SKRIPSI – TK141581

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI *CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS* UNTUK REGENERASI ABSORBEN NaOH PADA SISTEM PEMURNIAN BIOGAS UNIT *ACID GAS REMOVAL*

Oleh:
Teofilus Kristanto
NRP. 02211440000072
Tasliya Diba Pujiyanto
NRP. 02211440000091

Dosen Pembimbing
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 19810713 200501 1 001
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 19620820 198903 1 004

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018

FINAL PROJECT – TK145181

DEVELOPMENT OF CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS TECHNOLOGY FOR NaOH ABSORBENT REGENERATION IN THE BIOGAS PURIFICATION SYSTEM AT THE ACID GAS REMOVAL UNIT

Proposed by:
Teofilus Kristanto
NRP. 02211440000072
Tasliya Diba Pujiyanto
NRP. 02211440000091

Advisor
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 19810713 200501 1 001
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 19620820 198903 1 004

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

LEMBAR PENGESAHAN

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI *CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS* UNTUK REGENERASI ABSORBEN NaOH PADA SISTEM PEMURNIAN BIOGAS UNIT *ACID GAS REMOVAL*

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Oleh:

Teofilus Kristanto — **NRP. 02211440000 072**
Tasliya Diba Pujiyanto — **NRP. 02211440000 091**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph. D. (Pembimbing I) .....
2. Dr. Ir. Susianto, DEA. (Pembimbing II) .....
3. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. (Penguji I) .....
4. Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph. D. (Penguji II) .....
5. Dr. Ir. Sumarno, M. Eng (Penguji III) .....

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

Surabaya
Juli, 2018

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI *CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS* UNTUK REGENERASI ABSORBEN NaOH PADA SISTEM PEMURNIAN BIOGAS UNIT *ACID GAS REMOVAL*

Nama : **1. Teofilus Kristanto**
2. Tasliya Diba Pujiyanto
NRP : **1. 02211440000 072**
2. 02211440000 091
Pembimbing : **1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.**
2. Dr. Ir. Susianto, DEA

ABSTRAK

Biogas, salah satu energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini masih memiliki kandungan impurities CO_2 yang cukup tinggi dengan kisaran 27% – 38%. Untuk memenuhi standar penggunaan biogas sebagai bahan bakar, keberadaan CO_2 tersebut harus dihilangkan hingga menjadi 3-5%. Salah satu metode *Acid Gas Removal* untuk menghilangkan kandungan CO_2 dalam biogas adalah metode absorbsi, yaitu dengan mengontakkan biogas dan absorben NaOH dalam *packed column*. Namun demikian, metode ini masih terkendala pada regenerasi absorben NaOH yang membutuhkan energi dan biaya operasional yang tinggi dalam prosesnya. Oleh karena itu, penelitian kami bertujuan untuk mengembangkan teknologi terbarukan yaitu membrane electrolysis dengan sistem seri kontinu untuk memproduksi kembali NaOH dengan biaya yang lebih murah. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan 4 sel membrane electrolysis yang dilengkapi dengan membran nafion ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$) dan lempeng *stainless steel* dengan ketebalan 1 mm sebagai katoda dan anoda. Feed katolit berupa *aquadest* dan *feed* anolit berupa larutan limbah kolom *Acid Gas Removal* yang dihubungkan langsung dengan *membrane electrolysis*. Variabel bebas berupa L/G *packed column* 1/20 dan 1/30, penambahan

larutan elektrolit NaOH dengan konsentrasi 0,01 M dan 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40, 60, 80, dan 100 ml/ menit, serta arah aliran *co-current* dan *counter current*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa hampir keseluruhan grafik memiliki bentuk *volcano*, yaitu terdapat titik puncak pada *flow rate* 80 ml/menit untuk nilai *percent recovery* natrium, *current density*, dan kecepatan *transfer* massa Na^+ dari proses yang ada. Selain itu didapatkan pula hasil analisa faktor-faktor yang berpengaruh pada sistem regenerasi NaOH agar menghasilkan proses yang efisien untuk menekan biaya produksi biogas. Hasil optimal didapatkan pada variable L/G 1/20, *counter current*, dan elektrolit NaOH 0,01 M, pada *flow rate* 80 ml/menit dengan *percent recovery* sebesar 95,50 %, kebutuhan energi 0,2689 kWh, serta biaya produksi NaOH sebesar Rp15.573/ kg NaOH, yang masih jauh dibawah harga pembelian NaOH teknis di pasaran yang berkisar antara Rp20.000 – Rp23.400/ kg NaOH.

Kata kunci: Absorbsi, Biogas, *Membrane Electrolysis*, NaOH, Regenerasi.

DEVELOPMENT OF CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS TECHNOLOGY FOR NaOH ABSORBENT REGENERATION IN THE BIOGAS PURIFICATION SYSTEM AT THE *ACID GAS REMOVAL* UNIT

Name : **1. Teofilus Kristanto**
2. Tasliya Diba Pujiyanto
NRP : **1. 02211440000 072**
2. 02211440000 091
Advisor : **1. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.**
2. Dr. Ir. Susianto, DEA

ABSTRACT

Biogas, one of the alternative energy being developed, has a high CO_2 content in the process, which is 27% - 38%. To meet the standards of biogas for fuel, the presence of CO_2 gas should be eliminated until 3-5%. One of the the best Acid Gas Removal method to eliminate CO_2 content in biogas is absorption method by contacting biogas with NaOH absorbent in the packed column. However, this method is still constrained on the regeneration of NaOH which requires high energy and operational costs in the process. Therefore, our research aims to develop renewable technology that is membrane electrolysis with continuous series system to regenerate the NaOH absorbent with a lower cost. The experiment was conducted experimentally using 4 electrolysis membrane cell equipped with nafion membrane ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$) and plate-shaped stainless steel with thickness of 1 mm as cathode and anode. Chatolyte feed is Aquadest and anolyte feed is the Na_2CO_3 solution of Acid Gas Removal column that is connected directly with membrane electrolysis. The independent variables are L/G packed column 1/20 dan 1/30, the addition of electrolyte NaOH with concentration of 0.01 M and 1 M, the flow rate of Na_2CO_3 40, 60, 80, and 100 ml/ min, and the direction of feed co-

current and counter current flow. The results of this study indicate that most of charts have volcano form, ie there is a peak point at 80 ml/ minute flow rate for the percent recovery rate of sodium, current density, and mass transfer rates of Na^+ of the process. In addition, there were also analysis of factors influencing the NaOH regeneration system to produce an efficient process in order to reduce the cost of biogas production. Optimum results were obtained on variables L/G 1/20, counter current flow, and electrolyte 0.01 M, at 80 ml/ minute flow rate with 95.5% Percent Recovery, 0.2689 kWh energy required, and NaOH production cost of Rp15.573/ kg NaOH, which is below the price of technical NaOH on the market around Rp20.000 – Rp23.400/ kg NaOH.

Keywords: Absorption, Biogas, Membrane Electrolysis, NaOH, Regeneration.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi yang berjudul:

"PENGEMBANGAN TEKNOLOGI *CONTINUOUS SERIES MEMBRANE ELECTROLYSIS* UNTUK REGENERASI ABSORBEN NaOH PADA SISTEM PEMURNIAN BIOGAS UNIT *ACID GAS REMOVAL*"

Laporan 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, ST., Ph. D selaku Dosen Pembimbing 1 dan Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah membimbing dan mendukung kami sepenuhnya.
3. Prof. DR. Ir. Ali Altway, MS., selaku Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa
4. Ibu Siti Nurkhamidah, ST., MS. dan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. selaku Dosen Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa.
5. Bapak Dr. Ir. Juwari M. Eng, selaku Kepala Departemen Teknik Kimia FTI – ITS.
6. Seluruh dosen dan staff jurusan Teknik Kimia FTI - ITS.
7. Rekan – rekan mahasiswa Teknik Kimia ITS angkatan 2014 yang senantiasa memberikan dukungan dalam pengerjaan laporan skripsi ini.

8. 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. Amiin.

Surabaya, Juli 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

COVER LAPORAN i
LEMBAR PENGESAHAN ii
ABSTRAK iii
ABSTRACT v
KATA PENGANTAR vii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xiv
BAB I PENDAHULUAN I-1
I.1 Latar Belakang I-1
I.2 Rumusan Masalah I-3
I.3 Batasan Masalah I-4
I.4 Tujuan Penelitian I-5
I.5 Manfaat Penelitian I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA II-1
II.1 Biogas II-1
II.2 Karbon dioksida (CO_2) II-1
II.3 *Acid Gas Removal* II-2
II.4 Absorben II-3
II.5 Natrium Hidroksida II-5
II.6 Elektrolisis Membran II-6
BAB III METODE PENELITIAN III-1
III.1 Deskripsi Penelitian III-1
III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian III-1
III.3 Variable Penelitian III-5
III.4 Prosedur Penelitian III-5
III.5 *Flow Chart* Penelitian III-7
III.6 Metode Analisa III-8

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN IV-1
IV.1 *Current Efficiency* IV-5
IV.2 Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ Total IV-9
IV.3 *Percent Recovery* Ion Na^+.....IV-14
IV.4 Biaya Produksi NaOH Teknis.....IV-19
IV.5 *Current Density* pada Setiap *Cell* IV-21
IV.6 Pengaruh *Current Density* IV-25
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....V-1
V.1 Kesimpulan.....V-1
V.2 Saran.....V-2
DAFTAR PUSTAKA xiii
DAFTAR NOTASI.....xviii
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Gambar Proses Elektrolisa Membran dari NaCl.. II-7
Gambar III.1 Skema Alat Penelitian.....III-3
Gambar III.2 Skema Peralatan Penelitian Sistem Regenerasi Absorben NaOH dengan Arah Aliran *Counter Current* III-4
Gambar III.3 Skema Peralatan Penelitian Sistem Regenerasi Absorben NaOH dengan Arah Aliran *Co-Current* III-4
Gambar IV.1 Perpindahan Ion yang terjadi pada *Membrane Electrolysis* (a) tampak atas; (b) tampak samping IV-3
Gambar IV.2 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH IV-5
Gambar IV.3 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal* IV-6
Gambar IV.4 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter Current* dan *Co-Current*).....IV-8
Gambar IV.5 Grafik kecepatan *transfer* massa Na+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH IV-9
Gambar IV.6 Grafik kecepatan *transfer* massa Na+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal* IV-11

Gambar IV.7 Grafik kecepatan *transfer* massa Na+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter Current* dan *Co-Current*).....IV-12
Gambar IV.8 Grafik *% recovery* Na+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH (1 M dan 0.01 M).....IV-14
Gambar IV.9 Grafik *% recovery* Na+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal* (1/20 dan 1/30) IV-15
Gambar IV.10 Grafik *% recovery* Na+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter Current* dan *Co-Current*).....IV-17
Gambar IV.11 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan variabel *Counter Current*, L/G 1/20, Elektrolit 1 M IV-21
Gambar IV.12 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan variabel *Counter Current*, L/G 1/20, Elektrolit 0.01 M IV-21
Gambar IV.13 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan variabel *Counter Current*, L/G 1/30, Elektrolit 0.01 M IV-22
Gambar IV.14 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan variabel *Co-Current*, L/G 1/20, Elektrolit 0.01 M IV-22
Gambar IV.15 (a) Bagian anoda dari *membrane electrolysis cell*; (b) dinamika aliran dari gelembung udara dengan porositas yang lebih rendah; (c) porositas yang lebih tinggi.....IV-24

Gambar IV.16 Grafik konsentrasi *regenerated* NaOH terhadap *Current Density* dengan *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M.....IV-25
Gambar IV.17 Grafik *Current Efficiency* terhadap *Current Density* dengan *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M.....IV-26
Gambar IV.18 Grafik konsentrasi NaOH per daya terhadap *Current Density* dengan *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M.....IV-27
Gambar IV.19 Grafik biaya produksi NaOH teknis terhadap *Current Density* dengan *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M.....IV-28

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Perbandingan Absorben pada *Acid Gas Removal* II-4
Tabel II.2 Data larutan Garam Natrium II-7
Tabel IV.1 Biaya produksi NaOH Teknis (Rp/ kg NaOH) IV-19

BAB I
PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Energi merupakan salah satu kebutuhan manusia untuk menunjang berbagai aktifitas dalam kehidupan sehari-hari. Seiring bertumbuhnya perekonomian Indonesia, kebutuhan energi juga akan terus meningkat (ESDM, 2017). Berbagai langkah strategis pun telah dilakukan Pemerintah untuk menjamin ketersediaan energi nasional, salah satunya adalah dengan mendorong secara masif pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT).

Indonesia memiliki banyak potensi EBT yang tersebar di berbagai wilayah di Indonesia, antara lain panas bumi, air, bioenergi, surya, angin dan laut. Energi baru dan terbarukan sangat penting untuk mewujudkan ketahanan energi di masa depan. Terlebih, Indonesia memiliki potensi EBT sebesar lebih dari 441 GW, yang sejauh ini baru terealisasi sebesar 8,89 GW (ESDM, 2017).

Salah satu energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini yaitu bioenergi-biogas (ESDM, 2017). Sistem biogas mengacu pada skema manajemen energi skala kecil yang mengubah limbah hewan dan residu pertanian menjadi biogas, yaitu gas yang mudah terbakar dengan komponen utama gas metana (CH_4). Biasanya sistem terdiri dari *digester* anaerobik yang terbuat dari beton. Biogas yang diproduksi mampu menghasilkan energi terbarukan yang serbaguna, karena metana dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar fosil baik pada panas maupun pembangkit tenaga listrik dan sebagai bahan bakar kendaraan (Weiland, 2009). Bahkan pemanfaatan biogas ini sudah di atur dalam Peraturan Menteri ESDM RI Nomor 50 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik.

Namun dalam prosesnya, biogas memiliki kandungan CO_2 yang cukup tinggi, yaitu sebesar 27% – 38% (Detman, dkk., 2017).

Untuk memenuhi standar penggunaan biogas, keberadaan gas CO_2 harus dihilangkan, baik pada biogas yang digunakan dalam rumah tangga maupun di dunia industri. Hal ini dikarenakan CO_2 merupakan kontaminan utama yang dapat menyebabkan turunnya nilai kalor (*heating value*) saat biogas diaplikasikan untuk menghasilkan energi panas dan listrik (Jiang, 2018). Selain itu, CO_2 bersifat korosif apabila terdapat air sehingga dapat merusak perpipaan dan sistem utilitas pabrik (Kermani, 2003). Oleh karena itu, berdasarkan Huguen (2010), yang merupakan hasil pengujian sampling biogas dengan standar internasional di berbagai negara, kandungan CO_2 maksimum yang diperbolehkan terkandung dalam biogas siap pakai yaitu berkisar antara 3-5%.

Menurut Andriani (2013), terdapat beberapa metode untuk menghilangkan kandungan CO_2 dalam biogas, antara lain *water scrubbing*, *chemical scrubbing* / *chemical absorption*, *physical scrubbing* / *physical absorption*, *pressure swing adsorption* (PSA), *membrane based techniques*, *biological techniques*, dan *cryogenic separation*.

Berdasarkan hasil penelitian Andriani (2013), *chemical scrubbing*/ *chemical absorption* memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya, yaitu tingginya kemurnian CH_4, banyaknya CO_2 yang terlarut dalam pelarut, proses yang cepat, volume kolom yang dibutuhkan kecil, serta pelarut kimia lebih mudah untuk diregenerasi. Namun kekurangan dari metode ini adalah energi yang tinggi dibutuhkan untuk menghasilkan *steam* untuk meregenerasi pelarut kimia yang digunakan. Maka dari itu, *chemical scrubbing*/ *chemical absorption* ini perlu dikembangkan lebih jauh untuk menjadikannya metode yang paling efektif.

Pada metode *chemical absorption* atau absorbsi kimia, berbagai absorben yang memiliki sifat selektif terhadap CO_2 telah dipelajari untuk pengolahan biogas. Absorben yang ideal harus memiliki kapasitas absorpsi yang tinggi, stabil, tidak berbahaya, serta tersedia secara komersial. Absorben yang biasa digunakan yaitu ammonia, alkali, dan amina (Maile, 2017). Berdasarkan Maile (2017), absorben-absorben tersebut memiliki kelemahan

dalam prosesnya, pada absorben amonia yaitu volatilitas yang tinggi, kecepatan absorbsi CO_2 yang rendah, serta akan terdapat amonia yang ikut teruapkan bersama biogas yang telah diproses. Absorben alkali (NaOH) kelemahannya yaitu membutuhkan panas yang tinggi untuk proses regenerasinya. Sedangkan absorben amina memiliki kelemahan yaitu biaya alat yang tinggi, korosif, dibutuhkan panas untuk regenerasi, serta pengendapan garam amina dan dapat terbentuk busa. Diantara ketiga absorben tersebut, NaOH merupakan absorben yang paling menguntungkan digunakan sebagai absorben pemurnian biogas dengan banyak kelebihan yang ditawarkannya yaitu energi listrik yang digunakan dalam proses rendah, gas metana yang ikut terabsorbsi NaOH rendah serta absorben yang mudah didapatkan.

Namun menurut Maile (2017), disamping dari kelebihannya, NaOH memiliki kelemahan terbesar pada proses regenerasinya yang harus diatasi. Didukung penelitian Boaciocchi (2012), mengenai regenerasi NaOH yang tidak ekonomis karena produk dari absorbsi CO_2 adalah larutan Na_2CO_3 dan $NaHCO_3$ yang sulit diregenerasi. Dalam prosesnya, suhu regenerasi NaOH dapat mencapai 900^oC, sehingga membutuhkan energi yang besar (Makhmoudkani, 2009).

Saat ini, lebih dari 90% produksi NaOH menggunakan *membrane electrolysis* (Savari, 2008). Maka dari itu, *membrane electrolysis* dapat dimanfaatkan pula untuk meregenerasi NaOH. Kombinasi reaksi elektrokimia dan membran dapat digunakan untuk mengubah garam menjadi asam dan basa penyusunnya (Faverjon, 2006). Sehingga *membrane electrolysis* meruapakan teknologi yang layak digunakan untuk meregenerasi NaOH pada unit *Acid Gas Removal* (Simon, 2014)

Pada penelitian Simon (2014) tentang regenerasi NaOH dari larutan *limbah* yang terdiri dari NaCl, Na_2CO_3, dan $NaHCO_3$ dengan *membrane electrolysis* sistem *batch*, NaOH berhasil terbentuk kembali namun *Current Density* yang digunakan dalam penelitian ini masih tinggi, sehingga membutuhkan arus yang besar dalam proses regenerasinya. Dari penelitian pembentukan NaOH

dari Na_2CO_3 yang dilakukan oleh Simon (2014) disimpulakan bahwa NaOH dengan konsentrasi tinggi akan didapatkan dengan mensirkulasikan larutan di katoda semakin besar nilai *Current Density* maka biaya untuk menghasilkan NaOH semakin besar.

