



**LAPORAN SKRIPSI – TK141581
PENGEMBANGAN PROSES REGENERASI
ABSORBEN NaOH DI DALAM UNIT *ACID*
GAS REMOVAL MENGGUNAKAN
MEMBRANE ELECTROLYSIS SISTEM
KONTINU**

Oleh:

Zalza Lola Rinanda

NRP. 2313100013

Muhammad Fattah Romdhoni

NRP. 2313100090

Dosen Pembimbing

Fadlilatul Taufany S.T., Ph.D.

NIP. 19810713 200501 1 001

Dr. Yeni Rahmawati S.T., M.T.

NIP. 19761020 200501 2 001

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



**FINAL PROJECT – TK145181
DEVELOPMENT PROCESS OF NAOH
ABSORBENT REGENERATION IN ACID
GAS REMOVAL UNIT USING MEMBRANE
ELECTROLYSIS IN CONTINUOUS SYSTEM**

Proposed by:

Zalza Lola Rinanda

NRP. 2313100013

Muhammad Fattah Romdhoni

NRP. 2313100090

Advisor

Fadlilatul Taufany S.T., Ph.D.

NIP. 19810713 200501 1 001

Dr. Yeni Rahmawati S.T., M.T.

NIP. 19761020 200501 2 001

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN
PENGEMBANGAN PROSES REGENERASI ABSORBEN
NaOH DI DALAM UNIT *ACID GAS REMOVAL*
MENGUNAKAN *MEMBRANE ELECTROLYSIS* SISTEM
KONTINU


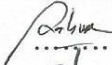


Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik
Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Zalza Lola Rinanda **2313100013**

Muhammad Fattah Romdhoni **2313100090**

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir :

1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D. .....(pembimbing)
2. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. .....(pembimbing)
3. Prof Dr.Ir.Ali Altway, M.S. .....(Penguji I)
4. Dr.Ir Susianto, DEA .....(Penguji II)

Surabaya

Juli, 2017



**PENGEMBANGAN PROSES REGENERASI
ABSORBENT NaOH DI DALAM UNIT ACID GAS
REMOVAL MENGGUNAKAN MEMBRANE
ELECTROLYSIS SISTEM KONTINU**

Nama : 1. Zalza Lola Rinanda
2. Muhammad Fattah Romdhoni
NRP : 1. 2313100013
2. 2313100090
Pembimbing : 1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
2. Dr. Yeni Rahmawati S.T., M.T.

ABSTRAK

Salah satu proses untuk meregenerasi unit absorben yang menggunakan NaOH dapat dilakukan dengan *membrane electrolysis*. Namun, proses tersebut masih menggunakan sistem batch dengan voltase yang besar. Oleh sebab itu diperlukan sebuah inovasi penggunaan membrane elektrolisa menggunakan sistem seri kontinu dengan mengurangi jarak elektroda sehingga didapatkan regenerasi NaOH yang efisien. Metode penelitian ini menggunakan *membrane electrolysis* dengan jumlah sel sebanyak 4 buah dimana feed anolit berupa larutan Na₂CO₃ 0.2 M dan NaOH 0.1 M dan feed katolit berupa *DM Water* dengan laju aliran bersifat counter current. Variabel kondisi operasi berupa penambahan larutan elektrolit pada katolit berupa NaOH dengan konsentrasi 0.05M, 0.1M dan 0.3M serta larutan elektrolit pada anolit berupa HCl. jarak elektroda 1 cm dan 3 cm. laju alir 20 ml/menit, 40 ml/menit, dan 60 ml/menit. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa jarak elektroda mempengaruhi kenaikan *current density* dan % konversi dari proses yang ada sedangkan kenaikan *flowrate* menurunkan % konversi namun penurunan *current density* lebih rendah. Kemudian elektrolit pada katoda mempengaruhi proses awal dengan mempercepat kenaikan arus sedangkan elektrolit HCl pada anoda menghasilkan % konversi lebih baik namun mengakibatkan pitting break pada elektroda. Hasil optimal didapatkan pada jarak 1 cm dengan laju alir 60

ml/menit dan tanpa larutan elektrolit dengan kebutuhan energi 0.75 M/kw serta biaya produksi NaOH sebesar Rp 13.590/kg.

Kata Kunci: Acid Gas Removal, Regenerasi NaOH, Membran Electrolysis Sistem Kontinu

**DEVELOPMENT PROCESS OF NAOH ABSORBENT
REGENERATION IN ACID GAS REMOVAL UNIT
USING MEMBRANE ELECTROLYSIS IN
CONTINUOUS SYSTEM**

Name : 1. **Zalza Lola Rinanda**
2. **Muhammad Fattah Romdhoni**

NRP : 1. **2313100013**
2. **2313100090**

Advisor : 1. **Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.**
2. **Dr. Yeni Rahmawati S.T., M.T.**

ABSTRACT

There are many ways to regenerate absorbant using Sodium Hydroxide (NaOH), and one of them is using membrane electrolysis. However, those process that had already done was using batch system and high amount of voltage. Because of that, an innovation is needed, which is using series continuous system and reducing each electrode spaces, so NaOH regeneration's result will be optimum. This experiment uses 4 cells of membrane electrolysis which is arranged in series continuous system, using Na₂CO₃ 0.2 M and NaOH 0.1 M solutions as anolyte feed and DM water as chatolyte feed, which ais arranged in counter current flow. Operating condition variables such as NaOH electrolyte 0.05M, 0.1M and 0.3M solution addition in chatolyte, and HCl addition in anolyte; electrode spaces for 1 cm and 3 cm; and last, flowrate variables in 20 ml/minute, 40 ml/minute, dan 60 ml/minute. The results from this experiment show that electrode spaces affect the increasing in current density and conversion percentage from the process, while the rising in flowrate amount lower the conversion percentage, however the decreasing in current density will be lower. Then the electrolyte addition in chatode affects the initial process by fasten the increasing of electrical current, in the other hand the addition of electrolyte (HCl) in anode generates better coversion percentage,

unfortunately this can cause pitting break in electrode. The optimum result is obtained by 1cm space, using flowrate variable 60ml/minute and without adding electrolyte solution. This process requires energy in the amount of 0.75 M/kW and NaOH production cost for Rp 13.590/kg.

Keyword: Acid Gas Removal, NaOH Regeneration, Series Continuous Membrane Electrolysis

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul: **“PENGEMBANGAN PROSES REGENERASI ABSORBENT NaOH DI DALAM UNIT ACID GAS REMOVAL MENGGUNAKAN MEMBRANE ELECTROLYSIS SISTEM KONTINU”** Laporan skripsi ini disusun untuk melengkapi persyaratan penelitian skripsi dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang Studi S1 Teknik Kimia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini dengan kerendahan hati kami menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga kami yang telah memberikan segalanya yang tak mungkin tercantumkan dalam tulisan ini.
 2. Bapak Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 1, Ibu Dr. Yeni Rahmawati S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 serta Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan Bapak Prof. Dr. Ir. Nonot Soewarno, M.Eng., selaku Guru Besar Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran, bimbingan, saran dan dukungan dalam menyelesaikan tugas akhir kami.
 3. Bapak Juwari S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI - ITS
 4. Bapak Ibu Dosen Pengajar serta seluruh staff jurusan Teknik Kimia FTI – ITS
 5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Kimia ITS yang senantiasa memberikan *support* dalam pengerjaan proposal skripsi ini.
 6. Rekan-rekan Laboratorium Perpanmas 15/16 dan 16/17 tercinta atas dukungan dan bantuannya selama penyusunan laporan skripsi kami
 7. Semua pihak yang telah membantu merajut kelengkapan dari laporan ini yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.
- Kami menyadari bahwa Laporan skripsi ini masih jauh dari sempurna, namun, kami tetap berharap semoga penelitian dalam skripsi ini dapat bermanfaat. Amin.

Surabaya, 10 Juli 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

COVER	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-4
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-5
1.4 Batasan Masalah.....	I-5
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
II.1 Elektrolisa.....	II-1
II.2 Elektrolisis Membran.....	II-2
II.3 Karbondioksida (CO ₂).....	II-6
II.4 Natrium Hidroksida.....	II-7
II.5 Absorber.....	II-8
II.6 Acid Gas Removal.....	II-9
II.7 Penelitian Terdahulu yang Bersangkutan.....	II-10
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	III-1
III.1. Deskripsi Penelitian.....	III-1
III.2. Bahan dan Peralatan Penelitian.....	III-1

III.2.1. Bahan Penelitian.....	III-1
III.2.2 Peralatan Penelitian.....	III-1
III.3 Variabel Penelitian.....	III-3
III.4. Prosedur Penelitian	III-3
III.4.1 Tahap Optimasi Membrane Electrolysis.....	III-3
III.5 Flowchart Penelitian.....	III-5
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	IV-1
IV.1 Karakteristik Arus pada setiap <i>Cell</i>	IV-3
IV.2 Pengaruh Flowrate terhadap <i>Persen Recovery</i> dan <i>Current Density</i> Rata – Rata.....	IV-5
IV.3 pengaruh konsentrasi elektrolit terhadap <i>current</i> <i>density</i> Rata-Rata dan percent recovery	IV-7
IV.4 pengaruh konsentrasi HCl pada anoda terhadap <i>Current</i> <i>Density</i> Rata – Rata dan percent recovery	IV-9
IV.5 pengaruh jarak terhadap <i>Current Density</i> Rata – Rata dan percent recovery	IV-11
IV.6 Optimasi.....	IV-12
IV.7 Biaya Operasi	IV-15
BAB V PENUTUP.....	V-1
V.1 Kesimpulan	V-1
V.2 Saran.....	V-2
DAFTAR PUSTAKA.....	xiv
APPENDIKS A Pengamatan Arus pada setiap variabel.....	A-1
APPENDIKS B Pengamatan pH dan Hasil percent Recovery pada setiap variabel.....	B-1
APPENDIKS C PERHITUNGAN Percent Recovery.....	C-1

APPENDIKS D Perhitungan Current Density D-2
APPENDIKS E PERHITUNGAN Energi dan biaya Produksi..... E-1
APPENDIKS F Grafik Arus tiap Cell.....F-1

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Data larutan Garam Natrium.....	II-3
Tabel II. 2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida Dalam Proses Industri	II-6
Tabel II. 3 Penilaian absorban	II-10
Tabel II. 4 Penelitian Sebelumnya	II-10

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Gambar proses elektrolisa membrane dari NaCl	II-3
Gambar II. 2 Process Penghilangan Gas Asam.....	II-9
Gambar III. 1 Skema Alat Percobaan.....	III-2
Gambar III. 2 Flowchart Penelitian <i>membrane electrolysis</i>	III-5
Gambar IV. 1 Grafik <i>Current Density</i> terhadap waktu pada setiap <i>cell</i> dengan <i>flowrate</i> 40 ml/menit pada masing masing <i>feed</i> , tanpa elektrolit, dan jarak elektroda 3 cm anoda dan katoda.	IV-3
Gambar IV. 2 Grafik Pengaruh laju alir pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan non elektrolit (a) <i>Current Density</i> terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu	IV-6
Gambar IV. 3 Grafik Pengaruh konsentrasi elektrolit pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan laju alir 40 ml/menit (a) <i>Current Density</i> Rata-Rata terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu.....	IV-8
Gambar IV. 4 Grafik Pengaruh konsentrasi elektrolit HCl pada anoda pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan laju alir 40 ml/menit (a) <i>Current Density</i> Rata-Rata terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu	IV-10
Gambar IV. 5 Grafik Pengaruh jarak elektroda pada kondisi Operasi jarak non elektrolit dan laju alir 40 ml/menit (a) <i>Current density</i> terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu.....	IV-11
Gambar IV. 6 Grafik optimasi pada kondisi jarak 1 cm dan non elektrolit (a) <i>Current Density</i> terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu	IV-14
Gambar IV. 7 Efisiensi energy tiap variabel.....	IV-15
Gambar IV. 8 Biaya produksi 1 kg NaOH tiap variabel.....	IV-16

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Energi memiliki peran penting yang menunjang segala kegiatan manusia, mulai dari sektor industri, transportasi, rumah tangga, komersial, dan lainnya. Indonesia sendiri merupakan Negara terbesar dalam kebutuhan energi di Asia Tenggara yaitu sebesar 44% dari total kebutuhan energi di Asia Tenggara (Tempo,2016). Selama ini sumber energi yang paling banyak dimanfaatkan dalam pemenuhan kebutuhan masyarakat Indonesia adalah minyak bumi dan batubara yaitu sebesar masing masing 32% dan 23% dari total konsumsi pada 2014. (Sugiyono, 2016). Ketergantungan terhadap energi fosil terutama minyak bumi dalam pemenuhan konsumsi di dalam negeri masih tinggi yaitu sebesar 96% (minyak bumi 48%, gas 18% dan batubara 30%) dari total konsumsi (Sudirman Sugiyono, 2014). Kebutuhan energi ini akan semakin meningkat dari tahun ke tahun.

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut Indonesia memiliki potensi sumber energi yang besar baik dalam bidang gas alam maupun batubara Potensi Indonesia dalam gas alam terhitung besar Karena Indonesia memiliki banyak cadangan gas alam seperti cadangan gas alam di Pulau Natuna yang memiliki potensi sebesar 222 TSCF (Rinovsky,2010). Kemudian selain di Natuna, Indonesia juga memiliki cadangan gas alam ditempat lain seperti arun, kuala langsa dan sebagainya. Dimana pada umumnya cadangan gas alam yang dimiliki Indonesia memiliki kandungan CO₂ yang cukup besar. Seperti di Natuna yang memiliki kandungan CO₂ sebesar 71%, Arun alpha sebesar 13.76%, Belunai 28-31%, Kuala langsa 18-21%, Libo 8-22 %, Sumatera Selatan lebih dari 40% pada grup C, Jambi 3-57% (Satyana, 2007). Sedangkan untuk cadangan batubara di Indonesia memiliki potensi yang cukup besar di Kalimantan Timur sebesar 2 juta ton dan Sulawesi Selatan 2,6 juta ton. Melimpahnya produksi

batubara ini jika digunakan untuk memproduksi syngas akan menggantikan kebutuhan gas alam sedikitnya 4%.

