



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

2789A / H166



PSK

660.28923

KUR

9-1

2006

TUGAS AKHIR RK - 1583

**ABSORPSI GAS CO<sub>2</sub> KEDALAM LARUTAN K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> PADA  
PACKED COLUMN DENGAN MENGGUNAKAN  
PACKING JENIS RASCHIG RINGS**

EKO CAHYO KURNIAWAN  
NRP 2303 109 611

ABDULLAH SAAD BIN SMEER  
NRP 2303 109 615

Dosen Pembimbing  
Prof.Dr.Ir.ALI ALTWAY, M.S.

JURUSAN TEKNIK KIMIA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2006

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	6-9-06
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	226431



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT RK - 1583

**ABSORPTION OF CO<sub>2</sub> GASSES INTO K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>  
SOLUTION IN PACKED COLUMN USING  
RASCHIG RINGS PACKING TYPE**

EKO CAHYO KURNIAWAN  
NRP 2303 109 611

ABDULLAH SAAD BIN SMEER  
NRP 2303 109 615

Advisor  
Prof.Dr.Ir.ALI ALTWAY, M.S.

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2006

# ABSORPSI GAS CO<sub>2</sub> KEDALAM LARUTAN K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> PADA *PACKED COLUMN* DENGAN MENGGUNAKAN *PACKING* JENIS *RASCHIG RINGS*

**Nama Mahasiswa** : EKO CAHYO K. (2303 109 611)  
: ABDULLAH SAAD B.S.(2303 109 615)  
**Jurusan** : Teknik Kimia FTI – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. ALI ALTWAY, MS.

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mencari korelasi koefisien perpindahan massa pada proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> kedalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> di dalam *packed column* dengan menggunakan *packing* tipe *raschig rings* dari bahan logam alumunium.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *column* berdiameter 10 cm dan tinggi 200 cm dari bahan fiberglass. Sistem yang digunakan adalah gas CO<sub>2</sub> – larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang dikontakkan secara *counter current*. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah laju alir larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dengan cara mengatur valve sehingga manometer liquid menunjukkan  $\Delta h$  sebesar 0,5 cm; 1 cm; 1,5 cm; 2 cm; 2,5 cm; 3 cm; 3,5 cm dan 4 cm pada laju alir gas CO<sub>2</sub> konstan sebesar 299,065 cm<sup>3</sup>/s dan viscositas larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dengan cara menambahkan CMC dengan konsentrasi 0%; 0,05%; 0,1%; 0,15% dan 0,2%.

Dari hasil penelitian terlihat bahwa semakin besar laju alir larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, koefisien perpindahan massa juga semakin besar. Penambahan surfaktan (CMC) menyebabkan kenaikan viscositas larutan sehingga nilai koefisien perpindahan massa menjadi turun. Penelitian ini menghasilkan korelasi empiris untuk koefisien perpindahan massa sebagai berikut:

$$\frac{k_L D}{D_{AB}} = 36,6201 \left[ \left( \frac{V_L \rho D}{\mu} \right)^{0,7955} \left( \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{0,5089} \right]$$

**Kata kunci:** Koefisien perpindahan massa, *Packed column*, *Packing*, *Raschig ring*

# ABSORPTION OF CO<sub>2</sub> GASSES INTO POTASSIUM CARBONATE SOLUTION IN *PACKED COLUMN* USING *RASCHIG RINGS* PACKING TYPE

**Name** : EKO CAHYO K. (2303 109 611)  
: ABDULLAH SAAD B.S. (2303 109 615)  
**Department** : Chemical Engineering FTI - ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. ALI ALTWAY, MS.

## Abstract

*The experiment purpose is to find out the mass transfer coefficient correlation of CO<sub>2</sub> absorption into potassium carbonate solutions in packed column using aluminium raschig rings packing.*

*This experiment use fiberglass column with 10 cm in diameter and 200 cm in height. The system is counter current contacted between CO<sub>2</sub> – potassium carbonate solution. Potassium carbonate solutions from the top of the column and pure CO<sub>2</sub> flow from the bottom. The flow is continue, The variables are potassium carbonate solutions flow rate ( $\Delta h$  liquid manometer 0,5 cm; 1 cm; 1,5 cm; 2 cm; 2,5 cm; 3 cm; 3,5 cm and 4 cm) and viscosity (add CMC 0%; 0,05%; 0,1%; 0,15% and 0,2%) with constant CO<sub>2</sub> flow rate 299,065 cm<sup>3</sup>/s ( $\Delta h$  gas manometer 2,5 cm). We analyze the sample from the bottom with pH meter to calculate the mass transfer coefficient.*