Berdasarkan penelitian Simon (2014) tersebut, masih terdapat beberapa kelemahan pada proses regenerasi NaOH yaitu produk belum dapat diproduksi secara massal (skala industri) karena sistem *batch* akan membutuhkan volume yang besar sehingga tidak ekonomis. Menurut White (1989) ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan pada desain *membrane electrolysis* yaitu luas permukaan elektroda, jenis dan jarak elektroda, tekanan dan suhu, serta kecepatan *flow rate* dan model *flow rate*.

Oleh karena itu, perlu dilakukan inovasi pada faktor-faktor yang berpengaruh pada desain *membrane electrolysis* agar dihasilkan proses yang lebih efisien yaitu dengan menjadikannya sistem seri kontinu dan menghubungkan langsung dengan unit *Acid Gas Removal,* menambahkan elektrolit pada unit regenerasi, serta arah aliran larutan *Counter Current*.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu variabel-variabel apa saja yang berpengaruh dalam menjalankan sistem regenerasi NaOH dengan menggunakan dengan *membrane electrolysis* seri kontinu agar diperoleh sistem yang lebih efisien serta produk regenerasi dapat dimanfaatkan kembali untuk proses absorpsi dalam sistem produksi biogas. Serta bagaimana membuat sistem regenerasi NaOH yang efektif untuk menekan biaya produksi biogas.

I.3 Batasan Masalah

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

1. Limbah Na_2CO_3 yang digunakan dalam penelitian regenerasi merupakan limbah yang dihasilkan pada kolom absorber (unit *Acid Gas Removal*).

2. Pada unit *Acid Gas Removal*, syngas yang digunakan memiliki kandungan gas nitrogen dan CO_2, dengan persentase kandungan CO_2 30% (sesuai dengan CO_2 rata-rata yang terkandung dalam biogas).
3. Nantinya akan dilakukan perbandingan molaritas dari larutan NaOH sebelum masuk kolom absorber (unit *Acid Gas Removal*) dengan NaOH hasil regenerasi.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:
1. Mengetahui pengaruh rasio aliran feed *Acid Gas Removal* (*Liquid*/ Gas) terhadap konsentrasi larutan Na_2CO_3 yang dihasilkan.
2. Mengetahui pengaruh *flow rate* larutan limbah Na_2CO_3, konsentrasi larutan elektrolit, serta sistem aliran yang digunakan (*Co-Current* dan *Counter Current*) terhadap *percent recovery* natrium, *current density*, *current efficiency* dan energi yang dibutuhkan untuk memproduksi NaOH dengan *membrane electrolysis*.
3. Mengetahui faktor-faktor yang berpengaruh pada sistem regenerasi NaOH untuk menghasilkan proses yang efisien agar dapat menekan biaya produksi biogas.

I.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah didapatkannya kondisi operasi yang paling efektif dan efisien untuk meregenerasi NaOH dengan *membrane electrolysis* dalam proses produksi biogas yang ekonomis dan ramah lingkungan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Biogas

Biogas adalah gas yang mudah terbakar dengan komponen utama gas metana, dibuat dari limbah hewan dan residu pertanian. Pada penelitian Detman pada tahun 2017, pembuatan biogas secara fermentasi anerobik dibagi menjadi empat langkah besar, yaitu:

1. Hidrolisis polimer organik yang kompleks menjadi monomer organik
2. Acidogenesis, dimana akan dihasilkan gas hidrogen dan karbon dioksida beserta produk fermentasi lainnya, seperti asam organik pendek dan alkohol
3. Acetogenesis, dimana produk fermentasi seperti asam organik pendek dan alkohol dioksidasikan menjadi gas hidrogen, karbon dioksida, dan asetat, biasanya dengan proses degradasi sintropi. Reaksi pada proses acetogenesis adalah sebagai berikut:
   $2\ CH_3CH_2OH + 2\ H_2O \rightarrow 2\ CH_3COOH + 4\ H_2$
   ($\Delta G^{\circ\prime} = +19$ kJ)
4. Methanogenesis, dimana produk fermentasi dioksidasi menjadi gas metana. Reaksi pada proses methanogenesis adalah sebagai berikut:
   $4\ H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$
   ($\Delta G^{\circ\prime} = -131$ kJ)

Proses Acetogenesis dan Methanogenesis berhubungan dekat dan meliputi hubungan sintropi antara bakteri asetogen yang memproduksi gas hidrogen dan bakteri metanogen yang memproduksi gas metana.

(Drake, Harold L., dkk, 2009)

II.2 Karbon dioksida (CO_2)

Karbon dioksida (CO_2) adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah

atom karbon dengan berat molekul 44 g/mol. CO_2 dapat menyebabkan beberapa permasalahan antara lain; bersifat korosif apabila terdapat air sehingga dapat merusak perpipaan dan sistem utilitas pabrik (Kermani, 2003). Dalam biogas, karbon dioksida adalah salah satu gas pengotor yang harus dipisahkan. Kadar CO_2 pada biogas sangat tinggi, yaitu 27% – 38% (Detman, dkk., 2017). Sehingga nilai kalor dan nilai ekonomis biogas sangat rendah. Selain itu, karbondioksida menurunkan nilai *heating value* pada gas dan menyebabkan korosi peralatan. Untuk meningkatkan nilai kalor dan ekonomisnya, kandungan CO_2 pada biogas harus dihilangkan dengan alat *Acid Gas Removal* (Detman, dkk, 2017).

II.3 *Acid Gas Removal*

Gas pengotor yang dihilangkan pada proses ini adalah CO_2 dan H_2S sebagai pengotor biogas. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan kandungan CO_2 dalam biogas, antara lain *water scrubbing*, *chemical scrubbing*/ *chemical absorption*, *physical scrubbing*/ *physical absorption*, *pressure swing adsorption* (PSA), *membrane based techniques*, *biological techniques*, dan *cryogenic separation.*

Water scrubbing merupakan metode yang sederhana untuk menghilangkan kandungan CO_2 dikarenakan CO_2 memiliki kelarutan yang tinggi dalam air dibandingkan dengan metana. Biogas, yang sebagian besar mengandung metana (CH_4) dan CO_2 akan dicampur dengar air pada *packed scrubber column*. Karena perbedaan kelarutan CH_4 dan CO_2, jika campuran biogas dilewatkan ke aliran air, maka CO_2 akan larut ke dalam air dan CH_4 akan tetap berada dalam fase gas, sehingga CO_2 bisa dipisahkan dari metana. Penurunan konsentrasi CO_2 terjadi selama biogas mengalir melalui air sehingga gas menjadi lebih terkonsentrasi dengan metana. Kinerja proses ini tergantung pada faktor-faktor seperti kolom *scrubbing*, komposisi gas mentah, *flow rate* air, dan kemurnian air.

Sedangkan *pressure swing adsorption* (PSA) adalah metode umum yang biasa digunakan untuk memisahkan gas

tertentu dari campuran gas berdasarkan afinitasnya terhadap bahan adsorben. Dalam hal pemurnian biogas, PSA menggunakan *package column* yang diisi dengan bahan adsorptif sebagai saringan molekuler seperti zeolit, karbon aktif, atau silika gel untuk adsorpsi diferensial gas (CO_2) dan membiarkan gas metana untuk lewat. Umumnya, unit PSA terdiri dari tangka yang disusun seri, masing-masing bekerja pada stadion yang berbeda: adsorpsi, depressurization, desorpsi, dan pressurization. (Andriani, 2013)

Berdasarkan hasil penelitian Andriani (2013), *chemical scrubbing*/ *chemical absorption* memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya, yaitu tingginya kemurnian CH_4, banyaknya CO_2 yang terlarut dalam pelarut, proses yang cepat, volume kolom yang dibutuhkan kecil, serta pelarut kimia lebih mudah untuk diregenerasi. Namun kekurangan dari metode ini adalah energi yang tinggi dibutuhkan untuk menghasilkan steam untuk meregenerasi pelarut kimia yang digunakan. Maka dari itu, *chemical scrubbing*/ *chemical absorption* ini perlu dikembangkan lebih jauh untuk menjadikannya metode yang paling efektif.

II.4 Absorben

Absorben merupakan cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi, beberapa persyaratan absorben 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 dilakukan proses *recovery* 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. Kinerja *absorber* juga

dipengaruhi oleh tekanan, *flow rate* gas, serta konsentrasi larutan penyerap (Mc. Cabe, 1999).

Berdasarkan Maile (2017), absorben-absorben tersebut memiliki kelemahan dalam prosesnya, pada absorben amonia yaitu volatilitas yang tinggi, kecepatan absorbsi CO_2 yang rendah, serta akan terdapat amonia yang ikut teruapkan bersama biogas yang telah diproses. Pada absorben NaOH yaitu membutuhkan panas yang tinggi untuk proses regenerasinya. Sedangkan absorben amina memiliki kelemahan yaitu biaya alat yang tinggi, korosif, dibutuhkan panas untuk regenerasi, serta pengendapan garam amina dan dapat terbentuk busa. Diantara ketiga absorben tersebut, NaOH merupakan absorben yang paling menguntungkan digunakan sebagai absorben pemurnian biogas dengan banyak kelebihan yang ditawarkannya yaitu energi listrik yang digunakan dalam proses rendah, gas metana yang ikut terabsorbsi NaOH rendah serta absorben yang mudah didapatkan.

Tabel II.1 Perbandingan Absorben pada *Acid Gas Removal*

Bahan Kimia	Kelebihan	Kelemahan
Ammonia	1. Dapat mengabsorbsi CO_2 dengan jumlah yang tinggi 2. Membutuhkan sedikit panas dan listrik untuk pengoperasiannya 3. Tidak ada degradasi pelarut	1. Volatil 2. Kecepatan absorbsi CO_2 yang lambat 3. Pelarut dapat terbawa bersama biogas yang telah terpurifikasi
NaOH	1. Membutuhkan sedikit listrik untuk pengoperasiannya 2. Sedikit gas CH_4 yang terabsorbsi oleh absorben	1. Membutuhkan biaya alat dan operasi yang mahal 2. Membutuhkan banyak panas untuk regenerasi absorben

Amine	1. Efisiensi tinggi 2. Biaya operasi dan regenerasi yang murah 3. Dapat mengabsorbsi CO_2 dengan jumlah yang tinggi.	1. Membutuhkan biaya alat yang tinggi karena adanya daya korosi 2. Membutuhkan panas untuk regenerasi amine 3. Pengendapan garam amine dan dapat terbentuk busa

(Maile, O.I., *dkk*, 2017)

Dari ketiga absorben diatas, NaOH dipilih sebagai absorben yang paling baik untuk dilakukan metode *recovery*. Hal ini ditunjukkan dengan data *unit operation cost per recovery* yang paling tinggi. Sehingga dipilihlah NaOH sebagai absorben CO_2 pada unit *Acid Gas Removal* yang dapat disebut juga sebagai *Caustic Wash Tower*.

II.5 Natrium hidroksida

Natrium hidroksida (NaOH) adalah senyawa kimia yang bersifat basa. Natrium hidroksida memiliki berat molekul sebesar 40 g/mol. Pada kondisi ambient, NaOH berbentuk kristal putih tidak berbau yang dapat mengabsorbsi 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 (Na_2CO_3) dengan reaksi seperti berikut:

$$2\ NaOH(aq) + CO_2(g) \rightarrow 2\ Na_2CO_3(aq) + H_2O(l)$$

(Maile, O.I., dkk, 2017)

Adapun kelarutan karbon dioksida didalam NaOH bergantung pada tekanan dan temperatur dari NaOH, semakin tinggi temperatur 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.6 Elektrolisis Membran

Elektrolisis membran adalah proses dimana terjadi reaksi di kedua elektroda, yaitu reduksi katodik serta oksidasi anodik, 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).

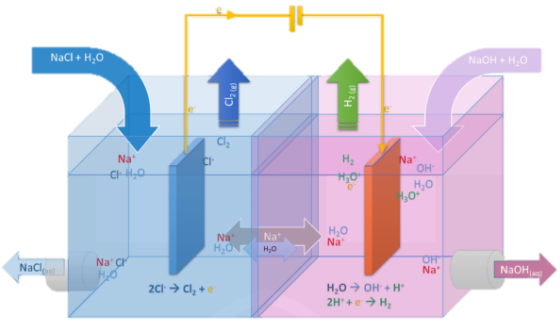
Dalam proses elektrolisis chloro-alkali membran saat ini, air garam dimasukkan ke anoda yang menghasilkan larutan NaOH, klorin dan gas hidrogen. Dengan demikian, reaksi berikut terjadi di anoda dan katoda:

Anoda: $2Cl^-_{(aq)} \rightarrow Cl_{2\,(g)} + 2e^-$

Katoda: $2H_2O_{\,(l)} + 2e^- \rightarrow H_{2\,(g)} + 2OH^-_{(aq)}$

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:

$$2NaCl_{\,(aq)} \rightarrow 2NaOH_{\,(aq)} + H_{2\,(g)} + Cl_{2\,(g)}$$



Gambar II.1 Gambar Proses Elektrolisa Membran dari NaCl

Selain proses pembentukan NaOH dari NaCl, elektrolisis membran 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 ekivalen dari natrium di dalam ketiga jenis garam tersebut yang bisa dilihat pada tabel dimana nilai terbesar terdapat pada $NaHCO_3$ (Simon, 2014).

Tabel II.2 Data Larutan Garam Natrium

Salt	**BM (g/mol)**	**Kelarutan pada 25ºC (g/L)**	**Konduktivitas 10% b/b air garam pada 25ºC (mS/cm)**
NaCl	58,44	362	130
$NaHCO_3$	84	105	55
Na_2CO_3	106	307	79

(Simon, 2014)

Tingkat transportasi Na^+ ion melalui membran penukar kation mengikuti hukum Faraday 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 *flow rate*an larutan air garam (U_{limbah}), 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:

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

Dengan koefisien efisiensi (ε):

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

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^+) konsesntrasi 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 membran 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 :

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

Dimana nilai ($E_{aq}^{C} - E_{aq}^{A}$) merupakan perbedaan energi Gibbs dari proses yang terjadi. Energi Gibbs 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 temperatur semakin rendah energy Gibbs yang dibutuhkan (Joe, 1989).

Pada desain sel membran elektrolisa ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan karena berhubungan dengan jumlah arus yang terbentuk, yaitu:

1. Luas Permukaan elektroda
   Sebanding dengan jumlah arus yang di-*transfer*.
2. Geometri elektroda
   Bentuk dari geometri elektroda akan mempengaruhi pembentukan layer gas pada saat proses elektrolisa terjadi.
3. Jenis elektroda
   Jenis elektroda mempengaruhi terbentuknya *over-voltage* dari sebuah proses membran elektrolisa.
4. Jarak elektroda
   Jarak elektroda mempengaruhi arus yang ter-*transfer* 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 disiasati dengan menaikan tekanan. Dimana pada proses ini tekanan bisa digunakan 12 bar dan suhu 80^{o}C.
6. Kecepatan *flow rate* dan model *flow rate*
   Kecepatan *flow rate* mempengaruhi waktu tinggal dan *recovery* yang terjadi dimana semakin cepat *flow rate* semakin rendah *recovery* dari proses yang terjadi. Selain itu bentuk *flow rate* juga mempengaruhi seperti *Counter Current, Co-Current,* dan *cascade*.

(White, 1989)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh flow rate larutan Na2CO3, konsentrasi larutan elektrolit, serta sistem aliran yang digunakan (*Co-Current* dan *Counter Current*) terhadap molaritas NaOH yang dihasilkan, *Percent Recovery* natrium, dan produksi NaOH per energi, serta pegoptimalan terhadap hasil penelitian. Pada penelitian ini unit *Acid Gas Removal* dihubungkan langsung dengan membrane electrolysis seri kontinu yang akan meregenerasi limbah Na2CO3 yang dihasilkan oleh unit *Acid Gas Removal* tersebut. Kemampuan regenerasi diukur melalui *Percent Recovery*. Dalam penelitian ini didapatkan hasil berupa arus, daya, pH larutan Na_2CO_3 dan larutan NaOH sebagai produk membrane electrolysis. Selain itu, akan didapatkan energi yang dibutuhkan untuk proses regenerasi per kg NaOH teknis, *Current Density*, kecepatan *transfer* massa Na+, *Current Efficiency*, dan kecepatan *transfer* massa Na+ total.

III.2. Bahan dan Peralatan Penelitian

III.2.1 Bahan Penelitian

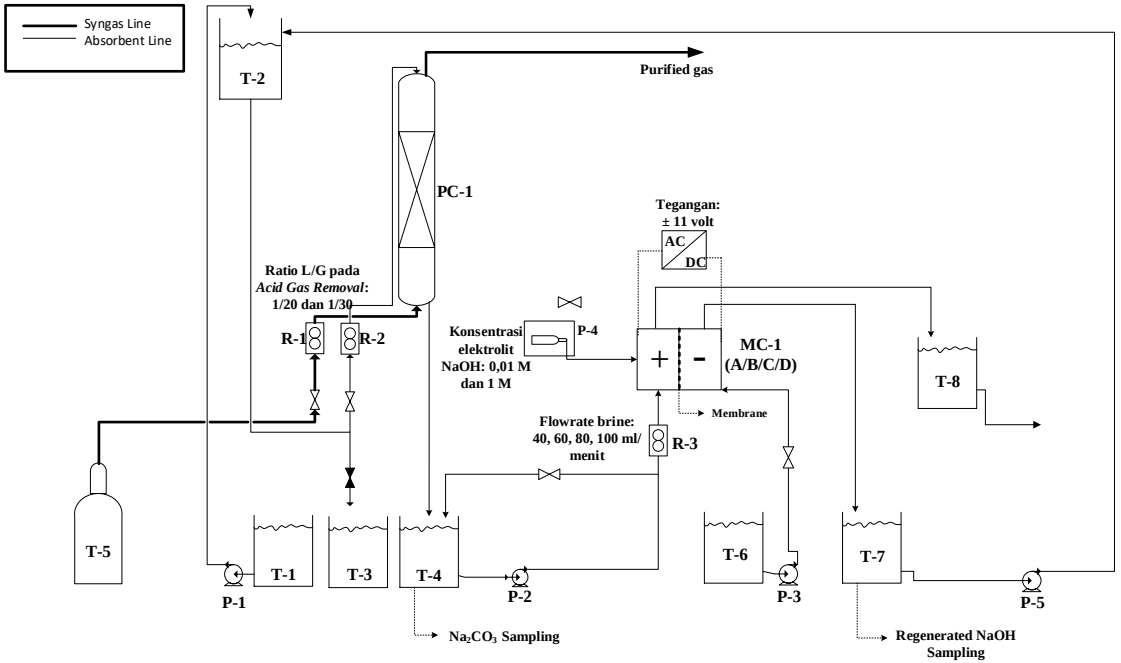
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Natrium hidroksida (NaOH) teknis (98%) dari PT. Brataco
2. *Aquadest* dari UD. Sumber Ilmiah Persada
3. *Syntetic* Gas (CO_2 30%, N_2 70%) dari PT. Aneka Gas

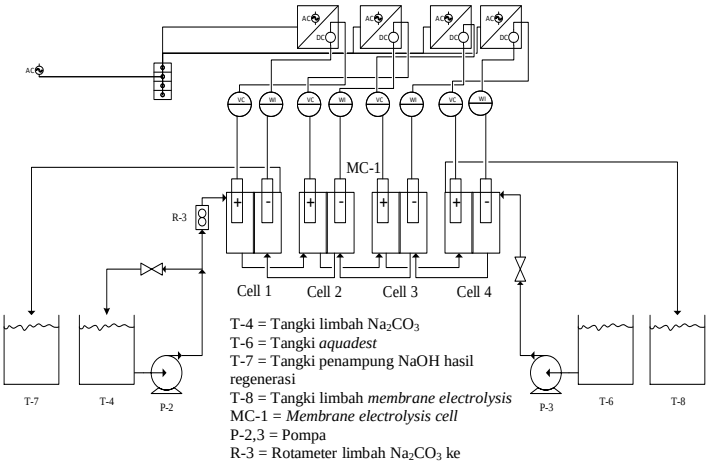
III.2.2 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan unit regenerasi NaOH, 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 ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$), ketebalan 440 μm, counterion dengan ion Na^+, memiliki *transport number* >0.95, dan digunakan pada industri *chlor alkali* dengan bentuk penampang lembaran; dengan *stainless*

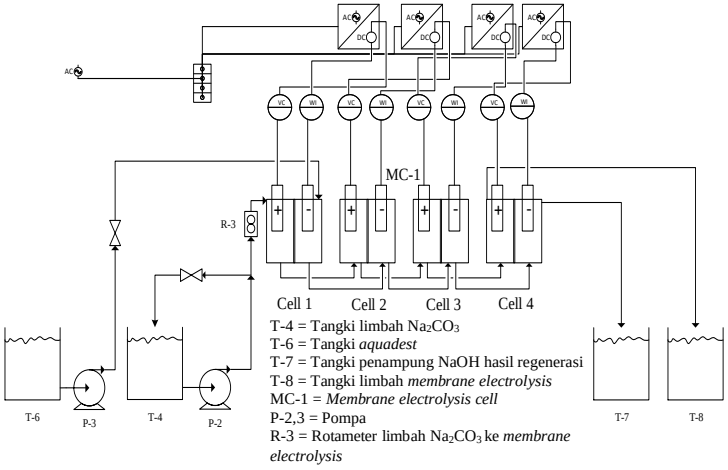
steel sebagai katoda dan anoda dengan ketebalan 1 mm berbentuk plate; kemudian switching voltage dengan spesifikasi merk Chinai S250-12, serta 2 buah *flow meter* yang mengatur kedua aliran *feed* (Gambar III.2).