Kedua produk tersebut baik gas alam maupun syngas memiliki kandungan CO₂ yang besar Sehingga perlu adanya pengoptimalan produksi gas alam dan syngas sebagai sumber energi yaitu dengan teknologi pemurnian gas alam (*Acid Gas Removal*) agar gas alam dapat memenuhi standar spesifikasi galam alam yang dapat ditransportasikan melalui pipa yaitu hanya mengandung CO₂ sebesar 2-3% (GPSA,2004).

Selain untuk memenuhi standar pipa gas alam, keberadaan gas CO₂ pada gas alam yang digunakan dalam dunia industri, seperti industri pengolahan minyak, dapat menyebabkan beberapa permasalahan antara lain; bersifar korosif apabila terdapat air sehingga dapat merusak perpipaan dan sistem utilitas pabrik (Kermani, 2003), selain itu keberadaan gas CO₂ didalam pipa mampu menyebabkan *freezing* akibat titik beku yang rendah dari CO₂, dan menurunkan nilai kalor (*heating value*) dari gas alam tersebut.

Dalam pemurnian CO₂ pada gas alam, pemilihan teknologi pemurnian haruslah tepat. Teknologi proses pemurnian CO₂ yang umum dilakukan dengan dua cara yaitu adsorber dan absorber. Namun dengan kondisi komposisi CO₂ yang tinggi maka menurut Kidney (2006) teknologi pengolahan yang tepat untuk gas reservoir di Indonesia adalah menggunakan teknologi absorpsi dengan pelarut amina untuk menghilangkan kandungan CO₂ yang ada di dalam gas. Sun (2015) juga menyebutkan bahwa teknik *acid gas removal* yang paling ekonomis adalah menggunakan absorpsi kimia dengan pelarut amina seperti *mono-ethanol-amine* (MEA), *Diethanolamine* (DEA), *Methyl diethanolamine* (MDEA). Namun selain memiliki banyak keuntungan, MEA memiliki beberapa kekurangan seperti tingkat volatilitas yang tinggi, korosif serta membutuhkan banyak energi untuk proses regenerasinya (Nguyen dkk, 2011; Wang dkk, 2010; Zhao dkk, 2011).

Untuk mengatasi permasalahan pada penggunaan pelarut amina Rahayaan (2015) mencari alternatif adsorben kimia lain yang bisa digunakan untuk memurnikan CO₂ dari gas alam dengan membandingkan kinerja zat kimia seperti NaOH, K₂CO₃, DEA, KOH, CaCO₃, Ca(OH)₂ dan Na₂CO₃ sebagai adsorben CO₂. Penggunaan senyawa logam alkali pada pemurnian CO₂ untuk mengikat reaksi pembentukan karbonat sebagai hasil samping dari reaksi pemurnian CO₂ (Kordylewski, Sawicka, dan Falkowski, 2013). Berdasarkan tinjauan beberapa parameter seperti % *Recovery*, Δ pH, *Max Power*, dan *Unit Operation Cost*. Berdasarkan parameter tersebut Rahayaan mendapatkan hasil bahwa NaOH memiliki nilai tertinggi dibanding adsorben lainnya. Hal ini menjadikan NaOH menjanjikan secara teknis maupun ekonomis dalam absorpsi CO₂. Kemudian bila dibandingkan dengan penggunaan pelarut MEA hasil proses dari biogas oleh NaOH tidak jauh berbeda. Hal ini didukung penelitian Tippayawong dan Thanompongchart pada tahun 2010 dimana kandungan CO₂ pada gas alam yang menggunakan NaOH sebagai adsorben memiliki kandungan gas alam keluaran sebesar 3.2% sedangkan bila menggunakan MEA sebesar 1.3%. Meskipun memiliki kemampuan yang tinggi dalam mengabsorpsi CO₂ proses regenerasi NaOH menurut Makhmoudkani (2009) membutuhkan energi yang besar dengan suhu hingga 900°C. Sehingga tidak ekonomis bila ditinjau dari proses regenerasinya, hal ini ditunjang oleh penelitian Boacocchi (2012) yang menyimpulkan bahwa regenerasi yang dilakukan ini tidak ekonomis karena produk dari absorpsi CO₂ menggunakan larutan NaOH adalah larutan Na₂CO₃ dan NaHCO₃ yang sulit diregenerasi.

Untuk menghasilkan proses regenerasi NaOH yang ekonomis, menurut Simon (2014) larutan *brine* yang terdiri dari NaCl, Na₂CO₃, dan NaHCO₃ dapat diregenerasi menjadi NaOH menggunakan *membrane electrolysis*. Namun, proses tersebut masih menggunakan *current density* yang tinggi, sehingga membutuhkan arus yang besar dalam proses regenerasi. Untuk

mensiasati *current density* yang tinggi dilakukan penambahan larutan elektrolit KCl ke dalam larutan garam alkali dimana berdasarkan penelitian Alvian (2016), didapatkan regenerasi NaOH sebesar 95% pada kondisi operasi, tegangan 15V, luas elektroda 18x8cm, temperatur *feed* 30°C, dan disertai penambahan larutan KCl 0,01M dengan waktu elektrolisis 60 menit.

Proses regenerasi NaOH yang dilakukan oleh Alvian (2016) masih menggunakan sistem batch. Penggunaan Sistem batch memiliki beberapa kekurangan antara lain, pertama bila digunakan dalam skala industry sistem batch akan membutuhkan volume dan ruang yang besar. kemudian voltase yang digunakan untuk memperoleh regenerasi sebesar 95% terhitung besar. Sebab pada umumnya untuk mergenerasi larutan garam menggunakan voltase rendah seperti pada industri pembentukan NaOH dari garam NaCl menggunakan voltase pada rentang 3-5 volt (Seko, 1972). Selain itu menggunakan larutan KCl memiliki beberapa masalah seperti terbentuknya gas klorida yang menjadi impuritis dari terbentuknya gas hydrogen serta ion kalium yang juga akan menjadi impurities pada produk NaOH. Selain penelitian yang dilakukan oleh Alvian, berdasarkan penelitian Simon (2014) mengenai pembentukan NaOH dari Na₂CO₃ didapatkan bahwa semakin besar nilai *current density* maka biaya untuk menghasilkan NaOH semakin besar selain itu nilai *current efficieny* proses tersebut masih pada rentang 0.5-0.6 dimana nilai *current efficiency* semakin rendah dengan bertambahnya nilai *current density*. Oleh sebab itu untuk menyelesaikan permasalahan tersebut diperlukan sebuah inovasi penggunaan membrane elektrolisa menggunakan sistem seri kontinu.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian regenerasi NaOH dari garam alkali yang merupakan produk dari absorpsi CO₂ menggunakan larutan NaOH saat ini masih menggunakan sistem batch dan konversi

menjadi NaOH masih belum mencapai 100% serta masih membutuhkan waktu yang lama. Hal ini memotivasi penulis untuk mengembangkan metode proses regenerasi NaOH dengan menggunakan proses kontinu dengan sistem seri agar diperoleh sistem regenerasi yang lebih optimum serta produk regenerasi dapat dimanfaatkan kembali untuk proses absorpsi.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variabel operasi seperti laju alir, penambahan larutan elektrolit NaOH di katoda atau HCl di anoda, serta jarak elektroda terhadap persen recovery NaOH, current density, energi, dan pH larutan katolit serta biaya produksi NaOH dari Natrium karbonat (Na_2CO_3).

I.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan antara lain:

1. Regenerasi garam alkali menggunakan membrane elektrolisa beroperasi secara kontinu
2. Jumlah membran pada penelitian ini berjumlah 4 buah dengan volume anoda *cell* masing-masing sebesar 1000 cm^3 dengan luas permukaan elektroda sebesar 117 cm^2
3. Proses regenerasi NaOH pada membran elektrolisa menggunakan aliran *counter current*.
4. Na_2CO_3 teknis digunakan sebagai feed analisa kemampuan membrane meregenerasi NaOH.

I.5 Manfaat Penelitian

1. Terdapatnya proses Acid Gas Removal dalam produksi gas alam yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Elektrolisa

Elektrokimia adalah ilmu yang mempelajari akibat transfer muatan listrik dari satu fasa ke fasa lain. Elektrokimia juga bisa diartikan sebagai studi tentang hubungan antara perubahan kimia dan kerja listrik. Elektrokimia dipelajari melalui penggunaan sel elektrokimia yang merupakan sistem dengan memasukkan reaksi redoks untuk menghasilkan atau menggunakan energi listrik.

Teknik elektrokimia mulai diterapkan dalam berbagai hal semenjak tahun 1807, dimana saat itu Sir Humphry Davy berhasil memisahkan logam kalium dari senyawanya. Prinsip penerapan ini berkaitan dengan sel elektrokimia. Secara umum sel elektrokimia dibagi menjadi sel galvani dan sel elektrolisis. Proses yang terjadi pada sel galvani ialah reaksi kimia berubah menjadi energi listrik, sedangkan di dalam sel elektrolisis energi listrik menjadi reaksi kimia. Pada sel galvani elektrode positif sebagai katode, dan elektrode negatif sebagai anode, sedangkan pada sel elektrolisis elektrode negatif sebagai katode, dan elektrode positif sebagai anode. Penggunaan sel elektrolisis untuk pengolahan limbah telah dimulai tahun 1950, namun penggunaannya secara professional baru dimulai semenjak beberapa tahun terakhir ini, terutama setelah ditemukannya beberapa bahan elektrode, bahan membran serta inovasi-inovasi metode teknik kimia (Ryan, 1982). Sel Galvani bekerja dengan melepaskan energi bebas dari reaksi spontan untuk menghasilkan listrik, sedangkan sel elektrolisis bekerja dengan menyerap energi bebas dari sumber listrik untuk menggerakkan reaksi tak spontan. Sebagai contoh saat ini semakin banyak ditemukan bahan elektrode yang mempunyai stabilitas kimia maupun fisika yang sangat tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi, *non fouling*, elektroda potensial tinggi dan mempunyai tegangan lebih yang

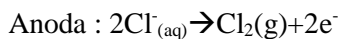
rendah, yang kesemuanya merupakan sifat-sifat yang baik terhadap efisiensi reaksi elektrolisisnya (Bray, 1986).

Pada sel elektrolisis zat-zat dapat terurai sehingga terjadi perubahan massa. Peruraian tersebut disebabkan oleh energi listrik yang diangkut oleh ion-ion yang bergerak di dalam larutan elektrolit, atau karena adanya daya gerak listrik di dalam sel tersebut. Daya gerak listrik ini merupakan perbedaan potensial standar elektroda negatif (katode) dan potensial standar elektroda positif (anode). Perbedaan potensial standar ini biasanya disebabkan perbedaan bahan yang dipakai antara anode dan katode, namun bisa juga bahan yang dipakai sama, tetapi konsentrasi larutan elektrolitnya berbeda. Jenis yang terakhir ini disebut sel konsentrasi.

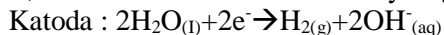
II.2 Elektrolisis Membran

Elektrolisis membran adalah proses dimana terjadi reaksi di kedua elektroda, yaitu reduksi katodik serta oksidasi anodic, yang terkait dengan transportasi dan transfer ion bermuatan. Tujuan dari membran dalam elektrolisis ini adalah untuk memisahkan loop anoda (analit) dari loop katoda (katolit) oleh cairan, serta untuk menghindari reaksi sekunder yang tidak diinginkan, sehingga untuk menggabungkan reaksi elektroda dengan langkah pemisahan atau untuk mengisolasi secara terpisah produk terbentuk pada elektroda (Zoulias, 2002).

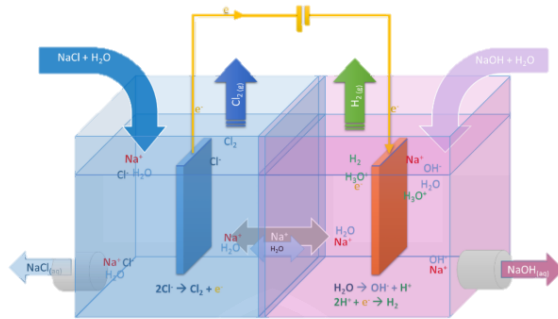
Dalam proses elektrolisis chloro-alkali membran saat ini, air garam dimasukkan ke anoda yang menghasilkan larutan NaOH, klorin dan gas hidrogen. Dengan demikian, reaksi berikut terjadi di anoda dan katoda :



Di katoda, air dielektrolisa ke OH^{-} dan hydrogen gas.



Sebuah membran penukar kation memisahkan anoda dan katoda, tetapi permeable untuk Na^{+} . dengan demikian, Na^{+} dapat bermigrasi melintasi membran untuk menggabungkan dengan OH^{-} di katoda untuk membentuk NaOH. Dengan reaksi keseluruhan sebagai berikut:



Gambar II. 1 Gambar proses elektrolisa membrane dari NaCl

Sumber: Budiarto, 2016

Selain proses pembentukan NaOH dari NaCl, elektrolisis membrane juga dapat digunakan sebagai metode pembentukan NaOH dari garam Na_2CO_3 dan NaHCO_3 . Dimana proses penguraian garamnya akan dimulai dari NaHCO_3 kemudian NaCl lalu Na_2CO_3 hal ini terjadi karena dipengaruhi dari berat equivalent dari Natrium di dalam ketiga jenis garam tersebut yang bisa dilihat pada tabel dimana nilai terbesar terdapat pada NaHCO_3 (Simon, 2014)

Tabel II. 1 Data larutan Garam Natrium

Salt	Molecular weight (g/mol)	Solubility at 25 °C (g/L)	Conductivity of 10% (wt/wt) brine at 25 °C (mS/cm)
NaCl	58.44	362	130
NaHCO ₃	84	105	55
Na ₂ CO ₃	106	307	79

Sumber : Simon, 2014

Tingkat transportasi Na^+ ion melalui membran penukar kation mengikuti hukum Faradaya dan meningkat secara proporsional terhadap arus yang ditetapkan:

$$N(\text{mol/s}) = \frac{1}{F} \quad (2.1)$$

Dimana N adalah tingkat transportasi molar kation melalui membran, I adalah arus yang ditetapkan (A) dan F adalah konstanta Faraday (96.485 C/M). Ketika laju aliran larutan air garam (U_{brine}), volume ruang anode (V_{anode}) dan efisiensi arus (ε) dari proses elektrolisis diperkenalkan, maka transportasi molar keseluruhan natrium kation melalui membran (N_{overall}) selama proses:

$$N_{\text{overall}} = \frac{I \times \frac{V_{\text{anode}}}{U_{\text{brine}}}}{F} \times \varepsilon \quad (2.2)$$

Dengan koefisien efisiensi (ε):

$$\varepsilon = \frac{U_{\text{brine}} \times F \times (C_{\text{in}} - C_{\text{out}})}{I_{\text{dens}} \times A} \quad (2.3)$$

Dimana A adalah luas permukaan membran, I_{dens} adalah kepadatan arus diterapkan (A/m^2), dan C_{in} dan C_{out} adalah equivalent kation (Na^+) konsentrasi pada masing masing inlet dan outlet. Persamaan tersebut merupakan model sederhana untuk mensimulasikan produksi NaOH pada kondisi operasi yang berbeda (Simon, 2004).

