruhi sifat dari polipropilena itu sendiri. Terdapat tiga posisi yang dikenal akan membedakan sifat dari polipropilena, yakni [11]:

- Isotaktik, dimana seluruh gugus metil berada pada sisi yang sama sepanjang rantai utama, dengan rumus bangun seperti berikut:



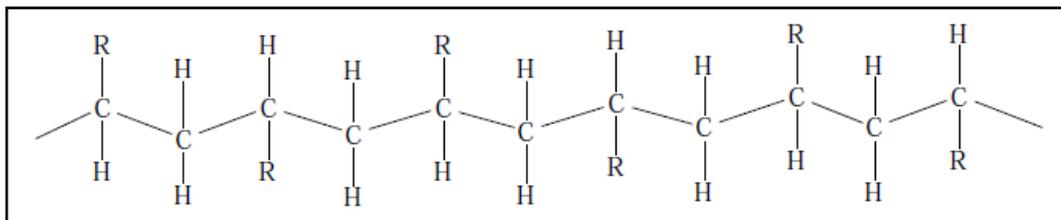
Gambar 2. 3 Struktur kimia polipropilena isotaktik

- Atatik, dimana gugus metil menempati rantai utama secara acak. Polipropilena ataktik merupakan polimer yang lemah karena polimer yang terbentuk merupakan bentuk amorf dengan susunan rantai yang tidak beraturan dengan rumus bangun seperti gambar berikut ini:



Gambar 2. 4 Struktur kimia polipropilena ataktik

- Syndiotaktik, dimana posisi dari gugus metil tersusun secara berselang-seling di sepanjang rantai utama, dengan rumus bangun seperti Gambar 2.5 berikut ini:



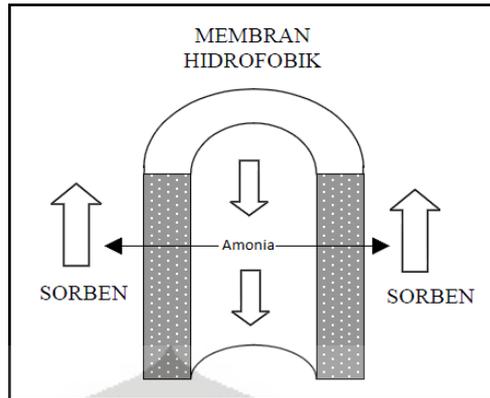
Gambar 2. 5 Struktur kimia polipropilena syndiotaktik

Posisi dari gugus metil sangat mempengaruhi sifat-sifat dari polipropilena. Karena kekristalan dari suatu polimer tergantung pada strukturnya, maka polipropilena bentuk isotaktik bersifat lebih kristalin jika dibandingkan dengan ataktik maupun syndiotaktik. Dengan kata lain, bentuk ataktik tidak beraturan (*amorf*), sedangkan bentuk isotaktik lebih kristalin. Bentuk kristalin tidak hanya berpengaruh pada sifat mekanik, tetapi juga permeabilitasnya. Polipropilena isotaktik memiliki berbagai sifat, antara lain:

1. Memiliki densitas yang lebih kecil ($0,9 \text{ gr/cm}^3$)
2. Mempunyai *softening point* yang lebih tinggi, sehingga dapat digunakan pada temperatur yang tinggi.
3. Polipropilena resisten terhadap proses *cracking* oleh lingkungan, kecuali jika terdapat kandungan sulfur dan asam kromat.
4. Memiliki tingkat kekuatan yang tinggi.
5. Mudah teroksidasi dikarenakan adanya karbon tersier pada gugus metil samping polipropilena.

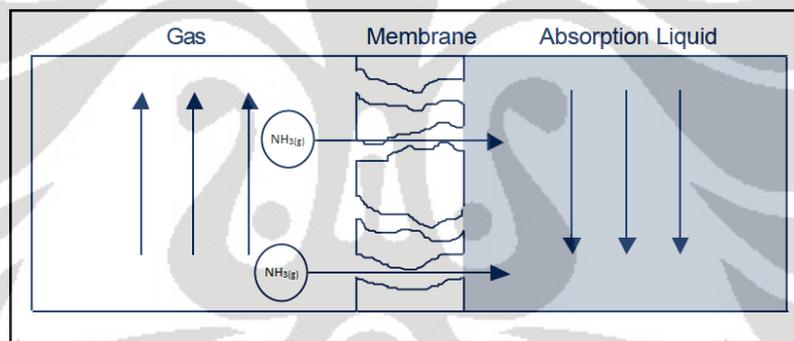
2.2.3 Dasar Teori Perpindahan Massa Pada Membran

Untuk penghilangan gas terlarut dari aliran air, kontaktor membran dioperasikan dengan aliran fluida di salah satu sisi membran hidrofobik dan *sweep gas* dan/atau vakum yang diterapkan pada sisi lain membran. Karena membran mikroporous bersifat hidrofobik, membran tidak akan memungkinkan cairan melewati pori ke sisi gas pada membran. Pada dasarnya membran bertindak sebagai dukungan antara fase gas dan cair yang memungkinkan mereka untuk bertemu di pori-pori. Dengan menyesuaikan tekanan parsial dari gas dalam kontakannya dengan air, gas dapat secara selektif dihilangkan atau dilarutkan ke dalam air. Prinsip kerja membran kontaktor dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Membran Kontaktor [13]

Sedangkan dasar perpindahan massa pada kontaktor membran adalah fenomena desorpsi dan absorpsi. Pada Gambar 2.7 dapat dilihat proses desorpsi dari gas NH_3 ke dalam membran dan proses absorpsi NH_3 oleh larutan absorben. Berikut adalah penjelasan lebih terperinci mengenai masing-masing fenomena tersebut:



Gambar 2. 7 Peristiwa Absorpsi dan Desorpsi Amonia pada Membran [14]

2.2.3.1 Desorpsi

Desorpsi adalah fenomena dimana suatu senyawa dilepaskan dari atau melalui suatu permukaan. Proses ini adalah kebalikan dari peristiwa penyerapan (yaitu adsorpsi dan absorpsi). Penyerapan ini terjadi dalam sistem yang berada dalam keadaan setimbang antara fasa *bulk* (cairan, yaitu larutan gas atau cair) dan permukaan yang mengadsorpsi (padat atau lapisan batas yang memisahkan dua cairan). Ketika konsentrasi (atau tekanan) senyawa dalam fase *bulk* diturunkan, beberapa senyawa yang terserap berubah menjadi keadaan *bulk*.

Dalam kimia, khususnya kromatografi, desorpsi adalah kemampuan dari senyawa kimia untuk bergerak dengan fase gerak. Semakin banyak bahan kimia mendesorpsi, semakin kecil kemungkinan ia untuk mengadsorpsi, sehingga bukannya menempel pada fasa diam, bahan kimia tersebut bergerak naik dengan pelarut di depan.

Dalam proses pemisahan kimia, *stripping* juga dapat disebut sebagai desorpsi karena salah satu komponen dari aliran liquid bergerak melalui transfer massa ke dalam fasa uap melalui *interface* cair-uap. Pada penelitian ini, fenomena desorpsi terjadi pada gas NH₃ ke dalam modul membran.

Senyawa kimia yang teradsorpsi akan tetap tinggal pada substrat hampir tanpa batas, asalkan suhu tetap rendah. Namun, karena suhu naik, begitu juga kemungkinan terjadinya desorpsi. Persamaan umum untuk kecepatan desorpsi adalah:

$$R = rN^x \quad (2.5)$$

dimana r adalah laju tetap untuk desorpsi, N adalah konsentrasi bahan teradsorpsi, dan x adalah orde reaksi desorpsi [15].

2.2.3.2 Absorpsi

Secara sederhana, absorpsi gas merupakan suatu proses untuk menyerap gas yang dikontakkan dengan cairan, dimana cairan ini disebut dengan cairan penyerap (absorben). Selama proses absorpsi, molekul dari zat yang diabsorpsikan masuk ke antara molekul bahan penyerap dan menghasilkan sistem yang homogen. Hal ini berarti kepekatan dari molekul yang diserap tersebar merata sepanjang bahan absorpsi tersebut. Absorpsi biasanya dilakukan dengan tujuan tertentu, yaitu [16]:

1. Memperoleh zat yang bernilai tinggi dari suatu campuran gas dan atau uap.
2. Mengeluarkan campuran tambahan yang tidak diinginkan dari produk yang berbentuk gas.
3. Pembentukan persenyawaan kimia dari suatu bahan absorpsi dan suatu komponen tertentu dari campuran gas.

Kecepatan absorpsi dalam suatu penyerapan gas oleh cairan dipengaruhi oleh [16]:

1. Afinitas atau gaya tarik yang dilakukan oleh suatu zat cair tertentu.
2. Suhu, dimana sifat dapat larut gas dalam cairan menurun pada suhu yang lebih tinggi.
3. Tekanan gas, dimana pada tekanan gas yang lebih tinggi akan larut lebih banyak gas dalam tiap jumlah zat cair.
4. Permukaan kontak antara zat cair dan gas, untuk mendorong absorpsi gas dalam zat cair maka permukaan kontak antara gas dan zat cair harus dibuat sebesar mungkin. Makin besar permukaan kontak, makin cepat absorpsi terjadi.
5. Selisih kepekatan antara campuran gas dan zat cair penyerap. Makin besar selisih kepekatan ini, makin cepat pula terjadi penyerapan oleh cairan absorben.

Jika absorpsi dilakukan pada konsentrasi gas terlarut yang bervariasi dalam campuran total gas, maka akan menghasilkan suatu kurva kesetimbangan, sehingga apabila konsentrasi gas terlarut melebihi konsentrasi kesetimbangan gas terlarut-cairan, maka akan terjadi perpindahan molekul gas ke dalam cairan. Perpindahan ini menyebabkan konsentrasi gas terlarut dalam cairan akan naik sedangkan konsentrasinya dalam total gas masuk akan turun sampai mencapai titik kesetimbangan. *Driving force* perpindahan ini adalah konsentrasi gas terlarut yang melebihi konsentrasi kesetimbangannya dalam cairan pada setiap waktu.

Mekanisme absorpsi adalah mengontakkan gas dengan cairan yang mampu melarutkan gas tersebut dalam jangka waktu yang cukup lama pada suhu tetap. Pada kondisi di atas terjadi kesetimbangan dimana tidak ada lagi pelarutan. [17]. Pada penelitian ini, terjadi absorpsi $\text{NH}_{3(g)}$ oleh larutan asam yang berasal dari sumber air panas Ciater, Subang.

Kondisi yang paling sesuai untuk transfer massa NH_3 adalah pH basa, namun berdasarkan penelitian yang ada, pH yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan menempelnya ion-ion OH^- pada permukaan serat membran (*fouling*). Hal ini akan menyebabkan terhambatnya transfer massa NH_3 . Oleh

karena itu dilakukan variasi pH pada penelitian ini untuk mengetahui kondisi pH terbaik untuk transfer massa yang optimal.

2.2.4 State of The Art

Berikut adalah tabel *state of the art* dari penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya mengenai proses penyisihan amonia melalui modul membran kontaktor dengan menggunakan berbagai jenis absorben.

Tabel 2. 2 *State of the Art* Mengenai Pemisahan Amonia dari Air

Peneliti	Judul Penelitian	Penelitian
B. Norddahl, V.G. Horn, M. Larsson, J.H. du Preez, K. Christensen [18]	<i>A membrane contactor for ammonia stripping, pilot scale experience and modeling</i>	Menggunakan kontaktor membran polipropilena dengan <i>driving force</i> perbedaan tekanan parsial antara <i>feed</i> amonia dan cairan penyerap untuk memisahkan amonia dari air. Variabel bebasnya adalah pH dan temperatur. Cairan penyerap yang digunakan antara lain: asam sulfat dan asam karbonat.
Zongli Xie, Tuan Dong, Manh Hoang, Cuong Nguyen, Brian Bolto [19]	<i>Ammonia removal by sweep gas membrane distillation</i>	Menggunakan membran <i>flat sheet</i> PTFE berongga dengan <i>sweep gas</i> berupa <i>compressed air</i> dengan variabel bebas berupa laju alir serta temperatur <i>sweep gas</i> dan <i>feed</i> amonia.
Amish Mandowara, Prashant K. Bhattacharya [20]	<i>Membrane contactor as degasser operated under vacuum for ammonia removal from water: A numerical simulation of mass transfer under laminar flow conditions</i>	Dengan mengaplikasikan vakum pada kontaktor membran serat berongga, terjadi perpindahan massa amonia secara difusi dari sisi <i>lumen</i> ke <i>shell</i> .

Tabel 2.2 *State of the Art* Mengenai Pemisahan Amonia dari Air (Sambungan)

M.S. EL-Bourawi, M.Khayet, R. Ma, Z. Ding, Z. Li, X. Zhang [21]	<i>Application of vacuum membrane distillation for ammonia removal</i>	Menggunakan membran <i>flat sheet</i> PTFE berongga dengan mengaplikasikan distilasi membran vakum dan variabel bebas laju alir, pH, dan temperatur <i>feed</i> , serta <i>downstream pressure</i> .
SHAO Jiahui, FANG Xuliang, HE Yiliang, JIN Qiang [22]	<i>Emergency membrane contactor based absorption system for ammonia leaks in water treatment plants</i>	Menggunakan kontaktor membran serat berongga polipropilena dan absorben asam sulfat dengan variasi kecepatan dan konsentrasi absorben serta konsentrasi <i>feed gas</i> amonia.

Dalam penelitian ini, digunakan kontaktor membran serat berongga dengan larutan absorben berupa sumber air alami yang didapatkan dari Ciater, Subang, Jawa Barat. Variabel bebasnya adalah pH absorben dan laju alir limbah amonia. Limbah amonia yang digunakan merupakan limbah sintetis yang dibuat dari melarutkan amonium sulfat padat dalam air.

2.3 Perpindahan Massa Amonia terlarut dalam Air

Perpindahan amonia terlarut dari fasa cair-cair dikontrol oleh koefisien perpindahan massa dan gaya penggerak perpindahan massa. Untuk operasi tunak, fluks amonia yang melewati membran dapat ditulis sebagai Persamaan (2.6).

$$N = k(C^* - C_L) \quad (2.6)$$

Dimana C^* adalah konsentrasi gas pada serat dan k adalah koefisien perpindahan massa keseluruhan yang berhubungan dengan tahanan (resistansi) perpindahan individual.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{Hk_m} = \frac{1}{k_L} \quad (2.7)$$

Kontribusi relatif resistansi lapisan gas ($\frac{1}{Hk_G}$) dan resistansi membran ($\frac{1}{Hk_m}$) pada Persamaan (2.7) bernilai sangat kecil sehingga persamaan tersebut dapat ditulis kembali sebagai persamaan (2.8):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_L} \quad (2.8)$$

Koefisien perpindahan massa umumnya dianalisis menggunakan korelasi perpindahan massa. Untuk aliran di luar yang melewati kontakor membran, korelasi perpindahan massa yang digunakan adalah Persamaan (2.9):

$$Sh = aRe^b Sc^{1/3} \quad (2.9)$$

Dimana Sh , Re dan Sc merupakan bilangan Sherwood, Reynold dan Schmidt secara berturut-turut. Sedangkan a dan b adalah konstanta empiris. Persamaan untuk ketiga bilangan tak berdimensi di atas dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$Sh = \frac{k_L d_e}{D} \quad (2.10)$$

$$Re = \frac{V d_e}{\mu} \quad (2.11)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.12)$$

dengan k_L adalah koefisien perpindahan massa fasa cair, d_e diameter ekivalen, D difusivitas amonia pada fasa cair, V kecepatan cairan dan μ viskositas kinematik fasa cair. d_e dapat dihitung dengan persamaan:

$$d_e = \frac{d_p^2 - N d_f^2}{d_p + N d_f} \quad (2.13)$$

2.4 Air Ciater sebagai Larutan Absorben

Desa Ciater, Kab. Subang, Jawa Barat, berlokasi kurang lebih 32 km di utara Bandung, merupakan daerah wisata yang menjual kesejukan udara dan air panas alaminya. Berada di bawah kaki Gunung Tangkuban Perahu dan di tengah kehijauan perkebunan teh, Ciater menawarkan air panas alami dengan luas areal sebesar 30-40 Ha. Menurut klasifikasi balneologi, air panas Ciater masuk dalam kategori "*Calcium Magnesium Chloride Sulfate Thermomineral Hypertherma*"

dengan kandungan aluminium yang cukup tinggi (38,5%) serta pH yang sangat asam (2,45).