Gambar III.1 Skema Alat Penelitian



Gambar III.2 Skema Peralatan Penelitian Sistem Regenerasi Absorben NaOH dengan Arah Aliran *Counter Current*



Gambar III.3 Skema Peralatan Penelitian Sistem Regenerasi Absorben NaOH dengan Arah Aliran *Co-Current*

III.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Variabel tetap
1. Luas permukaan elektroda 117 cm^2
2. Jarak antar elektroda pada *membrane electrolysis* 1 cm
3. Sumber tegangan DC 11 Volt
4. Absorban NaOH pada *Acid Gas Removal* 0.1 M

b. Variabel bebas
1. Rasio aliran *feed Acid Gas Removal* (L/G): 1/20 dan 1/30
2. *Flow rate* larutan Na_2CO_3: 40, 60, 80, 100 ml/menit
3. Konsentrasi larutan elektrolit NaOH: 0.01 M dan 1 M
4. Arah aliran *Co-Current* dan *Counter Current membrane electrolysis*

c. Variabel respon
1. Molaritas NaOH yang dihasilkan
2. *Percent Recovery* Natrium
3. Energi yang dibutuhkan/ kg NaOH
4. *Current Density*
5. Kecepatan *Transfer* Massa Na+
6. Kecepatan *Transfer* Massa Na+ Total

III.4. Prosedur Penelitian

III.4.1 Prosedur Umum

1. Menyusun rangkaian alat penelitian (sesuai Gambar III.1) dengan proses regenerasi *membrane electrolysis cell* yang berjumlah 4 disusun secara seri (sesuai Gambar III.2).
2. Menjalankan prosedur unit *Acid Gas Removal* (**Sub-bab III.4.2**).
3. Setelah proses *steady* (± 2 menit), kemudian mulai mengisi tangki limbah Na_2CO_3 (T-4).
4. Setelah tangki limbah Na_2CO_3 cukup terisi (± 15 menit), kemudian mulai menjalankan prosedur unit regenerasi *membrane electrolysis* (**Sub-bab III.4.3**).

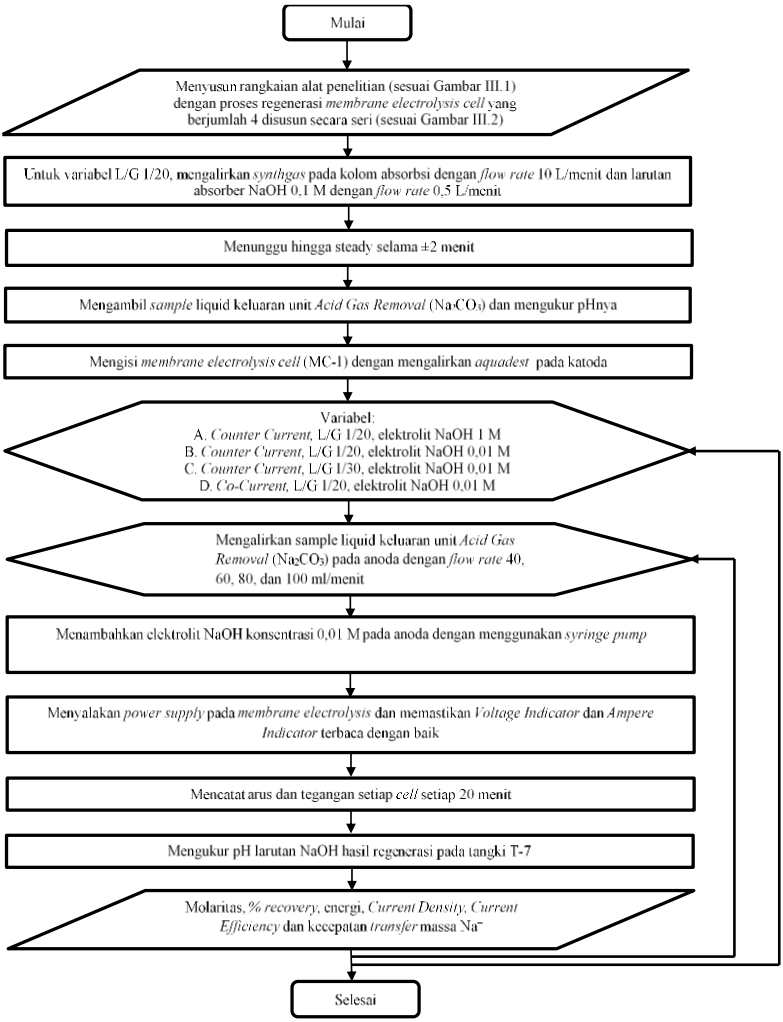
III.4.2 Prosedur Unit *Acid Gas Removal*

1. Mempersiapkan larutan absorber NaOH 0,1 M pada tangki feed dan gas CO_2 pada tabung gas.
2. Membuka *valve* keluaran liquid di bagian bawah kolom absorbsi.
3. Untuk L/G 1/20, mengalirkan gas CO_2 pada kolom absorbsi dengan *flow rate* 10 ml/ menit dan dilanjutkan dengan mengalirkan larutan absorber NaOH 0,1 M dengan *flow rate* 0,5 ml/menit.
4. Menunggu hingga steady selama ±2 menit, kemudian mulai mengisi tangki limbah Na2CO3 (T-4).
5. Mengambil *sample* liquid keluaran unit *Acid Gas Removal* (Na_2CO_3).
6. Mengukur pH liquid keluaran unit *Acid Gas Removal* (Na_2CO_3).
7. Mengulang langkah 1-5 untuk L/G 1/30.

III.4.3 Prosedur Unit *Membrane Electrolysis*

1. Mengisi *cell membrane electrolysis* (MC-1) dengan mengalirkan *aquadest* pada katoda.
2. Mengalirkan limbah Na_2CO_3 dari unit *Acid Gas Removal* (Na_2CO_3) ke *cell* anoda dengan *flow rate* 40 ml/menit.
3. Menambahkan elektrolit NaOH konsentrasi 0,01 M pada anoda dengan menggunakan *syringe pump*.
4. Menyalakan *power supply* pada *membrane electrolysis* dan memastikan pembacaan *Voltage Indicator* dan *Ampere Indicator* terbaca dengan baik.
5. Mencatat arus dan tegangan setiap *cell* setiap 20 menit.
6. Mengukur pH larutan NaOH hasil regenerasi pada tangki T-11.
7. Mengulang kembali langkah 1-6 dengan semua variasi variabel bebas yang telah ditentukan.

III.5 Flowchart Penelitian



Gambar III.5 *Flow Chart* Penelitian *Membrane Electrolysis*

III.6 Metode Analisa

Berikut perhitungan untuk analisa hasil penelitian:

a. Molaritas NaOH yang Dihasilkan

$$pOH_{NaOH} = 14 - pH_{NaOH}$$

$$M_{NaOH} = 10^{-pOH_{NaOH}}$$

b. *Percent Recovery* Natrium

$$M_{Na^+} = M_{NaOH}$$

$$Na^+ \; pada \; lartuan \; NaOH \; (\frac{g}{L}) = M_{Na^+} \; x \; AR \; Na^+$$

$$\%\; recovery \; natrium = \frac{Na^+ \; pada \; larutan \; NaOH \; hasil \; regenerasi \; (\frac{g}{L})}{Na^+ \; pada \; larutan \; NaOH \; masuk \; AGR \; (\frac{g}{L})} x \; 100\%$$

c. Energi yang Dibutuhkan untuk Regenerasi 1 kg NaOH Teknis

$$Daya \; Total \; (kW) = Daya \; Cell \; 1 + Daya \; Cell \; 2 + Daya \; Cell \; 3 + Daya \; Cell \; 4$$

$$Produksi \; M_{NaOH} \; per \; daya \; (\frac{M}{kW}) = \frac{M_{NaOH} \; yang \; terbentuk}{Daya \; Total \; (kW)}$$

$$Target \; Daya \; (kW) = \frac{M_{NaOH \; Target}}{Produksi \; M_{NaOH} \; per \; daya}$$

$$Target \; Energi \; (kWh) = Target \; Daya \; x \; 1 \; jam$$

$$Produksi\ NaOH\ (kg/jam)$$

$$= \frac{flowrate\ (mL/menit)\ x\ 60\frac{menit}{jam} x\ M_{NaOH\ Target}\ x\ BM\ NaOH}{1000000\ mL/m^3}$$

$$Biaya\ Produksi\ NaOH\ Teknis\ (Rp/kgNaOH) = \frac{Target\ Energi\ x\ Biaya\ Listrik\ 1\ kWh}{Produksi\ NaOH\ (kg/jam)}$$

d. *Current Density*

$$Current\ Density = \frac{I}{A_{membrane}}$$

I = Arus listrik (A)

$A_{membran}$ = Luas permukaan membran (cm^2)

e. Kecepatan *Transfer* Massa Na^+

$$N = \frac{I}{F}$$

N = kecepatan perpindahan mol kation Na^+ melewati membran (mol/s)

I = Arus listrik (A)

F = Konstanta Faraday = 96485 C/M

f. *Current Efficiency* (Efisiensi Arus)

$$\varepsilon = \frac{U_{Brine}\ x\ F\ x\ (C_{in} - C_{out})}{Current\ Density\ x\ A} = \frac{U_{Brine}\ x\ F\ x\ (C_{in} - C_{out})}{I}$$

ε = *Current Efficiency*

U_{limbah} = Flow rate larutan Na_2CO_3 (L/s)

F = Konstanta Faraday = 96485 C/M

C_{in} = Konsentrasi Inlet kation Na^+ pada anoda (mol/L)

C_{out} = Konsentrasi Outlet kation Na^+ pada anoda (mol/L)

I = Arus listrik (A)

g. Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ Total

$$N_{overall} = \frac{I\ x \frac{V_{anode}}{U_{Brine}}\ x\ \varepsilon}{F}$$

$N_{overall}$ = kecepatan perpindahan mol kation Na^+ melewati membran (mol/s)

I = Arus listrik (A)

V_{anode} = Volume dari bagian anode (L)

U_{limbah} = Flow rate larutan Na_2CO_3 (L/s)

ε = *Current Efficiency*

F = Konstanta Faraday = 96485 C/M

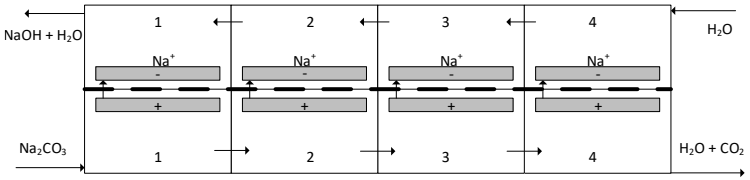
(Simon, 2014)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

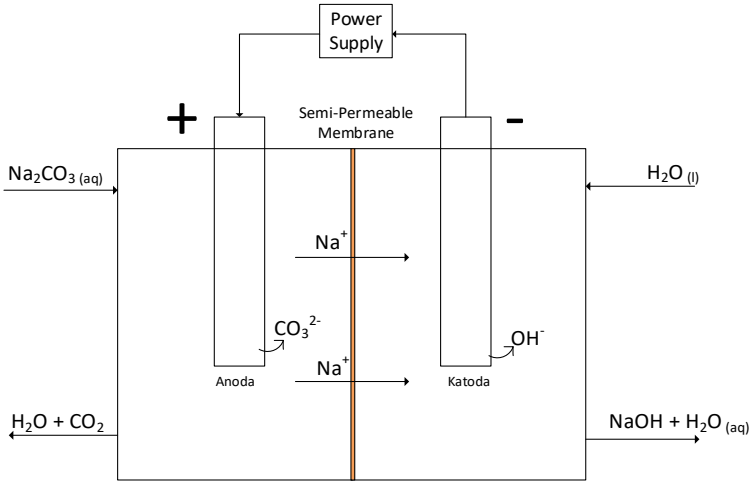
Aplikasi teknologi *membrane electrolysis* dalam meregenerasi absorben NaOH pada sistem pemurnian biogas unit *Acid Gas Removal* dapat menjadi alternatif tersendiri dalam sistem produksi biogas. Dengan memanfaatkan kembali bahan yang telah digunakan, dapat diperoleh sistem yang lebih efisien serta produk regenerasi absorben yang dapat dimanfaatkan kembali untuk proses absorbsi. Hal ini tentunya juga dapat menekan biaya produksi biogas, sebagai salah satu Energi Baru Terbarukan (EBT) yang sedang dikembangkan saat ini. Teknologi *membrane electrolysis* 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^+) (O'Brien, 2005). Pada bab ini akan dibahas hasil penelitian secara teknis maupun ekonomis dari regenerasi absorban NaOH pada *Acid Gas Removal* dengan menggunakan metode *membrane electrolysis* sistem seri-kontinu. Membran yang digunakan dengan spesifikasi; nama dagang nafion ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$) dengan ketebalan 440 μm, sifatnya *counterion* dengan ion Na^+, biasanya membran ini digunakan pada industri *chlor – alkali*. Terdapat 2 prosedur dalam penelitian ini, yaitu prosedur unit *Acid Gas Removal* dan prosedur *Membrane Electrolysis*. Pada Unit *Acid Gas Removal*, pengamatan dilakukan dengan membandingan rasio Liquid terhadap Gas (L/G) *feed* pada kolom yaitu pada L/G 1/20 dan 1/30. Sedangkan pengamatan untuk *membrane electrolysis* dilakukan pada variabel *flow rate* (40, 60, 80, dan 100 ml/menit), penambahan larutan elektrolit NaOH pada katoda (0.1 M dan 1 M), serta arah aliran *membrane electrolysis* (*Counter Current* dan *Co-Current*). Larutan NaOH digunakan karena merupakan larutan elektrolit kuat yang memiliki nilai konduktivitas 206 mS/cm (Wolf, 1966 dan Weast, 1989).

Prosedur unit *Acid Gas Removal* pada penelitian ini dilakukan untuk menghasilkan larutan Na_2CO_3 yang merupakan *feed* untuk unit *membrane electrolysis*. Dalam sistem produksi biogas yang sesungguhnya, produk reaksi dari absorbsi CO_2 pada gas alam dengan NaOH adalah Na_2CO_3 (Yoo, 2013). Gas yang dialirkan pada kolom *Acid Gas Removal* merupakan campuran 30% mol CO_2 dan 70% mol N_2 dengan konsentrasi CO_2 yang menyerupai konsentrasi biogas. Pada awal percobaan, absorben NaOH yang digunakan adalah konsentrasi 1 M, namun Na_2CO_3 yang dihasilkan kurang jenuh dikarenakan NaOH yang digunakan terlalu tinggi konsentrasinya sehingga sulit untuk dijenuhkan oleh CO_2. Sehingga, konsentrasi NaOH absoben diubah menjadi 0,1 M. Waktu tunggu untuk alat *Acid Gas Removal* hingga aliran *steady* yaitu selama ±2 menit. Kemudian liquid keluaran unit *Acid Gas Removal* (Na_2CO_3) diukur pH nya dan dialirkan ke unit *membrane electrolysis* untuk diregenerasi agar dihasilkan NaOH dengan konsentrasi yang sama kembali.

Membrane Electrolysis yang digunakan pada penelitian ini disusun secara seri dengan jumlah 4 *cell* dan akan dilewati oleh *liquid* secara kontinu (Gambar IV.1 (a)). Limbah Na_2CO_3 yang telah dihasilkan tersebut dimasukan kedalam *cell* anoda, sedangkan *demineralized water* dimasukkan ke dalam katoda. Hasil proses regenerasi tersebut akan menghasilkan produk berupa larutan NaOH yang disebut *regenerated caustic soda*. Lebih jelasnya dijelaskan pada skema Gambar IV.1.