Adapun daya yang dibutuhkan didalam proses elektrolisa membrane dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti delta gibs energi dari keseluruhan reaksi pada membran, katoda anoda overpotential, katoda anoda over potential dari transfer massa Bila dirumuskan dalam persamaan matematika adalah sebagai berikut :

$$U = E_{aq}^C - E_{aq}^A - |n_D^C| - |n_D^A| - |n_r^C| - |n_r^A| - |n_d^C| - |n_d^A| - IR_c$$

Dimana nilai $(E_{aq}^C - E_{aq}^A)$ merupakan delta gibs energi dari proses yang terjadi. Energi gibs sendiri didapatkan dari entalpi pembentukan dikurangi entropi yang dipengaruhi suhu dimana untuk proses elektrolisa membran dari garam natrium nilai entropi bernilai positif sehingga semakin tinggi temperature semakin rendah energy gibs yang dibutuhkan (Joey, 1989).

II.2.1 Parameter Design Cell membrane elektrolisa

Didalam mendesain cell membran elektrolisa ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan karena berhubungan dengan jumlah arus yang terbentuk. Seperti:

1. Luas Permukaan elektroda

Luas permukaan elektroda mempengaruhi dari jumlah arus yang ditransfer dari elektroda dimana jumlah arus yang ditransfer berbanding lurus terhadap luas permukaan elektroda. Jika permukaan elektroda diperluas dua kali lipat maka jumlah arus yang ditransfer akan naik menjadi dua kali lipat.

2. Geometri elektroda

Geometri atau bentuk elektroda memiliki peran penting dalam transfer arus hal ini dikarenakan bentuk dari geometri elektroda akan mempengaruhi dari pembentukan layer gas pada saat proses elektrolisa terjadi.

3. Jenis elektroda

Jenis elektroda mempengaruhi dari terbentuknya overvoltage dari sebuah proses membran elektrolisa. Pada umumnya jenis elektroda yang digunakan adalah stainless steel yang diaktivasi nickel, atau Platinum dan karbon.

4. Jarak elektroda

Jarak dari elektroda mempengaruhi dari arus yang tertransfer karena proses membran elektrolisa juga bergantung pada difusitas yang terjadi sehingga semakin jauh jarak elektroda semakin besar overvoltage yang terjadi

5. Tekanan dan Suhu

Tekanan dan suhu mempengaruhi proses karena entropi dari proses membran elektrolisa bersifat positif sehingga semakin tinggi suhu semakin sedikit tegangan yang dibutuhkan namun kenaikan suhu mempercepat proses terbentuknya gas akibat elektrolisa dan evaporasi hal ini

bisa diatasi dengan menaikkan tekanan. Dimana pada proses ini tekanan bisa digunakan 12 bar dan suhu 80°C.

6. Kecepatan laju alir dan model laju alir
Kecepatan laju alir mempengaruhi waktu tinggal dan recovery yang terjadi dimana semakin cepat laju alir semakin rendah recovery dari proses yang terjadi. Selain itu bentuk laju alir juga mempengaruhi seperti counter current, co-current, dan cascade.

(White,1989)

II.3 Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Gas karbondioksida diproduksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil. Karbondioksida menurunkan nilai heating value pada gas dan menyebabkan korosi peralatan. Berikut spesifikasi batas konsentrasi Gas Karbondioksida pada tabel II.2:

Tabel II. 2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbondioksida Dalam Proses Industri

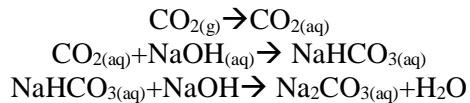
Proses	Batas konsentrasi gas karbondioksida
Industri Manufaktur	<0.1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam:	
• Pipa gas	< 4 % CO ₂
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ /CO)	<500 ppm CO ₂
Gasifikasi batubara	~ 500 ppm CO ₂
Industri etilen	~ 1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik:	
• Pembangkit tenaga listrik IGCC	< 0.5 % CO ₂
• Pembangkit tenaga listrik batubara	<1.5% CO ₂

Beberapa nilai ekonomis dari karbon dioksida adalah digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku industri urea, dan industri abu soda (GPSA,2011)

II.4 Natrium Hidroksida

Natrium Hidroksida adalah senyawa kimia yang bersifat basa. Natrium hidroksida memiliki berat molekul sebesar 40 kg/kmol. Pada kondisi ambient, NaOH berbentuk Kristal putih tidak berbau yang dapat mengabsorpsi air dari udara. Apabila dilarutkan dalam air atau menetralkan asam akan menghasilkan panas. NaOH bersifat korosif (National Center for Biotechnology Information).

NaOH dapat bereaksi dengan gas karbon dioksida menghasilkan natrium karbonat dan natrium bikarbonat dengan reaksi seperti berikut:



(Yoo,2013)

Adapun kelarutan karbon dioksida didalam NaOH bergantung pada tekanan dan temperature dari NaOH, semakin tinggi temperature dari NaOH semakin kecil nilai kelarutannya namun semakin tinggi tekanan pada NaOH semakin tinggi kelarutan dari karbon dioksida di dalam NaOH (Lucile, dkk, 2012).

II.3 Kalium klorida

Kalium klorida atau potasium klorida (KCl) adalah senyawa kimia yang berwarna putih kristal yang umumnya digunakan sebagai larutan penyangga ataupun dalam industri pupuk. KCl memiliki sifat elektrolit yang kuat karena kalium merupakan bagian dari golongan logam alkali (National Center for Biotechnology Information). KCl dapat digunakan sebagai larutan elektrolit dalam proses membran elektrolisa karena penambahan KCl mampu menurunkan energi aktivasi reaksi hal ini dikarenakan KCl mampu meningkatkan konduktivitas elektrik yang ada (Hadi, 2013). Didalam proses regenerasi NaOH menggunakan membran elektrolisa penambahan KCl mampu

meningkatkan persen recovery dari proses yang ada (Alvian, 2016).

II.5 Absorber

Alat yang digunakan pada proses absorpsi disebut *absorber*. *Absorber* berfungsi memisahkan suatu komponen atau lebih dari campurannya menggunakan prinsip perbedaan kelarutan. Kinerja absorber dipengaruhi beberapa factor seperti tekanan, lju alir gas, dan konsentrasi larutan penyerap.

Absorban merupakan cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi, beberapa persyaratan absorban antara lain kelarutan gas harus tinggi sehingga dapat meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan kuantitas pelarut yang diperlukan, pelarut memiliki tekanan uap rendah karena jika gas meninggalkan kolom absorpsi jenuh terhadap pelarut maka akan ada banyak pelarut terbuang, korosifitas rendah agar tidak menimbulkan kerusakan pada kolom *absorber*, penggunaan pelarut yang ekonomis dan mudah *direcovery* akan menurunkan biaya operasi, ketersediaan pelarut akan mempengaruhi stabilitas harga pelarut, viskositas pelarut yang rendah menyebabkan laju absorpsi yang tinggi, meningkatkan karakter flooding dalam kolom, jatuh tekan yang kecil dan sifat perpindahan panas yang baik, dan sebaiknya pelarut tidak beracun, tidak mudah terbakar, stabil secara kimiawi, dan titik beku rendah (Mc.Cabe.1999).

Kinerja *absorber* juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Tekanan
2. Laju alir gas
3. Konsentrasi larutan penyerap

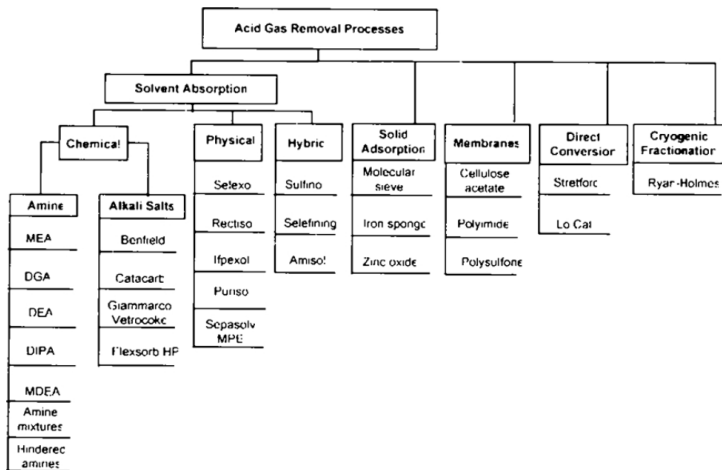
Hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *absorber* adalah keberadaan bahan isian (*packing*). Bahan isian (*packing*) dalam *absorber* berfungsi untuk memperluas bidang kontak di dalam *absorber*. Bahan isian (*packing*) yang digunakan dalam *absorber* dapat terbuat dari bermacam-macam bahan. Syarat-syarat suatu bahan isian yang bisa digunakan adalah sebagai berikut

(McCabe, 1999):

1. Tidak bereaksi dengan fluida dalam *absorber*.
2. Kuat tetapi tidak berat.
3. Memberikan luas kontak yang besar.
4. Murah.
5. Tahan korosi.

II.6 Acid Gas Removal

Gas alam yang dihilangkan pada proses ini adalah CO₂ dan H₂S sebagai produk samping dari gas alam ataupun biogas. Beberapa metode yang dapat digunakan dapat dilihat pada gambar II.2 dimana pada umumnya metode yang digunakan adalah solvent absorption secara *chemical*, *physical* dan *hybric*, *solid adsorption*, *membrane*, *direct conversion* dan *cryogenic fractionation*.



Gambar II. 2 Process Penghilangan Gas Asam

Dari metode-metode tersebut, metode adsorbs menggunakan adsorban kimia dinilai yang terbaik dalam proses penghilangan CO₂. Adapun untuk menggantikan amine sebagai adsorban dalam proses penghilangan gas asam Rahayan mencoba

Absorban lain seperti NaOH, K₂CO₃, Ca(OH)₂, CaCO₃, dan KOH dalam pemurnian CO₂ adapun berikut ini adalah absorban terbaik berdasarkan %recovery, ΔpH, max power dan unit operation cost pada tabel 2.3:

Tabel II.3

Tabel II. 3 Penilaian absorban

Absorban	%Recovery	ΔpH	Max Power	Unit Operation Cost
NaOH	16.6	4.1	395.4	119.2
K ₂ CO ₃	6.1	1.2	376.2	47.9
DEA	21.9	1.6	412.3	496.2
KOH	15.8	2.7	391.1	368.8
CaCO ₃	9.3	2.8	398.2	248.1
Ca(OH) ₂	7.1	4.4	386.4	78.6
Na ₂ CO ₃	III.4	2.2	388.3	208.1

(Sumber: Rahayan, 2015)

Dari beberapa metode-metode tersebut, dipilih yang merupakan absorban paling baik, yaitu NaOH.

II.7 Penelitian Terdahulu yang Bersangkutan

Berikut beberapa penelitian sebagai acuan penulis:

Tabel II. 4 Penelitian Sebelumnya

No	Nama Penulis	Judul	Hasil yang Diperoleh
1.	D.Y. Tuarev, 2011	<i>Use of membrane electrolysis for Recovery of Heavy metal ions</i>	Elektrolisis membran dapat digunakan untuk memulihkan ion cadmium pada konsentrasi rendah pada suatu larutan. Metode elektrolisis membran disarankan untuk daur ulang garam alkali

2.	Alexander Simon, 2014	<i>Sodium hydroxide production from sodium carbonate and bicarbonate solutions using membrane electrolysis: A feasibility study</i>	Menggambarkan kelayakan produksi NaOH dari NaCl, NaHCO ₃ dan Na ₂ CO ₃ menggunakan <i>membrane electrolysis</i>
3	Alvian, Romzudin, Taufany. 2016	<i>Feasibility Study of NaOH Regeneration in Acid Gas Removal Unit Using Membrane Electrolysi</i>	Mendapatkan hasil konversi NaOH sebesar 95% dari brine acid gas removal menggunakan NaOH dengan menggunakan larutan elektrolit pada feed katodanya.
4	Hung C. Duong, Mikel Duke, Stephen Gray, Bart Nelemans, Long D. Nghiem. 2016	<i>Membrane distillation and embrane electrolysis of coal seam gas reverse osmosis brine for clean water extraction and NaOH production</i>	Energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan NaOH 1kg sebesar 3 MJ.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1. Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi larutan elektrolit (NaOH), kecepatan aliran *feed*, dan jarak elektroda terhadap regenerasi NaOH, serta pegoptimalan terhadap hasil penelitian. Metode yang digunakan adalah memberane electrolysis sistem series continuous. Kemampuan regenerasi diukur melalui percent recovery. Dalam percobaan didapatkan hasil berupa arus, daya, pH produk sehingga dapat diketahui pengaruhnya terhadap percent recovery natrium.