*From the result we can conclude that the increase of potassium carbonate solutions flow rate will increase the mass transfer coefficient. The addition of surfactant (CMC) will decrease the mass transfer coefficient. This experiment give us empirical correlation for mass transfer coefficient as :*

$$\frac{k_L D}{D_{AB}} = 36,6201 \left[ \left( \frac{V_L \rho D}{\mu} \right)^{0,7955} \left( \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{0,5089} \right]$$

**Keywords** : Mass transfer coefficient, Packed column, Packing, Raschig rings

## LEMBAR PERSETUJUAN

Skripsi dengan judul :

### **ABSORPSI GAS CO<sub>2</sub> KEDALAM LARUTAN K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> PADA *PACKED COLUMN* DENGAN MENGGUNAKAN *PACKING* JENIS *RASCHIG RINGS***

Telah diperiksa dan disetujui untuk diujikan oleh :

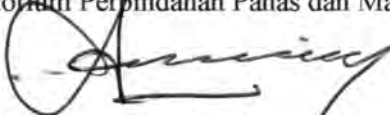
Dosen Pembimbing,



Prof. Dr. Ir. ALI ALTWAY, M.S.

NIP. 130 519 878

Mengetahui,  
Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa



Prof. Dr. Ir. ALI ALTWAY, M.S.

NIP. 130 519 878



Eko Cahyo Kurniawan

NRP. 2303 109 611

Penyusun,



Abdullah Saad Bin Smeer

NRP. 2303 109 615

**ABSORPSI GAS CO<sub>2</sub> KEDALAM LARUTAN K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> PADA  
PACKED COLUMN DENGAN MENGGUNAKAN PACKING  
JENIS RASCHIG RINGS DARI BAHAN LOGAM  
ALUMINIUM**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**EKO CAHYO KURNIAWAN**  
Nrp. 2303.109.611

**ABDULLAH SAAD B.S**  
Nrp. 2303.109.615

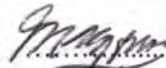
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MS.



(Pembimbing)

2. Ir. Margono, MT.



(Penguji I)

3. Dr. Ir. Susianto, DEA



(Penguji II)

4. Orchidea Rahmaniah, ST. MT.



(Penguji III)

**SURABAYA  
AGUSTUS, 2006**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah S.W.T atas kuasa dan pertolonganNya kepada kami sehingga kami dapat menyelesaikan laporan penelitian ini.

Laporan penelitian ini merupakan salah satu tugas yang harus ditempuh sebagai prasyarat menyelesaikan studi tahap sarjana di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Laporan skripsi ini kami susun berdasarkan data-data yang diperoleh selama penelitian serta dilengkapi dengan teori dari literatur. Dalam penyusunannya, kami mendapat bantuan pemikiran, moril maupun materiil dari berbagai pihak. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih yang sedalam dalamnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MS. sebagai dosen pembimbing sekaligus Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Masaa Jurusan Teknik Kimia FTI - ITS Surabaya.
2. Bapak Ir. Margono, MT., Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA, dan Ibu Orchidea Rahmaniah ST. MT. sebagai dosen penguji.
3. Bapak Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng sebagai Kepala Sie Tugas Akhir dan Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI - ITS Surabaya.
4. Bapak Dr. Ir Mahfud, DEA sebagai Kepala Jurusan Teknik Kimia FTI - ITS Surabaya.
5. Orang tua dan saudara-saudara kami yang telah banyak memberikan dorongan moril maupun materiil yang sangat berarti bagi kami.
6. Bapak Edyanto sebagai Laboran di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah memberikan ilmu pengetahuan kepada kami
8. Rekan-rekan seperjuangan di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, serta rekan-rekan Lintas Jalur Angkatan 2003 Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.

9. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu yang telah membantu kami.

Kami menyadari bahwa Laporan Penelitian ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat kami harapkan. Akhir kata semoga Laporan Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan.