(a)



(b)

Gambar IV.1 Perpindahan Ion pada *Membrane Electrolysis*
(a) tampak atas; (b) tampak samping

Karena adanya perbedaan potensial listrik di anoda dan katoda, maka terjadi *transfer* ion Na^+ dari *cell* anoda yang bermuatan positif ke *cell* katoda yang bermuatan negatif. Tahapan reaksi pada *membrane electrolysis cell* adalah sebagai berikut:

1. Reaksi oksidasi H_2O pada anoda (+):
   $2\ H_2O_{(l)} \rightarrow 4\ H^+_{(aq)} + O_{2\,(g)} + 4\ e^-$
   Reaksi reduksi H_2O pada katoda (-):
   $4\ H_2O_{(l)} + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-_{(aq)} + 2\ H_{2\,(g)}$
2. Reaksi ionisasi Na_2CO_3 pada anoda (+):
   $2\ Na_2CO_{3\,(aq)} \rightarrow 4\ Na^+_{(aq)} + 2\ CO_3^{2-}{}_{(aq)}$
3. Reaksi pembentukan H_2CO_3 pada anoda (+):
   $4\ H^+_{(aq)} + 2\ CO_3^{2-}{}_{(aq)} \rightarrow 2\ H_2CO_{3\,(aq)}$
4. Reaksi kesetimbangan H_2CO_3 pada anoda (+):
   $2\ H_2CO_{3\,(aq)} \leftrightarrow 2\ H_2O_{(l)} + 2\ CO_{2\,(g)}$

5. Reaksi Pembentukan NaOH pada katoda setelah ion Na^+ berdifusi ke katoda (-):

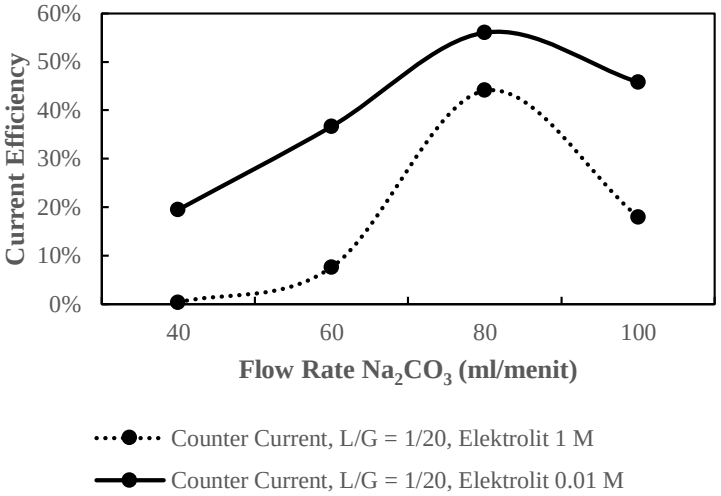
$$4\ Na^+_{(aq)} + 4\ OH^-_{(aq)} \rightarrow 4\ NaOH_{(aq)}$$

(O'Brien, 2005)

Proses dilakukan pada variabel yang telah ditentukan dengan pengamatan silang pada variabel *flow rate* dan konsentrasi elektrolit NaOH pada katoda serta pengamatan tunggal untuk jarak elektroda. Penelitian ini dilakukan selama 120 menit dengan sistem kontinu.

Pengamatan yang dilakukan adalah perubahan pH pada larutan di katoda, arus serta tegangan pada setiap *cell* kemudian menghitung molaritas larutan NaOH dan persen *recovery* natrium. Pengamatan dilakukan setiap 20 menit sekali untuk arus dan tegangan. Sampel liquid keluaran unit *membrane electrolysis* (*regenerated* NaOH) diambil untuk diukur pHnya. Persen *recovery* natrium dihitung dengan mengukur ion natrium yang telah bermigrasi ke *cell* katoda dibandingkan natrium total yang masuk dari *cell* anoda dengan persamaan III.6 (b). Molaritas larutan NaOH dapat dihitung dari pengukuran pH yang telah dilakukan sebelumnya.

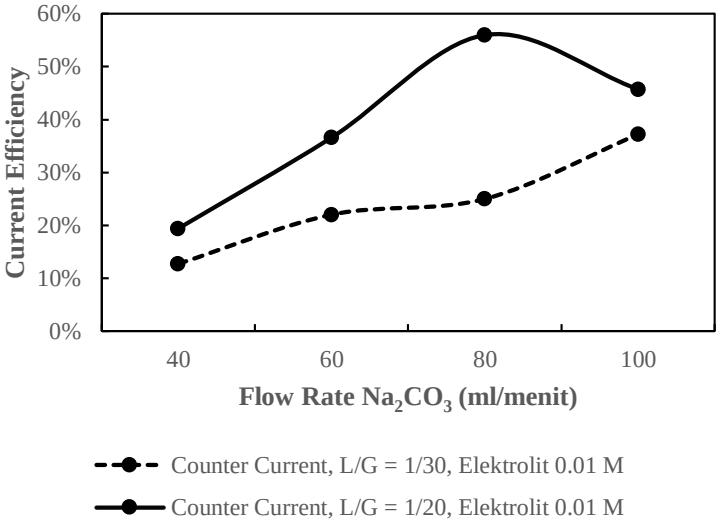
IV.1. *Current Efficiency*



Gambar IV.2 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH

Gambar IV.2 menunjukkan pengaruh konsentrasi elektrolit NaOH yang digunakan terhadap *Current Efficiency*. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat kesamaan titik untuk *Current Efficiency* terendah, yaitu pada saat *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, dengan nilai 0,0031 untuk elektrolit 1 M dan 0,1943 untuk elektrolit 0,01 M. Grafik terus naik seiring meningkatnya *flow rate* - Na_2CO_3 hingga mencapai puncak pada titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 0,4409 dan 0,5598 berturut-turut untuk elektrolit 1 M dan 0,01 M, kemudian grafik kembali turun pada *flow rate* 100 ml/menit. Grafik penelitian secara keseluruhan, menunjukkan bahwa elektrolit NaOH 0,01 M memberikan *Current Efficiency* yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolit NaOH 1 M. Penambahan konsentrasi elektrolit NaOH yang tinggi pada

feed, dalam penelitian ini yaitu elektrolit 1 M, mengakibatkan proses pembentukan gas lebih cepat, sehingga penurunan *% recovery* Na^+ dan *Current Density* lebih cepat dikarenakan *resistant gas* memiliki pengaruh terhadap *transfer* arus listrik yang ada (Joe, 1989). Sehingga hal ini juga mungkin mempengaruhi *Current Efficiency*, yaitu efisiensi perpindahan elektron atau arus listrik yang terjadi pada proses elektrolisis.

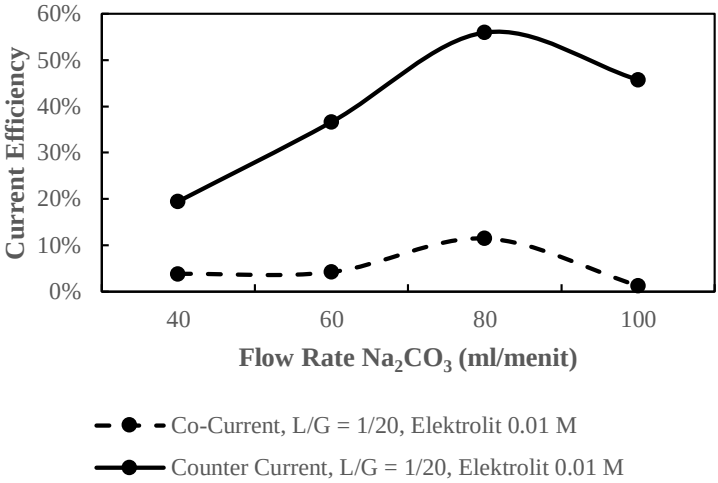


Gambar IV.3 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal*

Dari Gambar IV.3 dapat dibandingkan pengaruh ratio L/G pada unit *Acid Gas Removal* yang digunakan terhadap *Current Efficiency*. Untuk variabel L/G 1/20, data penelitian menunjukkan bentuk grafik *volcano*, dimana terdapat nilai tertinggi pada *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit, dengan nilai 0,5598 dan nilai terendah pada *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit dengan nilai 0,1943. Untuk variabel L/G 1/30, data penelitian menunjukkan bentuk grafik yang

cenderung meningkat secara linier, dimana nilai tertinggi didapatkan pada *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit, dengan nilai 0,3725 dan terendah pada *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit dengan nilai 0,1276. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa ratio L/G pada *Acid Gas Removal* 1/20 memberikan *Current Efficiency* yang lebih tinggi dibandingkan dengan L/G 1/30.

Pada variabel ratio L/G 1/30, larutan NaOH awal dimungkinkan telah mengabsorb jumlah CO_2 yang lebih banyak, sehingga larutan *feed* pada *membrane electrolysis cell* memiliki kandungan CO_2 yang lebih banyak daibandingkan dengan L/G 1/20. Semakin tinggi kandungan CO_2 dan komponen kimia (selain H_2O), mengakibatkan sebagian arus listrik digunakan untuk menguraikan komponen kimia tersebut (Li, 2016), dalam kasus ini yaitu komponen kimia dalam Na_2CO_3, sehingga jumlah arus listrik yang digunakan untuk elektrolisis air semakin rendah. Jumlah arus listrik pada variabel L/G 1/30 yang digunakan untuk elektrolisis air lebih sedikit bila dibandingkan dengan variabel L/G 1/20, dikarenakan jumlah CO_2 yang lebih tinggi. Hal inilah yang menyebabkan semakin rendahnya efisiensi arus listrik (*Current Efficiency*) pada proses elektrolisis.

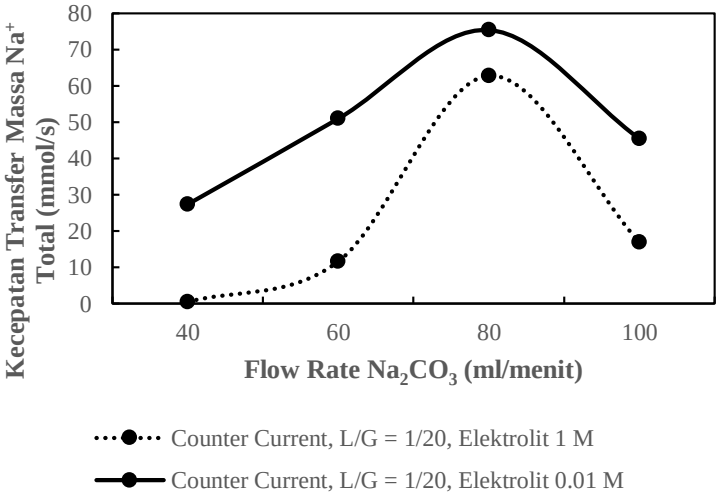


Gambar IV.4 Grafik *Current Efficiency* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter* dan *Co-Current*)

Dari Gambar IV.4 dapat dibandingkan pengaruh arah aliran *Counter Current* dan *Co-Current* pada unit *membrane electrolysis cell* yang digunakan terhadap *Current Efficiency*. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 0,5598 dan 0,1145 berturut-turut untuk arah aliran *Counter Current* dan *Co-Current*. Pada variabel *Counter Current*, nilai *Current Efficiency* terendah terdapat pada *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, yaitu sebesar 0,1943. Pada variabel *Co-Current*, nilai *Current Efficiency* terendah terdapat pada *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit, yaitu sebesar 0,0118. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa arah aliran *Counter Current* memberikan *Current Efficiency* yang lebih tinggi dibandingkan arah aliran *Co-Current*. Hal ini mungkin dikarenakan perbedaan konsentrasi yang tinggi pada *cell-cell*

anoda-katoda aliran *Co-Current*, memberikan daya difusi balik ion Na^+ dari *cell* katoda ke *cell* anoda yang lebih besar dari arus listriknya. Dimana arus listrik saat elektrolisis berfungsi untuk mencegah difusi balik dari katoda ke anoda. Untuk arah aliran *Counter Current*, dengan arah aliran masuk *feed* yang berlawanan, perbedaan konsentrasi ion Na^+ lebih kecil dibandingkan arah aliran *Co-Current*, sehingga difusi balik ion Na^+ dari *cell* katoda ke *cell* anoda akan lebih kecil (Simon, 2014 dan Ping, 2016). Hal ini membuat arus (*Current Efficiency*) pada aliran *Counter Current* terhitung lebih efisien karena dihasilkan hasil massa ion Na^+ pada katoda yang lebih tinggi.

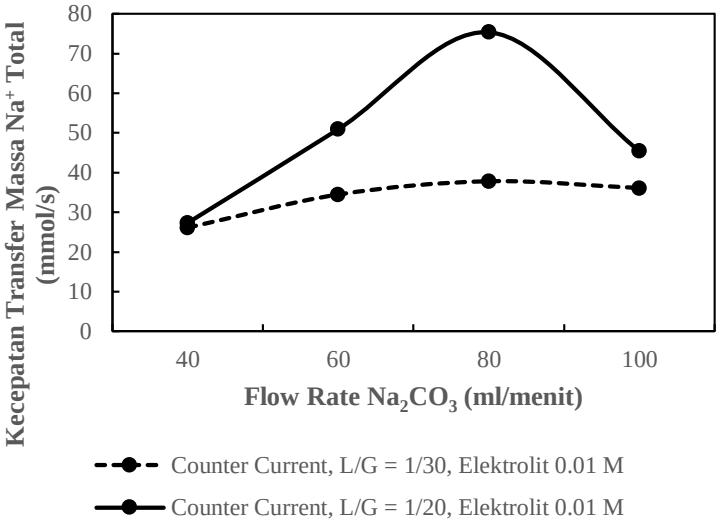
IV.2. Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ Total



Gambar IV.5 Grafik kecepatan *transfer* massa Na^+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH

Dari Gambar IV.5 dapat dibandingkan pengaruh konsentrasi elektrolit NaOH yang digunakan terhadap kecepatan

transfer massa Na^+ total. Kedua variabel juga menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 62,7193 mmol/s dan 75,4052 mmol/s berturut-turut untuk elektrolit 1 M dan 0,01 M. Selain itu terdapat kesamaan titik untuk kecepatan *transfer* massa Na^+ total terendah, yaitu pada saat *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, yaitu 0,5463 mmol/s untuk elektrolit 1 M dan 27,3780 mmol/s untuk elektrolit 0,01 M. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa elektrolit NaOH 0,01 M memberikan kecepatan *transfer* massa Na^+ total yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolit NaOH 1 M. Fenomena ini juga didukung oleh pernyataan Joe (1989), dimana penambahan konsentrasi elektrolit NaOH yang lebih tinggi pada *feed* mengakibatkan proses pembentukan gas lebih cepat. *Resistant gas* yang terbentuk ini mengakibatkan energi yang dibutuhkan meningkat sehingga menyebabkan *transfer* arus listrik pada *cell* mengalami penurunan. Hal ini tentunya akan mempengaruhi *transfer* massa Na^+ dari *cell* anoda ke katoda yang berbanding lurus dengan *transfer* arus listrik yang terjadi pada proses elektrolisis.

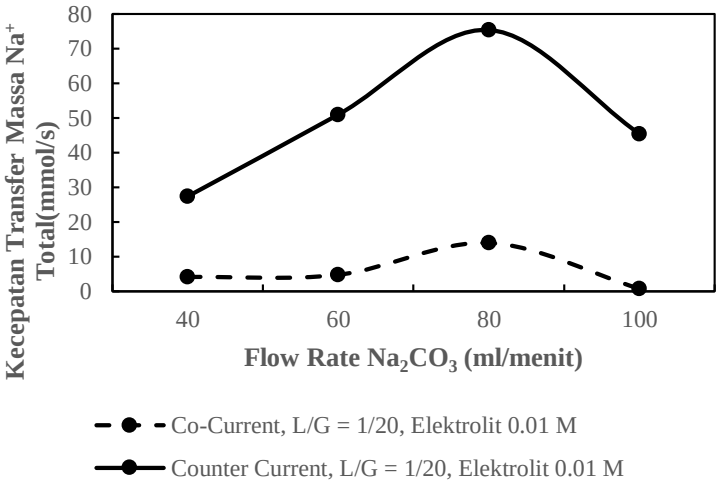


Gambar IV.6 Grafik kecepatan *transfer* massa Na^+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal*

Dari Gambar IV.6 dapat dibandingkan pengaruh ratio L/G *Acid Gas Removal* terhadap kecepatan *transfer* massa Na^+ total. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 37,7921 mmol/s dan 75,4052 mmol/s berturut-turut untuk L/G 1/30 dan 1/20. Selain itu terdapat kesamaan titik untuk kecepatan *transfer* massa Na^+ total terendah, yaitu pada saat *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, yaitu 26,1458 mmol/s untuk L/G 1/30 dan 27,3780 mmol/s untuk L/G 1/20. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa L/G 1/20 memberikan kecepatan *transfer* massa Na^+ total yang lebih tinggi dibandingkan dengan L/G 1/30.

Transfer massa ion Na^+ pada proses elektrolisis tentunya dipengaruhi oleh arus listrik yang mengalir. Untuk variabel ratio

L/G 1/30, larutan NaOH awal dimungkinkan telah mengabsorb jumlah CO_2 yang lebih banyak (cenderung lebih jenuh), sehingga larutan *feed* pada *membrane electrolysis cell* memiliki kandungan CO_2 yang lebih banyak daripada L/G 1/20. Hal ini didukung oleh penelitian Li (2016), dimana semakin tinggi kandungan CO_2 dan komponen kimia (selain H_2O), mengakibatkan sebagian arus listrik digunakan untuk menguraikan komponen kimia tersebut, dalam penelitian ini terutama komponen pada Na_2CO_3, sehingga jumlah arus listrik yang digunakan untuk elektrolisis air semakin rendah. Jumlah arus listrik pada variabel L/G 1/30 yang digunakan untuk elektrolisis air lebih sedikit bila dibandingkan dengan variabel L/G 1/20, dikarenakan jumlah CO_2 yang lebih tinggi. Hal inilah yang menyebabkan semakin rendahnya kecepatan *transfer* massa ion Na^+ pada proses elektrolisis untuk L/G 1/30.

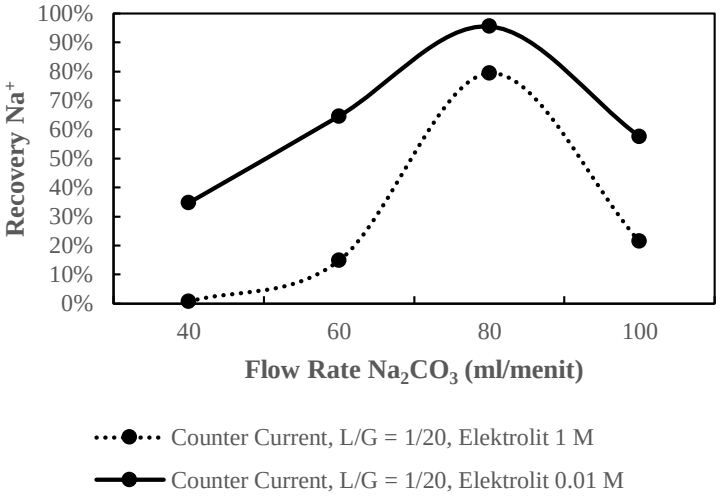


Gambar IV.7 Grafik kecepatan *transfer* massa Na^+ total terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter Current* dan *Co-Current*)

Dari Gambar IV.7 dapat dibandingkan pengaruh arah aliran *Counter Current* dan *Co-Current* pada *membrane electrolysis cell* yang digunakan terhadap kecepatan *transfer* massa Na^+ total. Kedua variabel juga menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 14,0411 mmol/s dan 75,4052 mmol/s berturut-turut untuk arah aliran *Co-Current* dan *Counter Current*. Titik *transfer* massa Na^+ total terendah pada *Counter Current* terletak pada *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, yaitu 27,3780 mmol/s. Titik *transfer* massa Na^+ total terendah pada *Co-Current* terletak pada *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit, yaitu 0,8658 mmol/s. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa arah aliran *Counter Current* memberikan kecepatan *transfer* massa Na^+ total yang lebih tinggi dibandingkan arah aliran *Co-Current.*

Arah aliran *Co-Current* memberikan daya difusi Na^+ yang lebih besar dibandingkan dengan arah aliran *Counter Current* karena perbedaan konsentrasi ion Na^+ yang lebih besar antara *cell* katoda dan *cell* anoda. Sehingga sangat tinggi kemungkinan kembalinya ion Na^+ untuk berdifusi kembali dari *cell* katoda ke anoda selama proses elektrolisis dalam *cell* (Simon, 2014 dan Ping, 2016). Hal inilah yang menyebabkan kecepatan *transfer* massa Na+ yang teranalisis di *cell* terakhir menghasilkan massa ion Na^+ yang lebih rendah dibandingkan dengan aah aliran *Counter Current*.