III.2. Bahan dan Peralatan Penelitian

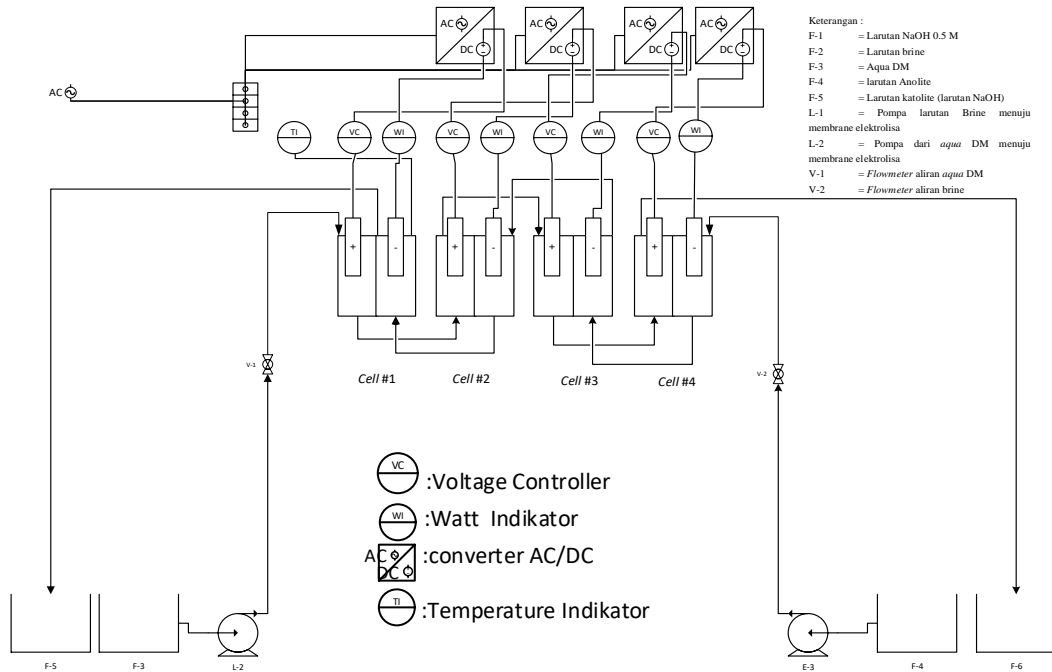
III.2.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Natrium hidroksida (NaOH) teknis 98%
2. *Aqua DM (Demineralized)* TDS 0, 2.1 mS
3. Asam klorida (HCl) P.A 7%
4. Natrium karbonat (Na₂CO₃) teknis 98%

III.2.2 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan unit regenerasi acid gas removal, yang terdiri dari *membrane electrolysis cell* berjumlah 4 buah yang dipasang seri dengan dimensi masing – masing 15x10x10 cm, terdiri dari membran dengan spesifikasi nama dagang nafion (C₇HF₁₃O₅S.C₂F₄), ketebalan 440 μm, counterion dengan ion Na⁺, memiliki transpot number >0.95, dan digunakan pada industri chlor alkali dengan bentuk penampang lembaran; katoda dan anoda tipe *stainless steel type 316* dengan ketebalan 1 mm berbentuk plate; kemudian *switching voltage* dengan spesifikasi merk Chinai S250-12, serta 2 buah *flowmeter* yang mengatur kedua aliran feed ;dan tangki penampung gas.



Gambar III. 1 Skema Alat Percobaan

III.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada:

1. Tekanan operasi = 760mmHg
2. Suhu = 28-32°C

Adapun variabel yang digunakan pada penelitian ini

- a. Variabel tetap
 1. Luas permukaan elektroda 117 cm²
 2. Konsentrasi Na₂CO₃ 0.2 M dan NaOH 0.1 M untuk membrane elektrolisa
 3. Tegangan 11 Volt
- b. Variabel bebas
 1. Konsentrasi larutan elektrolit (NaOH) 0.05M, 0.1M dan 0.3M 10% vt/vt
 2. Kecepatan aliran *feed* 20 ml/menit dan 40 ml/menit
 3. Penambahan larutan HCl 12 molar 1% vt/vt pada anoda
 4. Jarak elektroda 1 cm dan 3 cm
- c. Variabel respon
 1. Persen recovery natrium
 2. Molaritas NaOH yang dihasilkan
 3. Produksi NaOH per energi

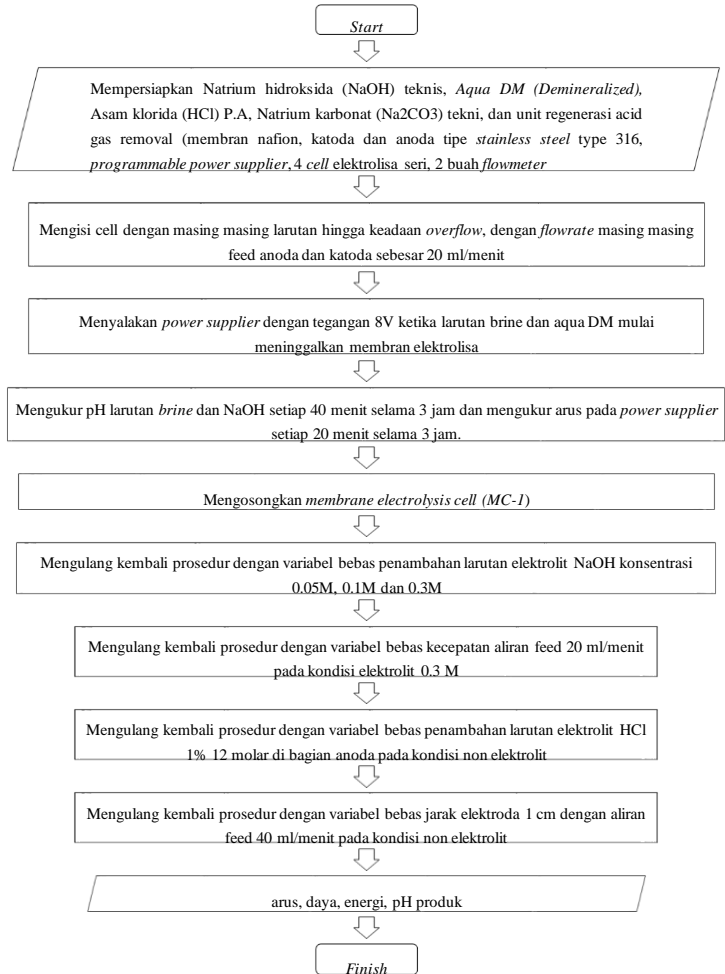
III.4. Prosedur Penelitian

III.4.1 Tahap Optimasi Membrane Electrolisis

1. Menyusun 4 *membrane electrolisis cell* secara seri
2. Mengisi *cell* katoda dalam *membrane electrolisis cell (MC-1)* dengan mengalirkan *aqua DM* dengan *flowrate* 20 ml/menit.
3. Mengisi *cell* anoda dalam *membrane electrolisis cell (MC-1)* dengan mengalirkan larutan *brine* dengan *flowrate* 20 ml/menit.
4. Menyalakan *power supply* dengan tegangan 8V ketika larutan *brine* dan *aqua DM* mulai *overflow*

5. Mengukur pH larutan *brine* dan NaOH setiap 40 menit selama 3 jam, sedangkan mengukur arus, daya dan suhu pada setiap *cell* setiap 20 menit selama 3 jam.
6. Mengosongkan *membrane electrolysis cell (MC-1)*
7. Mengulang kembali langkah 1 hingga 6 dengan variabel bebas penambahan larutan elektrolit NaOH konsentrasi 0.05M, 0.1M dan 0.3M
8. Mengulang kembali langkah 1 hingga 6 dengan variabel bebas kecepatan aliran feed 20 ml/menit pada kondisi elektrolit 0.3 M
9. Mengulang kembali langkah 1 hingga 6 dengan variabel bebas penambahan larutan elektrolit HCl 1% 12 molar di bagian anoda pada kondisi non elektrolit
10. Mengulang kembali langkah 1 hingga 6 dengan variabel bebas jarak elektroda 1 cm dengan aliran feed 40 ml/menit pada kondisi non elektrolit

III.5 Flowchart Penelitian



Gambar III. 2 Flowchart Penelitian *membrane electrolysis*

III.6 Metode Analisa

III.6.1 Percent Recovery

$$\% \text{ recovery natrium} = \frac{\text{natrium di NaOH } (\frac{g}{l})}{\text{natrium total } (\frac{g}{l})} \times 100\%$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

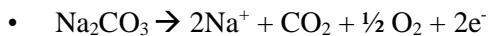
Aplikasi teknologi *membrane electrolysis* untuk regenerasi absorban dari unit *acid gas removal* dapat menjadi alternatif bagi industri kimia yang menggunakan NaOH sebagai absorban. Teknologi *membrane electrolysis* atau elektrodialisis menggunakan prinsip dasar elektrolisis dimana *cell* katoda dan anoda dipisahkan oleh membran kation yang bersifat selektif terhadap ion yang diinginkan yaitu dalam penelitian ini adalah ion natrium (Na^+). Transportasi ion pada membran terjadi karena adanya *driving force* yang dapat berupa konveksi atau difusi dari masing-masing molekul dan tarik menarik antar muatan (Moorhouse, 2000). Pada bab ini akan dibahas hasil penelitian secara teknis maupun ekonomis regenerasi absorban NaOH pada *acid gas removal* menggunakan metode *membrane electrolysis* sistem kontinu. Membran yang digunakan dengan spesifikasi; nama dagang nafion ($\text{C}_7\text{HF}_{13}\text{O}_5\text{S}_2\text{CF}_4$) dengan ketebalan 440 μm , sifatnya *counterion* dengan ion Na^+ , biasanya membran ini digunakan pada industri *chlor - alkali*. Pengamatan dilakukan pada variabel laju alir (20 ml/menit dan 40 ml/menit), penambahan larutan elektrolit NaOH pada Katoda (0.05 M, 0.1 M, dan 0.3 M), Jarak elektroda (1 cm dan 3 cm), serta optimasi pada penambahan elektrolit HCl di elektroda dan laju alir (60 ml/menit). Larutan NaOH dan HCl digunakan karena merupakan larutan elektrolit kuat yang memiliki nilai konduktivitas 206 mS/cm dan 189 mS/cm (Wolf, 1966 dan Weast, 1989)

Feed yang digunakan pada penelitian ini adalah garam Na_2CO_3 dan NaOH teknis, karena kedua bahan tersebut merupakan komponen utama brine produk *acid gas removal* menggunakan NaOH (Alvian, 2016). Larutan dibuat dengan komposisi 0.2 M Na_2CO_3 dan 0.1 M NaOH penggunaan Na_2CO_3 lebih besar karena produk reaksi dari absorpsi gas alam dengan NaOH adalah Na_2CO_3 (Yoo, 2013). Natrium bikarbonat (NaHCO_3) tidak digunakan karena stoikiometri reaksi kimia dari

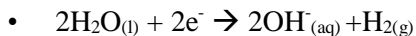
absorbs menyatakan bahwa NaHCO_3 hanya terbentuk saat NaOH menjadi *limiting reactant* (Yoo, 2013). Feed yang telah dibuat dimasukan kedalam *cell* anoda, pada *acid gas removal unit* feed ini disebut dengan *saturated brine*, sedangkan *demineralized water* (DM) dimasukkan ke dalam katoda. Hasil dari regenerasi tersebut akan menghasilkan produk berupa larutan NaOH murni disebut *concentrated caustic soda*. Lebih jelasnya dijelaskan pada skema Gambar III.1.

Karena adanya perbedaan potensial listrik di anoda dan katoda, maka ion Na^+ tertarik ke *cell* katoda yang bermuatan negatif. Produk utama dari proses elektrolisa membrane ini adalah larutan NaOH sesuai reaksi *overall* berikut:

Reaksi Anoda:



Reaksi katoda:



Reaksi Overall:

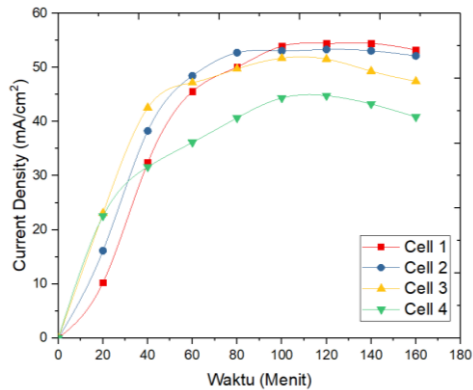


Proses dilakukan pada variabel yang telah ditentukan dengan pengamatan silang pada variabel laju alir dan konsentrasi elektrolit NaOH pada katoda serta pengamatan tunggal untuk jarak elektroda pada kondisi non-elektrolit. Penelitian ini dilakukan selama 160 menit dengan sistem kontinu.

Pengamatan yang dilakukan adalah perubahan pH pada larutan di katoda, arus serta watt pada setiap *cell* kemudian menghitung molaritas larutan NaOH dan persen *recovery* natrium. Pengamatan dilakukan setiap 20 menit sekali untuk arus dan watt serta 40 menit sekali untuk perubahan pH. Persen *recovery* natrium dihitung dengan mengukur ion natrium yang telah bermigrasi ke *cell* katoda dibandingkan natrium total yang ada di *cell* anoda mengikuti persamaan III.1. Molaritas larutan NaOH dapat dihitung dari pengukuran pH yang telah dilakukan sebelumnya.

IV.1 Karakteristik Arus pada setiap *Cell*

Proses elektrolisa membran kontinu dengan sistem seri memiliki karakteristik yang berbeda dengan sistem batch. Pada sistem batch, proses dilakukan dalam satuan waktu dengan jumlah larutan brine yang tetap hingga tercapai persen konversi yang tinggi dari Na_2CO_3 menjadi NaOH (Alvian, 2016). Sementara dalam proses kontinu dengan sistem seri dilakukan pada laju alir *feed* tertentu sehingga diperoleh persen konversi tertentu yang dipengaruhi oleh arus yang terbentuk.



Gambar IV. 1 Grafik *Current Density* terhadap waktu pada setiap *cell* dengan *flowrate* 40 ml/menit pada masing masing *feed*, tanpa elektrolit, dan jarak elektroda 3 cm anoda dan katoda.