Sementara itu, air panas yang berasal dari mata air ini memiliki temperatur sekitar 43-46 derajat Celsius. Sedangkan air yang terletak pada kolam pemandian, jangkauan temperaturnya mencapai 37-42 derajat Celsius [23]. Air alami inilah yang akan digunakan dalam penelitian ini sebagai larutan absorben pada kontaktor membran. Beberapa pertimbangan yang mendukung pemilihan absorben ini adalah kandungan sulfat yang terkandung di dalam air Ciater mampu menggantikan fungsi asam sulfat yang kerap kali digunakan sebagai larutan penyerap pada penelitian-penelitian sebelumnya. Sumber air alami memiliki banyak keunggulan, selain ramah lingkungan, sumber tak terbatas, ia juga lebih murah.

Kemampuan dari air Ciater sebagai absorben amonia dapat dibandingkan dengan asam sulfat pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Berikut ini adalah tabel analisis kimia dari air Ciater yang dilakukan di Laboratorium Analisis dan Kalibrasi Balai Besar Industri Argo di Bogor:

Tabel 2. 3 Komposisi Ion Air Ciater [24]

Parameter	Kandungan (mg/liter)	Metode Uji/Teknik
Kesadahan Ca	30,8	SNI.06-6989-12-2004
Kesadahan Mg	28,9	SNI.06-6989-12-2004
Nitrat (NO ₃ ⁻)	2,46	SNI.01-3554-2006, butir 2.8
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	291	SNI.06-6989-20-2004
Klorida (Cl ⁻)	9,03	SNI.06-6989-19-2004
Fluorida (F ⁻)	2,83	SNI.06-6989-29-2005
Sianida (CN ⁻)	0,002	SNI.01-3554-2006
Hidrogen sulfida	<0,002	APHA.4500D-2005
Fosfat	0,07	APHA 4500 PO ₄ 2005
Besi (Fe)	12,9	SNI.06-6989-4-2004
Mangan (Mn)	1,71	SNI.06-6989-5-2004
Natrium (Na)	30,54	AAS

Tabel 2. 4 Komposisi Ion Air Ciater (Sambungan)

Kalium (K)	26,35	AAS
Magnesium (Mg)	15,28	AAS
Kalsium (Ca)	76,29	AAS
Kadmium (Cd)	0,004	APHA.3120B-2005
Kromium (Cr)	0,03	APHA.3120B
Tembaga (Cu)	< 0,002	APHA.3120B
Nikel (Ni)	< 0,002	APHA.3120B

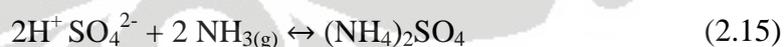
Dari hasil analisa laboratorium, ternyata air Ciater masih mengandung sekitar 50 ppm amonia. Hal ini berarti terdapat kehidupan di dalam air Ciater, karena makhluk hidup mengeluarkan sekresi berupa amonia. Mengingat suhu air Ciater yang juga mendukung untuk bakteri termofilik yang mampu hidup hingga suhu 50°C.

2.5 Produk Samping Proses Penyisihan Amonia

Berdasarkan Tabel 2.3, terdapat beberapa kandungan anion dalam air Ciater, dengan kandungan terbanyak berupa ion Cl^- dan SO_4^{2-} . Reaksi antara anion tersebut dengan gas amonia terdesorpsi dalam membran akan menghasilkan produk samping dengan reaksi sebagai berikut:



dan



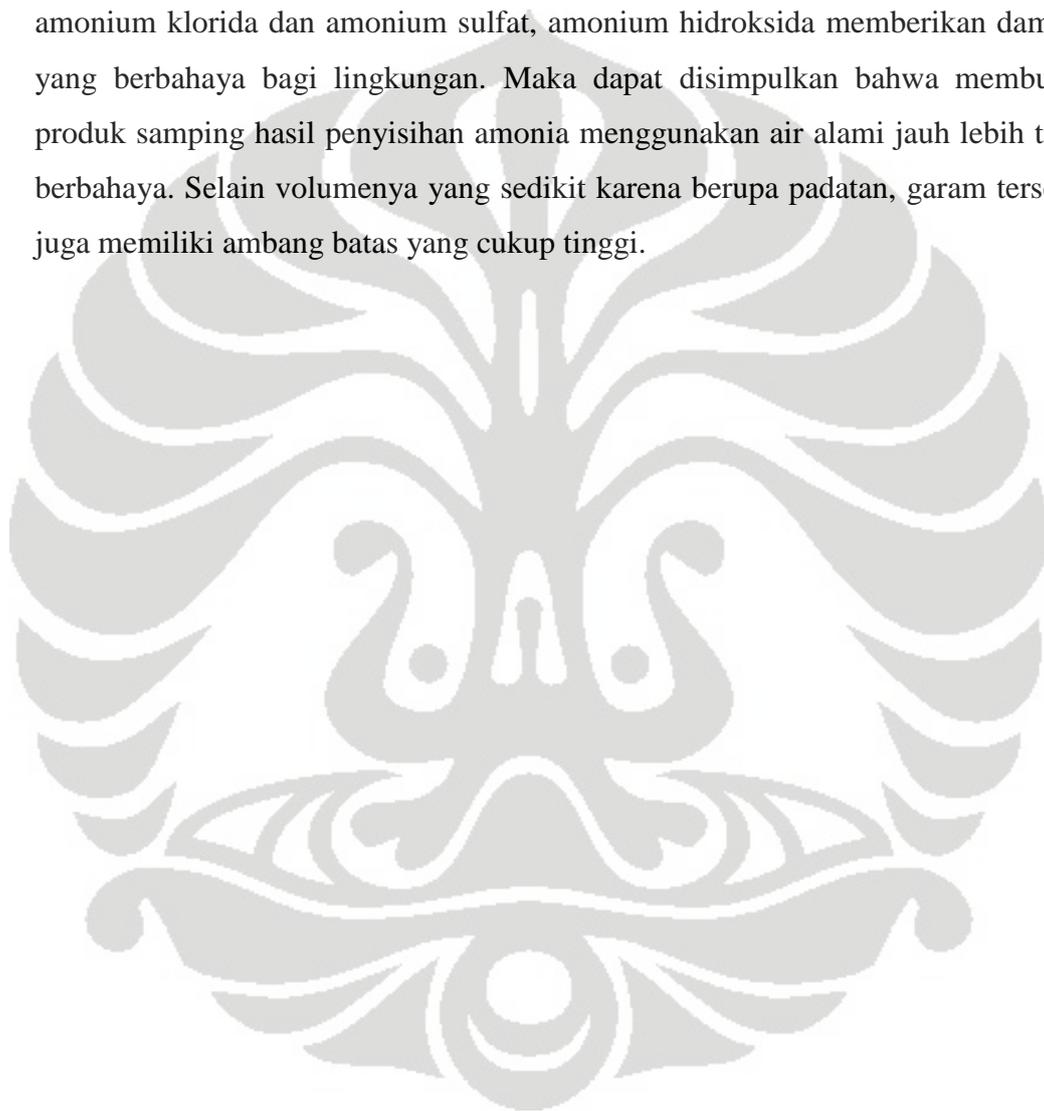
Berdasarkan literatur yang didapatkan, amonium klorida NH_4Cl dan amonium sulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ merupakan suatu garam anorganik yang berwujud padatan [25]. Karena karakteristiknya yang berupa padatan, maka pembuangan produk samping penyisihan amonia menggunakan sumber air alami akan jauh lebih mudah.

Selain alasan di atas, garam amonium yang telah berikatan dengan anion lain jauh lebih tidak berbahaya bagi lingkungan dan makhluk hidup jika dibandingkan dengan amonium dalam bentuk kesetimbangan ion dalam air, yakni amonium hidroksida (NH_4OH). Berdasarkan MSDS (*Material Safety Data Sheet*)

milik perusahaan Mallinckrodt Baker, Inc., ambang batas dari senyawa tersebut di atas adalah [26]:

- Amonium Klorida : 1650 mg/kg
- Amonium Sulfat : 2840 mg/kg
- Amonium Hidroksida : 350 mg/kg

Dari data di atas jelas terlihat bahwa dalam dosis yang jauh lebih kecil daripada amonium klorida dan amonium sulfat, amonium hidroksida memberikan dampak yang berbahaya bagi lingkungan. Maka dapat disimpulkan bahwa membuang produk samping hasil penyisihan amonia menggunakan air alami jauh lebih tidak berbahaya. Selain volumenya yang sedikit karena berupa padatan, garam tersebut juga memiliki ambang batas yang cukup tinggi.



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Pemisahan amonia terlarut dalam limbah dilakukan dengan tujuan menghilangkan kandungan amonia yang dapat membahayakan biota perairan maupun manusia yang menggunakan air di tempat pembuangan limbah tersebut. Sementara teknologi membran yang dipilih bertujuan untuk mengatasi masalah-masalah yang terdapat pada proses konvensional seperti endapan, *fouling* dan *flooding*.

Pada penelitian ini, proses perpindahan massa amonia terlarut dalam air dilakukan dengan menggunakan kontaktor membran serat berongga yang berfungsi sebagai media kontak antara fasa cair-cair. Penelitian akan dilakukan di laboratorium Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini dibagi menjadi lima bagian, yaitu studi literatur, perangkaian alat, preparasi larutan, uji perpindahan massa dan hidrodinamika, serta pengolahan data dan analisis hasil.

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari teori-teori dan referensi baik dari buku, jurnal dan internet mengenai bahaya dan sifat-sifat amonia, proses separasi amonia, kontaktor membran serat berongga, dasar teori perpindahan massa pada membran dan produk samping amonium sulfat yang dapat terbentuk dari hasil pemisahan amonia menggunakan absorben asam. Selain itu, dicari pula literatur mengenai teori dan persamaan-persamaan yang akan digunakan untuk uji perpindahan massa dan hidrodinamika di dalam kontaktor.

3.2.2 Perangkaian dan Preparasi Alat

Langkah selanjutnya adalah menyiapkan peralatan-peralatan seperti wadah limbah amonia, wadah absorben, larutan penyerap (air Ciater), pompa peristaltik dan pompa aquarium (*submersible pump*), *liquid flow meter*, *ammonia meter* dan merangkai peralatan tersebut menjadi suatu sistem tertutup yang melewati kontaktor membran.

Kontaktor membran serat berongga sendiri dibuat dengan cara merangkai membran polipropilena, selongsong acrylic, T drat, shock drat, *double nipple* dan pipa pralon dalam menjadi suatu kesatuan dengan menggunakan perekat resin Epoxy. Ukuran modul yang digunakan adalah ½” dan jumlah membran 16 berdiameter 2 mm. Tidak dilakukan kalibrasi secara manual pada peralatan digital seperti *ammonia meter* karena terdapat kalibrasi otomatis yang telah terbukti cukup akurat.

3.2.3 Preparasi Larutan Absorben

Sebelum menggunakan air Ciater, perlu dilakukan karakterisasi terlebih dahulu untuk mengetahui kandungan ion apa saja yang terkandung di dalamnya dan juga berapa tegangan permukaan dari fluida tersebut. Tegangan permukaan diperoleh dengan menggunakan metode pipa kapiler, dimana perhitungan lebih rinci dapat dilihat pada Lampiran 1.

Setelah dikarakterisasi, diketahui bahwa air Ciater mengandung amonia dalam jumlah kecil, yakni sekitar 50 ppm. Maka melalui pemanasan terlebih dahulu, kandungan amonia tersebut diharapkan menguap sehingga air Ciater dapat digunakan secara lebih efektif sebagai absorben. Air Ciater yang telah didinginkan kemudian ditambahkan dengan asam sulfat pekat (96%) hingga mencapai pH tertentu sesuai dengan variasi yang diinginkan. Sumber air Ciater akan diambil dalam jumlah yang cukup besar dan disimpan dalam wadah tertutup untuk memastikan tidak terjadi penguapan maupun kontaminasi. Diperkirakan kebutuhan absorben untuk satu kali *running* percobaan adalah sekitar 3 liter.

Kontaminan logam pada sumber air Ciater berjumlah sangat kecil sehingga dapat diasumsikan tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada proses perpindahan massa maupun reaksi kesetimbangan amonia pada modul membran

serat berongga. Komposisi maupun karakter dari air Ciater juga tidak akan berubah secara signifikan karena disimpan dalam wadah tertutup rapat. Konsentrasi ion logam yang sangat kecil tersebut tidak akan mampu menyebabkan pengendapan pada dasar wadah karena tidak memenuhi syarat pengendapan, yaitu konsentrasi harus melebihi kelarutan.

3.2.4 Preparasi Limbah Amonia

Limbah amonia yang digunakan adalah limbah sintetis yang dibuat dari melarutkan 4,0 gram Amonium Sulfat_(s) pada 5 L Aquadest. Berat dari amonium sulfat yang digunakan telah dihitung terlebih dahulu oleh penulis sedemikian rupa sehingga konsentrasi amonia yang diperoleh kurang lebih sebesar 180-200 ppm (merupakan konsentrasi maksimum yang dapat terukur oleh *ammonia meter*).

Karena adanya keterbatasan alat *ammonia meter* yang hanya mampu mengukur konsentrasi amonia hingga konsentrasi 50 ppm, maka limbah sintesis tersebut masih perlu diencerkan sebanyak 5 kali untuk mencapai jangkauan *spec* konsentrasi alat. Pengenceran dilakukan dengan mengambil 1 mL sampel larutan dan melarutkannya dalam 4 mL Aquadest.

Untuk menjaga kestabilan perpindahan massa dan absorpsi dari limbah amonia ke absorben, pH basa dari larutan amonia perlu dijaga konstan pada pH 11 dengan cara menambahkan NaOH.