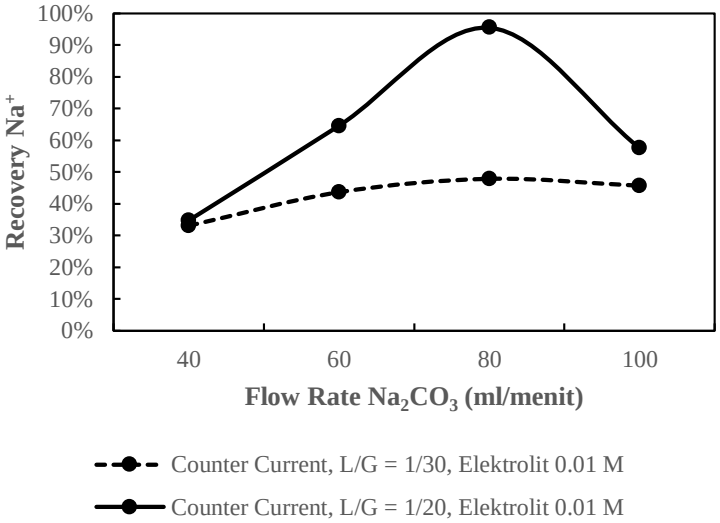
IV.3. *Percent Recovery* Ion Na^+



Gambar IV.8 Grafik *% recovery* Na^+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan konsentrasi elektrolit NaOH (1 M dan 0.01 M)

Dari Gambar IV.8 dapat dibandingkan pengaruh konsentrasi elektrolit NaOH yang digunakan terhadap *% recovery* Na^+. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 79,43% dan 95,50% berturut-turut untuk elektrolit 1 M dan 0,01 M. Selain itu terdapat kesamaan titik untuk *% recovery* Na^+ terendah, yaitu pada saat *flow rate* Na2CO3 40 ml/menit, yaitu 0,69% untuk elektrolit 1 M dan 34,67% untuk elektrolit 0,01 M. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa elektrolit NaOH 0,01 M memberikan *% recovery* Na^+ yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolit NaOH 1 M. Sehingga, semakin tinggi konsentrasi elektrolit yang digunakan, semakin rendah *% recovery* Na^+.

Penambahan konsentrasi elektrolit NaOH yang tinggi pada *feed* mengakibatkan proses pembentukan gas lebih cepat, sehingga *% recovery* Na^+ yang dihasilkan akan lebih rendah dikarenakan *resistant gas* memiliki pengaruh terhadap *transfer* arus listrik yang ada (Joe, 1989).

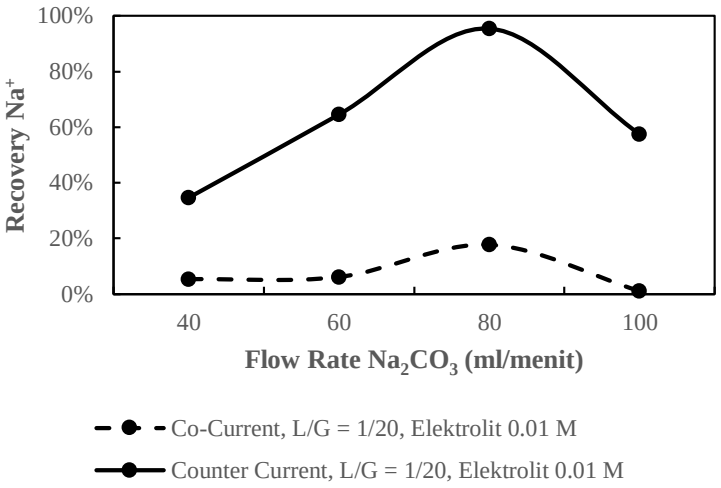


Gambar IV.9 Grafik *% recovery* Na^+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan ratio L/G *Acid Gas Removal* (1/20 dan 1/30)

Dari Gambar IV.9 dapat dibandingkan pengaruh ratio L/G pada unit *Acid Gas Removal* yang digunakan terhadap *% recovery* Na^+. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano,* dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 95,50% dan 47,86% berturut-turut untuk L/G 1/20 dan 1/30. Selain itu terdapat kesamaan titik untuk *% recovery* Na^+ terendah, yaitu pada saat *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, dengan nilai 34,67% dan 33,11% berturut-turut untuk L/G 1/20 dan 1/30. Grafik penelitian

secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik flow rate Na_2CO_3, menunjukkan bahwa ratio L/G pada *Acid Gas Removal* 1/20 memberikan *% recovery* Na^+ yang lebih tinggi dibandingkan dengan L/G 1/30. Sehingga, semakin kecil ratio L/G pada unit *Acid Gas Removal*, semakin rendah *% recovery* Na^+.

Dalam penelitian ini, selain digunakan untuk elektrolisis air, arus listrik juga digunakan untuk menguraikan larutan Na_2CO_3. Pada variabel ratio L/G 1/30, larutan *feed* pada *membrane electrolysis cell* memiliki kandungan CO_2 yang lebih banyak daripada L/G 1/20. Semakin tinggi kandungan CO_2 dan komponen kimia (selain H_2O), mengakibatkan sebagian arus listrik digunakan untuk menguraikan komponen kimia tersebut terutama larutan Na_2CO_3, sehingga jumlah arus listrik yang digunakan untuk elektrolisis air semakin rendah. Dikarenakan jumlah CO_2 yang lebih tinggi tersebut, arus listrik pada variabel L/G 1/30 lebih sedikit yang digunakan untuk elektrolisis air bila dibandingkan dengan variabel L/G 1/20. Hal ini mengakibatkan semakin rendahnya penguraian ion yang terjadi, sehingga semakin sedikit Na^+ yang berdifusi dari *cell* anoda ke katoda, yang berujung pada *% recovery* yang lebih rendah untuk L/G 1/30 (Li, 2016).



Gambar IV.10 Grafik *Recovery* Na^+ terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan perbedaan arah aliran (*Counter* dan *Co-Current*)

Dari Gambar IV.10 dapat dibandingkan pengaruh arah aliran *Counter Current* dan *Co-Current* pada unit *membrane electrolysis cell* yang digunakan terhadap *% recovery* Na^+. Kedua variabel menunjukkan kesamaan bentuk grafik yaitu bentuk *volcano*, dimana terdapat puncak pada kedua grafik di titik yang sama, yaitu pada *flow rate* 80 ml/menit, dengan nilai 95,50% dan 17,78% berturut-turut untuk arah aliran *Counter Current* dan *Co-Current*. Pada variabel *Counter Current*, nilai *% recovery* Na^+ terendah terdapat pada *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, yaitu sebesar 34,67%. Pada variabel *Co-Current*, nilai *% recovery* Na^+ terendah terdapat pada *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit, yaitu sebesar 1,10%. Grafik penelitian secara keseluruhan, yaitu pada setiap titik *flow rate* Na_2CO_3, menunjukkan bahwa arah aliran *Counter Current* memberikan *% recovery* Na^+ yang lebih tinggi dibandingkan arh aliran *Co-Current* pada *membrane electrolysis cell*. Hal ini dikarenakan daya difusi Na^+ dari kation ke anion lebih

besar dari daya listrik saat arah aliran *Co-Current*. Arah aliran *Co-Current* memberikan daya difusi yang besar karena perbedaan konsentrasi ion Na^+ yang besar antara sel katoda dan sel anoda. Daya listrik saat elektrolisis berfungsi untuk mencegah difusi balik dari katoda ke anoda. Untuk arah aliran *Counter Current*, perbedaan konsentrasi ion Na^+ lebih kecil dibandingkan arah aliran *Co-Current*, sehingga difusi balik ion Na^+ dari sel katoda ke anoda lebih kecil daripada saat arah aliran *Co-Current* (Simon, 2014 dan Ping, 2016).

Pengaruh waktu tinggal berpengaruh terhadap persen konversi karena waktu tinggal berbanding lurus terhadap *% recovery*. Berdasarkan turunan dari hukum Faraday, waktu tinggal akan berpengaruh pada *transfer* ion, jika waktu tinggal aliran lebih lama maka *transfer* ion akan semakin besar sehingga *% recovery* Na^+ yang dihasilkan semakin tinggi. Semakin tinggi *flow rate* Na_2CO_3 maka semakin rendah waktu tinggal aliran, sehingga semakin tinggi *flow rate* Na_2CO_3 maka semakin rendah *% recovery* Na^+ (Simon, 2014).

Meskipun memiliki nilai *% recovery* Na^+ yang lebih tinggi, semakin kecil *flow rate* Na_2CO_3 juga menyebabkan penurunan *Current Density*. Penurunan *Current Density* akan menyebabkan *% recovery* semakin menurun. Hal ini disebabkan karena waktu tinggal yang lebih lama juga berbanding lurus dengan jumlah gas yang terakumulasi pada elektroda serta berbanding terbalik dengan daya turbulensi aliran fluida pada *membrane electrolysis cell*. 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 (Joe, 1989 dan Giancoli, 2014). *Overpotential* ini disebabkan karena terjadinya polarisasi diantara elektroda dan larutan elektrolit. Polarisasi ini terbentuk karena terbentuknya gelembung 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. Disamping terakumulasinya gelembung pada elektroda, ion Na^+ yang berdifusi kembali dari sel katoda ke sel anoda juga dapat mengurangi *% recovery* Na^+ (Simon, 2014).

IV.4. Biaya Produksi NaOH Teknis

Tabel IV.1. Biaya produksi* NaOH Teknis (Rp/ kg NaOH)

Flow rate **Na_2CO_3**	**Biaya Produksi (A)**	**Biaya Produksi (B)**	**Biaya Produksi (C)**	**Biaya Produksi (D)**
40 ml/ menit	Rp 2.888.350	Rp 44.739	Rp 68.191	Rp 234.182
60 ml/ menit	Rp 117.923	Rp 23.917	Rp 39.525	Rp 212.561
80 ml/ menit	Rp 19.980	Rp 15.573	Rp 34.838	Rp 76.295
100 ml/ menit	Rp 49.269	Rp 19.153	Rp 23.283	Rp 750.799
Keterangan				
(A)	*Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M			
(B)	*Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M			
(C)	*Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M			
(D)	*Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M			

*Biaya produksi dibandingkan dengan harga pembelian NaOH teknis Rp 20.000 – 23.400/ kg NaOH

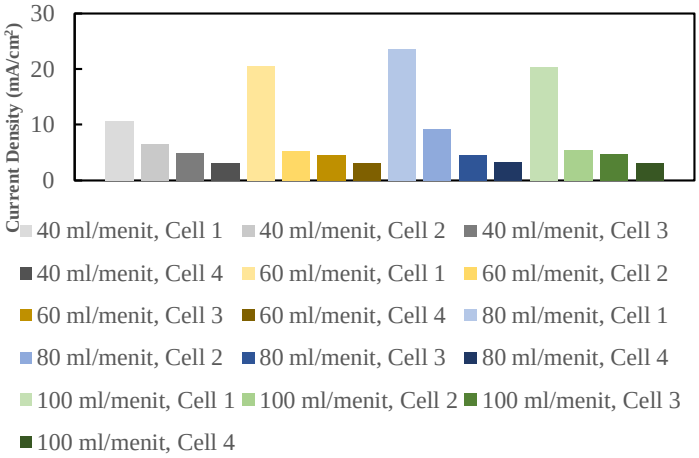
Tabel IV.1 menunjukkan bahwa variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M memiliki biaya produksi NaOH

teknis paling rendah dibandingkan ketiga variabel lainnya. Biaya produksi NaOH teknis tertinggi diraih saat variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 pada *membrane electrolysis cell* 40 ml/menit, sebesar Rp2.888.350,00/kg NaOH. Sementara biaya produksi NaOH teknis terendah diraih saat variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 pada *membrane elctrolysis cell* 80 ml/menit, sebesar Rp15.573,00/kg NaOH. Harga diatas merupakan harga perhitungan energi listrik yang dibutuhkan saja, belum mencakup kebutuhan *aquadest* serta perhitungan harga untuk *make-up* NaOH agar diperoleh konsentrasi seperti semula.

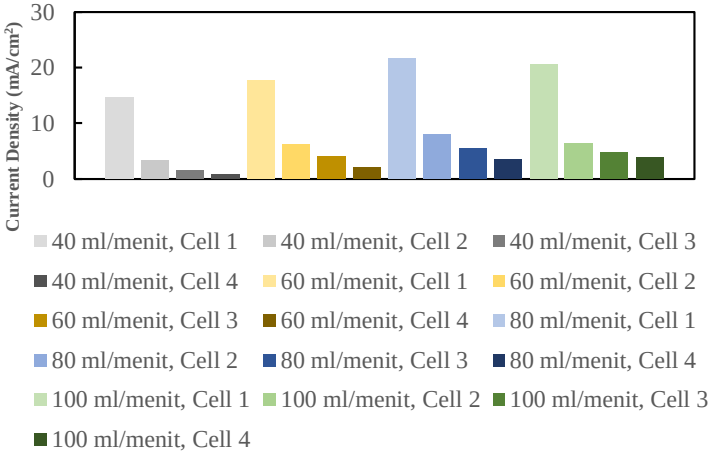
Variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M menunjukkan variabel yang memiliki biaya produksi NaOH teknis terendah dibandingkan variabel yang lain terutama pada *flow rate* Na_2CO_3 pada *membrane electrolysis cell* 80 ml/menit menunjukkan biaya produksi NaOH teknis terendah dari seluruh variabel dengan biaya produksi NaOH teknis sebesar Rp.15.573,00/kg NaOH. Ditambah lagi dengan nilai *% recovery* Na^+ tertinggi dengan nilai 95,5%. Variabel dan *flow rate* tersebut merupakan kondisi operasi terbaik dengan biaya produksi yang paling murah dibandingkan variabel lain, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel tersebut merupakan kondisi operasi paling optimal pada penelitian ini.

Target biaya produksi NaOH teknis adalah serendah mungkin, dengan rentang harga pembelian NaOH teknis yaitu berkisar antara Rp20.000/kg NaOH – Rp 28.500/kg NaOH (Phyedumedia.com, 2017). Dengan *% recovery* yang tinggi yaitu sebesar 95,50%, variable penelitian *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, pada *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit hanya membutuhkan biaya produksi NaOH teknis sebesar Rp.15.572,00/kg NaOH, yang jauh dibawah biaya pembelian NaOH teknis, sehingga proses ini cukup efisien untuk menekan biaya produksi biogas pada unit *Acid Gas Removal*.

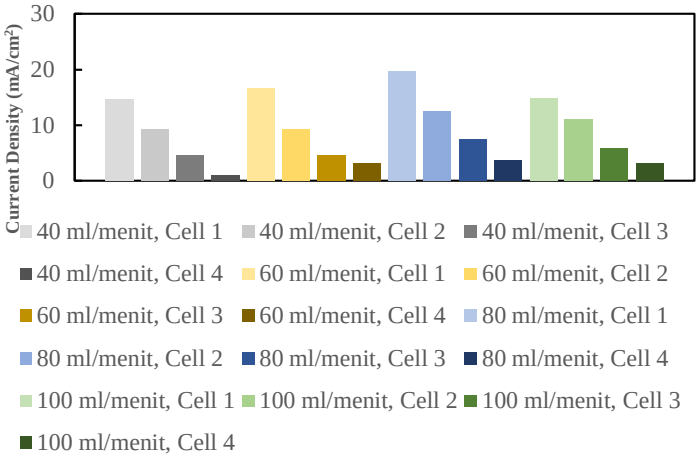
IV.5 *Current Density* pada Setiap *Cell*



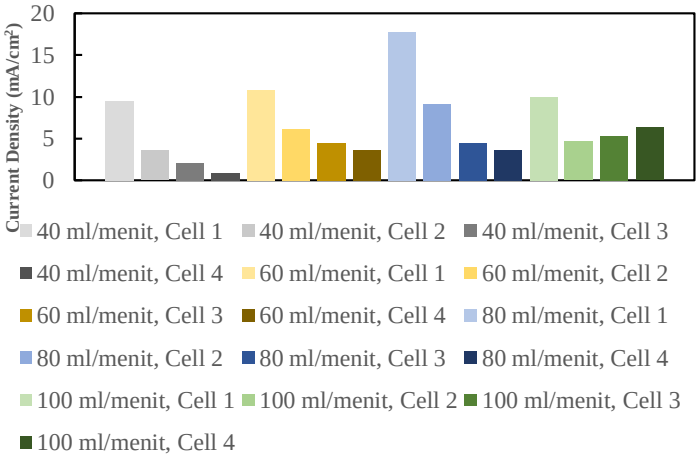
Gambar IV.11 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, Elektrolit 1 M



Gambar IV.12 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3, variabel *Counter Current*, L/G 1/20, Elektrolit 0.01 M



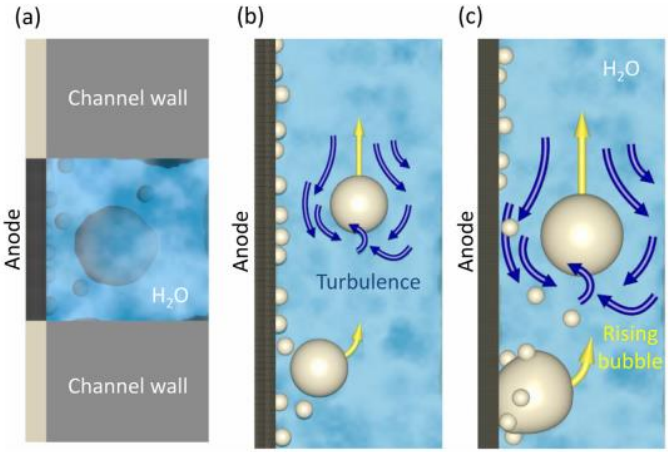
Gambar IV.13 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3, variabel *Counter Current*, L/G 1/30, Elektrolit 0.01 M



Gambar IV.14 Grafik *Current Density* terhadap *flow rate* Na_2CO_3 dengan variabel *Co-Current*, L/G 1/20, Elektrolit 0.01 M

Dari Gambar IV.11 sampai Gambar IV.14, hasil *Current Density* dari yang tertinggi ke terendah adalah *cell* 1, *cell* 2, *cell* 3, dan *cell* 4, dengan pengecualian variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit. *Current Density* dihasilkan karena kekuatan elektrolit dan konsentrasi NaOH 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 menjadi dua ion Na^+ dan satu ion CO_3^{2-} akibat beda potential yang ada menciptakan perpindahan ion Na^+ dari anoda menuju katoda yang ditunjukan dalam nilai arus sebagai respon dari elektron yang bergerak diantara elektroda sehingga semakin banyak Natrium yang di*transfer* makin tinggi nilai *Current Density* yang dihasilkan (Dias, 2005).