Proses elektrolisa membran kontinu sistem seri dimulai dengan proses yang menyerupai sistem *batch* dikarenakan proses ini dimulai dengan kondisi *cell* sudah terisi penuh sehingga semua *cell* akan memulai dengan kondisi yang sama hal ini menyebabkan nilai arus dari setiap *cell* baik *cell* 1- 4 berbeda satu sama lain dan tidak teratur. Selama proses awal ini *current density* akan terus naik sampai mencapai batas nilai arus tertentu. Nilai *current density* tertinggi yang dicapai pada awal proses menunjukkan batas maksimal *current density* yang bisa dihasilkan selama proses hal ini dikarenakan nilai beda potential antara

elektroda dan anoda pada posisi tertinggi dimana anoda mengandung NaOH yang sudah terbentuk hasil proses pra-kontinu dan anoda memiliki Na_2CO_3 yang belum terurai. *Current density* tinggi dihasilkan karena NaOH merupakan elektrolit kuat yang memiliki nilai konduktivitas 206 mS/cm (Wolf, 1966 dan Weast, 1989). Konduktivitas adalah ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Kemudian Na_2CO_3 yang terurai akibat beda potential yang ada menciptakan perpindahan ion Natrium dari anoda menuju katoda yang ditunjukkan dalam nilai arus sebagai respon dari elektron yang bergerak diantara elektroda sehingga semakin banyak Natrium yang ditransfer makin tinggi nilai *current density* yang dihasilkan (Dias,2005).

Setelah titik tertinggi arus tercapai maka perlahan arus akan turun seperti Gambar IV.1 dan nilai *current density* dari *cell 1* dan *cell 4* akan membentuk pola dimana *cell 1* akan memiliki nilai *current density* paling tinggi sedangkan *current density* pada *cell 4* akan paling rendah seperti pada Gambar IV.1. hal ini disebabkan proses bersifat kontinu dan *counterflow* yang menyebabkan perbedaan konsentrasi, dimana *cell 1* memiliki Na_2CO_3 belum terurai di anoda dan NaOH yang telah terbentuk di katoda (White,1984). Kondisi konsentrasi hal tersebut menyebabkan nilai *current density* pada *cell 1* menjadi paling tinggi. Sedangkan *cell 4* memiliki DM water di katoda yang memiliki konsentrasi NaOH kecil atau bahkan nol dan *anolyte* ion Natrium sisa penguraian disisi anoda (White, 1984). Kondisi pada Cell 4 ini menyebabkan *cell 4* memiliki nilai *current density* paling rendah.

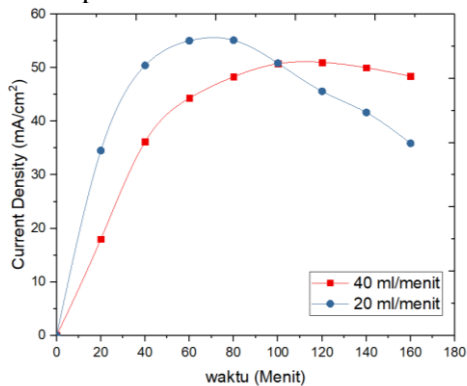
Setelah mencapai titik maksimalnya, *current density* akan turun hal ini disebabkan karena semakin banyak dihasilkannya gelembung gas (baik O_2 maupun H_2) berdasarkan reaksi di atas (Simon, 2014). Gelembung gas akan menutupi lempeng elektroda dan bersifat isolator listrik. Gas hydrogen akan menghalangi aliran elektron maupun aliran arus pada elektroda. Proses ini disebut polarisasi, yang menyebabkan hambatan semakin besar

(Joey, 1989). Hal inilah yang menyebabkan pola *current density* cenderung menurun setelah mencapai arus maksimal pada *cell* 1, 2, 3, dan 4.

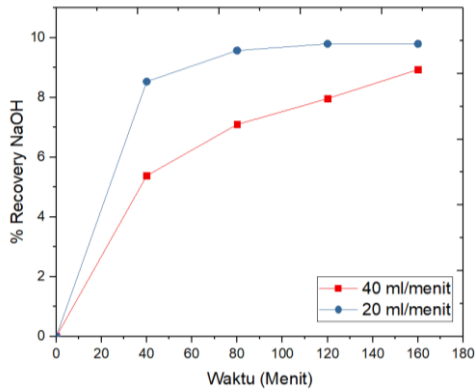
Selama proses terjadi kenaikan suhu dalam proses. Kenaikan suhu dalam proses akan mempermudah proses penguraian Na_2CO_3 dikarenakan nilai entropi dari proses penguraian garam bersifat positif sehingga semakin tinggi suhu proses akan menurunkan nilai energi yang dibutuhkan dimana hal ini berpengaruh pada tegangan yang dibutuhkan (O'brien, 2005). Namun berdasarkan penelitian Duong (2016) peningkatan temperature ini tidak terlalu signifikan berpengaruh pada peningkatan percent recovery.

IV.2 Pengaruh Flowrate terhadap Persen *Recovery* dan *Current Density* Rata – Rata

Pengaruh laju alir dalam proses elektrolisis membran secara kontinu dengan sistem seri berpengaruh pada nilai *current density* rata – rata dan persen *recovery* yang dihasilkan dari proses tersebut. Dimana pada penelitian ini digunakan dua jenis laju alir yaitu 20 ml/menit dan 40 ml/menit laju alir tersebut berlaku untuk feed di katoda maupun anoda.



(a)



(b)

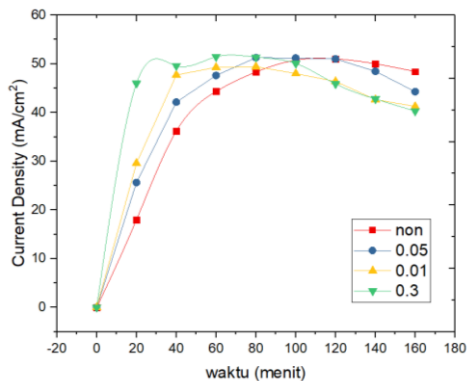
Gambar IV. 2 Grafik Pengaruh laju alir pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan non elektrolit (a) Current Density terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu

Kenaikan laju alir menyebabkan nilai konversi dari proses turun, dimana untuk laju alir 20 ml/menit persen konversi proses adalah 9.79% dan untuk laju alir 40 ml/menit adalah 8.93% penurunan laju alir ini disebabkan karena waktu tinggal didalam *cell* menjadi lebih sebentar. Yaitu dari 180 menit untuk laju alir 20 ml/menit menjadi 90 menit untuk laju alir 40 ml/menit. Pengaruh waktu tinggal berpengaruh terhadap persen konversi karena waktu tinggal berbanding lurus terhadap persen recovery. Berdasarkan turunan hukum faraday waktu tinggal akan berpengaruh pada transfer ion, jika waktu tinggal aliran lebih lama maka transfer ion akan semakin besar sehingga persen recovery yang dihasilkan akan makin bagus (Simon, 2014).

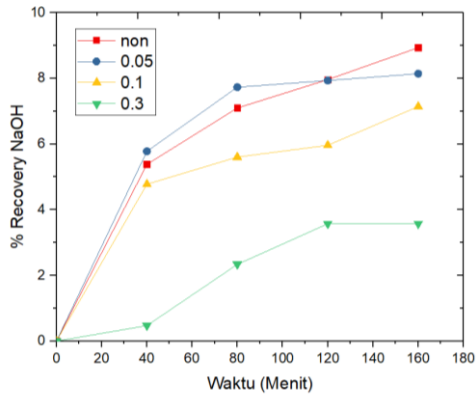
Meskipun memiliki nilai persen konversi yang lebih tinggi, laju alir yang lebih rendah menyebabkan penurunan *current density* yang lebih tinggi dan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan laju alir yang lebih cepat. Penurunan arus yang terlalu sering dan dalam jumlah yang besar akan menyebabkan persen recovery semakin menurun. Hal ini

disebabkan karena waktu tinggal yang lebih lama juga berbanding lurus dengan jumlah gas yang terbentuk. Pembentukan gas pada proses elektrolisa menyebabkan *overpotential*, yakni nilai tegangan yang dibutuhkan untuk proses elektrolisa tetap berjalan, namun dikarenakan proses menggunakan tegangan yang tetap bukan arus tetap maka nilai *current density* akan turun disebabkan hambatan yang meningkat hal ini dikarenakan arus berbanding terbalik dengan hambatan berdasarkan hukum Ohm (Joey,1989 dan Giancoli, 2014). *Overpotential* ini disebabkan karena terjadinya polarisasi diantara elektroda dan larutan elektrolit. Polarisasi ini terbentuk karena terbentuknya deplesi gas terutama oksigen pada elektroda yang membentuk suatu barrier yang menyebabkan energi yang dibutuhkan meningkat dimana dalam penelitian ini menyebabkan arus listrik pada *cell* mengalami penurunan (Rossum, n.d dan Romero, 2014). Pada proses ini terbentuk 3 produk gas yaitu gas oksigen, karbon dioksida dan gas hidrogen, yang dapat menyebabkan polarisasi. Terutama kehadiran gas oksigen pada proses ini dapat menyebabkan korosi sehingga harus diminimalisir.

IV.3 pengaruh konsentrasi elektrolit terhadap *current density* Rata-Rata dan percent recovery



(a)



(b)

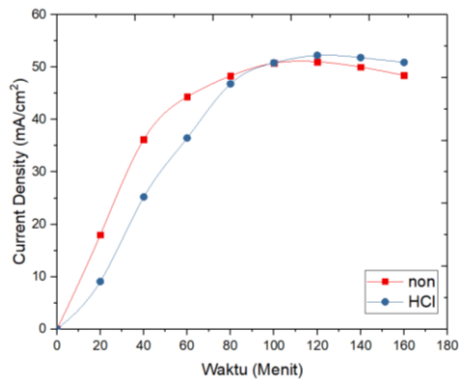
Gambar IV. 3 Grafik Pengaruh konsentrasi elektrolit pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan laju alir 40 ml/menit (a) Current Density Rata-Rata terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu

Pengaruh Konsentrasi larutan elektrolit pada katoda dalam proses elektrolisis membran secara kontinu dengan sistem seri berpengaruh pada nilai *Current Density* rata-rata yang dihasilkan dari proses tersebut. Dimana pada penelitian ini digunakan 4 jenis variabel yaitu non elektrolit, 0.05 M, 0.1 M dan 0.3 M dengan konsentrasi 10% v/vt. Didapatkan hasil bahwa penambahan konsentrasi elektrolit pada katoda mampu menaikkan *Current Density* lebih cepat dibandingkan dengan kondisi non-elektrolit seperti pada Gambar IV.3. Kenaikan *current density* paling cepat dialami proses pada penambahan konsentrasi elektrolit 0.3 M hal ini dikarenakan pengaruh elektrolit didalam larutan mengakibatkan kenaikan konduktivitas sehingga nilai *current density* lebih tinggi. Peningkatan *Current Density* ini diinginkan untuk meningkatkan besarnya persen recovery. Namun penambahan elektrolit di feed katoda tidak mampu meningkatkan konversi dari proses karena penambahan elektrolit pada feed

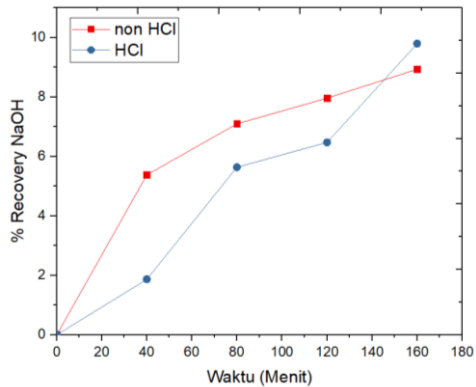
mengakibatkan proses pembentukan gas lebih cepat sehingga penurunan *Current Density* lebih cepat dikarenakan *resistant gas* memiliki pengaruh terhadap arus yang ada (Joey, 1989). Hal ini menyebabkan percent recovery menjadi lebih rendah Karena percent recovery berbanding lurus terhadap current density selain itu dikarenakan pada larutan feed sudah mengandung NaOH maka persen konversi dari proses harus dikurangi dari konsentrasi NaOH awal pada feed hal ini.

IV.4 pengaruh konsetrasi HCl pada anoda terhadap *Current Density Rata – Rata* dan percent recovery

Pengaruh larutan elektrolis dalam proses elektrolisis membran secara kontinu dengan sistem seri berpengaruh pada nilai arus dan persen recovery yang dihasilkan dari proses tersebut. Dimana pada penelitian ini digunakan HCl pada anoda karena HCl bersifat elektrolisis kuat dengan konduktivitas 189 mS/cm, berbeda dengan NaOH, HCl bersifat asam (Wolf, 1966 dan Weast, 1989). Penggunaan HCl di anoda dikarenakan berdasarkan penelitian Mirzazadeh (2008) pH optimum *anolyte* pada kondisi asam sehingga digunakan HCl yang merupakan asam kuat dimana pada penilitian ini digunakan HCl 12 M dengan komposisi 1% v/vt.



(a)



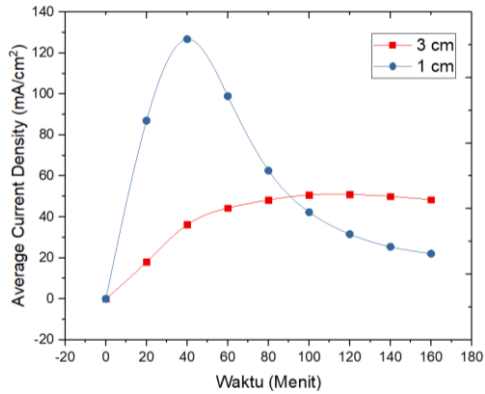
(b)

Gambar IV. 4 Grafik Pengaruh konsentrasi elektrolit HCl pada anoda pada kondisi Operasi jarak 3 cm dan laju alir 40 ml/menit
 (a) Current Density Rata-Rata terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu

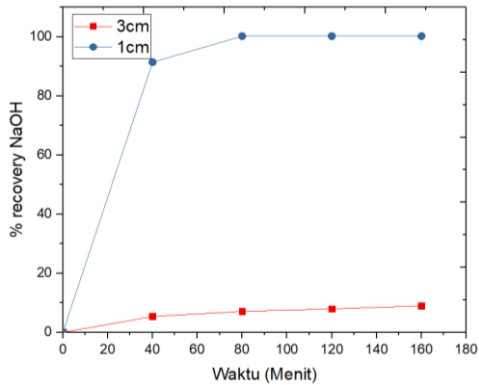
Penambahan HCl pada anoda meningkatkan nilai arus pada *cell*. Hal ini dikarenakan HCl meningkatkan konduktivitas dari larutan yang ada pada *cell* sehingga nilai arus yang berbanding lurus terhadap konversi meningkatkan molaritas NaOH yang terbentuk hal ini bisa dilihat pada Gambar IV.4 selain itu penambahan konsentrasi ion hydrogen dalam larutan mampu meningkatkan arus yang ada.