3.2.5 Uji Perpindahan Massa dan Hidrodinamika

Pada dasarnya, aliran limbah dengan amonia terlarut di dalamnya akan dilewatkan melalui bagian selongsong (*shell side*), sedangkan aliran absorben asam melalui bagian dalam serat (*lumen side*) dari kontaktor yang digunakan. Laju alir air dari tangki yang menuju dan keluar dari kontaktor akan diukur menggunakan *flowmeter*. Peristiwa perpindahan massa akan terjadi ketika limbah amonia memasuki kontaktor membran. Indikator telah terjadinya perpindahan massa adalah perubahan konsentrasi amonia terlarut pada reservoir. Hal ini dapat diukur dengan menggunakan *ammonia meter* Palintest UK. Uji perpindahan massa dilakukan dengan membuat variasi pH absorben dan laju alir limbah amonia. Data perubahan konsentrasi amonia pada berbagai variasi pH digunakan

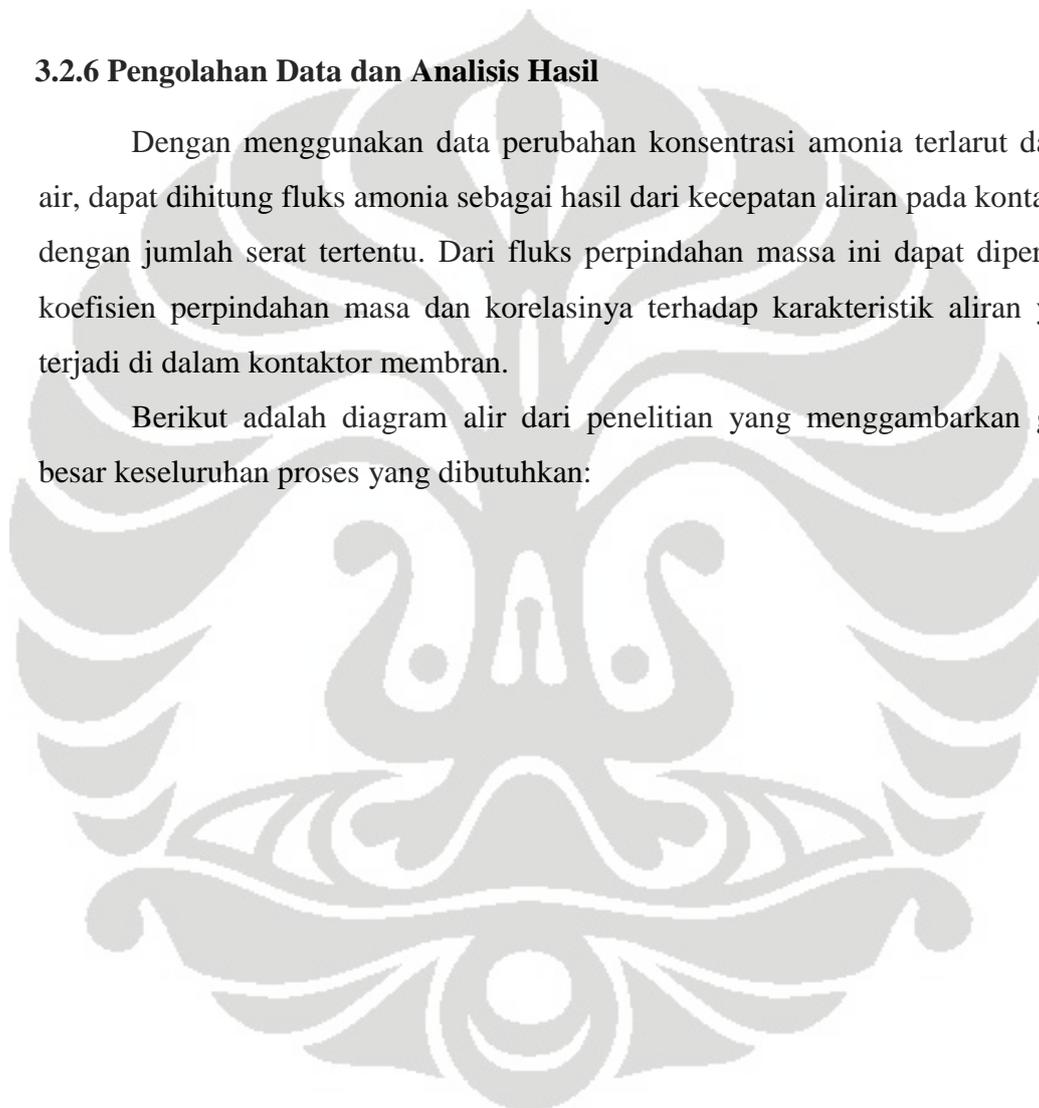
untuk mengetahui koefisien perpindahan massa. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit selama sirkulasi 2 jam.

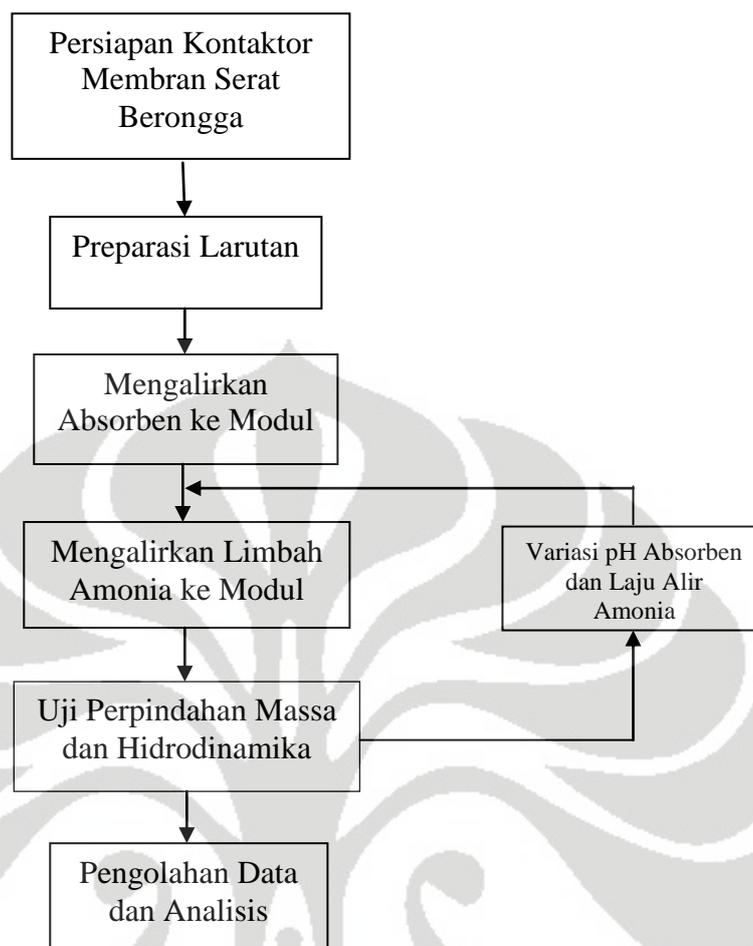
Pertimbangan pengambilan data dengan selisih 30 menit adalah proses desorpsi dan absorpsi yang membutuhkan waktu lama. Sehingga dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, 30 menit adalah waktu yang paling ideal untuk mengambil data.

3.2.6 Pengolahan Data dan Analisis Hasil

Dengan menggunakan data perubahan konsentrasi amonia terlarut dalam air, dapat dihitung fluks amonia sebagai hasil dari kecepatan aliran pada kontaktor dengan jumlah serat tertentu. Dari fluks perpindahan massa ini dapat diperoleh koefisien perpindahan masa dan korelasinya terhadap karakteristik aliran yang terjadi di dalam kontaktor membran.

Berikut adalah diagram alir dari penelitian yang menggambarkan garis besar keseluruhan proses yang dibutuhkan:





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

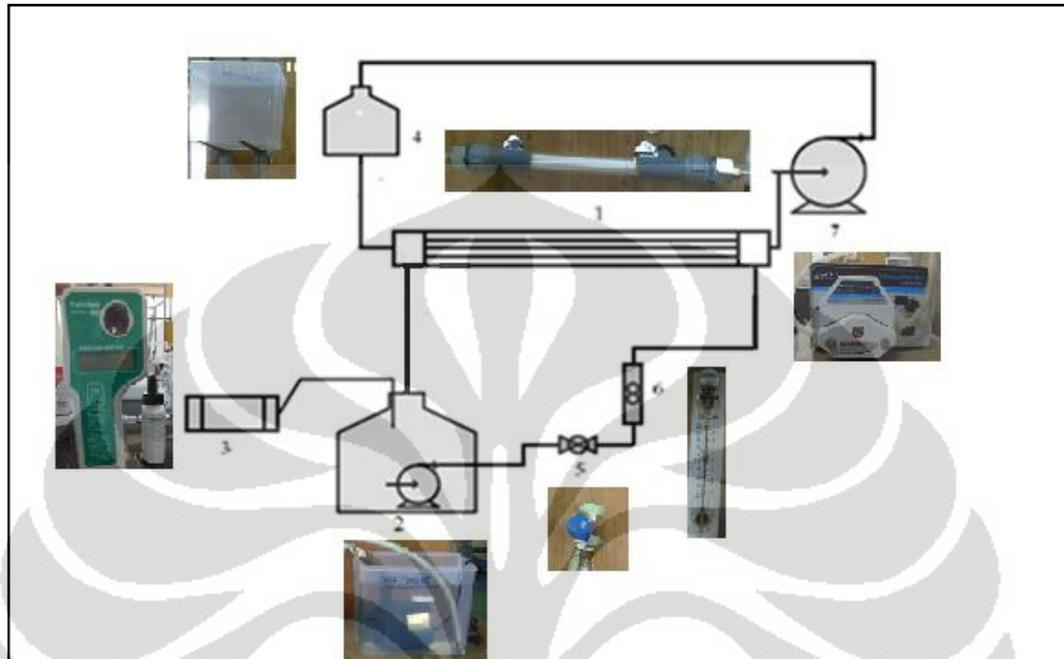
3.3 Peralatan dan Bahan yang Digunakan

1. Kontaktor membran serat berongga sebagai media kontak antara zat terlarut dengan cairan penyerap
 - Material : Polypropilene
 - Ukuran modul :
 - Diameter selongsong : 1,6 cm
 - Panjang membran : 47 cm
 - Channel : 16
2. Amonia 1000 Meter Analyzer Digital untuk mengukur konsentrasi amonia dengan spesifikasi:
 - Produk : Palintest-UK
 - Tipe instrumen : Pulsasi Kolorimeter LED

- Rentang : 0-15 mg/L N dan 0-50 mg/L N
 - Rentang Temperatur: 0-50°C
 - Ukuran : Ukuran saku 173 × 75/44 × 41 mm
3. Pompa air untuk mengalirkan air dari tangki menuju kontaktor membran dengan spesifikasi:
- Jenis : Pompa Sentrifugal
 - Q : 1-10 L/menit
 - Tegangan Listrik : 220 Volt
 - Daya : 0,1 watt
 - Kecepatan Putar : 2.900 rpm
4. Pompa untuk mengalirkan amonia menuju kontaktor membran dengan spesifikasi:
- Jenis : Pompa Peristaltik
 - Tegangan Listrik : 230 Volt
 - Daya : 0,1 watt
 - Kecepatan Putar : 6-600 rpm
5. Tangki reservoir untuk absorben dan limbah amonia sebagai wadah penampungan dan penyimpanan larutan.
6. *Flowmeter* untuk mengukur laju alir air yang akan masuk ke dalam dan keluar kontaktor membran dengan spesifikasi
- Q : 100-1.000 L/jam
 - Skala : 1-10
7. Termometer, pH meter, dan manometer
8. Acrylic sebagai selongsong kontaktor membran, lem epoxy dan sambungan untuk membangun kerangka percobaan.
9. Selang sebagai penghubung antara tangki air dengan kontaktor membran.
10. Limbah amonia sintesis dengan konsentrasi ± 200 ppm.
11. Larutan penyerap berupa air dari Ciater.

3.4 Skema Peralatan

Sirkulasi selama percobaan ini dilakukan dengan *loop* tertutup dengan skema rancangan alat sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Skema Alat Penelitian

Keterangan:

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Modul membran serat berongga | 4. Tangki reservoir absorben |
| 2. Tangki reservoir ammonia dan pompa ammonia | 5. Valve |
| 3. Ammonia meter | 6. Flow meter |
| | 7. Pompa Peristaltik |

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian secara bertahap dilakukan melalui tahapan berikut ini:

1. Pembuatan modul

Modul dibuat berbentuk selongsong dan tabung (*shell and tube*) dengan sisi selongsong terbuat dari *acrylic* dan isi tabung membran serat berongga berbahan polipropilena.

2. Menghubungkan peralatan seperti tangki *reservoir*, pompa, manometer, *flowmeter*, dan modul membran serat berongga.

3. Persiapan larutan limbah amonia dan absorben air Ciater

4. Mengalirkan amonia ke dalam selongsong (*shell*) dan larutan penyerap ke dalam membran (*tube*) sampai tercapai keadaan *steady*.

5. Mengambil data studi perpindahan massa

Data yang diambil adalah konsentrasi amonia yang keluar dari modul membran dengan menggunakan amonia meter.

6. Pengambilan data dilakukan untuk setiap variasi pH absorben sebesar 2, 1 dan 0,7 dan laju alir amonia 5, 4 dan 3 Lpm pada pH optimum 1 dengan selang waktu pengambilan data 30 menit selama 2 jam laju sirkulasi.

7. Membuang limbah hasil absorpsi amonia oleh air Ciater.

8. Menganalisis data yang telah didapatkan seperti studi perpindahan massa dan studi hidrodinamika.

3.6 Penentuan Koefisien Perpindahan Massa

Perpindahan amonia melewati setiap satuan serat membran dituliskan dalam persamaan berikut [27]:

$$v_L \left(-\frac{dC_L}{dz} \right) = k \cdot a(C_L - C^*) \quad (3.1)$$

Tekanan amonia pada fasa gas sama dengan tekanan amonia pada serat sehingga konsentrasi gas amonia dalam fasa gas pada serat (C^*) cenderung bernilai konstan, sangat kecil dan dapat diabaikan. Pada laju alir gas yang sangat kecil di dalam serat, penurunan tekanan sepanjang serat dapat diabaikan dan diasumsikan konstan. Jika pengaruh konsentrasi amonia terlarut (C_L) konstan,

maka batas kondisi $C_L = C_1$ pada $z=0$ dan $C_L = C_2$ pada $z=L$ dapat digunakan sehingga integrasi persamaan akan menghasilkan:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dC_L}{(C_L - C^*)} &= \frac{k \cdot a}{v_L} dz \\
 \int_{C_L=C_1 \rightarrow \text{pada } z=0}^{C_L=C_2 \rightarrow \text{pada } z=L} -\frac{dC_L}{(C_L - C^*)} &= \int_{z=0}^{z=L} \frac{k \cdot a}{v_L} dz \\
 [-\ln(C_L - C^*)]_{C_1}^{C_2} &= \frac{k \cdot a \cdot L}{v_L} \\
 \ln\left(\frac{C_1 - C^*}{C_2 - C^*}\right) &= \frac{k \cdot a \cdot L}{v_L} \\
 \ln\left(\frac{C_2 - C^*}{C_1 - C^*}\right) &= -\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L} \\
 \left(\frac{C_2 - C^*}{C_1 - C^*}\right) &= \exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) \\
 C_2 - C^* &= (C_1 - C^*) \exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) \\
 C_2 &= C^* + (C_1 - C^*) \exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

Luas permukaan spesifik (a) telah diketahui nilainya dalam modul serat berongga dan dapat dihitung dari jumlah dan ukuran serat serta dimensi modul.

Apabila tangki air dicampur dengan baik (*well mixed reservoir*), maka neraca massa pada tangki adalah:

$$V \left(\frac{dC_1}{dt} \right) = QC_2 - QC_1 \quad (3.3)$$

Substitusikan nilai C_2 dari persamaan (3.2) ke persamaan (3.3) untuk menghasilkan persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{dC_1}{dt} \right) &= \frac{Q}{V} \left(C^* + (C_1 - C^*) \exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - C_1 \right) \\
 \left(\frac{dC_1}{dt} \right) &= \frac{Q}{V} \left((C_1 - C^*) \exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - (C_1 - C^*) \right) dt \\
 \left(\frac{dC_1}{(C_1 - C^*)} \right) &= \frac{Q}{V} \left[\exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - 1 \right] dt \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

Integrasi pada batas kondisi $t=0$, $C_1=0$, dan $t=t$, $C_1=C$ memberikan hubungan perubahan konsentrasi terhadap waktu yang disajikan pada persamaan berikut:

$$\int_{C_1=C_0 \rightarrow \text{pada } t=0}^{C_1=C \rightarrow \text{pada } t=1} \frac{dC_1}{(C_1-C^*)} = \int_{t=0}^{t=t} \frac{Q}{V} \left[\exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - 1 \right] dt$$

$$\ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C - C^*}\right) = \frac{Q}{V} \left(\exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - 1 \right) t \quad (3.5)$$

Dari persamaan tersebut, koefisien perpindahan massa *overall* (k) dapat dicari dengan memplotkan $\ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C - C^*}\right)$ vs t , kemudian *slope* garis dapat dihitung, dengan demikian nilai k dapat diketahui melalui persamaan:

$$\text{Slope} = \frac{Q}{V} \left(\exp\left(-\frac{k \cdot a \cdot L}{v_L}\right) - 1 \right)$$

$$k = -\frac{v_L}{a \cdot L} \left(\ln\left(\frac{V \times \text{slope}}{Q}\right) + 1 \right) \quad (3.6)$$

Dua asumsi penting yang diterapkan dalam dua persamaan di atas adalah:

1. Waktu respon perhitungan amonia cukup cepat untuk mengawasi laju perubahan amonia secara akurat.
2. Asumsi umpan konstan yang masuk ke dalam modul harus realistis dengan konsentrasi amonia dalam tangki yang berubah secara perlahan-lahan jika dibandingkan dengan perubahan konsentrasi di dalam modul.