Nilai *Current Density* dari *cell* 1 dan *cell* 4 akan membentuk pola dimana *cell* 1 memiliki nilai *Current Density* paling tinggi sedangkan *Current Density* pada *cell* 4 paling rendah seperti pada Gambar IV.11 sampai Gambar IV.14. Untuk nilai *Current Density* pada gambar IV.11 sampai Gambar IV.13, fenomena ini disebabkan oleh proses yang bersifat *continuous* dan arah aliran *Counter Current* pada *membrane electrolysis cell* 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 tersebut menyebabkan nilai *Current Density* pada *cell* 1 menjadi paling tinggi. Sedangkan *cell* 4 memiliki Aquadest di katoda yang memiliki konsetrasi 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.



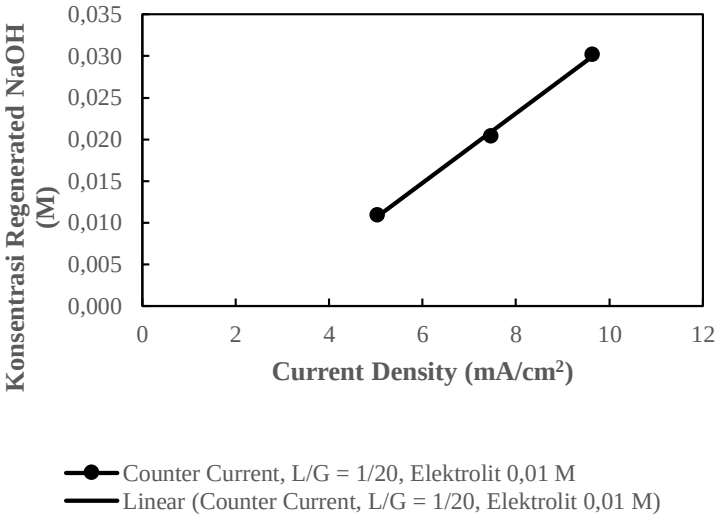
Gambar IV.15 (a) Bagian anoda dari *membrane electrolysis cell*; (b) dinamika aliran dari gelembung udara dengan porositas yang lebih rendah; (c) porositas yang lebih tinggi

Selain dari perbedaan konsenrasi ion Na^+, *Current Density* juga dipengaruhi oleh gelembung udara pada anoda. Semakin banyak gelembung udara yang terakumulasi, semakin kecil luas penampang anoda yang dapat memberikan arus listrik. Gelembung gas akan menutupi lempeng elektroda dan bersifat isolator listrik. Gelembung gas akan menghalangi aliran elektron maupun aliran arus pada elektroda. Proses ini disebut polarisasi, yang menyebabkan hambatan semakin besar dan *Current Density* semakin kecil pada proses elektrolisis (Joe, 1989). Gelembung udara pada anoda timbul karena adanya reaksi oksidasi air menjadi gas O_2 dan pada katoda timbul gas H_2 karena adanya reaksi reduksi air. Pada Gambar IV.15 (b), gelembung udara yang menempel pada plat elektroda dapat lepas dari plat dengan bantuan turbulensi dari larutan yang mengalir pada *membrane electrolysis cell.* Pada Gambar IV.15 (c), gelembung udara dapat lebih cepat lepas dari plat elektroda dengan meningkatnya turbulensi dari larutan. Turbulensi dari larutan dapat ditingkatkan dengan menambah *flow*

rate dari fluida yang ingin dielektrolisis. Sehingga, *Current Density* dapat ditingkatkan dengan meningkatkan *flow rate* fluida pada *membrane electrolysis cell*. Namun, turbulensi dari fluida berkurang dengan mengalirnya *feed* dari sumber input *membrane electrolysis cell*, sehingga hal inilah yang menyebabkan *Current Density* pada *cell* 1 paling tinggi dan *cell* 4 paling rendah. (Dedigama, 2014).

IV.6 Pengaruh *Current Density*

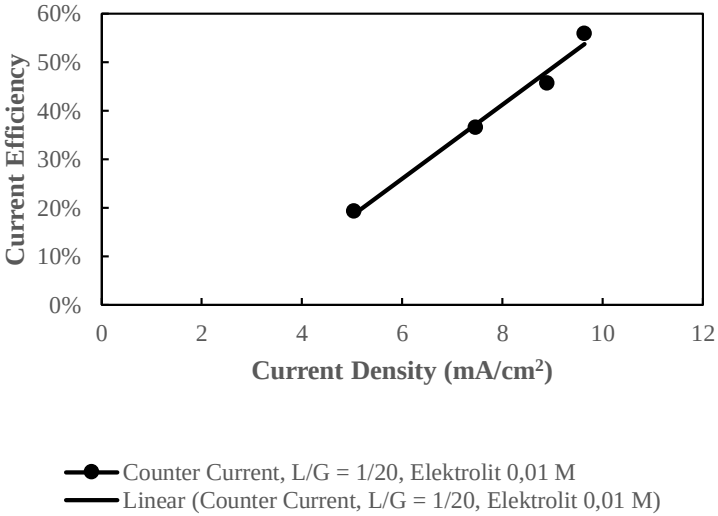
Pada pembahasan pengaruh *Current Density*, yang dibahas adalah pengaruh *Current Density* dengan variabel terbaik, yaitu variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M.



Gambar IV.16 Grafik konsentrasi *regenerated* NaOH terhadap *Current Density* dengan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

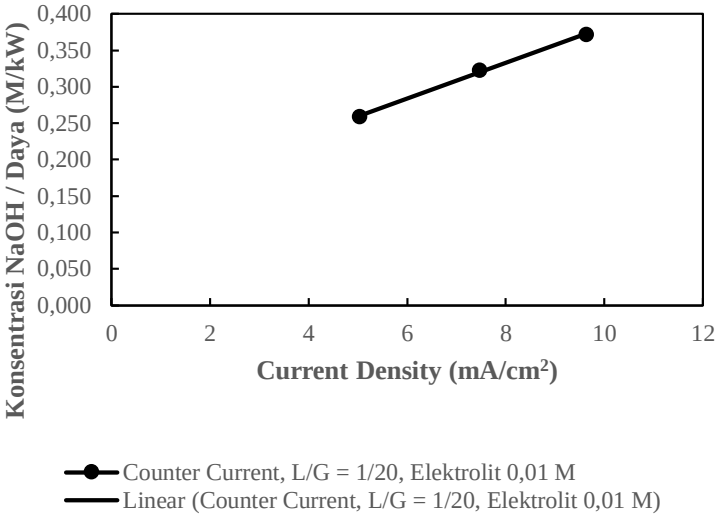
Dari Gambar IV.16, konsentrasi *regenerated* NaOH yang dapat dihasilkan dari proses elektrolisis relatif meningkat dengan

seiringnya meningkatnya *Current Density*. Pada penelitian ini, *Current Density* terendah yaitu 5,0417 mA/cm^2 menghasilkan konsentrasi regenerated NaOH terendah juga, yaitu dan 0,011 M. Sedangkan *Current Density* tertinggi 9,6389 mA/cm^2 menghasilkan konsentrasi *regenerated* NaOH tertinggi, yaitu 0,0302 M. Maka, semakin tinggi *Current Density*, semakin tinggi juga konsentrasi *regenerated* NaOH yang dihasilkan dari proses elektrolisis.



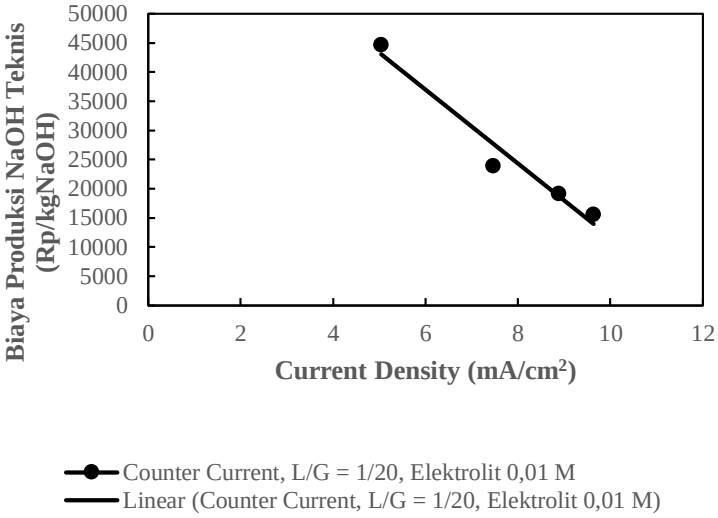
Gambar IV.17 Grafik *Current Efficiency* terhadap *Current Density* pada *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Dari Gambar IV.17, *Current Efficiency* pada proses elektrolisis meningkat dengan seiringnya meningkatnya *Current Density*. *Current Density* dan *Current Efficiency* terendah, yaitu pada 5,0417 mA/cm^2 dan 0,1943. Sedangkan untuk *Current Density* dan *Current Efficiency* tertinggi, yaitu 9,6389 mA/cm^2 dan 0,5598. Dapat disimpulkan bahwa semakin tingginya *Current Density*, maka semakin tinggi pula *Current Efficiency* pada proses elektrolisis.



Gambar IV.18 Grafik konsentrasi NaOH per daya terhadap *Current Density* dengan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Dari Gambar IV.18, konsentrasi NaOH per daya pada proses elektrolisis meningkat dengan seiringnya meningkatnya *Current Density*. Namun, terdapat penurunan konsentrasi *regenerated* NaOH saat *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit ke 100 ml/menit meskipun meningkatnya *Current Density*. Pada penelitian ini, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit memiliki *Current Density* dan konsentrasi NaOH per daya terendah, yaitu 5,0417 mA/cm^2 dan 0,2589 M/kW. *Flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit memiliki *Current Density* dan *Current Efficiency* tertinggi, yaitu 9,6389 mA/cm^2 dan 0,3719 M/kW. Maka, semakin tinggi *Current Density*, semakin tinggi juga konsentrasi NaOH per daya pada proses elektrolisis.



Gambar IV.19 Grafik biaya produksi NaOH teknis terhadap *Current Density* dengan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Dari Gambar IV.19, biaya produksi NaOH teknis pada proses elektrolisis menurun dengan seiringnya meningkatnya *Current Density*. Pada penelitian ini, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit memiliki *Current Density* terendah dan biaya produksi NaOH teknis tertinggi, yaitu 5,0417 mA/cm^2 dan Rp44.739,00 Rp/kgNaOH. *Flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit memiliki *Current Density* tertinggi dan biaya produksi NaOH teknis terendah, yaitu 9,6389 mA/cm^2 dan Rp15.573,00 Rp/kgNaOH. Maka, semakin tinggi *Current Density*, semakin rendah biaya produksi NaOH teknis pada proses elektrolisis.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian proses regenerasi NaOH dengan metode *continous series membrane electrolysis*, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin rendah ratio L/ G (ratio feed *liquid* terhadap gas) pada unit *Acid Gas Removal*, maka semakin tinggi kadar CO_2 pada larutan Na_2CO_3 yang dihasilkan, dengan konsentrasi ion Na^+ yang sama, yang ditunjukkan dengan nilai pH.
2. Dengan meningkatnya *flow rate* Na_2CO_3 pada *membrane electrolysis cell* menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:
    - Terdapat fenomena grafik berbentuk *volcano* pada sebagian besar data, dimana terdapat puncak nilai tertinggi pada *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit.
    - Semakin tingginya *Current Efficiency*
    - Semakin tingginya kecepatan *transfer* massa Na^+ total
    - Semakin tingginya *% recovery* Na^+
3. Dengan meningkatnya konsentrasi elektrolit NaOH yang digunakan menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:
    - Semakin rendahnya *Current Efficiency*
    - Semakin rendahnya kecepatan *transfer* massa Na^+ total
    - Semakin rendahnya *% recovery* Na^+
4. Dengan semakin rendahnya ratio L/G pada unit *Acid Gas Removal* memberikan pengaruh pada unit *membrane electrolysis cell* sebagai berikut:
    - Semakin rendahnya *Current Efficiency*
    - Semakin rendahnya kecepatan *transfer* massa Na^+ total

- Semakin rendahnya *% recovery* Na^+

5. Secara keseluruhan, arah aliran *Counter Current* menghasilkan hasil penelitian yang lebih baik dibandingkan arah aliran *Co-Current*.
6. Hasil optimal didapatkan pada variable *Liquid*/ Gas 1/20, *Counter Current*, dan elektrolit NaOH 0,01 M, pada *flow rate* 80 ml/menit dengan *percent recovery* sebesar 95,5 % serta biaya produksi NaOH sebesar Rp15.573/ kg NaOH.

V.2 Saran

1. Memodifikasi desain *membrane electrolysis cell* dengan sistem seri-paralel dan ukuran yang sesuai untuk mengakomodasi *flow rate* yang besar dari unit *Acid Gas Removal*.
2. Mengganti desain dinding *membrane electrolysis cell* dengan material yang dapat menghantarkan panas tanpa menghantarkan listrik (contoh: Aluminium) agar suhu proses elektrolisis dapat dikontrol.
3. Penambahan instalasi *controller* dan *data logger* agar data penelitian dapat terbaca secara otomatis dan lebih akurat.
4. Memodifikasi desain *membrane electrolysis cell* dengan instalasi membrane yang mudah dilepas-pasang untuk mempermudah perawatan membran nafion dengan larutan KCl.

DAFTAR PUSTAKA

Andriani, D., Wresta, A., Atmaja T., Saepudin A. 2013. *A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO_2 Removal Using Various Techniques*. Applied Biochemistry and Biotechnology, (172): 1909-1928.

Boaciocchi, R., Carnevale E., Corti A., Costa G., Lombardi L., Olivieri T., Zanchi L., Zingaretti D. 2012. *Innovative Process for Biogas Upgrading with CO_2 Storage: Results from Pilot Plan Operation.* Biomass and Bioenergy (53): 128-137.

Dedigama, Ishanka, Pangiota Angeli, Nicholas V. D., et. al. 2014. *Current Density* mapping and optical flow visualization a polymer electrolyte membrane water electrolyser. Journal of Power Sources (265): 97-103.

Detman A., Chojnacka, A., Blaszczyk M., Kazmierezak W., et.al. 2017. *Biohydrogen and Biomethane (Biogas) Production in the Consecutive Stages of Anaerobic Digestion of Molasses*. Pol. J. Environtmental Study (26): 1023-1029.

Dias, A.C.B.V .2005. Chlor-Alkali Membrane Cell Process: Study and Characterization. Disertasi tidak terpublikasi. University of Porto

Drake, Harold L.; Horn, Marcus A.; Wüst, Pia K. 2009. *Intermediary ecosystem metabolism as a main driver of methanogenesis in acidic wetland soil*. Environmental Microbiology Reports: 307–318.

ESDM. 2017. Menteri ESDM: Ke Depan, EBT akan Lebih Kompetitif Dibanding Energi Fosil. Diakses tanggal 15 Januari 2018. https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-ke-depan-ebt-akan-lebih-kompetitif-dibanding-energi-fosil.

GPSA. 2004. *Engineering Data Book.* Oklahoma: GPSA

Giancoli, D. C. 2014. Physics Principles With Applications, 8th. New York: Pearson

Faverjon F., Durand G., Rakib, M. 2006. *Regeneration of hydrochloric acid and sodium hydroxide from purified sodium chloride by membrane electrolysis using a hydrogen diffusion anode-membrane assembly*. Journal of Membrane Science (284): 323-330.

Huguen P., Saux G. 2010. *Perspective for a European standard on Bio methane: a biogasmax proposal*. Lille Metropole: Lille Metropole Communaute Urbaine (LCMU)

Joe, 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.

Li, Tongyan. Tim C. Keener. 2016. A review: Desorption of CO_2 from rich solution in chemical absorption processes. International Journal of Greenhouse Gas Control (51): 290–304.

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): 784–789

Maile, O.I., Muzenda, E., Tesfagiorgis, H. 2017. *Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification*. Procedia Manufacturing 7 (2017): 639-646.

Makhmoudkani, M., Keith D.W. 2009. *Low-Energy Sodium Hydroxide Recovery for CO_2 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.

Moorhouse, j.2000. Modern Chlor-Alkali Technology Volume 8. Oxford: Blackwell Science Ltd.

National Center for Biotechnology Information. Sodium Hydroxide. Publication Chemical Open Chemistry Database. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sodium_hydroxide.

O'Brien, Thomas F., Tilak V. Bommaraju, dan Fumio Hine. 2005. Handbook of Chlor Alkali Technology. USA: Springer.

Ping, Qingyun, Oded Porat, Carlos G Dosoretz, Zhen He. 2016. Bioelectricity inhibits back diffusion from the anolyte into the Desalinated stream in microbial desalination cells. Water Research (88): 266-273.

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

Savari, S., Sachdeva, S., Kumal, A. 2008. *Electrolysis of Sodium Chloride using Composite poly(styrene-co-divinylbenzene) Cation Exchange Membranes*. Journal of Membrane Science (310): 246-261.

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.

Weast, R, C., Ed. 1989. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton: CRC Press

Weiland, Peter. 2010. *Biogas production: Current state and perspectives*. Applied Microbiology and Biotechnology (85): 849-860.

White, Ralph E. 1984. *Electrochemical Cell Design*. New York: Plenum Press

Zoulias, E; Varkaraki, E; Lymberopoulos, N; Christodoulos, N; Karagiorgis G.N. 2002. *A Review on Water electrolysis*. Pikermi: Centre for Renewable Energy Sources (CRES).