Namun penambahan HCl ini menyebabkan elektroda mengalami korosi karena berkontak dengan gas klorin yang korosif. Korosi ini disebabkan karena elektroda yang terbuat dari *stainless steel* mengalami reaksi oksidasi dengan ion klorin. Reaksi ini menyebabkan terbentuknya gas klorin namun menyebabkan lapisan dari *stainless steel* juga ikut terurai hal ini karena pH dari larutan berubah dari pH basa menjadi asam yang memungkinkan terjadinya *breakdown pitting corrosion* dari *stainless steel* (Sharma, 2012 dan Yuan Ma, 2012).

IV.5 pengaruh jarak terhadap *Current Density* Rata – Rata dan percent recovery



(a)



(b)

Gambar IV. 5 Grafik Pengaruh jarak elektroda pada kondisi Operasi jarak non elektrolit dan laju alir 40 ml/menit (a) Current density terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu

Pengaruh jarak elektrolit dalam proses elektrolisis membran secara kontinu dengan sistem seri berpengaruh pada nilai *current density* dan persen *recovery* yang dihasilkan dari proses tersebut. Dimana pada penelitian ini digunakan jarak elektroda 3 cm dan 1 cm.

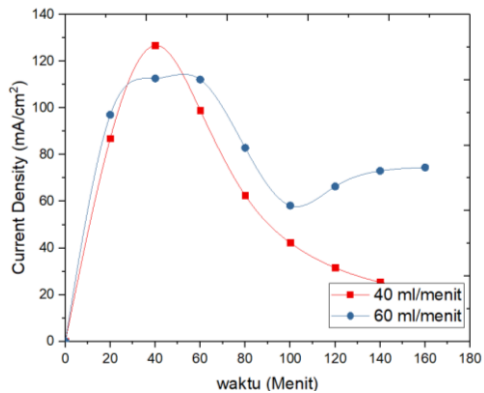
Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa pengurangan jarak meningkatkan nilai *current density* sehingga meningkat nilai dari percent konversi. Hal itu bisa dilihat pada Gambar IV.5 Pada jarak elektroda 3 cm didapatkan nilai *current density* maksimal sebesar 51.02564 mA/cm² dengan nilai persen konversi sebesar 8.93% dan untuk jarak 1 cm didapatkan *Current Density* maksimal sebesar 126.7521 mA/cm² Dengan nilai persen konversi sebesar 100%.

Peningkatan nilai *current density* ini dikarenakan pengurangan jarak dari elektroda menyebabkan berkurangnya nilai resistansi dari membrane elektroda yang ada sehingga mengurangi nilai *overpotential* yang mungkin terjadi (Joey, 1989). Namun kenaikan *current density* berbanding lurus terhadap pembentukan gas baik di anoda dan katoda hal ini yang menyebabkan laju pembentukan gas semakin tinggi hal ini yang menyebabkan *current density* turun begitu cepat karena nilai resistansi dari gas lebih tinggi dibandingkan nilai resistansi pada membran (Joey, 1989).

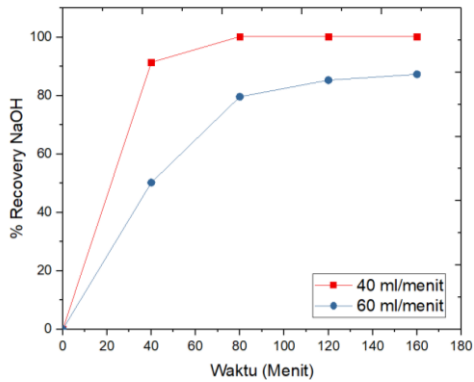
IV.6 Optimasi

Menurut O'brien (2005) untuk menghasilkan hasil regenerasi yang lebih baik ada beberapa cara seperti memperpendek jarak anoda dan katoda, pemilihan elektroda yang dapat menurunkan minimum tegangan yang dibutuhkan. Sementara berdasarkan pengamatan yang dilakukan, faktor yang mempengaruhi proses elektrolisis membran pada kondisi kontinu dengan sistem seri, yaitu laju alir yang semakin tinggi mengurangi menurunnya nilai *current density*. Pengurangan jarak elektrodapun mampu meningkatkan *current density* listrik yang mengalir namun mengakibatkan pembentukan gas yang lebih banyak sehingga penurunan *current density* menjadi lebih tinggi

serta konsentrasi elektrolit pada katoda hanya menaikkan *current density* tapi konversi yang didapatkan tidak lebih baik dari pada non elektrolit sementara HCl pada anoda menyebabkan elektroda terkorosi meskipun menghasilkan %konversi dan *Current Density* yang lebih baik. Melalui kondisi tersebut maka proses elektrolisa membrane dilakukan optimasi dengan menaikkan laju alir dari feed menjadi 60 ml/menit dengan jarak elektroda 1cm.



(a)



(b)

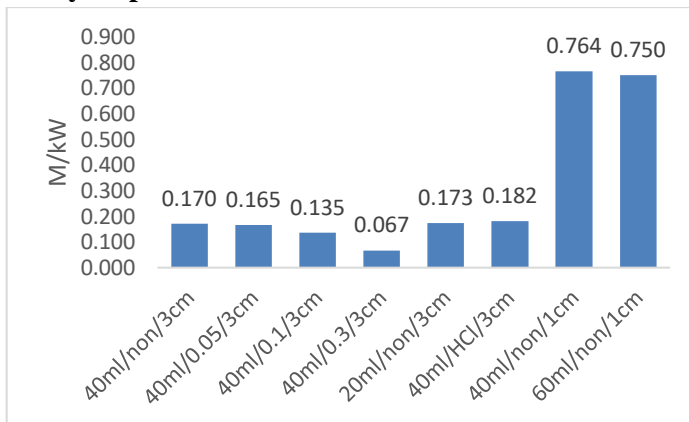
Gambar IV. 6 Grafik optimasi pada kondisi jarak 1 cm dan non elektrolit (a) Current Density terhadap waktu (b) percent recovery terhadap waktu

Berdasarkan penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa *current density* yang dihasilkan dari laju alir 60 ml/menit lebih rendah dari pada proses dengan laju alir 40 ml/menit seperti pada Gambar IV.6 yaitu menghasilkan *current density* 112.6068 mA/cm² sebesar sedangkan 40 ml/menit 126.752. mA/cm² Secara persen konversipun proses 40 ml/menit menghasilkan konversi yang lebih baik yaitu 100% sedangkan 60 ml/menit hanya menghasilkan persen konversi 87.3 % akan tetapi proses dengan laju alir 60 ml/menit menghasilkan penurunan *current density* yang lebih rendah dibandingkan 40 ml/menit. Dimana pada proses laju alir 40 ml/menit penurunan *current density* mencapai 22.0726 mA/cm² sedangkan pada proses 60 ml/menit penurunan *current density* hanya sampai 58.1837 mA/cm² kemudian proses naik kembali hingga 74.508 mA/cm². Hal ini sesuai dengan penelitian dengan metode simulasi yang dilakukan oleh Lee (2013) bahwa proses elektrolisa membran akan mengalami kenaikan dan penurunan diawal kemudian akan naik kembali dengan penurunan *current density* yang akan lebih rendah namun tidak mencapai

kenaikan melebihi nilai batas *Current Density* diawal proses. Proses naik turunnya *current density* disebabkan karena terbentuknya hambatan baru berupa polarisasi saat *current density* naik sehingga perlahan *current density* akan turun, namun ketika *current density* turun polarisasi akan berkurang sehingga perlahan *current density* akan kembali naik, hal inilah yang menyebabkan osilasi seperti pada gambar IV.6a. Penurunan *current density* yang lebih rendah pada laju alir yang lebih tinggi diakibatkan karena laju alir yang lebih tinggi mampu menurunkan nilai densitas dari gelembung gas yang terbentuk sehingga resistan akibat gelembung gas bisa menjadi lebih kecil (Joey, 1989).

Meskipun secara konversi lebih rendah dibandingkan dengan proses pada laju alir 40ml/menit tapi secara proses kontinu, laju alir 60 ml/menit lebih baik dibandingkan karena nilai *current density* yang turun tidak terlalu jauh sehingga proses elektrolisa membrane lebih stabil dibandingkan dengan proses dengan laju alir 40 ml/menit.

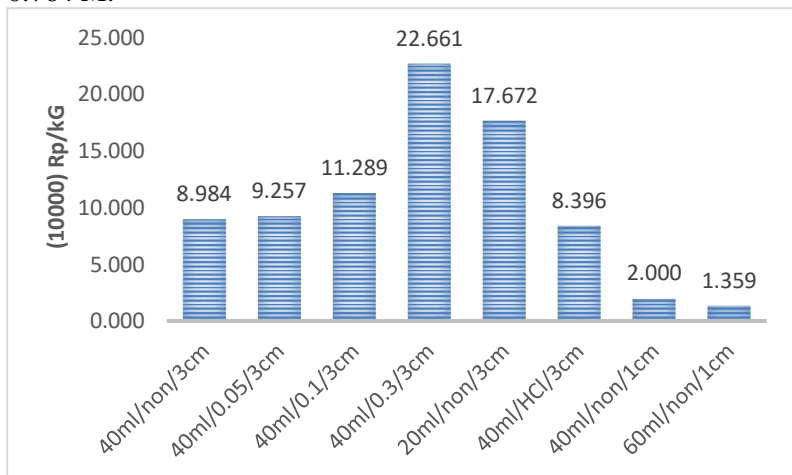
IV.7 Biaya Operasi



Gambar IV. 7 Efisiensi energy tiap variabel

Perhitungan ekonomi, biaya proses, dari regenerasi NaOH menggunakan sistem elektrolisa membran beroperasi

secara kontinu dengan sistem seri menggunakan titik batas current density tertinggi karena proses selanjutnya mengalami penurunan akibat resistansi yang terbentuk sehingga akan membuat perhitungan biaya menjadi kurang sesuai dengan konversi yang terbentuk dimana current density berbanding lurus terhadap konversi NaOH. Dari Gambar IV.7 terlihat bahwa proses dengan variabel 40 ml/menit dengan jarak 1 cm dan non- elektrolit memiliki hasil paling baik dengan hasil 0.764 M/kW yaitu untuk energi 1 kW mampu menghasilkan konsentrasi NaOH sebesar 0.764 M.



Gambar IV. 8 Biaya produksi 1 kg NaOH tiap variabel

Meskipun menghasilkan konsentrasi paling baik proses dengan variabel 40 ml/menit dengan jarak 1 cm dan non-elektrolit memiliki biaya ekonomi yang lebih tinggi yaitu Rp 20.000/kg dibandingkan dengan variabel optimasi yaitu Rp 13.590/kg. perbedaan biaya ekonomis ini dikarekan massa yang dihasilkan dengan laju alir yang lebih tinggi lebih besar dibandingkan dengan laju alir yang lebih rendah sehingga biaya ekonomi variabel optimasi menjadi lebih murah seperti terlihat pada Gambar IV.8.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil studi kelayakan secara teknis maupun ekonomis dalam proses regenerasi NaOH dengan metode *membrane electrolysis sistem kontinu*, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Kenaikan laju alir menurunkan percent recovery namun menurunkan nilai penurunan *current density* dari proses elektrolisa membran. Untuk laju alir 20 ml/menit dengan percent recovery 9.79% dan nilai *current density* terakhir 35.987 mA/cm² sedangkan laju alir 40 ml/menit dengan percent recovery 8.93 % dan nilai *current density* rata-rata terakhir 48.42 mA/cm²
2. Penambahan elektrolit pada katoda mampu mempercepat kenaikan *current density* pada awal proses yaitu 47.62607 mA/cm² untuk 0.05 M, 49.2735 mA/cm² untuk 0.1 M, dan 51.45299 mA/cm² untuk 0.3 M
3. Penambahan elektrolit pada anoda berupa HCl mampu meningkatkan *current density*, dan *percent recovery* dari proses yaitu 50.89 mA/cm² dan 9.79% namun membuat elektroda korosi.
4. Perpendekan jarak elektroda mampu menaikkan percent recovery namun mempercepat dan meningkatkan nilai penurunan *current density* dari proses elektrolisa membran dengan nilai *current density* tertinggi yaitu 126.75 mA/cm² dan 100% pada percent recovery pada jarak 1 cm.
5. Hasil terbaik didapatkan pada kondisi laju alir 60 ml/menit, jarak elektroda 1 cm serta tanpa elektrolit dengan persen recovery 87 % dan *current density* 112.6 mA/cm² dengan efisiensi energi sebesar 0.75 M/kW serta biaya produksi 1 kg NaOH sebesar RP 13.590.