Kedua asumsi di atas akan memuaskan jika tangki air dengan volume besar digunakan pada desain eksperimen.

3.7 Studi Hidrodinamika

Hidrodinamika merupakan suatu cabang ilmu yang mempelajari sifat atau kondisi fluida pada saat fluida tersebut bergerak. Dalam penelitian ini, kinerja dari membran dipengaruhi oleh faktor-faktor yang berhubungan dengan hidrodinamika, yaitu faktor friksi dan bilangan Reynold.

Untuk menghitung faktor-faktor tersebut, diperlukan data diameter ekivalen membran yang diperoleh dari persamaan:

$$d_e = \frac{d_p^2 - N d_f^2}{d_p + N d_f} \quad (3.7)$$

dimana N : jumlah serat dalam modul

d_f : diameter serat

d_p : diameter selongsong (pipa)

Gaya-gaya yang paling berpengaruh pada fluida yang mengalir melalui saluran yang terisi penuh adalah gaya inersia dan gaya viskositas. Perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskositas ini disebut dengan bilangan Reynold yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{d_e \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (3.8)$$

dengan d_e : diameter ekivalen

ρ : densitas

v : kecepatan aliran

μ : viskositas

Karakteristik hidrodinamika juga dapat dikorelasikan dengan bilangan-bilangan tak berdimensi seperti Sherwood dan Schmidt. Bilangan Sherwood diperoleh dengan menghitung koefisien transfer massa pada percobaan yang dilakukan, mengetahui difusivitas amonia (D) serta diameter ekivalen (d_e) dengan persamaan berikut:

$$Sh = \frac{k_L d_e}{D} \quad (3.9)$$

Setelah bilangan Sherwood diperoleh, dibuat grafik hubungan antara bilangan Reynolds dengan bilangan Sherwood untuk berbagai variasi percobaan yang dilakukan. Kedua besaran tak berdimensi tersebut kemudian dikorelasikan melalui persamaan:

$$Sh = aRe^b Sc^{1/3} \quad (3.10)$$

Namun pengaruh bilangan Schmidt diasumsikan kecil karena nilainya tetap sesuai dengan literatur, yaitu $1/3$, sehingga persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$Sh = ARe^b \quad (3.11)$$

Persamaan (3.11) merupakan persamaan yang menunjukkan hubungan antara koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul, baik aliran laminar, transisi, maupun turbulen. Dimana A dan b berturut-turut adalah konstanta untuk fraksi kepadatan membran dan laju alir.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang telah dituliskan sebelumnya, tujuan dari penelitian pemisahan amonia terlarut melalui modul membran serat berongga menggunakan larutan penyerap sumber air alami adalah mengetahui efektivitas pemisahannya, yang dapat diketahui melalui studi perpindahan massa. Modul serat berongga yang digunakan bersifat hidrofobik, ia tidak dibasahi baik oleh amonia maupun larutan asam. Amonia berdifusi melewati pori pada membran, sebagai akibatnya, konsentrasi amonia berkurang seiring dengan berjalannya waktu. Sampel dari amonia diukur dengan menggunakan ammonia meter bermerk Palintest UK, dimana pengambilan sampel dilakukan setiap 30 menit selama waktu sirkulasi 2 jam. Pengukuran dari perubahan konsentrasi amonia terhadap waktu digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan massa keseluruhan, k_{OVL} , sebagai sarana dalam pengajian perpindahan massa. Penelitian ini memberikan variasi pH absorben dan laju alir limbah amonia pada pH 1. pH 1 dipilih tanpa alasan spesifik tertentu karena variabel yang hendak dikaji adalah pengaruh laju sirkulasi amonia terhadap perpindahan massa, sehingga pH manapun yang diambil tidak menjadi masalah.

4.1 Studi Perpindahan Massa

Studi perpindahan massa meninjau besarnya koefisien perpindahan massa dari masing-masing variabel percobaan. Besarnya koefisien ini akan dijadikan tolak ukur dari efektivitas proses pemisahan amonia dari limbah menggunakan kontaktor membran serat berongga dengan absorben sumber air alami. Nilai koefisien perpindahan massa ini diperoleh dari pengolahan data perubahan konsentrasi amonia sebelum dan setelah melewati membran selama 2 jam sirkulasi dengan variasi pH absorben 2, 1 dan 0,7 serta laju sirkulasi limbah amonia 3, 4, dan 5 Lpm pada pH 1.

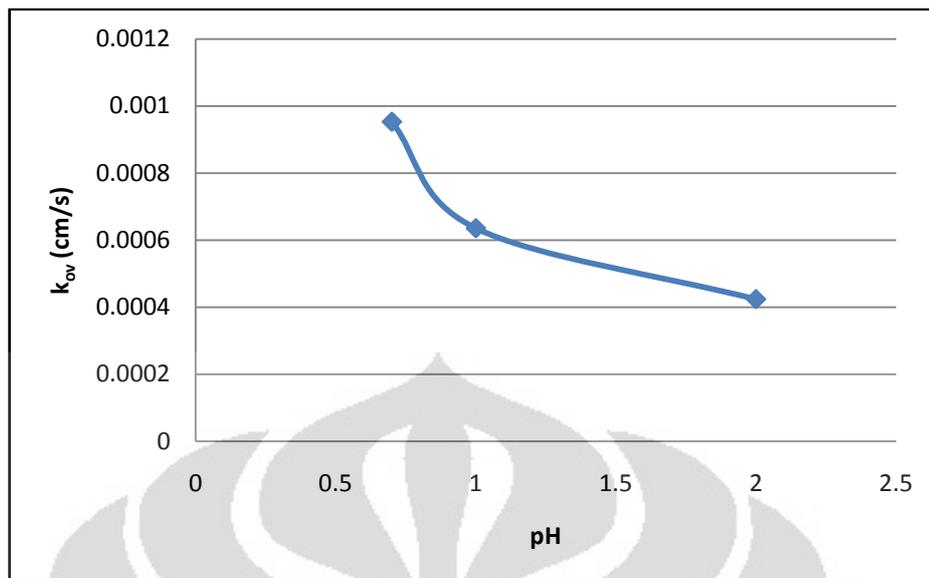
pH limbah amonia selalu dijaga pada kondisi basa, yakni pH 11. Hal ini dikarenakan pada kesetimbangan amonia dalam air, ion amonium dapat bergeser menjadi gas amonia hanya pada keberadaan ion hidroksida yang tinggi. Dan

hanya gas amonia lah yang mampu berdifusi melewati membran. Usaha dalam menjaga pH limbah tetap konstan adalah dengan menambahkan NaOH pekat, yakni 10 M, dari waktu ke waktu secara berkala dengan bantuan pH meter.

Pada studi perpindahan massa, dibuat pula korelasi perpindahan massa untuk mengetahui hubungan antara kecepatan dan jenis aliran yang melewati modul terhadap koefisien perpindahan massa, yakni bilangan tak berdimensi Sherwood.

4.1.1 Pengaruh pH Absorben Terhadap Perpindahan Massa

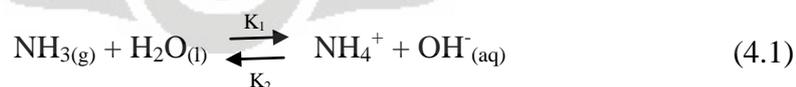
Nilai pH yang divariasikan adalah pH 2, 1, dan 0,7 yang diperoleh dengan menambahkan asam sulfat pekat 96%v/v. Perhitungannya dapat dilihat pada Lampiran 1, dan pengaruh dari variasi pH dapat terlihat dari nilai koefisien perpindahan massa yang diperoleh. Koefisien perpindahan massa sendiri diperoleh dari mengalikan *slope* grafik konsentrasi amonia terhadap waktu dengan volume limbah umpan, kemudian dibagi dengan luas permukaan membran. Perhitungan dan grafik yang lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran 2, Gambar 1 sampai 5. Namun metode diferensiasi mutlak seperti cara di atas tak dapat dielakkan akan membawa kepada kesalahan eksperimental yang cukup besar [28]. Untuk mengetahui pengaruh pH terhadap nilai koefisien perpindahan massa, gambar berikut ini dapat dijadikan salah satu pertimbangan:



Gambar 4. 1 Variasi Koefisien Perpindahan Massa terhadap pH pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm

Dari gambar terlihat bahwa semakin rendah pH absorben, semakin besar koefisien perpindahan massa yang diperoleh. Semakin rendah pH absorben berarti semakin banyak kandungan ion sulfat dalam absorben, atau dengan kata lain, absorben semakin bersifat asam. Di sisi lain, diketahui bahwa senyawa amonia yang dapat diabsorpsi oleh absorben adalah gas amonia dalam keadaan basa. Maka semakin asam suatu absorben, semakin optimal pula absorpsi yang terjadi.

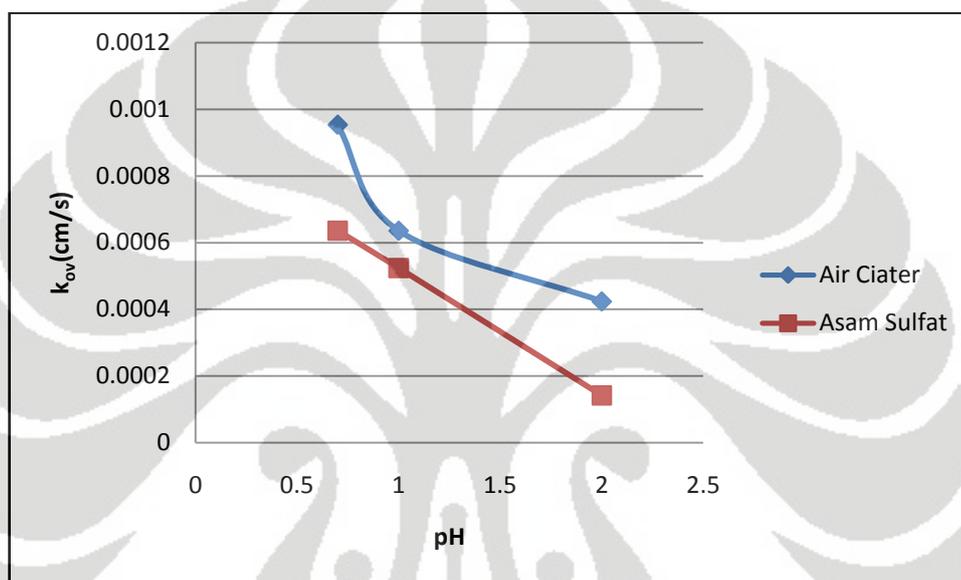
Proses pemisahan amonia ini terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi molekul amonia yang berada pada *shell* dengan konsentrasi molekul amonia pada *lumen* atau serat membran. Perbedaan konsentrasi ini akan mendorong molekul amonia untuk berdifusi melalui permukaan membran ke dalam larutan air Ciater yang berada di dalamnya. Berikut adalah reaksi kesetimbangan amonia dalam air:



Nilai K_1 pada reaksi di atas bernilai $1,8 \times 10^{-5}$; sedangkan nilai K_2 sebesar $5,6 \times 10^{-10}$. Dengan kata lain, reaksi pembentukan ion amonium dan hidroksida 32.142,86 kali lebih besar daripada reaksi pembentukan amonia dan air. Maka sesuai dengan hukum Le Chatelier, untuk mendapatkan lebih banyak hasil produk di ruas kiri, konsentrasi reaktan di sebelah kanan perlu ditingkatkan. Salah satu

caranya dalam kasus ini adalah menambahkan basa, yakni NaOH (Natrium Hidroksida) pekat hingga tercapai pH 11. Peningkatan pH larutan akan menggeser arah kesetimbangan ke kiri sehingga konsentrasi gas amonia terlarut yang hendak diabsorpsi oleh air Ciater akan semakin tinggi.

Bila performa air Ciater dalam proses penyisihan amonia dari air limbah dibandingkan dengan absorben asam sulfat pada variasi pH yang sama, diperoleh grafik sebagai berikut:



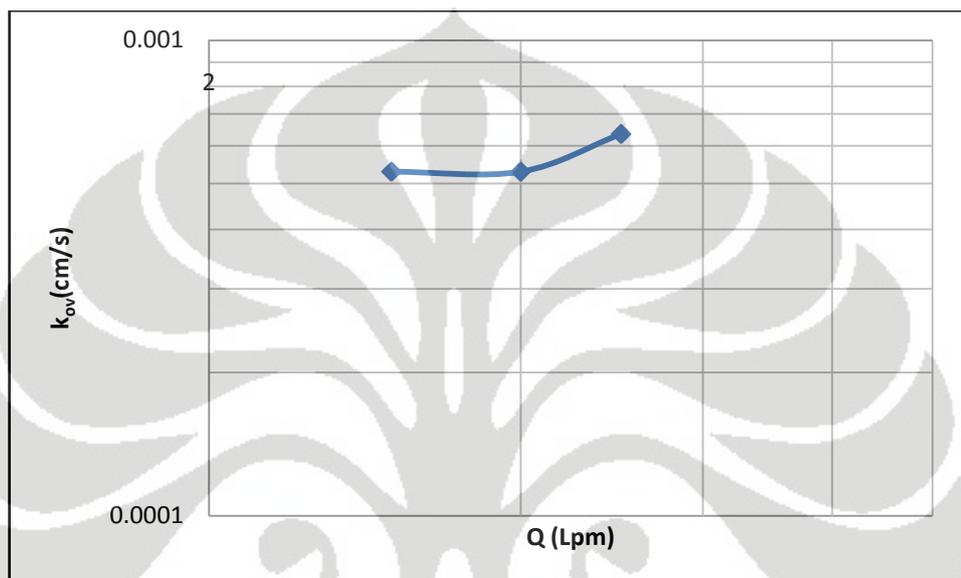
Gambar 4. 2 Variasi koefisien perpindahan massa keseluruhan, k_{ov} , terhadap pH pada Larutan Penyerap Air Ciater dan Asam Sulfat

Hal ini mungkin disebabkan oleh ion negatif yang terdapat di dalam air Ciater, seperti ion sulfat, klorida, fluorida dan sianida yang berperan dalam mengurangi tahanan perpindahan massa pada fasa larutan penyerap sehingga meningkatkan koefisien perpindahan massanya.

Berdasarkan perhitungan pada Lampiran 1 bagian 1.4, terlihat bahwa tegangan permukaan air Ciater tidak jauh berbeda dengan asam sulfat. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tegangan permukaan tidak terlalu signifikan terhadap performa dari air Ciater. Walaupun secara perhitungan, tegangan permukaan air Ciater sedikit di atas asam sulfat, yang berarti ia lebih disukai oleh membran.

4.1.2 Pengaruh Laju Alir Terhadap Koefisien Perpindahan Massa

Variasi laju alir memiliki peranan penting dalam efektivitas perpindahan massa amonia terhadap absorben karena berkaitan dengan dinamika fluida di dalam modul. Dari Gambar 4.3 berikut akan terlihat bahwa semakin rendah laju alir limbah amonia, semakin rendah koefisien perpindahan massa-nya.



Gambar 4. 3 Variasi Koefisien Perpindahan Massa terhadap Laju Alir pada pH 1 dalam Skala Logaritmik

Hal ini dikarenakan secara teoritis menurut Semmens dkk [28], penambahan natrium hidroksida berlebihan akan menghasilkan ion OH^- yang terlalu tinggi dalam larutan, dimana difusi ion hidroksida pada permukaan membran tergolong lambat sehingga dapat menghambat difusi amonia pada permukaan membran akibat *concentration polarization effect* tersebut. Masalah ini seharusnya dapat diatasi dengan meningkatkan laju alir amonia [19], karena peningkatan laju alir juga akan meningkatkan laju difusi ion hidroksida pada permukaan membran sehingga proses pemisahan menjadi lebih optimal. Itulah sebabnya pada laju alir yang rendah (yakni 4 dan 3 Lpm), koefisien perpindahan massa menurun seiring dengan efektivitas pemisahannya.