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
$A_{membran}$	Luas permukaan membran	m^2
C_{in}	Konsentrasi Inlet kation Na^+ pada anoda	mol/L
C_{out}	Konsentrasi Outlet kation Na^+ pada anoda	mol/L
F	konstanta Faraday	96.485 C/M
I	Arus listrik	Ampere
I_{dens}	Kepadatan arus diterapkan	A/m^2
N	tingkat transportasi molar kation melalui membran	mol/s
$N_{overall}$	kecepatan perpindahan mol kation Na^+ melewati membran	mol/s
Q	Energi	kW.h
R	Hambatan	Ω
U_{limbah}	*flow rate*an larutan air garam	L/s
V	Tegangan Listrik	Volt
V_{anode}	Volume dari bagian anode	L
V_{anode}	volume ruang anode	M^3
W	Daya	kW
ε	efisiensi arus/ *Current Efficiency*	-

APPENDIKS A

Pengamatan Arus pada Setiap Variabel

Tabel A.1 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.5	2.6	2.47	2.31	2.01	1.9	1.93
2	1.4	1.47	1.39	1.24	1.12	1.16	1.18
3	1.3	1.33	1.32	1.26	0.81	0.78	0.87
4	0.8	0.71	0.69	0.67	0.65	0.57	0.56

Tabel A.2 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	0.71	3.4	4.76	4.53	4.03	3.68	3.68
2	0.37	1.48	1.66	1.38	1.31	1.07	0.96
3	0.74	1.33	1.31	0.81	0.81	0.8	0.8
4	1.31	1.69	1.25	0.97	0.66	0.54	0.54

Tabel A.3 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.64	4.22	4.23	4.23	4.22	4.25	4.25
2	1.12	1.64	1.67	1.66	1.66	1.68	1.67
3	0.81	0.81	0.86	0.85	0.82	0.81	0.81
4	0.67	0.67	0.65	0.62	0.57	0.6	0.6

Tabel A.4 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.17	4.16	3.74	3.63	3.7	3.67	3.65
2	1.47	1.18	1.06	0.87	0.99	1	0.99
3	1.34	0.81	0.8	0.8	0.81	0.81	0.86
4	1	0.57	0.56	0.57	0.62	0.63	0.57

Tabel A.5 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.73	2.52	2.61	2.6	2.63	2.64	2.64
2	1.09	0.73	0.61	0.59	0.59	0.6	0.58
3	0.81	0.79	0.51	0.3	0.27	0.27	0.27
4	0.65	0.57	0.23	0.14	0.13	0.14	0.14

Tabel A.6 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.55	3.17	3.15	3.23	3.19	3.21	3.18
2	0.82	1.09	0.9	1.01	1.02	1.07	1.09
3	0.8	0.8	0.77	0.75	0.72	0.74	0.74
4	0.58	0.27	0.27	0.25	0.32	0.35	0.37

Tabel A.7 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.34	3.16	3.22	3.69	3.74	3.75	3.89
2	1.11	1.14	1.17	1.27	1.41	1.4	1.45
3	1.01	0.83	0.85	0.91	1.04	0.92	0.97
4	1.1	0.68	0.65	0.65	0.65	0.64	0.63

Tabel A.8 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.63	2.64	3.5	3.61	3.62	3.71	3.71
2	1.1	1.13	1.12	1.12	1.12	1.13	1.14
3	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.82	0.86
4	0.66	0.66	0.7	0.66	0.65	0.65	0.69

Tabel A.9 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	1.66	2.63	2.53	2.42	2.53	2.62	2.62
2	0.58	1.67	1.67	1.66	1.67	1.67	1.67
3	0.7	1.34	1.33	0.85	0.81	0.81	0.81
4	0.65	1.16	0.86	0.63	0.34	0.28	0.18

Tabel A.10 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.02	3.13	3.14	3.06	2.91	3.14	3.01
2	2.05	1.69	1.68	1.68	1.66	1.67	1.67
3	1.34	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
4	0.67	0.4	0.54	0.54	0.43	0.55	0.55

Tabel A.11 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.17	3.17	3.5	3.59	3.66	3.6	3.55
2	1.71	2.15	2.22	2.22	2.24	2.24	2.24
3	0.83	1.03	1.29	1.34	1.34	1.34	1.34
4	0.61	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65

Tabel A.12 Pengamatan arus pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.66	3.05	2.9	2.74	2.71	3.11	2.66
2	1.69	2.18	2.02	1.94	1.98	1.98	1.98
3	0.83	0.9	0.87	0.85	0.84	0.91	1.03
4	0.22	0.42	0.49	0.54	0.54	0.56	0.57

Tabel A.13 Pengamatan arus pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	2.59	2.16	1.57	1.61	1.66	1.72	1.72
2	1.12	1.1	0.61	0.6	0.62	0.64	0.64
3	1.11	0.81	0.61	0.34	0.37	0.37	0.37
4	1.17	0.65	0.33	0.17	0.17	0.16	0.16

Tabel A.14 Pengamatan arus pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	1.52	1.79	2.04	2.08	1.97	1.95	1.95
2	0.62	0.7	1.04	1.09	1.09	1.09	1.1
3	0.76	0.62	0.8	0.81	0.81	0.81	0.81
4	0.65	0.42	0.64	0.65	0.66	0.66	0.66

Tabel A.15 Pengamatan arus pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.2	3.17	3.11	3.15	3.17	3.17	3.2
2	0.76	1.64	1.44	1.25	1.68	1.67	1.65
3	0.83	1.35	1.05	0.81	0.81	0.81	0.81
4	1.9	1.69	1.17	0.67	0.65	0.65	0.66

Tabel A.16 Pengamatan arus pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Arus (A) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	1.9	2.25	2.21	2.08	1.85	1.81	1.8
2	0.56	1.14	1.11	1.07	0.82	0.84	0.84
3	0.63	1.35	1.35	1.31	0.94	0.94	0.95
4	1.6	1.69	1.54	1.2	1.14	1.14	1.14

APPENDIKS B

Pengamatan Tegangan pada Setiap Variabel

Tabel B.1 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	11.99	12
2	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.03
4	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.02

Tabel B.2 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.68	11.93	11.89	11.87	11.9	11.91	11.9
2	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.03	12.03
3	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.02	12.02
4	11.91	11.99	11.98	11.97	11.98	11.98	11.98

Tabel B.3 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.59	11.79	11.78	11.83	11.83	11.65	11.69
2	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
3	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.02	12.02
4	11.87	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94

Tabel B.4 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.51	11.45	11.68	11.72	11.7	11.71	11.74
2	12.01	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
4	11.85	11.83	11.91	11.92	11.92	11.92	11.92

Tabel B.5 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.38	11.51	11.49	11.5	11.39	11.52	11.54
2	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
4	11.81	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85

Tabel B.6 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.56	11.5	11.54	11.67	11.5	11.59	11.58
2	12.03	12.03	12.03	12.02	12.02	12.03	12.03
3	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
4	11.87	11.87	11.87	11.87	11.87	11.88	11.88

Tabel B.7 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.41	11.26	11.32	11.39	11.31	11.48	11.48
2	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
3	11.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.48	11.76	11.76	11.76	11.78	11.85	11.85

Tabel B.8 Pengamatan tegangan variable *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.3	11.35	11.75	11.57	11.58	11.59	11.59
2	12.01	12.01	12.01	12.02	12.02	12.02	12.02
3	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.77	11.77	11.77	11.86	11.86	11.87	11.87

Tabel B.9 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.21	11.44	11.35	11.36	11.37	11.46	11.35
2	12.03	12.01	12.02	12.01	12.01	12.01	12.01
3	12.03	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.76	11.82	11.79	11.79	11.80	11.83	11.79

Tabel B.10 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.69	11.64	11.65	11.61	11.62	11.41	11.41
2	12.01	12.01	12.01	12.02	12.02	12.02	12.02
3	12.01	12.02	12.01	12.02	12.02	12.02	12.02
4	11.90	11.89	11.89	11.88	11.89	11.82	11.82

Tabel B.11 Pengamatan tegangan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.44	11.43	11.54	11.44	11.38	11.38	11.37
2	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
3	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
4	11.82	11.82	11.86	11.82	11.80	11.80	11.80

Tabel B.12 Pengamatan tegangan variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.56	11.84	11.4	11.07	11.02	11.36	11.2
2	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
3	12.02	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.86	11.95	11.81	11.70	11.68	11.79	11.74

Tabel B.13 Pengamatan tegangan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.48	11.66	11.79	11.79	11.79	11.79	11.79
2	12.02	12.02	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.02	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.84	11.9	11.95	11.95	11.95	11.95	11.95

Tabel B.14 Pengamatan tegangan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.79	11.75	11.73	11.7	11.7	11.7	11.7
2	12.02	12.02	12.03	12.03	12.03	12.03	12.03
3	12.03	12.03	12.03	12.02	12.02	12.02	12.02
4	11.84	11.9	11.95	11.95	11.95	11.95	11.95

Tabel B.15 Pengamatan tegangan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.47	11.47	11.47	11.47	11.47	11.47	11.47
2	12.02	12.01	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
3	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.86	11.84	11.84	11.84	11.84	11.84	11.84

Tabel B.16 Pengamatan tegangan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Tegangan (V) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	11.39	11.39	11.57	11.67	11.73	11.73	11.73
2	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02	12.02
3	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
4	11.84	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9

APPENDIKS C

Perhitungan Daya pada Setiap Variabel

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, *cell* 1:

$$W = V\ x\ I$$

$$W = 11{,}99\ V\ x\ 2{,}5\ A$$

$$W = 29{,}98\ Watt$$

Seperti perhitungan diatas, maka *% recovery* ion Na^+ dapat dihitung seperti pada Tabel C.1 hingga Tabel C.16

Tabel C.1 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	29.98	31.17	29.6	27.7	24.1	22.8	23.2
2	16.84	17.68	16.7	14.9	13.5	14	14.2
3	15.63	15.99	15.9	15.1	9.74	9.38	10.5
4	9.608	8.527	8.29	8.05	7.81	6.85	6.73

Tabel C.2 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	8.293	40.56	56.6	53.8	48	43.8	43.8
2	4.447	17.79	20	16.6	15.7	12.9	11.5
3	8.887	15.97	15.7	9.73	9.73	9.62	9.62
4	15.6	20.26	15	11.6	7.91	6.47	6.47

Tabel C.3 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	30.6	49.75	49.8	50	49.9	49.5	49.7
2	13.46	19.71	20.1	20	20	20.2	20.1
3	9.728	9.728	10.3	10.2	9.85	9.74	9.74
4	7.953	8	7.76	7.4	6.81	7.16	7.16

Tabel C.4 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	36.49	47.63	43.7	42.5	43.3	43	42.9
2	17.65	14.2	12.8	10.5	11.9	12	11.9
3	16.11	9.736	9.62	9.62	9.74	9.74	10.3
4	11.85	6.743	6.67	6.79	7.39	7.51	6.79

Tabel C.5 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	31.07	29.01	30	29.9	30	30.4	30.5
2	13.11	8.782	7.34	7.1	7.1	7.22	6.98
3	9.744	9.504	6.14	3.61	3.25	3.25	3.25
4	7.677	6.755	2.73	1.66	1.54	1.66	1.66

Tabel C.6 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	29.48	36.46	36.4	37.7	36.7	37.2	36.8
2	9.865	13.11	10.8	12.1	12.3	12.9	13.1
3	9.624	9.624	9.26	9.02	8.66	8.9	8.9
4	6.885	3.205	3.2	2.97	3.8	4.16	4.4

Tabel C.7 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	26.7	35.58	36.5	42	42.3	43.1	44.7
2	13.34	13.7	14.1	15.3	16.9	16.8	17.4
3	11.12	9.968	10.2	10.9	12.5	11	11.6
4	12.63	7.997	7.64	7.64	7.66	7.58	7.47

Tabel C.8 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	29.72	29.96	41.1	41.8	41.9	43	43
2	13.21	13.57	13.5	13.5	13.5	13.6	13.7
3	9.728	9.728	9.73	9.73	9.73	9.85	10.3
4	7.768	7.768	8.24	7.83	7.71	7.72	8.19

Tabel C.9 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	18.61	30.09	28.7	27.5	28.8	30	29.7
2	6.977	20.06	20.1	19.9	20.1	20.1	20.1
3	8.421	16.09	16	10.2	9.73	9.73	9.73
4	7.642	13.71	10.1	7.43	4.01	3.31	2.12

Tabel C.10 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	35.3	36.43	36.6	35.5	33.8	35.8	34.3
2	24.62	20.3	20.2	20.2	20	20.1	20.1
3	16.09	9.736	9.73	9.74	9.74	9.74	9.74
4	7.975	4.756	6.42	6.42	5.11	6.5	6.5

Tabel C.11 Pengamatan daya pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	36.26	36.23	40.4	41.1	41.7	41	40.4
2	20.54	25.82	26.7	26.7	26.9	26.9	26.9
3	9.977	12.38	15.5	16.1	16.1	16.1	16.1
4	7.212	7.683	7.83	7.69	7.67	7.67	7.67

Tabel C.12 Pengamatan daya variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	30.75	36.11	33.1	30.3	29.9	35.3	29.8
2	20.3	26.18	24.3	23.3	23.8	23.8	23.8
3	9.977	10.81	10.4	10.2	10.1	10.9	12.4
4	2.61	5.02	5.79	6.32	6.31	6.6	6.69

Tabel C.13 Pengamatan daya pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	29.73	25.19	18.5	19	19.6	20.3	20.3
2	13.46	13.22	7.34	7.22	7.46	7.7	7.7
3	13.34	9.728	7.33	4.08	4.44	4.44	4.44
4	13.85	7.735	3.94	2.03	2.03	1.91	1.91

Tabel C.14 Pengamatan daya pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	17.92	21.03	23.9	24.3	23	22.8	22.8
2	7.452	8.414	12.5	13.1	13.1	13.1	13.2
3	9.143	7.459	9.62	9.74	9.74	9.74	9.74
4	7.696	4.998	7.65	7.77	7.89	7.89	7.89

Tabel C.15 Pengamatan daya pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	36.7	36.36	35.7	36.1	36.4	36.4	36.7
2	9.135	19.7	17.3	15	20.2	20.1	19.8
3	9.968	16.21	12.6	9.73	9.73	9.73	9.73
4	22.53	20.01	13.9	7.93	7.7	7.7	7.81

Tabel C.16 Pengamatan daya pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Daya (Watt) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	21.64	25.63	25.6	24.3	21.7	21.2	21.1
2	6.731	13.7	13.3	12.9	9.86	10.1	10.1
3	7.566	16.21	16.2	15.7	11.3	11.3	11.4
4	18.94	20.11	18.3	14.3	13.6	13.6	13.6

APPENDIKS D
Perhitungan Hambatan pada Setiap Variabel

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit, *cell* 1:

$$R = \frac{V}{I}$$

$$W = \frac{11{,}99\ V}{2{,}5\ A}$$

$$W = 4{,}8\ \Omega$$

Seperti perhitungan diatas, maka *% recovery* ion Na^+ dapat dihitung seperti pada Tabel D.1 hingga Tabel D.16

Tabel D.1 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.80	4.61	4.85	5.19	5.97	6.31	6.22
2	8.59	8.18	8.65	9.70	10.74	10.37	10.19
3	9.25	9.04	9.11	9.54	14.84	15.41	13.83
4	15.01	16.92	17.41	17.93	18.48	21.07	21.46

Tabel D.2 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	16.45	3.51	2.50	2.62	2.95	3.24	3.23
2	32.49	8.12	7.24	8.71	9.18	11.24	12.53
3	16.23	9.03	9.17	14.83	14.83	15.03	15.03
4	9.09	7.09	9.58	12.34	18.15	22.19	22.19

Tabel D.3 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.39	2.79	2.78	2.80	2.80	2.74	2.75
2	10.73	7.33	7.20	7.24	7.24	7.15	7.20
3	14.83	14.83	13.97	14.13	14.65	14.84	14.84
4	17.72	17.82	18.37	19.26	20.95	19.90	19.90

Tabel D.4 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.63	2.75	3.12	3.23	3.16	3.19	3.22
2	8.17	10.19	11.35	13.83	12.15	12.03	12.15
3	8.97	14.84	15.03	15.03	14.84	14.84	13.98
4	11.85	20.75	21.27	20.91	19.23	18.92	20.91

Tabel D.5 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.17	4.57	4.40	4.42	4.33	4.36	4.37
2	11.04	16.48	19.72	20.39	20.39	20.05	20.74
3	14.85	15.23	23.59	40.10	44.56	44.56	44.56
4	18.17	20.79	51.52	84.64	91.15	84.64	84.64

Tabel D.6 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.53	3.63	3.66	3.61	3.61	3.61	3.64
2	14.67	11.04	13.37	11.90	11.78	11.24	11.04
3	15.04	15.04	15.62	16.04	16.71	16.26	16.26
4	20.47	43.96	43.96	47.48	37.09	33.94	32.11

Tabel D.7 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.88	3.56	3.52	3.09	3.02	3.06	2.95
2	10.83	10.54	10.27	9.46	8.52	8.59	8.29
3	10.90	14.47	14.13	13.20	11.55	13.05	12.38
4	10.44	17.29	18.09	18.09	18.12	18.52	18.81

Tabel D.8 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.30	4.30	3.36	3.20	3.20	3.12	3.12
2	10.92	10.63	10.72	10.73	10.73	10.64	10.54
3	14.83	14.83	14.83	14.83	14.83	14.65	13.97
4	17.83	17.83	16.81	17.97	18.25	18.26	17.20

Tabel D.9 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	6.75	4.35	4.49	4.69	4.49	4.37	4.33
2	20.74	7.19	7.20	7.23	7.19	7.19	7.19
3	17.19	8.96	9.03	14.13	14.83	14.83	14.83
4	18.09	10.19	13.71	18.72	34.70	42.24	65.50

Tabel D.10 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.87	3.72	3.71	3.79	3.99	3.63	3.79
2	5.86	7.11	7.15	7.15	7.24	7.20	7.20
3	8.96	14.84	14.83	14.84	14.84	14.84	14.84
4	17.77	29.73	22.02	22.01	27.64	21.48	21.48

Tabel D.11 Pengamatan hambatan pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.61	3.61	3.30	3.19	3.11	3.16	3.20
2	7.02	5.59	5.41	5.41	5.36	5.36	5.36
3	14.48	11.67	9.32	8.97	8.97	8.97	8.97
4	19.38	18.18	17.96	18.19	18.16	18.16	18.15

Tabel D.12 Pengamatan hambatan variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.35	3.88	3.93	4.04	4.07	3.65	4.21
2	7.11	5.51	5.95	6.19	6.07	6.07	6.07
3	14.48	13.34	13.80	14.13	14.30	13.20	11.66
4	53.92	28.46	24.10	21.66	21.63	21.06	20.60

Tabel D.13 Pengamatan hambatan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	4.43	5.40	7.51	7.32	7.10	6.85	6.85
2	10.73	10.93	19.72	20.05	19.40	18.80	18.80
3	10.83	14.83	19.69	35.32	32.46	32.46	32.46
4	10.12	18.31	36.21	70.29	70.29	74.69	74.69

Tabel D.14 Pengamatan hambatan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 60 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	7.76	6.56	5.75	5.63	5.94	6.00	6.00
2	19.39	17.17	11.57	11.04	11.04	11.04	10.94
3	15.83	19.40	15.04	14.84	14.84	14.84	14.84
4	18.22	28.33	18.67	18.38	18.11	18.11	18.11

Tabel D.15 Pengamatan hambatan pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 80 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	3.58	3.62	3.69	3.64	3.62	3.62	3.58
2	15.82	7.32	8.35	9.62	7.15	7.20	7.28
3	14.47	8.90	11.44	14.83	14.83	14.83	14.83
4	6.24	7.01	10.12	17.67	18.22	18.22	17.94

Tabel D.16 Pengamatan hambatan variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M, *flow rate* Na_2CO_3 100 ml/menit

Cell	Hambatan (Ohm) pada menit ke-						
	0	20	40	60	80	100	120
1	5.99	5.06	5.24	5.61	6.34	6.48	6.52
2	21.46	10.54	10.83	11.23	14.66	14.31	14.31
3	19.06	8.90	8.90	9.17	12.78	12.78	12.64
4	7.40	7.04	7.73	9.92	10.44	10.44	10.44

APPENDIKS E

Pengamatan pH dan Perhitungan Hasil *Percent Recovery* pada setiap variabel

Tabel E.1 Pengamatan pH dari *Acid Gas Removal*

L/G	Flow rate Input Gas (L/min)	Flow rate Input Liquid (L/min)	pH NaOH Absorber	M NaOH Absober	Na^+ (g/L)	pH Na_2CO_3
1/20	10	0.5	12.5	0,031623	0,7273	9.17
1/30	15	0.5	12.5	0,031623	0,7273	9.01