Surabaya, 8 Agustus 2006

Penyusun



## DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	
INTISARI.....	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Pengertian Absorpsi.....	5
2.2. Tipe Packing.....	8
2.3. Teori Absorpsi.....	9
2.4. Absorpsi Dengan Reaksi Kimia.....	16
2.5. Absorpsi CO <sub>2</sub> Oleh Larutan K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	18
2.6. Koefisien Perpindahan Massa.....	19
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Peralatan.....	23
3.2. Bahan.....	24
3.3. Variabel Percobaan.....	24
3.4. Prosedur Penelitian.....	25
3.5. Gambar Peralatan.....	27
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Pengaruh Laju Alir Larutan K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> dan Viskositas Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k <sub>1a</sub> ).....	29
4.2. Korelasi Empiris.....	31
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. Kesimpulan.....	35
5.2. Saran.....	35

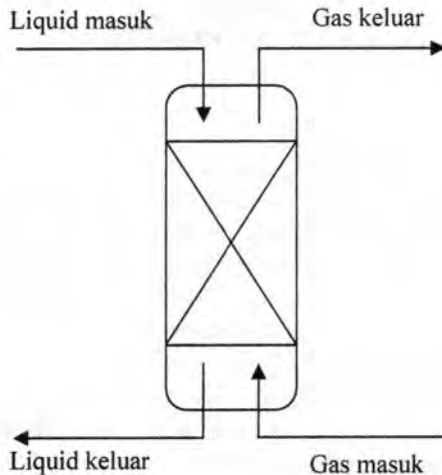
DAFTAR NOTASI.....	viii
DAFTAR PUSTAKA.....	xi
APPENDIKS A	
APPENDIKS B	
APPENDIKS C	
APPENDIKS D	

## DAFTAR TABEL

1. Tabel 2.1. Tipe dan Ciri Packing.....	8
2. Tabel 4.1. Hasil Analisa Absorpsi Pada Rate Gas CO <sub>2</sub> 299,065 cm <sup>3</sup> /s.....	31

## DAFTAR GAMBAR

1. Gambar 2.1. Skema Proses Absorpsi.....	6
2. Gambar 2.2. Profil Model Teori Absorpsi Dua Film...	10
3. Gambar 2.3. Gradien Konsentrasi di Sekitar Interface Gas - Liquid.....	11
4. Gambar 2.4. Pengaruh Diskontinuitas Pada Profil Konsentrasi .....	16
5. Gambar 2.5 Neraca Massa Pada Proses Absorpsi di Packed Column .....	20
6. Gambar 3.1. Gambar Alat Absorpsi.....	27
7. Gambar 4.1. Pengaruh $kLa$ Terhadap Rate Larutan $K_2CO_3$ .....	30
8. Gambar 4.2. Pengaruh $k_{1a}$ Terhadap Rate Liquid Untuk Viscositas Larutan $8,88 \times 10^{-4}$ kg/m.s (0,05% CMC).....	36



Gambar 2.1. Skema Proses Absorpsi

Dalam proses absorpsi ini peranan pelarut cukup penting. Beberapa pertimbangan yang perlu diperhatikan dalam pemilihan pelarut antara lain :

1. Kelarutan gas  
Kelarutan gas yang tinggi akan menaikkan rate absorpsi dan mengurangi kebutuhan pelarut yang digunakan.
2. Volatilitas  
Pelarut harus mempunyai tekanan uap yang rendah dimana gas yang meninggalkan suatu proses absorpsi biasanya jenuh dengan pelarut.
3. Viskositas  
Dipilih pelarut yang mempunyai viskositas rendah agar rate absorpsi naik, pressure drop pada pemompaan menjadi kecil, memberikan sifat perpindahan panas yang baik, dan meningkatkan karakteristik flooding dalam menara.
4. Korosifitas pelarut kecil, agar biaya konstruksi alat tidak mahal.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Pengertian Absorpsi.

Proses perpindahan massa dari fasa gas ke fasa cair dimana salah satu/ beberapa komponen campuran gas tersebut dapat larut dalam fasa cairnya disebut sebagai absorpsi. Proses absorpsi akan terjadi jika campuran gas dikontakkan dengan liquid yang berfungsi sebagai pelarut. Syarat mutlak dalam suatu proses absorpsi adalah kelarutan solute dalam solvent harus lebih besar daripada kelarutannya dalam carrier.