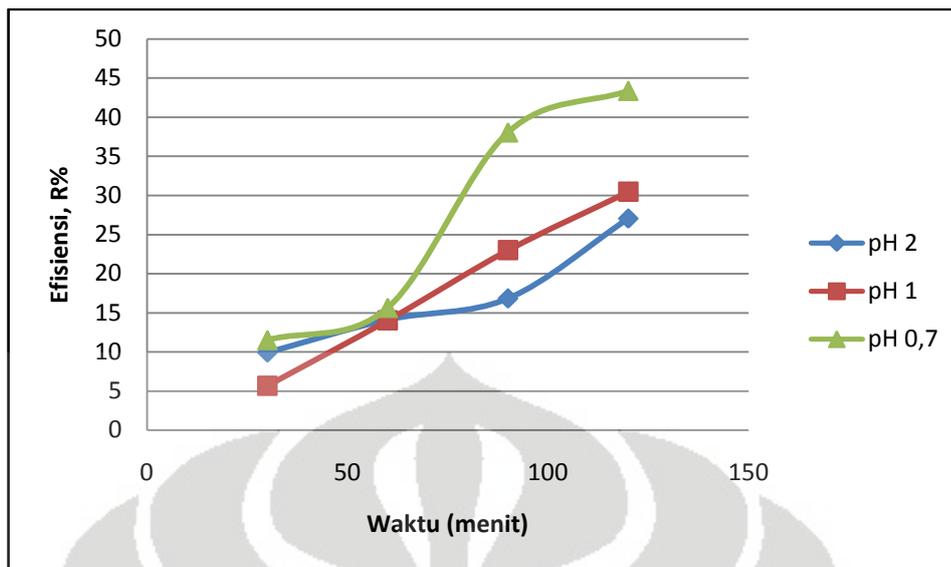
Peningkatan koefisien perpindahan massa juga dipengaruhi langsung oleh fraksi kekosongan (*void fraction*) dan distribusi aliran umpan di dalam modul. Dengan meningkatnya aliran fluida di dalam modul, maka fraksi kekosongan

tersebut akan semakin dipenuhi oleh fluida sehingga distribusi aliran umpan menjadi semakin merata. Akibatnya, jumlah molekul amonia yang melewati pori-pori membran meningkat sehingga perpindahan massa akan semakin banyak. Di samping itu, peningkatan laju alir juga akan meningkatkan turbulensi aliran dan membentuk arus Eddy sehingga membantu meningkatkan difusivitas amonia ke dalam membran [21]. Arus Eddy yang terbentuk mampu memperkecil hambatan yang terjadi di sekitar aliran amonia [29], sehingga secara tidak langsung membantu proses perpindahan massa pada membran. Namun bila diteliti lebih lanjut, akan terlihat bahwa koefisien perpindahan massa hanya berubah sedikit terhadap perubahan laju alir *feed*.

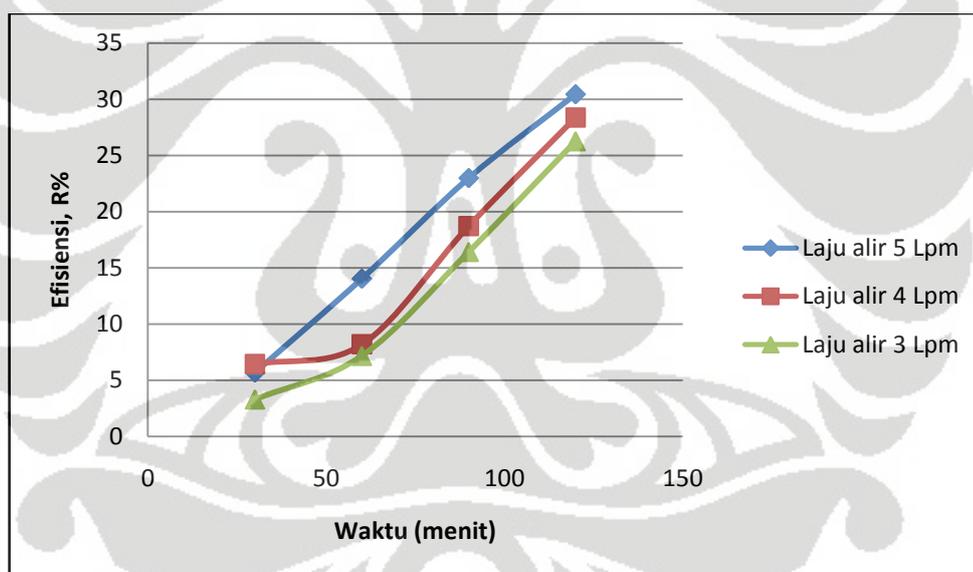
4.2 Efisiensi Pemisahan Amonia Terlarut dalam Limbah Sintetis

Efisiensi dari pemisahan amonia terlarut dalam limbah sintetis ditinjau dari perubahan konsentrasi amonia dari waktu ke waktu di dalam wadah limbah amonia. Efisiensi sendiri menunjukkan efektivitas atau kemampuan dari absorben dalam mengabsorpsi amonia, semakin tinggi nilai efisiensi, semakin baik pula performa dari suatu absorben.

Efisiensi yang dikaji pada penelitian kali ini adalah pengaruh variasi pH absorben dan variasi laju sirkulasi *feed* limbah amonia. Grafik berikut ini adalah hasil korelasi antara variasi pH dan laju alir terhadap efisiensi pemisahan amonia:



Gambar 4. 4 Variasi %Penyisihan Amonia terhadap Waktu pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm



Gambar 4. 5 Variasi %Penyisihan Amonia terhadap Waktu pada pH Larutan Penyerap 1

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa semakin rendah pH absorbennya, semakin tinggi efisiensi pemisahannya. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada perhitungan koefisien perpindahan massa, yang berarti bahwa koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan efisiensi pemisahan. Atau dengan kata lain, peningkatan konsentrasi keasaman larutan absorbennya, dalam hal ini

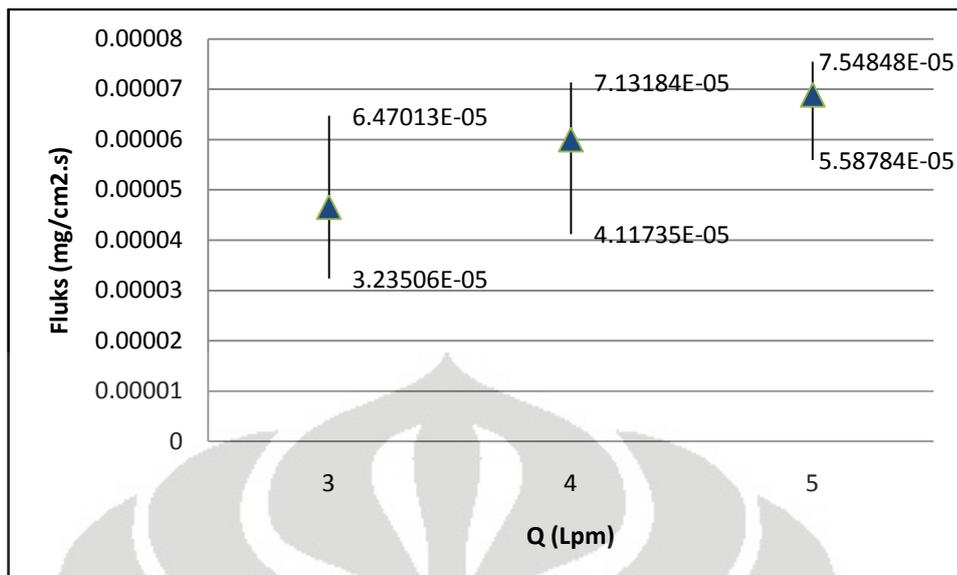
ditunjukkan dengan penurunan pH larutan, dapat meningkatkan efisiensi pemisahan amonia. Begitu pula dengan Gambar 4.5; terlihat bahwa semakin tinggi laju alir limbah amonia, semakin baik pula pemisahannya. Seperti yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, peningkatan laju alir akan menghasilkan arus Eddy yang akan menghilangkan pengaruh *concentration polarization effect* oleh ion hidroksida.

Dari Tabel 23 pada Lampiran 2, terlihat bahwa efisiensi pemisahan tertinggi pada penelitian ini adalah pada variasi pH absorben 0,7 dengan laju alir 5 Lpm, yakni sebesar 43,36%. Dari literatur [19] diperoleh bahwa pada kondisi dan temperatur yang baik, yakni sekitar 75°C, performa pemisahan amonia dapat mencapai efisiensi 97%.

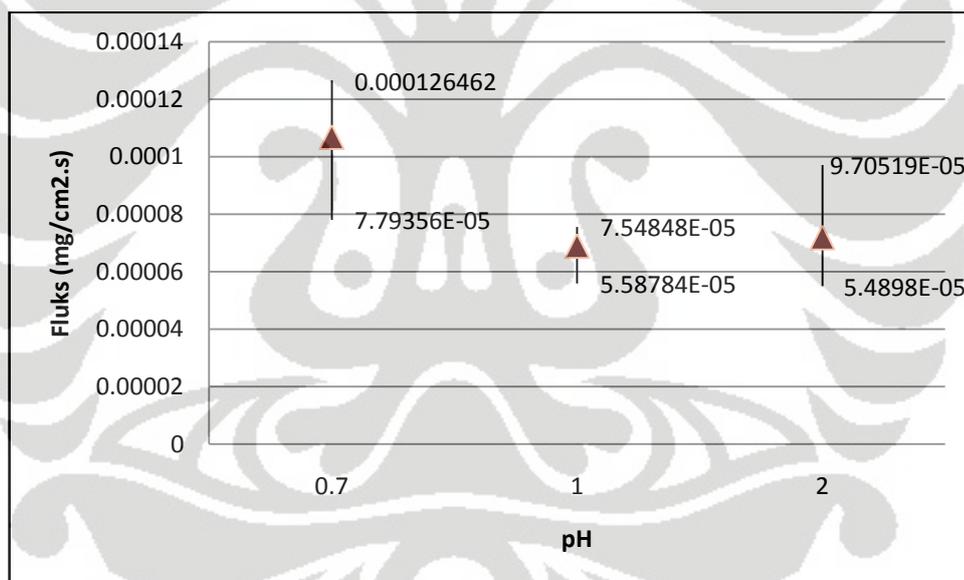
Terdapat banyak faktor yang menjadi penyebab relatif rendahnya efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini, di antaranya adalah lamanya waktu sirkulasi fluida, laju alir *feed* dan absorben, jumlah serat membran, temperatur larutan, dan *maintenance* pH *feed* amonia. Di samping itu, konsentrasi dari anion-anion yang terkandung pada air Ciater juga memberikan pengaruh yang besar.

4.3 Pengaruh Laju Alir dan pH Terhadap Fluks

Fluks adalah banyaknya jumlah amonia terpisahkan per luas area membran per satuan waktu. Pada percobaan ini, peneliti mencoba mencari korelasi antara laju alir *feed* dan pH absorben terhadap besarnya fluks yang diperoleh.



Gambar 4. 6 Variasi Fluks terhadap Perubahan Laju Alir Limbah Amonia pada pH Absorben 1



Gambar 4. 7 Variasi Fluks terhadap Perubahan pH Absorben pada Laju Sirkulasi Limbah 5 Lpm

Karena luas permukaan membran yang digunakan sama, atau dengan kata lain konstan untuk seluruh perhitungan fluks pada berbagai variasi yang berbeda, serta selisih waktu yang digunakan juga sama, maka satu-satunya faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai fluks adalah perbedaan konsentrasi yang diperoleh. Semakin tinggi nilai fluks, berarti semakin besar pula perbedaan

konsentrasi yang diperoleh dari waktu ke waktu terhadap konsentrasi awal amonia pada limbah.

Kedua grafik di atas menunjukkan nilai rata-rata fluks yang diperoleh pada masing-masing variasi laju alir, berdasarkan hasil pengolahan data yang diambil setiap 30 menit, dengan memberikan nilai maksimum dan minimumnya. Berdasarkan grafik yang diperoleh pada Gambar 4.6, terlihat bahwa semakin tinggi laju alir *feed* amonia, semakin tinggi pula nilai fluks yang dihasilkan. Peningkatan laju alir akan meningkatkan turbulensi aliran dan membentuk arus Eddy sehingga membantu meningkatkan difusivitas amonia ke dalam serat membran. Arus Eddy yang terbentuk mampu memperkecil hambatan yang terjadi di sekitar aliran amonia [22], sehingga secara tidak langsung membantu proses perpindahan amonia pada membran. Hal yang sama juga berlaku untuk penurunan nilai pH absorben; semakin rendah pH absorben, semakin tinggi fluks yang dihasilkan karena gas amonia bersifat basa. Gambar 4.7 menguatkan argumen di atas, dimana pH 0,7 menunjukkan nilai fluks tertinggi dibandingkan dengan pH 1 dan 2. Maka dapat dikatakan bahwa pH optimum perpindahan massa amonia melalui kontaktor membran serat berongga dengan absorben air Ciater berdasarkan percobaan yang telah dilakukan adalah 0,7.

4.5 Korelasi Perpindahan Massa

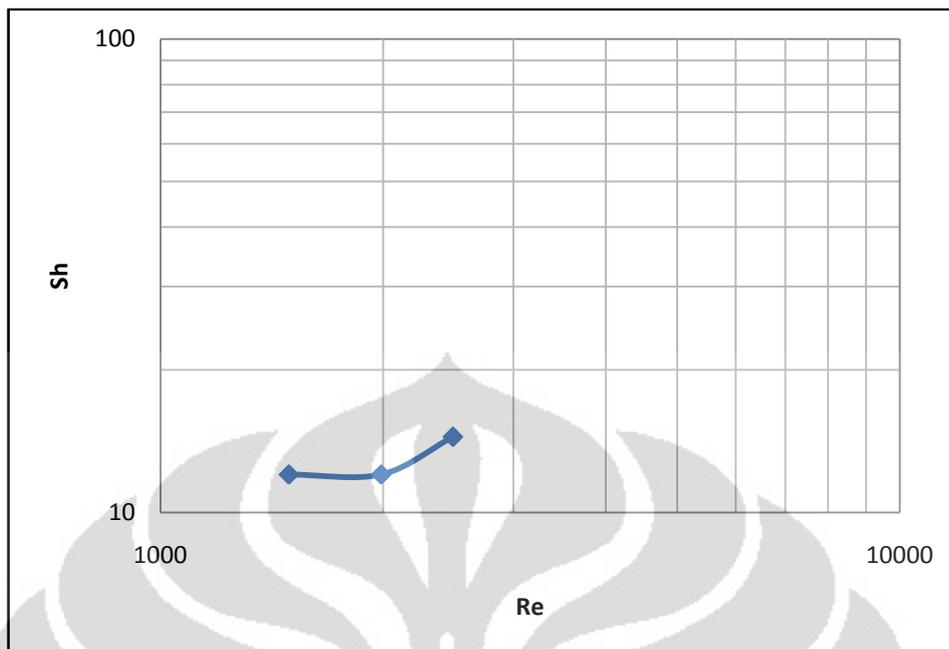
Hubungan antara koefisien perpindahan massa dengan jenis aliran dapat ditemui pada fungsi bilangan Sherwood dan bilangan Reynolds, dimana korelasinya ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$Sh = aRe^b Sc^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

Pangkat dari bilangan Schmidt diasumsikan konstan, yakni 1/3, sehingga Persamaan 4.2 dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$Sh = ARe^b \quad (4.3)$$

Bilangan Sherwood dan Reynold yang telah diperoleh pada Lampiran 2 kemudian dikorelasikan melalui grafik dengan menggunakan *trendline power* untuk setiap variasi laju alir, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4. 8 Variasi Bilangan Sherwood terhadap Bilangan Reynold pada pH Absorben 1 dalam Skala Logaritmik

Maka korelasi perpindahan massa yang diperoleh adalah:

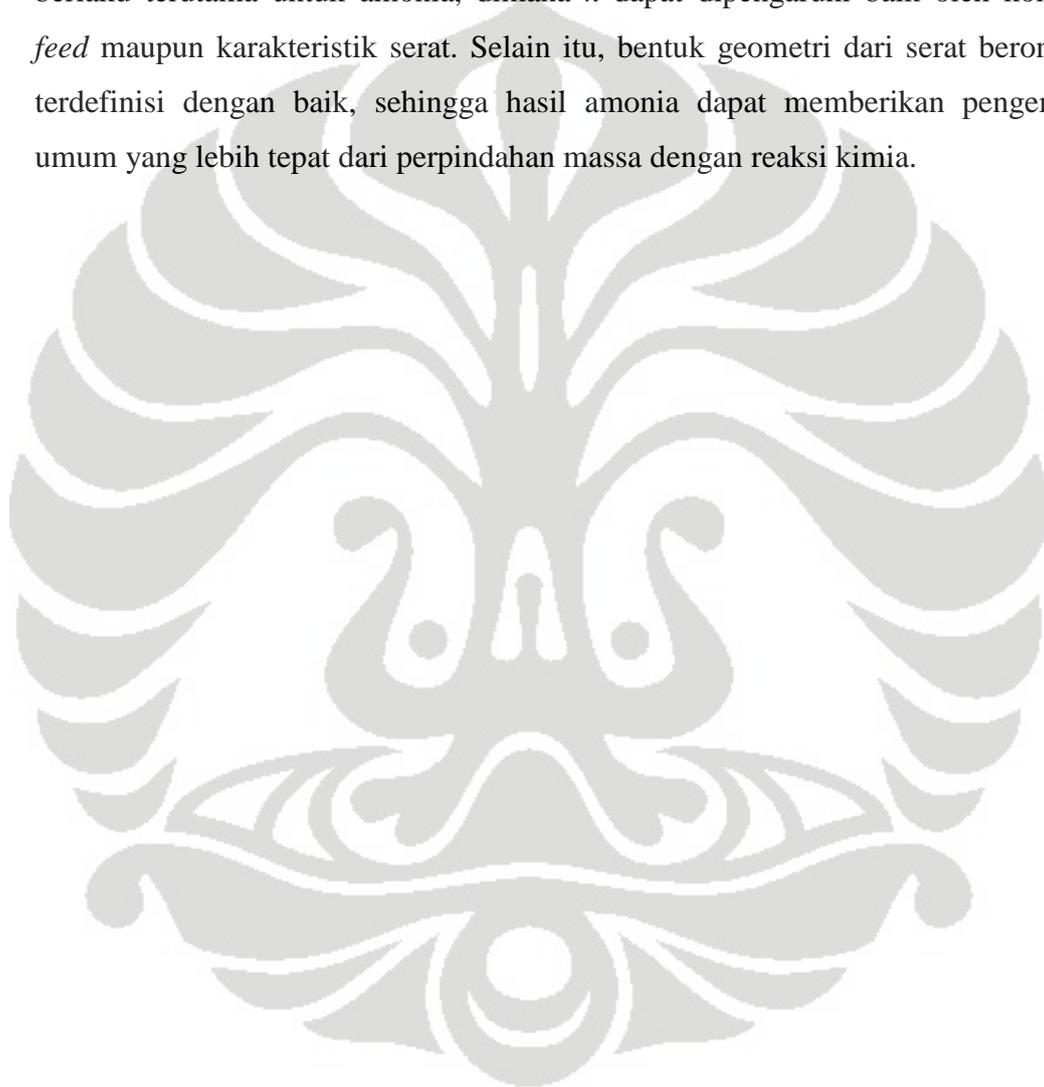
$$Sh = 0,973Re^{0,34} \quad (4.4)$$

Dari Gambar 4.8 dan Persamaan (4.4), terlihat bahwa bilangan Reynold dan Sherwood berbanding lurus. Semakin tinggi bilangan Reynold, atau semakin turbulen suatu aliran, semakin tinggi pula nilai bilangan Sherwood yang diperoleh. Atau dengan kata lain, semakin tinggi koefisien perpindahan massa yang didapatkan. Maka dapat disimpulkan bahwa jenis aliran yang mampu memberikan performa perpindahan massa yang baik adalah aliran turbulen. Namun pada perhitungan di Lampiran 2, dan berdasarkan eksponen bilangan Reynold yang bernilai 0,34, terlihat bahwa jenis aliran yang terbentuk di dalam selongsong modul kontaktor membran adalah aliran laminar [4], tanpa arus Eddy, yang mampu meningkatkan perpindahan massa konvensional. Literatur menuliskan bahwa pangkat Reynold senilai 0,34 berarti Reynold berada pada *range* 1-25, atau dengan kata lain, berada pada *range* aliran laminar.

Sementara itu, nilai konstanta A (0,973) menunjukkan fungsi geometri dari modul kontaktor. Fungsi geometri tersebut dipengaruhi oleh tingkat kepadatan modul membran atau *packing fraction* yang dipengaruhi pula oleh diameter serat,

diameter kontaktor dan jumlah serat yang digunakan. Semakin besar diameter serat, semakin padat modul membran tersebut. Namun dari penelitian sebelumnya disebutkan bahwa semakin padat suatu modul membran, faktor geometri justru semakin menurun.

Perlu diingat bahwa koefisien perpindahan massa k mempengaruhi secara dramatis desain optimal dari kontaktor membran serat berongga. Prinsip ini berlaku terutama untuk amonia, dimana k dapat dipengaruhi baik oleh kondisi *feed* maupun karakteristik serat. Selain itu, bentuk geometri dari serat berongga terdefinisi dengan baik, sehingga hasil amonia dapat memberikan pengertian umum yang lebih tepat dari perpindahan massa dengan reaksi kimia.



BAB 5

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Efektivitas air Ciater sebagai larutan penyerap (absorben) dari proses penyisihan amonia tergolong baik. Bila dibandingkan dengan performa pelarut asam sulfat dengan variabel yang sama (jumlah serat membran, laju sirkulasi limbah dan pH absorben), air Ciater memberikan kinerja yang lebih baik, yakni sekitar 35%.
2. Kontaktor membran serat berongga lebih cocok digunakan pada limbah dengan *range* konsentrasi kecil, sedangkan untuk pengolahan limbah dengan konsentrasi amonia tinggi, lebih disarankan untuk menggunakan proses lainnya.
3. Dari penelitian yang dilakukan, terlihat bahwa semakin rendah pH absorben, atau semakin asam absorben yang digunakan, efektivitas pemisahan amonia dari air limbah akan meningkat. Variasi pH yang memberikan hasil paling optimal adalah pH 0,7.
4. Semakin tinggi laju sirkulasi *feed* amonia, semakin tinggi pula efektivitas perpindahan massa amonia yang diperoleh. Hal ini disebabkan oleh arus Eddy yang dihasilkan oleh laju alir yang tinggi. Semakin turbulen suatu fluida, akan semakin baik perpindahan massa-nya.

Sementara itu, beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis adalah:

1. Berhubungan dengan banyaknya *impurities* yang terkandung di dalam air Ciater, ada baiknya bila dilakukan proses *pre-treatment* terlebih dahulu. Walaupun keberadaan kation dan anion lain di dalam air Ciater tergolong minoritas, namun pasti tetap mempengaruhi reaksi kimia yang berlangsung di dalam modul kontaktor. Proses *pre-treatment* yang diusulkan oleh penulis adalah pemanasan secara *proper*.
2. Peningkatan temperatur *feed* amonia juga mampu memberikan efektivitas penyisihan amonia yang lebih baik karena amonia volatil lebih banyak hadir

dalam larutan *feed* yang disebabkan oleh sifat endotermis dari proses disosiasi ion amonium.



DAFTAR PUSTAKA

1. Warlina, L., *Pencemaran Air: Sumber, Dampak dan Penanggulangannya*. 2004, Institut Pertanian Bogor: Bogor. p. 26.
2. Wiesler, F., *Membrane Contactors: An Introduction to The Technology*. Ultrapure Water, 1996.
3. Li, J.-L. and B.-H. Chen, *Review of CO₂ absorption using chemical solvents in hollow fiber membrane contactors*. Separation and Purification Technology, 2005. **41**(2): p. 109-122.
4. Gabelman, A. and S.-T. Hwang, *Hollow fiber membrane contactors*. Journal of Membrane Science, 1999. **159**(1-2): p. 61-106.
5. Peinemann, S.P.N.a.K.-V., *Membrane Technology in the Chemical Industry*. 2001: Wiley-VCH. 308.
6. Wikipedia, t.f.e. *Ammonia*. 2010 [cited 2010 24 Maret].
7. Alaerts, S.S.S.a.G., *Metode Penelitian Air*. 1984, Surabaya: Penerbit Usaha Nasional.
8. *KEPUTUSAN MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP NOMOR : KEP- 51/MENLH/10/1995 TENTANG BAKU MUTU LIMBAH CAIR BAGI KEGIATAN INDUSTRI*. 1995 [cited 2010 9 Desember]; Available from: http://hukum.unsrat.ac.id/lh/menlh_51_1999.pdf.
9. Unknown, *Ammonia Stripping*, Branch Environmental Corporation: New Jersey.
10. Fred Bergsrud, B.S., Russell Derickson. *Chlorination*. 1992 [cited 2010 24 Juni].
11. Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*. 1991, v: Kluwer Academic Publishers.
12. Siti Agustina, S.P.R., Tri Widiyanto, Trisni.A., *Penggunaan Teknologi Membran Pada Pengolahan Air Limbah Industri Kelapa Sawit, in Workshop Teknologi Industri Kimia dan Kemasan*. 2004.
13. N. Aryanti, A.P., S. Murdiyani, *Kontaktor Membran Hollow Fiber untuk Penyerapan Gas CO₂*, in *Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses*. 2004, Universitas Diponegoro: Semarang.
14. Falk-Pedersen, H.H.a.O., *THE KVAERNER MEMBRANE CONTACTOR: LESSONS FROM A CASE STUDY IN HOW TO REDUCE CAPTURE COSTS*. 2000, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge: MA, USA.
15. Dictionary, S.-T., *Desorption*, in *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. 2003, McGraw-Hill Companies, Inc.
16. Bergeyck, K.V.a.L., Ing. A.J., *Teknologi Proses* 1981, Jakarta: Penerbit Bhratara Karya Aksara.
17. Lintang, N., *Perpindahan Massa Difusional*. 2001, Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
18. Norddahl, B., et al., *A membrane contactor for ammonia stripping, pilot scale experience and modeling*. Desalination, 2006. **199**(1-3): p. 172-174.
19. Xie, Z., et al., *Ammonia removal by sweep gas membrane distillation*. Water Research, 2009. **43**(6): p. 1693-1699.

20. Mandowara, A. and P.K. Bhattacharya, *Membrane contactor as degasser operated under vacuum for ammonia removal from water: A numerical simulation of mass transfer under laminar flow conditions*. Computers & Chemical Engineering, 2009. **33**(6): p. 1123-1131.
21. El-Bourawi, M.S., et al., *Application of vacuum membrane distillation for ammonia removal*. Journal of Membrane Science, 2007. **301**(1-2): p. 200-209.
22. Shao, J., et al., *Emergency membrane contactor based absorption system for ammonia leaks in water treatment plants*. Journal of Environmental Sciences, 2008. **20**(10): p. 1189-1194.
23. Admin. *Pemandian Air Panas Ciater: Obyek Wisata Termahal di Jawa Barat*. 2010 [cited 2010 17 Juni].
24. Unknown. *SUMMARY OF BALNEOLOGI ANALYSES OF SPRING AT LOCATION SARIATER*. [cited 2010 24 Juni].
25. Unknown. *Ammonium Chloride*. 2010 [cited 2010 2 Juli].
26. Mallinckrodt Baker, I. *MSDS Ammonium Sulfate, Ammonium Chloride, Ammonium Hydroxide*. 2005 [cited 2010 2 Juli].
27. Coulson, J.M., and Richardson, J.F., *Chemical Engineering, Volume 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer*. . Vol. . 1978, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press. 40-45.
28. Michael J. Semmens, D.M.F., E.L. Cussler *Ammonia Removal from Water Using Microporous Hollow Fibers* Journal of Membrane Science 1990.
29. R. Bird, N.F.a.L., *Transport Phenomenon*. 1990, New York: John Wiley and Sons.

LAMPIRAN 1

1. Perhitungan Preparasi Air Ciater

Air Ciater dengan volume sebesar 3 liter memiliki pH 2,28. Air Ciater ditambahkan dengan asam sulfat (H_2SO_4) 18 M (96% v/v) hingga tercapai pH:

- 2
- 1
- 1,7

Beberapa asumsi yang digunakan dalam penyelesaian:

1. Air ciater terdiri dari beberapa kation dan anion dalam larutannya, seperti Aluminium, Calcium, Sulfat, Klor, dan sebagainya.
2. Molaritas atau pH dari air Ciater diperoleh dari observasi menggunakan pH-meter, artinya pH meter sudah mendeteksi total mol asam dalam volume larutan.
3. Reaksi yang terjadi adalah reaksi volumetrik, tidak terjadi penyusutan ataupun ekspansi volume akibat pengaruh *intermolecular forces*.
4. Jika menggunakan pipet tetes yang baik, 1 mL = 20 tetes.

1.1 pH target = 2

Karena pH air Ciater = 2,28, maka molaritas $[\text{H}^+] = 10^{-2.28} \text{ M} = 5,248 \times 10^{-3} \text{ M}$. Dengan menggunakan rumus

$$(V1 \times M1) + (V2 \times M2) = (V3 \times M3) \quad (1.1)$$

yang merupakan kesetimbangan jumlah zat dalam suatu larutan (mol input = mol output), maka didapatkan:

$$(3 \text{ L} \times 5,248 \times 10^{-3} \text{ M}) + (V2 \times 36 \text{ M}) = ((V1 + V2) \times 10^{-2})$$

$$(3 \text{ L} \times 5,248 \times 10^{-3} \text{ M}) + (V2 \times 36 \text{ M}) = ((3 \text{ L} + V2) \times 10^{-2})$$

Sehingga didapat $V2$ adalah sebesar $3,961 \times 10^{-4}$ liter atau sama dengan 0,3961 mL (asam sulfat murni). Kemudian karena digunakan H_2SO_4 18 M (96% v/v), maka volume asam sulfat yang perlu ditambahkan adalah sebesar $0,3961/0,96 = \mathbf{0,4126 \text{ mL}}$ (atau sekitar 8 tetes).

1.2 pH target = 1

Dengan menggunakan persamaan yang sama seperti pada Persamaan (1.1), diperoleh perhitungan sebagai berikut:

$$(3 L \times 5,248 \times 10^{-3} M) + (V2 \times 36 M) = ((3L + V2) \times 10^{-1})$$

Didapatkan $V2 = 3,969 \times 10^{-4} L = 0,3969 \text{ mL}$. Karena digunakan asam sulfat 96% v/v, maka volume asam sulfat yang ditambahkan ke dalam air Ciater adalah sebesar $0,3969/0,96 = \mathbf{0,4134 \text{ mL}}$ (atau sekitar 9 tetes).

1.3 pH target = 0,7

Dengan menggunakan Persamaan (1.1), diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$(3 L \times 5,248 \times 10^{-3} M) + (V2 \times 36 M) = ((3L + V2) \times 10^{-0,7})$$

Didapatkan $V2 = 3,98 \times 10^{-4} L = 0,398 \text{ mL}$. Karena digunakan asam sulfat 96% v/v, maka volume asam sulfat yang ditambahkan ke dalam air Ciater adalah sebesar $0,398/0,96 = \mathbf{0,4145 \text{ mL}}$ (atau sekitar 9 tetes).