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit:

$$pOH_{NaOH} = 14 - pH_{NaOH}$$
$$pOH_{NaOH} = 14 - 10{,}34$$
$$pOH_{NaOH} = 3{,}66$$
$$M_{NaOH} = 10^{-pOH_{NaOH}}$$
$$M_{NaOH} = 10^{-3{,}66}$$
$$M_{NaOH} = 0{,}0002\ M$$
$$M_{Na^+} = M_{NaOH}$$
$$M_{Na^+} = 0{,}0002\ M$$
$$Na^+ = M_{Na^+}\ x\ AR\ Na^+$$
$$Na^+ = 0{,}0002\ mol/L\ x\ 23\ g/mol$$
$$Na^+ = 0{,}005\ g/l$$

$$\%\ recovery\ natrium = \frac{Na^+\ pada\ larutan\ NaOH\ hasil\ regenerasi\ (\frac{g}{L})}{Na^+\ pada\ larutan\ NaOH\ masuk\ AGR\ (\frac{g}{L})}\ x\ 100\%$$

$$\%\ recovery\ natrium = \frac{0{,}005\ g/l}{0{,}7273\ g/l}\ x\ 100\%$$
$$\%\ recovery\ natrium = 0{,}69\%$$

Seperti perhitungan diatas, maka *% recovery* ion Na^+ dapat dihitung seperti pada Tabel E.2 hingga Tabel E.5

Tabel E.2 Perhitungan *% recovery* pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	pH *regenerated* NaOH	M *regenerated* NaOH	Na^+ *regenerated* NaOH (g/L)	*% recovery* Na^+
40	10.34	0,0002	0,0050	0,69%
60	11.67	0,0047	0,1076	14,79%
80	12.4	0,0251	0,5777	79,43%
100	11.83	0,0068	0,0068	21,38%

Tabel E.3 Perhitungan *% recovery* pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	pH *regenerated* NaOH	M *regenerated* NaOH	Na^+ *regenerated* NaOH (g/L)	*% recovery* Na^+
40	12,04	0,0110	0,2522	34,67%
60	12,31	0,0204	0,4696	64,57%
80	12,48	0,0302	0,6946	95,50%
100	12,26	0,0182	0,4185	57,54%

Tabel E.4 Perhitungan *% recovery* pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	pH *regenerated* NaOH	M *regenerated* NaOH	Na^+ *regenerated* NaOH (g/L)	*% recovery* Na^+
40	12,02	0,0105	0,2408	33,11%
60	12,14	0,0138	0,3175	43,65%
80	12,18	0,0151	0,3481	47,86%
100	12,16	0,0145	0,3325	45,71%

Tabel E.5 Perhitungan *% recovery* pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	pH *regenerated* NaOH	M *regenerated* NaOH	Na^+ *regenerated* NaOH (g/L)	*% recovery* Na^+
40	11,23	0,0017	0,0391	5,37%
60	11,29	0,0019	0,0448	6,17%
80	11,75	0,0056	0,1293	17,78%
100	10,54	0,0003	0,0080	1,10%

APPENDIKS F
Perhitungan Biaya Produksi NaOH Teknis

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit:
Daya total yang diambil adalah daya total saat menit ke-120

$$Daya\ Total\ (kW)$$
$$= Daya\ Cell\ 1 + Daya\ Cell\ 2 + Daya\ Cell\ 3 + Daya\ Cell\ 4$$
$$Daya\ Total = 23{,}2\ Watt + 14{,}2\ Watt + 10{,}5\ Watt + 6{,}73\ Watt$$
$$Daya\ Total = 54{,}63\ Watt$$
$$Daya\ Total = 0{,}0546\ kW$$
$$Produksi\ M_{NaOH}\ per\ daya\ (\frac{M}{kW}) = \frac{M_{NaOH}\ yang\ terbentuk}{Daya\ Total\ (kW)}$$
$$Produksi\ M_{NaOH}\ per\ daya = \frac{0{,}0002\ M}{0{,}0546\ kW}$$
$$Produksi\ M_{NaOH}\ per\ daya = 0{,}0040\ M/kW$$

$$Target\ Daya\ (kW) = \frac{M_{NaOH\ Target}}{Produksi\ M_{NaOH}\ per\ daya}$$
$$Target\ Daya = \frac{0{,}1\ M}{0{,}0040\ M/kW}$$
$$Target\ Daya = 24{,}9354\ kW$$
$$Target\ Energi\ (kWh) = Target\ Daya\ x\ 1\ jam$$
$$Target\ Energi = 24{,}9354\ kW\ x\ 1\ jam$$
$$Target\ Energi\ (kWh) = 24{,}9354\ kWh$$

$$Produksi\ NaOH\ (kg/jam)$$
$$= \frac{flowrate\ (mL/menit)\ x\ 60\frac{menit}{jam}\ x\ \ M_{NaOH\ Target}\ x\ BM\ NaOH}{1000000\ mL/m^3}$$
$$Produksi\ NaOH = \frac{40\frac{mL}{menit}\ x\ 60\frac{menit}{jam}\ x\ \ 0{,}1M\ x\ 40\ kg/kmol}{1000000\ mL/m^3}$$
$$Produksi\ NaOH = 0{,}0096\ kg/jam$$

$$Biaya\ Produksi\ NaOH\ Teknis\ (Rp/kgNaOH) = \frac{Target\ Energi\ x\ Biaya\ Listrik\ 1\ kWh}{Produksi\ NaOH\ (kg/jam)}$$

$$Biaya\ Produksi\ NaOH\ Teknis = \frac{24{,}9354\ kWh\ x\ 1112\ Rp/kWh}{0{,}0096\ kg/jam}$$

$$Biaya\ Produksi\ NaOH\ Teknis = 2888349{,}9071\ Rp/kgNaOH$$

Seperti perhitungan diatas, maka biaya produksi NaOH teknis dapat dihitung seperti pada Tabel F.1 hingga Tabel F.4.

Tabel F.1 Perhitungan biaya produksi NaOH teknis pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Daya total (kW)	M NaOH / Daya (M/kW)	Target Energi (kWh)	Produksi NaOH (kg/jam)	Biaya Produksi NaOH Teknis (Rp/kgNaOH)
40	0,0546	0,0040	24.9354	0.0096	2888349.9071
60	0,0714	0,0655	1.5271	0.0144	117923.0286
80	0,0867	0,2899	0.3450	0.0192	19980.3319
100	0,0719	0,0940	1.0634	0.0240	49269.2468

Tabel F.2 Perhitungan biaya produksi NaOH teknis pada variabel *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Daya total (kW)	M NaOH / Daya (M/kW)	Target Energi (kWh)	Produksi NaOH (kg/jam)	Biaya Produksi NaOH Teknis (Rp/kgNaOH)
40	0.0424	0.2589	0.3862	0.0096	44739.1774
60	0.0632	0.3229	0.3097	0.0144	23916.5830
80	0.0812	0.3719	0.2689	0.0192	15572.8133
100	0.0752	0.2419	0.4134	0.0240	19152.7147

Tabel F.3 Perhitungan biaya produksi NaOH teknis pada variabel *Counter Current,* L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Daya total (kW)	M NaOH / Daya (M/kW)	Target Energi (kWh)	Produksi NaOH (kg/jam)	Biaya Produksi NaOH Teknis (Rp/kgNaOH)
40	0.0616	0.1699	0.5887	0.0096	68190.5771
60	0.0707	0.1954	0.5118	0.0144	39525.0186
80	0.0910	0.1662	0.6015	0.0192	34837.6368
100	0.0726	0.1990	0.5025	0.0240	23282.6768

Tabel F.4 Perhitungan biaya produksi NaOH teknis pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Daya total (kW)	M NaOH / Daya (M/kW)	Target Energi (kWh)	Produksi NaOH (kg/jam)	Biaya Produksi NaOH Teknis (Rp/kgNaOH)
40	0.0343	0.0495	2.0217	0.0096	234182.3513
60	0.0537	0.0363	2.7526	0.0144	212561.0079
80	0.0741	0.0759	1.3173	0.0192	76295.9704
100	0.0562	0.0062	16.2043	0.0240	750799.5078

APPENDIKS G

Perhitungan *Current Density* dan *Current Efficiency*

Panjang Membran = 18 cm
Tinggi Membran = 10 cm
Luas Membrane= 180 cm^2

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit:

Arus total yang diambil adalah arus total saat menit ke-120

$$Current\ Density = \frac{I}{A_{membrane}}$$

Pada *cell* pertama:

$$Current\ Density = \frac{1{,}93\ A}{180\ cm^2}$$

$$Current\ Density = 0{,}01072\ A/cm^2$$

$$Current\ Density = 10{,}72\ mA/cm^2$$

$$\varepsilon = \frac{U_{Brine}\ x\ F\ x\ (C_{in} - C_{out})}{I}$$

$$\varepsilon = \frac{40\ x\ 96485\ x\ (0{,}031623 - (0{,}031623 - 0{,}0002)}{1{,}93 + 1{,}18 + 0{,}87 + 0{,}56}$$

$$\varepsilon = 0{,}00309965$$

Seperti perhitungan diatas, maka *Current Density* dan *Current Efficiency* dapat dihitung seperti pada Tabel G.1 hingga Tabel G.4.

Tabel G.1 Perhitungan *Current Density* dan *Current Efficiency* variabel *Counter Current,* L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Cell	Arus Pada Menit 120 (A)	*Current Density* (mA/cm^2)	*Current Density* Rata-rata (mA/cm^2)	Curret *Efficiency*
40	1	1.93	10.72	6.30556	0.00309965
	2	1.18	6.56		
	3	0.87	4.83		
	4	0.56	3.11		
60	1	3.68	20.44	8.30556	0.07546727
	2	0.96	5.33		
	3	0.8	4.44		
	4	0.54	3.00		
80	1	4.25	23.61	10.18056	0.44085377
	2	1.67	9.28		
	3	0.81	4.50		
	4	0.6	3.33		
100	1	3.65	20.28	8.43056	0.17911001
	2	0.99	5.50		
	3	0.86	4.78		
	4	0.57	3.17		

Tabel G.2 Perhitungan *Current Density* dan *Current Efficiency* variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Cell	Arus Pada Menit 120 (A)	*Current Density* (mA/cm^2)	*Current Density* Rata-rata (mA/cm^2)	Curret *Efficiency*
40	1	2.64	14.67	5.04167	0.19429513
	2	0.58	3.22		
	3	0.27	1.50		
	4	0.14	0.78		
60	1	3.18	17.67	7.47222	0.36616559
	2	1.09	6.06		
	3	0.74	4.11		
	4	0.37	2.06		
80	1	3.89	21.61	9.63889	0.55980796
	2	1.45	8.06		
	3	0.97	5.39		
	4	0.63	3.50		
100	1	3.71	20.61	8.88889	0.45722353
	2	1.14	6.33		
	3	0.86	4.78		
	4	0.69	3.83		

Tabel G.3 Perhitungan *Current Density* dan *Current Efficiency* variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Cell	Arus Pada Menit 120 (A)	*Current Density* (mA/cm^2)	*Current Density* Rata-rata (mA/cm^2)	Curret *Efficiency*
40	1	2.62	14.56	7.33333	0.12756591
	2	1.67	9.28		
	3	0.81	4.50		
	4	0.18	1.00		
60	1	3.01	16.72	8.38889	0.22050724
	2	1.67	9.28		
	3	0.81	4.50		
	4	0.55	3.06		
80	1	3.55	19.72	10.80556	0.25027585
	2	2.24	12.44		
	3	1.34	7.44		
	4	0.65	3.61		
100	1	2.66	14.78	8.66667	0.37249801
	2	1.98	11.00		
	3	1.03	5.72		
	4	0.57	3.17		

Tabel G.4. Perhitungan *Current Density* dan *Current Efficiency* pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Cell	Arus Pada Menit 120 (A)	*Current Density* (mA/cm^2)	*Current Density* Rata-rata (mA/cm^2)	Curret *Efficiency*
40	1	1.72	9.56	4.01389	0.03779816
	2	0.64	3.56		
	3	0.37	2.06		
	4	0.16	0.89		
60	1	1.95	10.83	6.27778	0.04162185
	2	1.1	6.11		
	3	0.81	4.50		
	4	0.66	3.67		
80	1	3.2	17.78	8.77778	0.11446731
	2	1.65	9.17		
	3	0.81	4.50		
	4	0.66	3.67		
100	1	1.8	10.00	6.56944	0.0117882
	2	0.84	4.67		
	3	0.95	5.28		
	4	1.14	6.33		

APPENDIKS H

Perhitungan Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ Total

Contoh perhitungan *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M, *flow rate* Na_2CO_3 40 ml/menit:
Arus total yang diambil adalah arus total saat menit ke-120

$$N = \frac{I}{F}$$

$$N = \frac{1{,}93 + 1{,}18 + 0{,}87 + 0{,}56}{96485}$$

$$N = 0{,}000047053946\ mol/s$$

$$N = 0{,}047053946\ mmol/s$$

Pada cell pertama:

$$Current\ Density = \frac{1{,}93\ A}{180\ cm^2}$$

$$Current\ Density = 0{,}01072\ A/cm^2$$

$$Current\ Density = 10{,}72\ mA/cm^2$$

$$\varepsilon = \frac{U_{Brine}\ x\ F\ x\ (C_{in} - C_{out})}{I}$$

$$\varepsilon = \frac{40\ x\ 96485\ x\ (0{,}031623 - (0{,}031623 - 0{,}0002)}{1{,}93 + 1{,}18 + 0{,}87 + 0{,}56}$$

$$\varepsilon = 0{,}00309965$$

$$N_{overall} = \frac{I\ x \frac{V_{anode}}{U_{Brine}}\ x\ \varepsilon}{F}$$

$$N_{overall} = \frac{(1{,}93 + 1{,}18 + 0{,}87 + 0{,}56)\ x \frac{2{,}4969}{40}\ x\ 0{,}00309965}{96485}$$

$$N_{overall} = 32{,}775732\ mmol/min$$

$$N_{overall} = 0{,}5462622\ mmol/s$$

Seperti perhitungan diatas, maka *Current Density* dan *Current Efficiency* dapat dihitung seperti pada Tabel H.1 hingga Tabel H.4.

Tabel H.1 Perhitungan kecepatan *transfer* massa Na^+ total pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 1 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ (mmol/s)	*Current Efficiency*	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ total (mmol/s)
40	0.047053946	0.00309965	0.5462622
60	0.061978546	0.07546727	11.67887874
80	0.075970358	0.44085377	62.71929231
100	0.062911333	0.17911001	16.88111581

Tabel H.2 Perhitungan kecepatan *transfer* massa Na^+ total pada variabel *Counter Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ (mmol/s)	*Current Efficiency*	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ total (mmol/s)
40	0.037622428	0.19429513	27.37796408
60	0.055759963	0.36616559	50.98015474
80	0.071928279	0.55980796	75.40517451
100	0.066331554	0.45722353	45.43611074

Tabel H.3 Perhitungan kecepatan *transfer* massa Na^+ total pada variabel *Counter Current*, L/G 1/30, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ (mmol/s)	*Current Efficiency*	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ total (mmol/s)
40	0.054723532	0.12756591	26.14575272
60	0.062600404	0.22050724	34.4668147
80	0.080634295	0.25027585	37.79211081
100	0.064673265	0.37249801	36.09118564

Tabel H.4 Perhitungan kecepatan *transfer* massa Na^+ total pada variabel *Co-Current*, L/G 1/20, elektrolit NaOH 0,01 M

Flow rate Na_2CO_3 (ml/menit)	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ (mmol/s)	*Current Efficiency*	Kecepatan *Transfer* Massa Na^+ total (mmol/s)
40	0.029952842	0.03779816	4.240344576
60	0.04684666	0.04162185	4.868566981
80	0.06550241	0.11446731	14.04110055
100	0.049023164	0.0117882	0.865767242

APPENDIKS I
Dokumentasi Penelitian

Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

Gambar 2. Unit *Acid Gas Removal*

Gambar 3. Unit Regenerasi dengan *Membrane Electrolysis*

RIWAYAT HIDUP PENULIS I

Teofilus Kristanto, lahir di Surabaya pada tanggal 31 Mei 1996. Anak ketiga dari tiga bersaudara. Memulai pendidikan formal di SD Petra 5 Surabaya dan lulus pada tahun 2008. Kemudian melanjutkan ke tingkat menengah di SMP Petra 3 Surabaya lalu SMA Petra 2 Surabaya. Penulis kemudian melanjutkan studi tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama melaksanakan studi S1, penulis melakukan kerja praktik di PT Chandra Asri Petrokimia di Cilegon dan menyelesaikan tugas Pra Desain Pabrik dengan judul, "***Ethylene*** **dari Gas Alam"** dan skripsi dengan judul **"Pengembangan Teknologi *Continuous Series Membrane Electrolysis* Untuk Regenerasi Absorben NaOH Pada Sistem Pemurnian Biogas Unit *Acid Gas Removal*"**. Selain kegiatan akademik, penulis juga aktif dalam kepengurusan Himatekk sebagai Staff *Entrepreneurship Development Department.* Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini. Semoga apa yang telah dicapai dapat dimanfaatkan sebaik-baiknya.

BIODATA PENULIS I

Nama	: Teofilus Kristanto
TTL	: Surabaya, 31 Mei 1996
Alamat	: Jl. Klampis Indah IX/ E-62, Surabaya
No. HP	: 087852573990
Email	: teosxn@gmail.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS II

Tasliya Diba Pujiyanto, penulis lahir di Jember, 18 Juli 1996. Kini berdomisili di Jember, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SD Muhammadiyah 1 Jember, SMP Negeri 3 Jember, dan SMA Negeri 1 Jember. Selama menempuh pendidikan S-1 di Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis aktif dalam organisasi *ITS International Office* sebagai wakil koordinator *Volunteer* dan sebagai Bendahara Umum *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE) ITS *Student Chapter*. Selain itu penulis juga aktif pada kegiatan olahraga di ITS, yaitu Tim Futsal Putri FTI dan Teknik Kimia. Penulis berpengalaman kerja praktek di PT Lotte Chemical Titan Nusantara pada tahun 2017. Pada akhir studi penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa untuk pengerjaan Tugas Akhir Pra Design Pabrik dengan judul, "***Ethylene* dari Gas Alam"** dan skripsi dengan judul **"Pengembangan Teknologi *Continuous Series Membrane Electrolysis* Untuk Regenerasi Absorben NaOH Pada Sistem Pemurnian Biogas Unit *Acid Gas Removal*"**. Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu penyelesaian buku ini. Semoga ilmu dalam buku ini dapat diaplikasikan dan bermanfaat bagi kemajuan teknologi di masa yang akan datang.

BIODATA PENULIS II

Nama	: Tasliya Diba Pujiyanto
TTL	: Jember, 18 Juli 1996
Alamat	: Jl. Jawa 2 G no. 10 Jember
No. HP	: 081230024766
Email	: tasliyadibapujiyanto@gmail.com