V.2 Saran

1. Penggunaan material elektroda yang tahan terhadap korosif seperti karbon serta elektroda yang mampu mendissolved oksigen untuk mengurangi efek polarisasi dari pembentukan gelembung gas sehingga penurunan Current Density tidak terlalu tinggi seperti penggunaan gas difusi elektroda.
2. penggunaan material alat yang lebih kuat namun tipis sehingga jarak elektroda bisa mendekati nol.
3. memfokuskan pada kondisi optimal antara laju alir dan percent konversi sehingga didapatkan biaya paling murah.
4. perlu mencari tahu kinetika reaksi sehingga percobaan bisa di scale-up

DAFTAR PUSTAKA

- Alvian, P., Romzudin, M., Taufany, F .2016. *Feasibility Study of NaOH Regeneration in Acid Gas Removal Unit Using Membrane Electrolysis*. International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering
- Boaciocchi, R., Carnevale E., Corti A., Costa G., Lombardi L., Olivieri T., Zanchi L., Zingaretti D. 2012. *Innovative Process for Biogas Upgrading with CO₂ Storage: Results from Pilot Plan Operation*. Biomass and Bioenergy (53): 128-137
- Bray, L.A, Ryan, J.L; Wheelwright, E.J. 1986. *Electrochemical Process for Dissolving Plutonium Dioxide and Leaching Plutonium from Scrap on Wastes*. Pasific Northwest Laboratory PNL-SA-13728.
- Budiarto, T., Eschie, E., Repke, J.2016. *Dynamic Modelling and Operation of The Chlor Alkali Process*. Technical Transactions, Mechanics Issue 1-M (1) 2016, p. 53-65
- Dias,A.C.B.V .2005. Chlor-Alkali Membrane Cell Process: Study and Characterization . Disertasi tidak terpublikasi. University of Porto
- Duong, H.C., Duke, M; Gray, S., Nelemans, B., Nghiem, L. D. .2016. *Membrane distillation and embrane electrolysis of coal seam gas reverse osmosis brine for clean water extraction and NaOH production*. Desalination 397 pp 108–115
- GPSA. 2004. *Engineering Data Book*. Oklahoma: GPSA
- Giancoli, D. C. 2014. *Physics Principles With Applications*, 8th. New York: Pearson
- Hadi, A.G., Lafta, F., Hashim, A., Hakim, H., Salman, S. R. 2013. *Studying the Effect of KCl Addition on the Electrical Properties of Polystyrene*. Industrial Engineering Letters vol.3, (5). Pp 37-39

- Joey, J.M. Chin K.1989. *Aspect of Power Reduction in The Chlor-Alkali Membrane Electrolysis*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven
- Kermani, M.B., Morshed A. 2003. *Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production a Compendium*. Journal of Corrosion (59): 8
- Kidney, A. J.; Parrish, W.2006. *Fundamental of Natural Gas Processing*. London: Taylor & Francis Group
- Lee, B., Kiwon P. and Hyung-Man Kim.2013. Dynamic Simulation of PEM Water Electrolysis and Comparison with Experiments. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 pp.235 - 248
- Lucile, F. Cézac, P., Contamine, F., Serin, J.P.,; Houssin, D., Arpentinier, P. 2012. *Solubility of Carbon Dioxide in Water and Aqueous Solution Containing Sodium Hydroxide at Temperatures from (293.15 to 393.15) K and Pressure up to 5 MPa: Experimental Measurements*. *J. Chem. Eng. Data*, 57 (3), pp 784–789
- Makhmoudkani, M., Keith D.W. 2009. *Low-Energy Sodium Hydroxide Recovery for CO₂ Capture from Atmospheric Air_Thermodynamic Analysis*. International Journal of Greenhouse Gas Control (3): 376-384
- McCabe, W.L; Smith J.C; Harriott, P. 1985. *Unit Operation of Chemical Engineering 4th Edition*. New York: McGrawHill, Inc.
- Mirzazadeh, T., Mohammadi, F., M. Soltanieh,E. Joudaki. 2008. Optimization of caustic current efficiency in a zero-gap advanced chlor-alkali cell with application of genetic algorithm assisted by artificial neural networks. *Chemical Engineering Journal*.140.157–164
- Moorhouse, j.2000. *Modern Chlor-Alkali Technology Volume 8*. Oxford: Blackwell Science Ltd
- National Center for Biotechnology Information. Sodium Hydroxide. Pub Chem Open Chemistry Database.

https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sodium_hydroxide

- O'Brien, Thomas F., Tilak V. Bommaraju., dan F. Hine. 2005. *Handbook of Chlor-Alkali Technology Volume I: Fundamentals*. New York: Springer
- Rahayaan, B.R.J; Ardhiya; Taufany, F; Susianto. 2015. *Pengaruh Purifikasi Biogas terhadap Efisiensi Overall Generator Listrik*. Publikasi Ilmiah Online Mahasiswa ITS (POMITS) 2015.
- Rinovsky, R. 2010. Profile Blok Natuna Cadangan Gas Terbesar di Dunia. *Tribunnews.com*. diakses tanggal 20 Oktober 2016.
(<http://www.tribunnews.com/tribunners/2010/11/20/profil-e-blok-natuna-cadangan-gas-terbesar-di-dunia>)
- Romero, Virginia, Victor Vega, Javier García, Victor M. Prida, Blanca Hernando, Juana Benavente. 2014. Effect of Porosity and Concentration Polarization on Electrolyte Diffusive Transport Parameters through Ceramic Membranes with Similar Nanopore Size. *Nanomaterial*, 4, 700-711
- Rossum, J.R. n.d. *Fundamentals of Metallic Corrosion in Fresh Water*. *Fundamentals of Metallic Corrosion in Fresh Water*. www.roscoemoss.com/wp-content/uploads/publications/fmcf.pdf
- Ryan, J.L; Bray, L.A; Wheelwright, E.J. 1982. The Use of atalyzed Electrolytic Plutonium Oxide Dissolution (CEPOD) for Waste Treatment. Pasific Northwest Laboratory PNL-SA-13729.
- Ryckebosch, E; Drouillon, M; Vervaeren, H. 2011. *Techniques for Transformation of Biogas to Biomethane*. *Biomass and Bioenergy* Vol 35: 1633–1645
- Satyana, Awang H.; Marpaung, Lambok; Purwaningsih, Margareta; Utama, M. Kusuma.2007. *Regional Gas Geochemistry of Indonesia: Genetic Characterization and Habitat of Natural Gases*. IPA07-G-050

- Seko, Maomi.1972. *The Ion Exchange Membrane, Chlor- Alkali Process*. Ind. Chem-Eng. Prod. Vol 15 (4) pp 286-292.
- Sharma, Sanjay K. 2012. *Green Corrosion Chemistry and Engineering: Opportunities and Challenges*, First Edition. New York: Wiley
- Simon, A., Fujioka T., Price W.E., Nghiem L.D. 2014. *Sodium Hydroxide Production from Sodium Carbonate and Bicarbonate Solutions Using Membran Electrolysis: A Feasible Study*. Separation and Purification Technology (127): 70-76
- Sugiyono, Agus; Anindhita; Boedoyo, M. Sidik; Adiarso.2014. *Outlook Energi Indonesia 2014 Pengembangan Energi untuk Mendukung Program Substitusi BBM*. Jakarta: Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia BPPT
- Sugiyono, Agus; Anindhita; Wahid, Laode M.A.; Adiarso.2016. *Outlook Energi Indonesia 2016 energi untuk mendukung industri hijau*. Jakarta: Pusat Teknologi Sumberdaya Energi dan Industri Kimia BPPT
- Sun, Q., Li H., Yan J., Liu L., Yu Z., Yu.X. 2005. *Selection of Appropriate Biogas Upgrading Technology- A Review Biogas Cleaning, Upgrading and Utilisation*. Renewable and Sustainable Energy Review (51): 521-532
- Tempo.2016. *Kebutuhan Energi Indonesia Tertinggi di ASEAN*. Tempo.co. diakses tanggal 20 Januari 2017. <https://m.tempo.co/read/news/2016/02/18/090746290/kebutuhan-energi-indonesia-tertinggi-di-asean>
- Tuarev, D.Y. 2006. *Use of Membrane Electrolysis for Recovery of Heavy Metal Ions*. Russian Journal of Applied Chemistry Vol. 80: 83–86.
- Wang, M., Lawal A., Stephenson P., Sidders J., Ramshaw C. 2010. *Post combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-art Review*. Chemical Engineering Research and Design (89): 1609-1624

- Weast,R.C.,Ed., 1989. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton: CRC Press
- White, Ralph E. 1984. Electrochemical Cell Design. New York : Plenum Press
- Wolf, A.V., 1966. Aqueous Solutions and Body Fluids. New York : Harper and Row
- Yoo, M., Han S., Wee J. 2013. *Carbon Dioxide Capture Capacity of Sodium Hydroxide Aqueous Solution*. Journal of Enviromental Management (114): 512-519
- Yuan Ma, Fong. 2012. Corrosive Effects of Chlorides on Metals, Pitting Corrosion, Prof. Nasr Bensalah (Ed.),ISBN: 978-953-51-0275-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/pittingcorrosion/corrosive-effects-of-chlorides-on-metals>
- Zhao, B., Sun Y., Yuan Y., Gao J., Wang S., Zhuo Y., Chen C. 2011. *Study on Corrosion in CO₂ Chemical Absorption Process Using Amine Solution*. Energy Procedia (4): 93-100
- Zoulias, E; Varkaraki, E; Lymberopoulos, N; Christodoulos, N; Karagiorgis G.N. 2002. *A Review on Water electrolysis*. Pikermi: Centre for Renewable Energy Sources (CRES).

APPENDIKS A

Pengamatan Arus pada setiap variabel

Tabel A.1 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	1.2	3.79	5.33	5.86	6.31	6.37	6.37	6.23
II	0	1.89	4.48	5.67	6.17	6.21	6.24	6.21	6.1
III	0	2.7	4.98	5.52	5.82	6.05	6.03	5.77	5.55
IV	0	2.64	3.7	4.23	4.76	5.19	5.24	5.06	4.78
	0	2.107	4.237	5.187	5.652			5.852	
	0	5	5	5	5	5.94	5.97	5	5.665

Tabel A.2 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.05 M jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	2.67	5.16	6	6.38	6.38	6.37	6.3	5.85
II	0	2.87	5.13	5.699	6.21	6.21	6.21	5.98	5.54
III	0	3.34	5.6	5.94	6.15	6.1	6.07	5.6	5.06
IV	0	3.12	3.83	4.65	5.25	5.27	5.22	4.8	4.28
	0	3	4.93	5.57225	5.9975	5.99	5.9675	5.67	5.1825

Tabel A.3 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.1 M, jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	3.3	5.8	6.02	5.89	5.86	5.79	5.68	5.42
II	0	3.2	5.67	5.71	5.85	5.69	5.65	5.3	5.13
III	0	4.22	6.1	6.14	6.1	5.72	5.51	4.7	4.66
IV	0	3.13	4.76	5.19	5.29	5.2	4.76	4.29	4.1
	0	3.462	5.582	5.76	5.782	5.617	5.427	4.992	4.827
	0	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabel A.4 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.3 M, jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	5.3	6.06	6.38	6.37	6.35	5.92	5.55	5.32
II	0	5.13	5.75	6.2	6.21	6.21	5.67	5.13	4.84

III	0	6.11	6.17	6.19	6.11	5.59	5.1	5	4.52
IV	0	4.99	5.23	5.31	5.35	5.28	4.78	4.34	4.18
	0	5.3825	5.8025	6.02	6.01	5.8575	5.3675	5.005	4.715

Tabel A.5 laju alir 20 ml/menit, non elektrolit, jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	3.3	5.81	6.88	6.89	6.2	5.71	5.46	4.8
II	0	4.05	6	6.4	6.31	5.8	5.3	4.93	4.5
III	0	4.08	6.1	6.48	6.56	6.2	5.23	4.6	3.84
IV	0	4.73	5.7	6	6.05	5.6	5.1	4.5	3.66
	0	4.04	5.9025	6.44	6.4525	5.95	5.335	4.8725	4.2

Tabel A.6 laju alir 40 ml/menit, elektrolit HCl jarak 3 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	0.62	2.33	4.3	5.82	6.21	6.37	6.42	6.38
II	0	0.8	2.95	4.59	5.67	6.11	6.21	6.21	6.21
III	0	1.67	3.89	5.01	6.1	6.48	6.58	6.33	6.03
IV	0	1.17	2.64	3.17	4.32	4.98	5.29	5.29	5.2
	0	1.065	2.9525	4.2675	5.4775	5.945	6.1125	6.0625	5.955

Tabel A.7 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	10.53	14.37	12.61	10.8	8.97	7.36	6.25	5.47
II	0	9.51	12.19	8.91	6.75	5.28	3.51	2.9	2.43
III	0	10.07	12.76	7.77	4.44	2.24	1.65	1.12	1.03
IV	0	10.59	20	17.02	7.29	3.3	2.26	1.63	1.4
	0	10.175	14.83	11.5775	7.325	4.9475	3.695	2.975	2.5825

Tabel A.8 laju alir 60 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm

Cell/waktu	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I	0	12.11	14.64	15.74	13.57	11.01	11.78	12.09	12.13
II	0	12.21	13.24	11.09	8.91	7.06	8.38	9.25	9.45
III	0	9.45	10.54	8.94	5.98	3.76	6.14	7.02	7.22
IV	0	11.65	14.28	16.71	10.35	5.4	4.76	5.83	6.07
	0	11.355	13.175	13.12	9.7025	6.8075	7.765	8.5475	8.7175

APPENDIKS B

Pengamatan pH dan Hasil percent Recovery pada setiap variabel

Tabel B.1 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 3 cm

non	pH	M	percent konversi
0			0
40	12.43	0.026915	5.38307
80	12.55	0.035481	7.096268
120	12.6	0.039811	7.962143
160	12.65	0.044668	8.933672

Tabel B.2 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.05 M, jarak 3 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0.005	0
40	12.53	0.033884	5.776883
80	12.64	0.043652	7.730317
120	12.65	0.044668	7.933672
160	12.66	0.045709	8.141764

Tabel B.3 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.1 M, jarak 3 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0.01	0
40	12.53	0.033884	4.776883
80	12.58	0.038019	5.603788
120	12.6	0.039811	5.962143
160	12.66	0.045709	7.141764

Tabel B.4 laju alir 40 ml/menit, NaOH 0.3 M, jarak 3 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0.03	0
40	12.51	0.032359	0.471873
80	12.62	0.041687	2.337388
120	12.68	0.047863	3.572602
160	12.68	0.047863	3.572602

Tabel B.5 laju alir 40 ml/menit, elektrolit HCl, jarak 3 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0	0
40	11.97	0.009333	1.866509
80	12.45	0.028184	5.636766
120	12.51	0.032359	6.471873
160	12.69	0.048978	9.795576

Tabel B.6 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0	0
40	13.66	0.457088	91.41764
80	13.7	0.501187	100.2374
120	13.7	0.501187	100.2374
160	13.7	0.501187	100.2374

Tabel B.7 laju alir 60 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0	0
40	13.4	0.251189	50.23773
80	13.6	0.398107	79.62143
120	13.63	0.42658	85.3159
160	13.64	0.436516	87.30317

Tabel B.8 laju alir 20 ml/menit, non elektrolit jarak 3 cm

waktu	pH	M	percent konversi
0		0	0
40	12.63	0.042658	8.53159
80	12.68	0.047863	9.572602
120	12.69	0.048978	9.795576
160	12.69	0.048978	9.795576