Berikut adalah tabel yang merangkum perhitungan di atas:

Tabel 1 Perhitungan Penambahan Volume Asam Sulfat ke Dalam Air Ciater

pH target	Penambahan volume asam sulfat
2	0,4126 mL
1	0,4134 mL
0,7	0,4145 mL

Namun pada kenyataannya, pada saat peneliti melakukan running di laboratorium, jumlah asam sulfat yang digunakan untuk mencapai pH yang diinginkan tidaklah sekecil volume asam sulfat hasil perhitungan. Berikut adalah tabel hasil penambahan asam sulfat pada keadaan sesungguhnya:

Tabel 2 Penambahan Volume Asam Sulfat pada Eksperimen

pH target	Penambahan volume asam sulfat
2	2 mL
1	40 mL
0,7	80 mL

Perbedaan hasil perhitungan dan hasil eksperimen kemungkinan besar disebabkan oleh banyaknya kehadiran impurities pada air Ciater. Salah satunya adalah Aluminium yang memiliki sifat amfoter, yakni dapat bersifat basa dan asam pada berbagai kondisi. Sifat ini mengakibatkan sulitnya larutan mengalami penurunan pH, sehingga membutuhkan asam sulfat dalam jumlah besar untuk melewati kesetimbangan amfoter tersebut.

1.4 Tegangan Permukaan

Dengan menggunakan bantuan piknometer, diperoleh data massa jenis air Ciater sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\text{massa air Ciater}}{\text{volume piknometer}} = \frac{(395,03 - 233,19)\text{gram}}{10\text{mL}} = 16,184\text{gram/mL}$$

Dengan persamaan yang sama, massa jenis dari asam sulfat adalah:

$$\rho = \frac{(394,69 - 233,19)\text{gram}}{10\text{mL}} = 16,15\text{gram/mL}$$

Melalui metode pipa kapiler, diperoleh besar tegangan permukaan dari air Ciater adalah:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{1}{2} r h \rho g = \frac{1}{2} (0,05\text{cm})(0,7\text{cm})(16,184\text{g/mL})(980,65\text{cm/s}^2) \\ &= 277,74 \text{ dyne/cm}\end{aligned}$$

Sementara tegangan permukaan dari asam sulfat adalah:

$$\gamma = \frac{1}{2} (0,05\text{cm})(0,7\text{cm})(16,15\text{g/mL})(980,65\text{cm/s}^2) = 277,15 \text{ dyne/cm}$$

dimana r = jari-jari pipa kapiler

h = ketinggian cairan dalam pipa kapiler

ρ = densitas fluida

g = gravitasi

2. Perhitungan Preparasi Larutan Amonium Sulfat

Larutan amonium sulfat dibuat dengan melarutkan $\pm 4,00$ gram $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dalam 5 L air. Larutan ini memiliki pH ± 6 , untuk mencapai pH basa 11, ditambahkan larutan NaOH 10 M. Berikut adalah perhitungannya:

Karena pH awal amonium sulfat adalah sebesar 6, maka $[\text{H}^+] = 10^{-6}$ M, dengan jumlah mol asam awal sebesar $n = V \times M = 5 \text{ L} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{-6}$ mol asam. Kemudian mol basa NaOH yang ditambahkan adalah sebesar $n = V \times M = V \times 10\text{M} = 10 \text{ V mol}$.

Berikut adalah reaksi penetralannya:

Tabel 3 Reaksi Penetralan Asam Basa

$(\text{H}^+)(\text{X})$	$(\text{Y})(\text{OH}^-)$	H_2O	YX
$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$	10 V mol	-	-
$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$	$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$	$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$	$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$
-	$(10\text{V}) - (5 \times 10^{-6})$	$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$	$5 \times 10^{-6} \text{ mol}$

Mol asam di-nol kan karena pH target adalah sebesar 11, hal ini berarti yang menjadi pengontrol keasaman bukan lagi ion H^+ , melainkan ion OH^- ; pH = 11, maka pOH = 3.

Sesuai dengan hasil reaksi diatas, maka mol basa yang tersisa adalah sebesar $(10\text{V}) - (5 \times 10^{-6})$ mol, berarti molaritasnya adalah:

$$M = \frac{(10\text{V}) - (5 \times 10^{-6}) \text{ mol}}{V + 5 \text{ liter}} \quad (1.2)$$

dimana molaritas target adalah konsentrasi OH^- sebesar 10^{-3}M . Dengan mensubstitusikan harga OH^- ke dalam persamaan, diperoleh nilai V sebesar $5,0055 \times 10^{-4} \text{ Liter} = 0,50 \text{ mL}$.

Beberapa asumsi yang digunakan dalam penyelesaian adalah:

1. Volume $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 4 gram tidak signifikan terhadap keseluruhan volume
2. Penentuan pH awal sebesar 6 menggunakan pH meter, pH meter dianggap telah mendeteksi seluruh ion H^+ dalam larutan.
3. pH=6 adalah hasil hidrolisis $(\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{SO}_4)$, yang tidak memperhitungkan konstanta disosiasi dari basa, sehingga molaritas asam sebesar 10^{-6} M

merupakan **mol asam tersisa dibagi volume total**. Maka yang bereaksi dengan NaOH adalah sisa mol asam ini.

4. NaOH yang ditambahkan adalah 100% murni.
5. Reaksi yang berlangsung adalah reaksi volumetrik, tidak terjadi penyusutan ataupun ekspansi volume akibat pengaruh *intermolecular forces*.



LAMPIRAN 2

2. Data Pengamatan Perubahan Konsentrasi Amonia

2.1 Variasi pH absorben 2

Berat ammonium sulfat tertimbang : 4,02 gram

pH sebelum penambahan NaOH : 6,02

Tabel 4 Data Pengamatan pada pH Absorben 2

Laju alir 5 Lpm				
Lama sirkulasi	Data alat	Pengenceran	Hasil	Satuan
0	33,3	5	166,5	ppm
30	30,0	5	150	ppm
60	28,6	5	143	ppm
90	27,7	5	138,5	ppm
120	24,3	5	121,5	ppm

	pH awal	pH akhir
Ammonium Sulfat	11,00	11,00
Air Ciater	2,00	1,99

2.2 Variasi pH absorben 1

2.2.1 Laju alir amonia 5 Lpm

Berat ammonium sulfat tertimbang : 4,03 gram

pH sebelum penambahan NaOH : 6,03

Tabel 5 Data Pengamatan pada pH absorben 1 Laju alir 5 Lpm

Laju alir 5 Lpm				
Lama sirkulasi	Data alat	Pengenceran	Hasil	Satuan
0	33,5	5	167,5	ppm
30	31,6	5	158	ppm
60	28,8	5	144	ppm
90	25,8	5	129	ppm
120	23,3	5	116,5	ppm

	pH awal	pH akhir
Ammonium Sulfat	11,00	10,98
Air Ciater	1,00	1,23

2.2.2 Laju alir amonia 4 Lpm

Berat ammonium sulfat tertimbang : 4,086 gram

pH sebelum penambahan NaOH : 5,97

Tabel 6 Data Pengamatan pada pH absorben 1 Laju alir 4 Lpm

Laju alir 4 Lpm				
Lama sirkulasi	Data alat	Pengenceran	Hasil	Satuan
0	34,2	5	171	ppm
30	32,0	5	160	ppm
60	31,4	5	157	ppm
90	27,8	5	139	ppm
120	24,5	5	122,5	ppm

	pH awal	pH akhir
Ammonium Sulfat	11,00	10,98
Air Ciater	1,00	1,20

2.2.3 Laju alir amonia 3 Lpm

Berat ammonium sulfat tertimbang : 4,002 gram

pH sebelum penambahan NaOH : 6,00

Tabel 7 Data Pengamatan pada pH absorben 1 Laju alir 3 Lpm

Laju alir 3 Lpm				
Lama sirkulasi	Data alat	Pengenceran	Hasil	Satuan
0	33,5	5	167,5	ppm
30	32,4	5	162	ppm
60	31,1	5	155,5	ppm
90	28,0	5	140	ppm
120	24,7	5	123,5	ppm

	pH awal	pH akhir
Ammonium Sulfat	11,00	10,97
Air Ciater	1,00	1,19

2.3 Variasi pH absorben 0,7

Berat ammonium sulfat tertimbang : 4,03 gram

pH sebelum penambahan NaOH : 6,03

Tabel 8 Data Pengamatan pada pH absorben 0,7

Laju alir 5 Lpm				
Lama sirkulasi	Data alat	Pengenceran	Hasil	Satuan
0	33,9	5	166,5	ppm
30	30,0	5	150	Ppm
60	28,6	5	143	Ppm
90	21,0	5	138,5	Ppm
120	19,2	5	121,5	ppm

	pH awal	pH akhir
Ammonium Sulfat	11,10	10,93
Air Ciater	0,70	1,19

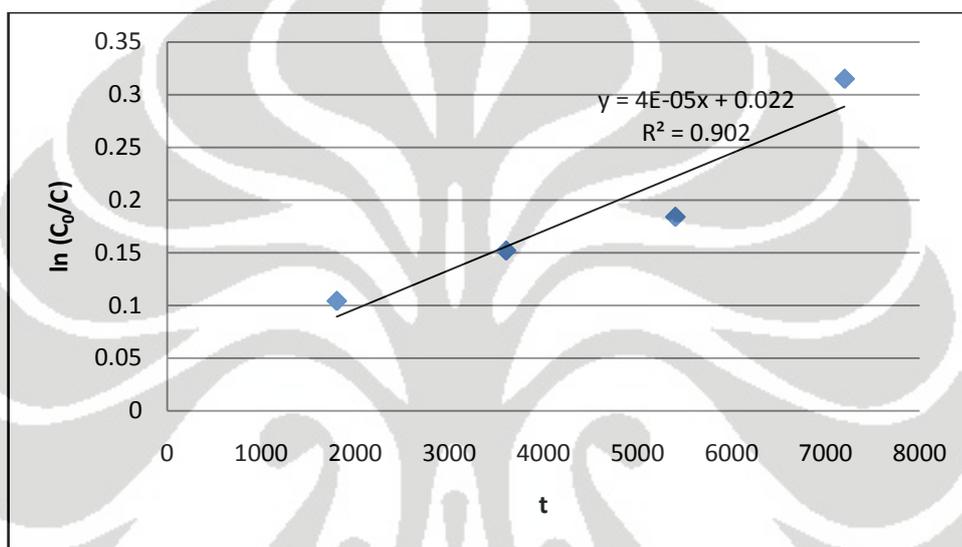
3. Perhitungan *Slope* Perubahan Konsentrasi terhadap Waktu

Untuk menghitung koefisien perpindahan massa (k), diperlukan *slope* dari perubahan konsentrasi amonia terhadap waktu. *Slope* ini diperoleh dengan memplot grafik $\ln C_0/C$ terhadap waktu (Persamaan 3.5). Berikut adalah tabel data hasil pehitungan $\ln C_0/C$, serta grafik hubungan $\ln C_0/C$ vs t .

3.1 Variasi pH absorben 2

Tabel 9 Perhitungan *Slope* $\Delta[\text{NH}_3]$ pada pH Absorben 2

Laju alir 5 Lpm			
Waktu (sec)	C_0	C	$\ln C_0/C$
0	166,5		
1800		150	0,10436
3600		143	0,152151
5400		138,5	0,184125
7200		121,5	0,315081



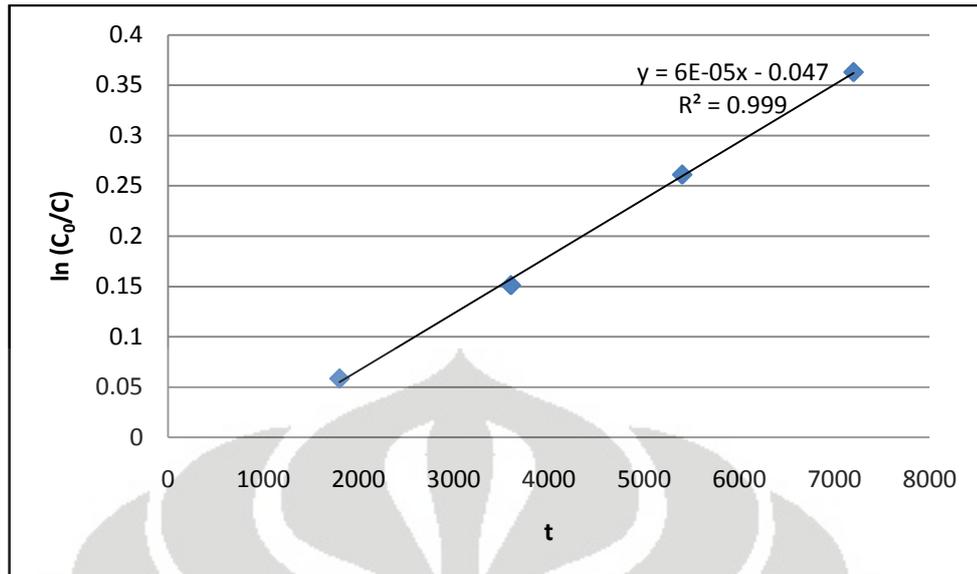
Gambar 1 Variasi $\ln(C_0/C)$ terhadap Waktu pada pH Absorben 2

3.2 Variasi pH absorben 1

3.2.1 Laju alir amonia 5 Lpm

Tabel 10 Perhitungan *Slope* $\Delta[\text{NH}_3]$ pada pH Absorben 1 Laju Alir 5 Lpm

Laju alir 5 Lpm			
Waktu (sec)	C_0	C	$\ln C_0/C$
0	167,5		
1800		158	0,058388
3600		144	0,15117
5400		129	0,261171
7200		116,5	0,363092

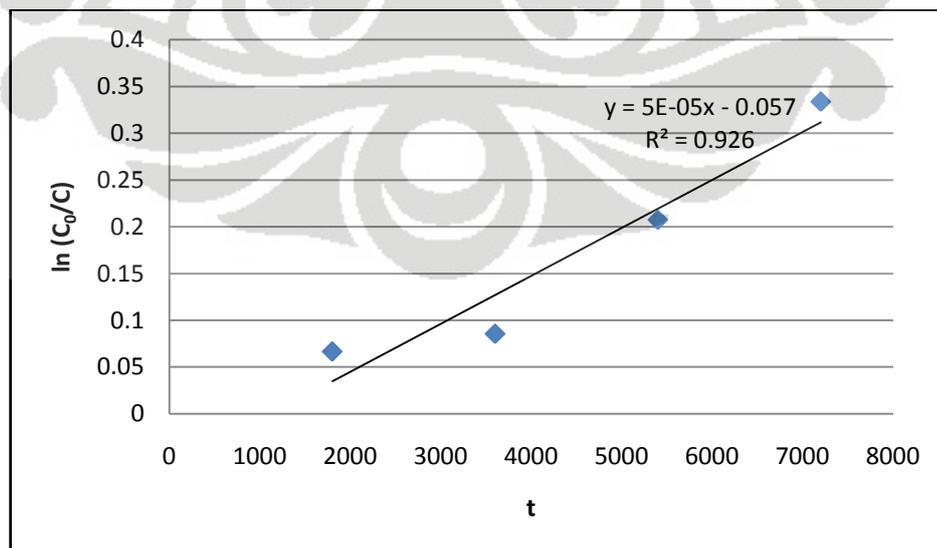


Gambar 2 Variasi $\ln(C_0/C)$ terhadap Waktu pada pH Absorben 1 Laju Alir 5 Lpm

3.2.2 Laju alir amonia 4 Lpm

Tabel 11 Perhitungan *Slope* $\Delta[\text{NH}_3]$ pada pH Absorben 1 Laju Alir 4 Lpm

Laju alir 4 Lpm			
Waktu (sec)	C ₀	C	ln C ₀ /C
0	171		
1800		160	0,06649
3600		157	0,085418
5400		139	0,20719
7200		122,5	0,333553