APPENDIKS C

PERHITUNGAN Percent Recovery

$$pH=12.63$$

$$OH^- = 10^{-(14-pH)}$$

$$OH^- = 10^{-(14-12.63)}$$

$$OH^- = 0.046258 M$$

$$OH^- = Na^+ = 0.046258 M$$

$$Na^+ = 0.046258 \frac{mol}{l} \times 23 \frac{g}{mol} = 1.063934 \frac{g}{l}$$

$$\% \text{ recovery natrium} = \frac{\text{natrium di NaOH} \left(\frac{g}{l}\right)}{\text{natrium total} \left(\frac{g}{l}\right)} \times 100\%$$

$$\% \text{ recovery natrium} =$$

$$\frac{\text{natrium di NaOH keluaran} \left(\frac{g}{l}\right) - \text{natrium di NaOH masuk} \left(\frac{g}{l}\right)}{\text{natrium total pada brine} \left(\frac{g}{l}\right)} \times 100\%$$

$$\% \text{ recovery natrium} = \frac{1.063934 \left(\frac{g}{l}\right) - 0 \left(\frac{g}{l}\right)}{11.5 \left(\frac{g}{l}\right)} \times 100\% = 8.53\%$$

APPENDIKS D

Perhitungan Current Density

$$\text{Arus} = 1.2 \text{ Ampere}$$

$$\text{Current Density} = \frac{\text{Arus}}{\text{luas permukaan elektroda}}$$

$$\begin{aligned} \text{Current Density} &= \frac{1.2 \text{ A}}{117 \text{ cm}^2} = 0.01256 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \\ &= 12.56 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

APPENDIKS E
PERHITUNGAN Energi dan biaya Produksi
Perhitungan dilakukan peak tertinggi dari
current density

Cell	Daya (watt)
I	70
II	68.6
III	66.2
IV	57.8

***Daya = daya cell 1 + daya cell 2 + daya Cell 3 +
 daya cell 4***

Daya = 0.2626 kW

Konsentrasi Natrium pada menit 160 = 0.04468 M

Produksi = $\frac{\text{Konsentrasi yang terbentuk}}{\text{daya yang diperlukan}}$

Produksi = $\frac{0.04468 M}{0.2626 kW}$

Produksi = 0.17 $\frac{M}{kW}$

Target konsentrasi 0.5 M

Energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan 0.5 M adalah

konsentrasi 0.5 M = $\frac{0.5}{\text{Produksi}}$

konsentrasi 0.5 M = $\frac{0.5}{0.17}$

konsentrasi 0.5 M = 2.939 kW

Biaya produksi 1 kg NaOH

***Karena energy listrik dihitung dalam satuan kWh maka
 produksi diambil basis 1 jam dimana peak daya dianggap stabil***

produksi 1 jam = $\frac{\text{flowrate} \times 0.5 M \times 3600 \times \text{BM NaOH}}{1000}$

produksi 1 jam = $\frac{40 \times 0.5 M \times 3600 \times 40}{1000}$

produksi 1 jam = 48 gram = 0.048 kg

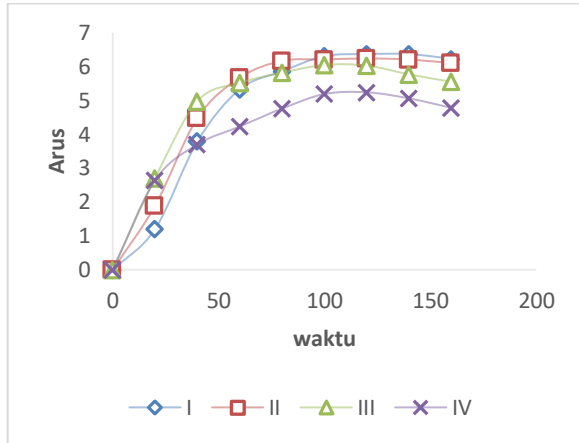
$$\text{biaya 1 kg NaOH} = \frac{\text{Daya 0.5 M} \times \text{biaya listrik 1 kWh}}{\text{produksi 1 jam}}$$

$$\text{biaya 1 kg NaOH} = \frac{2.939 \times 1467}{0.048}$$

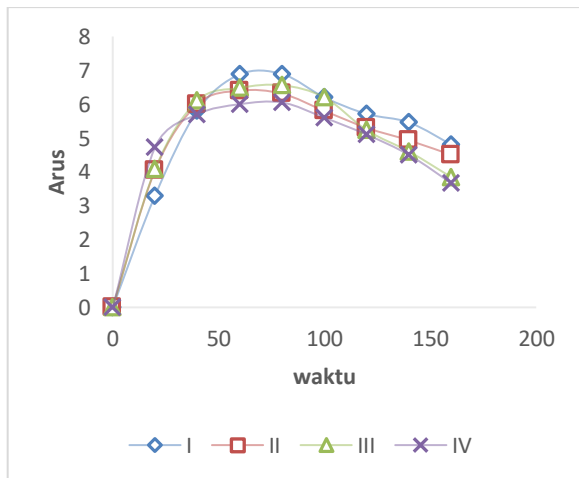
$$\text{biaya 1 kg NaOH} = \text{Rp } 89.837,00$$

APPENDIKS F

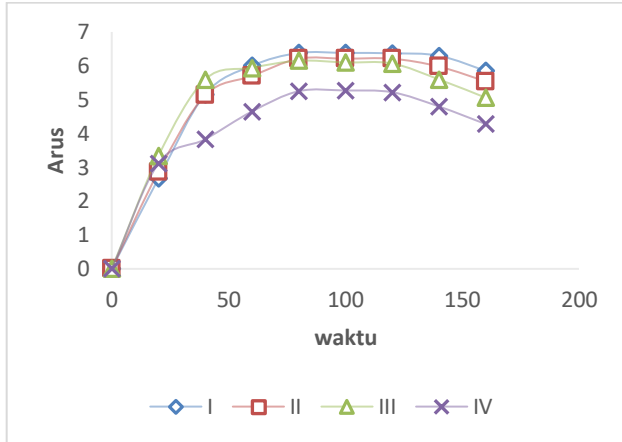
Grafik Arus tiap Cell



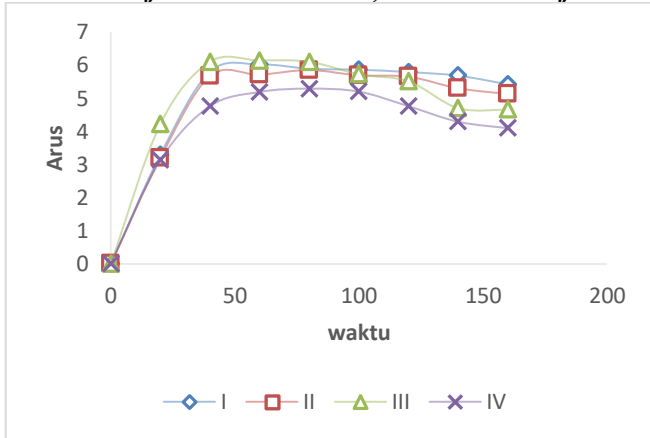
Gambar F.1 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 3 cm



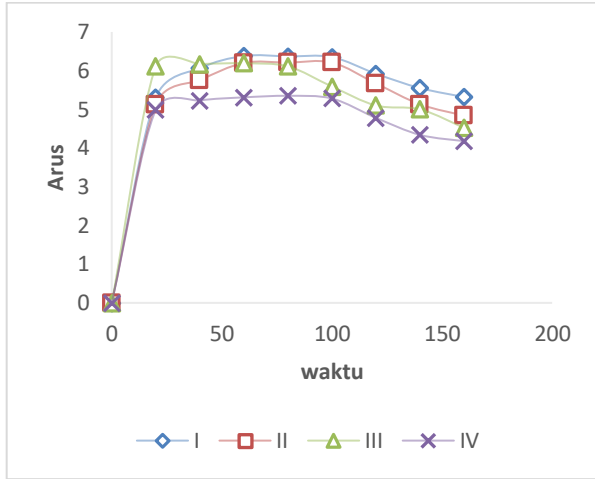
Gambar F.2 laju alir 20 ml/menit, non elektrolit jarak 3 cm



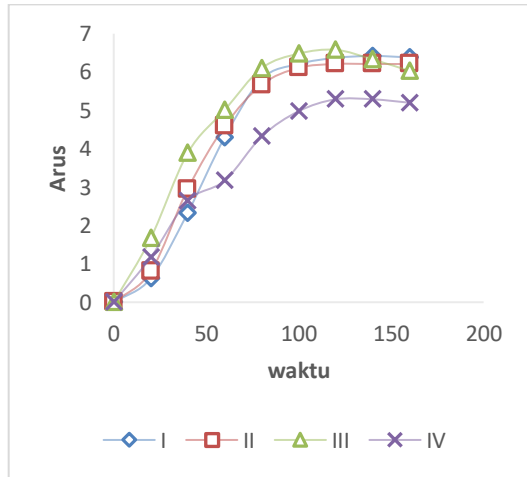
Gambar F.3 laju alir 40 ml/menit, elektrolit 0.05 jarak 3 cm



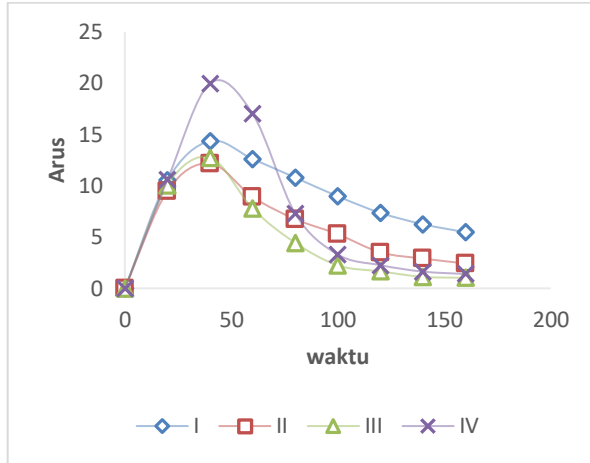
Gambar F.4 laju alir 40 ml/menit, elektrolit 0.1 jarak 3 cm



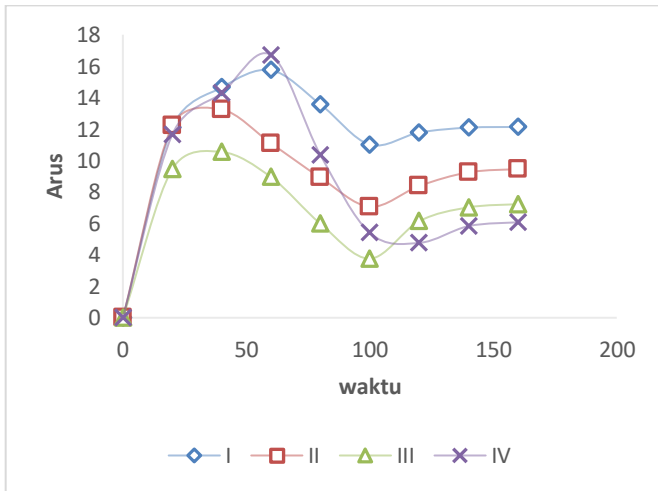
Gambar F.5 laju alir 40 ml/menit, elektrolit 0.3 jarak 3 cm



Gambar F.6 laju alir 40 ml/menit, elektrolit HCl jarak 3 cm

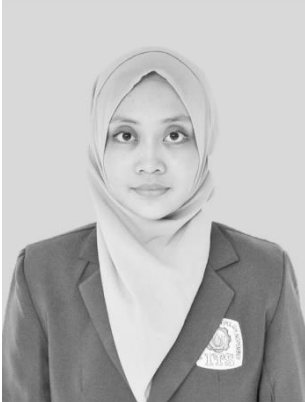


Gambar F.7 laju alir 40 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm



Gambar F. laju alir 60 ml/menit, non elektrolit jarak 1 cm

RIWAYAT HIDUP PENULIS I



Zalza Lola Rinanda, lahir di Jember pada tanggal 21 April 1995, kini berdomisili di Jember, Jawa Timur. Anak pertama dari tiga bersaudara. Memulai pendidikan formal di SDN Jember Lor III, Jember dan lulus pada tahun 2007. Kemudian melanjutkan ke tingkat menengah di SMPN 2 Jember lalu SMAN 1 Jember. Penulis kemudian melanjutkan studi tingkat sarjana di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama melaksanakan studi S1, penulis melakukan kerja praktik di PT Semen Tonasa di Pangkajene dan Kepulauan di Sulawesi Selatan dan menyelesaikan tugas Pra Desain Pabrik dengan judul “*Biogas Power Plan from Water Hyacinth*”. Selain kegiatan akademik, penulis juga aktif dalam Chernival sebagai *Coordinator of Gala Team*. Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini. Semoga apa yang telah dicapai dapat dimanfaatkan sebaik-baiknya.

Hormat saya,

Zalza Lola Rinanda

+62 8523 468 2121

zalzalola@gmail.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS II



Fattah, penulis lahir di Bekasi, 30 Januari 1996. Kini berdomisili di Bekasi, Jawa Barat. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SD Negeri Wanasari 13, SMP Negeri 1 Cikarang Barat, dan SMA Negeri 1 Tambun Selatan. Selama menempuh pendidikan S-1 di Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember aktif dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa sebagai Minister of Research and Technology Ministry, Head of Research and Technology Department di Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia ITS. Penulis juga aktif dalam kegiatan penulisan ilmiah seperti pemakalah pada kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa Nasional 2014, National Education Conference 2014, Petrocomp SPE UGM 2016. Selain itu juga aktif pada kegiatan kepanduan keilmiahan di ITS. Penulis berpengalaman kerja praktek di PT. Rekayasa Industri pada 2016. Pada akhir studi penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa untuk pengerjaan Tugas Akhir Pra Design Pabrik dengan judul, **“Purified Biogas Power Plant”** dan skripsi dengan judul, **“Pengembangan Proses Regenerasi Absorben Naoh Di Dalam Unit Acid Gas Removal Menggunakan Membrane Electrolisis Sistem Kontinu”**.

BIODATA PENULIS 2

Nama : Muhammad Fattah Romdhoni
TTL : Bekasi, 30 Januari 1996
Alamat : Kartika Wanasari Blok d5/22 Cibitung-Bekasi,
Jawa Barat
No HP : 081251721935
Email : m.f.romdhoni1@gmail.com