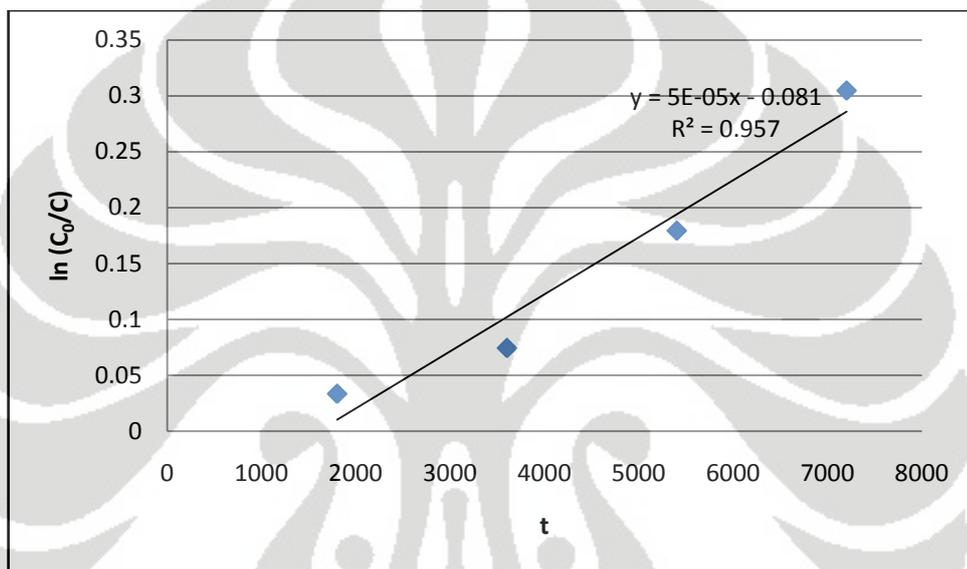


Gambar 3 Grafik $\ln(C_0/C)$ vs t pada pH Absorben 2 Laju Alir 4 Lpm

3.2.3 Laju alir amonia 3 Lpm

Tabel 12 Perhitungan *Slope* $\Delta[\text{NH}_3]$ pada pH Absorben 1 Laju Alir 3 Lpm

Laju alir 3 Lpm			
Waktu (sec)	C_0	C	$\ln C_0/C$
0	167,5		
1800		162	0,033387
3600		155,5	0,074338
5400		140	0,179341
7200		123,5	0,304742

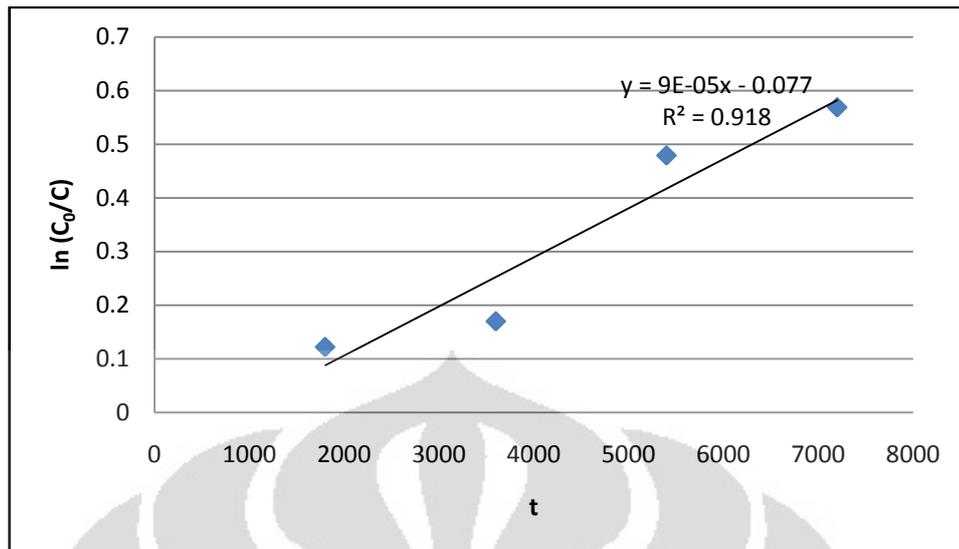


Gambar 4 Variasi $\ln(C_0/C)$ terhadap Waktu pada pH Absorben 1 Laju Alir 3 Lpm

3.3 Variasi pH absorben 0,7

Tabel 13 Perhitungan *Slope* $\Delta[\text{NH}_3]$ pada pH Absorben 0,7

Laju alir 5 Lpm			
Waktu (sec)	C_0	C	$\ln C_0/C$
0	169,5		
1800		150	0,122218
3600		143	0,170008
5400		105	0,478893
7200		96	0,568505



Gambar 5 Variasi $\ln (C_0/C)$ terhadap Waktu pada pH Adsorben 0,7

4. Koefisien Perpindahan Massa (k)

Koefisien perpindahan massa diperoleh melalui persamaan berikut:

$$k = \frac{\text{slope} \times V_{\text{umpan}}}{A_m}$$

dimana

$$A_m = \pi \times n_f \times L_f \times d_f$$

Keterangan:

A_m = luas permukaan membran (cm^2)

n_f = jumlah membran = 16

L_f = panjang membran (cm) = 47 cm

d_f = diameter membran (cm) = 0,2 cm

Sehingga,

$$A_m = 3,14 \times 16 \times 47\text{cm} \times 0,2\text{cm} = 472,256\text{cm}^2$$

4.1 Variasi pH adsorben 2

$$k = \frac{4 \times 10^{-5}/\text{s} \times 5000\text{cm}^3}{472,256\text{cm}^2} = 0,000423499\text{cm}/\text{s}$$

4.2 Variasi pH absorben 1

a. Laju alir amonia 5 Lpm

$$k = \frac{6 \times 10^{-5}/s \times 5000cm^3}{472,256cm^2} = 6,35249 \times 10^{-4}cm/s$$

b. Laju alir amonia 4 Lpm

$$k = \frac{5 \times 10^{-5}/s \times 5000cm^3}{472,256cm^2} = 5,29347 \times 10^{-4}cm/s$$

c. Laju alir amonia 3 Lpm

$$k = \frac{5 \times 10^{-5}/s \times 5000cm^3}{472,256cm^2} = 5,29347 \times 10^{-4}cm/s$$

4.3 Variasi pH absorben 0,7

$$k = \frac{9 \times 10^{-5}/s \times 5000cm^3}{472,256cm^2} = 9,52873 \times 10^{-4}cm/s$$

5. Perhitungan Fluks

Fluks dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Fluks = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{A_m \times t}$$

dimana

C_0 = konsentrasi awal amonia (ppm atau mg/dm^3)

C_t = konsentrasi amonia pada detik ke 7200 (ppm)

V = volume limbah amonium sulfat (dm^3)

t = lama sirkulasi (7200 sec)

A_m = luas permukaan membran (cm^2)

Berikut adalah contoh hasil perhitungan untuk masing-masing variasi pH dan laju alir serta tabel lengkap hasil perhitungannya:

5.1 Variasi pH absorben 2

$$Fluks = \frac{45mg/dm^3 \times 5dm^3}{472,256cm^2 \times 7200sec} = 6,6172 \times 10^{-5}mg/cm^2sec$$

Tabel 14 Hasil Perhitungan Fluks pada variasi pH absorben 2

Waktu	Konsentrasi	C ₀ -C _t	Fluks
0	166,5		
1800	150	16,5	9,70519×10 ⁻⁵
3600	143	23,5	6,91127×10 ⁻⁵
5400	138,5	28	5,4898×10 ⁻⁵
7200	121,5	45	6,61717×10 ⁻⁵

5.2 Variasi pH absorben 1

a. Laju alir amonia 5 Lpm

$$Fluks = \frac{51mg/dm^3 \times 5dm^3}{472,256cm^2 \times 7200sec} = 7,4995 \times 10^{-5} mg/cm^2sec$$

Tabel 15 Hasil Perhitungan Fluks pada variasi pH absorben 1 Laju Alir 5 Lpm

Waktu	Konsentrasi	C ₀ -C _t	Fluks
0	167,5		
1800	158	9,5	5,58784×10 ⁻⁵
3600	144	23,5	6,91127×10 ⁻⁵
5400	129	38,5	7,54848×10 ⁻⁵
7200	116,5	51	7,49946×10 ⁻⁵

b. Laju alir amonia 4 Lpm

$$Fluks = \frac{48,5mg/dm^3 \times 5dm^3}{472,256cm^2 \times 7200sec} = 7,132 \times 10^{-5} mg/cm^2sec$$

Tabel 16 Hasil Perhitungan Fluks pada variasi pH absorben 1 Laju Alir 4 Lpm

Waktu	Konsentrasi	C ₀ -C _t	Fluks
0	171		
1800	160	11	6,4701×10 ⁻⁵
3600	157	14	4,1174×10 ⁻⁵
5400	139	32	6,2741×10 ⁻⁵
7200	122,5	48,5	7,1318×10 ⁻⁵

c. Laju alir amonia 3 Lpm

$$Fluks = \frac{44mg/dm^3 \times 5dm^3}{472,256cm^2 \times 7200sec} = 6,4701 \times 10^{-5} mg/cm^2sec$$

Tabel 17 Hasil Perhitungan Fluks pada variasi pH absorben 1 Laju Alir 3 Lpm

Waktu	Konsentrasi	C_0-C_t	Fluks
0	167,5		
1800	162	5,5	$3,23506 \times 10^{-5}$
3600	155,5	12	$3,52916 \times 10^{-5}$
5400	140	27,5	$5,39177 \times 10^{-5}$
7200	123,5	44	$6,47013 \times 10^{-5}$

5.3 Variasi pH absorben 0,7

$$\text{Fluks} = \frac{73,5 \text{ mg/dm}^3 \times 5 \text{ dm}^3}{472,256 \text{ cm}^2 \times 7200 \text{ sec}} = 1,081 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^2 \text{ sec}$$

Tabel 18 Hasil Perhitungan Fluks pada variasi pH absorben 0,7

Waktu	Konsentrasi	C_0-C_t	Fluks
0	169,5		
1800	150	19,5	0,000114698
3600	143	26,5	$7,79356 \times 10^{-5}$
5400	105	64,5	0,000126462
7200	96	73,5	0,000108081

6. Perhitungan Bilangan Sherwood

Bilangan Sherwood dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Sh = k \frac{d_e}{D}$$

dimana

$$d_e = \frac{d_p^2 - Nd_f^2}{d_p + Nd_f}$$

$$d_e = \frac{1,6^2 - 16(0,2)^2}{1,6 + 16(0,2)} = 0,4 \text{ cm}$$

Keterangan:

Sh = Bilangan Sherwood

k = Koefisien perpindahan massa (cm/sec)

D = Difusivitas ammonia (cm²/sec) = $1,76 \times 10^{-5}$ cm²/sec

d_e = Diameter ekuivalen (cm)

N = Jumlah serat dalam modul

d_f = Diameter serat (cm)

d_p = Diameter selongsong (cm)

Berikut adalah hasil perhitungannya:

6.1 Variasi pH absorben 2

$$Sh = 0,0004235 \text{ cm/sec} \frac{0,4 \text{ cm}}{1,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}} = 9,625$$

6.2 Variasi pH absorben 1

a. Laju alir amonia 5 Lpm

$$Sh = 0,0006353 \text{ cm/sec} \frac{0,4 \text{ cm}}{1,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}} = 14,4$$

b. Laju alir amonia 4 Lpm

$$Sh = 0,0005294 \text{ cm/sec} \frac{0,4 \text{ cm}}{1,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}} = 12,01$$

c. Laju alir amonia 3 Lpm

$$Sh = 0,0005294 \text{ cm/sec} \frac{0,4 \text{ cm}}{1,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}} = 12,01$$

6.3 Variasi pH absorben 0,7

$$Sh = 0,0009529 \text{ cm/sec} \frac{0,4 \text{ cm}}{1,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}} = 21,7$$

7. Perhitungan Efisiensi Pemisahan

Efisiensi dari pemisahan amonia dari limbah dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$R\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

dimana C_0 = Konsentrasi awal limbah amonia

C_t = Konsentrasi amonia pada saat t

Berikut adalah contoh perhitungan efisiensi pemisahan pada pH absorben 2 dan laju alir 5 Lpm pada waktu ke 7200 detik:

$$R\% = \frac{166,5 - 121,5}{166,5} \times 100\% = 27,027\%$$

7.1 Hasil Perhitungan Efisiensi pada Variasi pH absorben 2

Tabel 19 Efisiensi Pemisahan Amonia pada pH absorben 2

Waktu	Konsentrasi	Efisiensi
0	166,5	
1800	150	9,90991
3600	143	14,11411
5400	138,5	16,81682
7200	121,5	27,02703

7.2 Hasil Perhitungan Efisiensi pada Variasi pH absorben 1

a. Laju alir 5 Lpm

Tabel 20 Efisiensi Pemisahan Amonia pada pH absorben 1 Laju Alir 5 Lpm

Waktu	Konsentrasi	Efisiensi
0	167,5	
1800	158	5,671642
3600	144	14,02985
5400	129	22,98507
7200	116,5	30,44776

b. Laju alir 4 Lpm

Tabel 21 Efisiensi Pemisahan Amonia pada pH absorben 1 Laju Alir 4 Lpm

Waktu	Konsentrasi	Efisiensi
0	171	
1800	160	6,432749
3600	157	8,187135
5400	139	18,71345
7200	122,5	28,36257

c. Laju alir 3 Lpm

Tabel 22 Efisiensi Pemisahan Amonia pada pH absorben 1 Laju Alir 3 Lpm

Waktu	Konsentrasi	Efisiensi
0	167,5	
1800	162	3,283582
3600	155,5	7,164179
5400	140	16,41791
7200	123,5	26,26866

7.3 Hasil Perhitungan Efisiensi pada Variasi pH absorben 0,7

Tabel 23 Efisiensi Pemisahan Amonia pada pH absorben 0,7

Waktu	Konsentrasi	Efisiensi
0	169,5	
1800	150	11,50442
3600	143	15,63422
5400	105	38,0531
7200	96	43,36283

8. Perhitungan Bilangan Reynold

Bilangan Reynold dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Re = \frac{d_e \times v}{\mu_{kinematis}}$$

dimana

d_e = Diameter ekivalen (cm)

v = Kecepatan aliran (cm/sec)

μ = Viskositas kinematis (cm²/sec) = $8,9 \times 10^{-3}$ cm²/s

Nilai d_e telah didapatkan dari perhitungan sebelumnya, yakni sebesar 0,4 cm. Sementara kecepatan aliran yang dimaksudkan adalah kecepatan dari aliran yang tidak melewati membran, yakni aliran limbah amonia, yang diperoleh dengan persamaan di bawah ini:

$$v = \frac{Q}{A_{flow}}$$

dimana

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times \pi \times (d_p^2 - nd_f^2)$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times \pi \times (1,6^2 - 2 \times 0,2^2) = 1,5072cm^2$$

Sehingga

- Kecepatan aliran untuk laju alir 5 Lpm

$$v = \frac{5000cm^3/60sec}{1,5072cm^2} = 55,29cm/sec$$

- Kecepatan aliran untuk laju alir 4 Lpm

$$v = \frac{4000cm^3/60sec}{1,5072cm^2} = 44,29cm/sec$$

- Kecepatan aliran untuk laju alir 3 Lpm

$$v = \frac{3000cm^3/60sec}{1,5072cm^2} = 33,29cm/sec$$

Berikut adalah hasil perhitungan bilangan Reynold:

- a. Laju alir amonia 5 Lpm

$$Re = \frac{0,4cm \times 55,29cm/sec}{8,9 \times 10^{-3}cm^2/sec} = 2480$$

- b. Laju alir amonia 4 Lpm

$$Re = \frac{0,4cm \times 44,29cm/sec}{8,9 \times 10^{-3}cm^2/sec} = 1990$$

- c. Laju alir amonia 3 Lpm

$$Re = \frac{0,4cm \times 33,29cm/sec}{8,9 \times 10^{-3}cm^2/sec} = 1490$$

Dari seluruh tahapan perhitungan di atas, data-data yang diperoleh dapat dirangkum menjadi satu tabel informasi di bawah ini:

Tabel 24 Ringkasan Perhitungan pada Proses Pemisahan Amonia dari Limbah

	pH 2	pH 1			pH 0,7
		Flow 5 Lpm	Flow 4 Lpm	Flow 3 Lpm	
<i>Slope</i>	4×10^{-5}	6×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	9×10^{-5}
<i>k</i>	$4,235 \times 10^{-4}$	$6,353 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$9,529 \times 10^{-4}$
Fluks	$6,62 \times 10^{-5}$	$7,499 \times 10^{-5}$	$7,132 \times 10^{-5}$	$6,47 \times 10^{-5}$	$1,081 \times 10^{-4}$
Sherwood	9,625	14,4	12,0	12,0	21,7
Reynold	2480	2480	1990	1490	2480