Packed column adalah suatu alat yang digunakan untuk mengontakkan sistem gas-liquid dan liquid-liquid. Biasanya column diisi dengan packing material yang ditempatkan secara acak, tetapi packing material dapat juga disusun dan diatur dengan hati-hati. Unit suatu column terdiri atas shell yang biasanya berbentuk silinder, packing material, packing support atau penyangga packing, liquid distributor yaitu alat distribusi liquid yang dirancang agar memberikan irigasi yang efektif ke packed bed, intermediate support dan redistributors yang digunakan bila liquid mulai turun ke packing material dan dinding tower, nozzle yang digunakan untuk gas dan liquid yang masuk dan keluar column.

Untuk absorpsi dalam packed column pada umumnya tidak ada liquid (absorbent) yang menguap. Sehingga dalam proses absorpsi, campuran gas yang akan masuk ke dalam packed column dijenuhkan dulu dengan uap solvent. Proses absorpsi dalam packed column dapat digambarkan sebagai berikut :





**BAB II**  
**TINJAUAN PUSTAKA**

sistem packed column guna optimasi proses absorpsi gas kedalam larutan potassium carbonat.

### 1.3. Tujuan Penelitian.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari korelasi koefisien perpindahan massa pada proses absorpsi gas  $\text{CO}_2$  kedalam larutan potassium carbonat di dalam packed column dengan menggunakan packing tipe raschig ring.

### 1.4. Batasan Masalah.

Batasan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana menentukan koefisien perpindahan massa pada absorpsi gas  $\text{CO}_2$  oleh larutan carbonat dan bicarbonat di dalam packed column ditinjau dari :

- Percobaan dilakukan pada saat aliran steady state, suhu kamar ( $27^\circ\text{C}$ ) dan tekanan satu atm.
- Packing yang digunakan dalam percobaan ini adalah packing tipe raschig ring dengan bahan logam aluminium.
- Larutan produk dijaga agar tidak terjadi kontak dengan udara.

### 1.5. Manfaat Penelitian.

Dari hasil penelitian diharapkan dapat dijadikan acuan optimasi pada industri-industri yang menggunakan proses absorpsi gas-liquid dalam packed column dengan tipe packing raschig rings.



tidak disebutkan mengenai pengaruh laju alir larutan  $K_2CO_3$  dan konsentrasinya terhadap koefisien perpindahan massa dan tidak diteliti lebih lanjut tentang korelasi yang menghubungkan keduanya. Karena itu, penyelidikan lebih lanjut terhadap sistem absorpsi  $CO_2$  di dalam larutan  $K_2CO_3$  yang menyangkut mengenai koefisien perpindahan massa sistem akan dilakukan dalam penelitian ini dengan menggunakan packed column.

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rohmatin dan Andrayani (2002) telah menyelidiki koefisien perpindahan massa total pada proses absorpsi gas  $CO_2$  dengan larutan  $K_2CO_3$  dalam packed column dengan menggunakan jenis packing raschig ring. Penelitian ini menunjukkan hubungan antara laju alir  $K_2CO_3$  dengan koefisien perpindahan massa total gas ( $K_{Ga}$ ) pada konsentrasi  $K_2CO_3$  yang bervariasi. Kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian ini adalah bahwa harga  $K_{Ga}$  dipengaruhi oleh laju alir larutan  $K_2CO_3$  dan konsentrasinya, sedangkan laju  $CO_2$  tidak mempengaruhi harga  $K_{Ga}$ .

Penelitian terakhir dilakukan oleh Hardi dan Pancasari (2006) untuk menentukan koefisien perpindahan massa pada packed column dengan menggunakan packing jenis raschig rings menyebutkan bahwa koefisien perpindahan massa sangat dipengaruhi oleh rate liquid, sedangkan rate gas  $CO_2$  sangat sedikit pengaruhnya terhadap koefisien perpindahan massa. Hal ini disebabkan karena kemurnian gas  $CO_2$  menyebabkan tidak adanya tahanan pada lapisan film gas.

Dari penelitian-penelitian di atas, dapat dilihat bahwa masih perlu banyak dipelajari lagi fenomena perpindahan massa di dalam packed column serta perlu dicari lagi data-data koefisien perpindahan massa agar laju perpindahan massa pada system absorpsi packed column dapat lebih dioptimalkan.

## 1.2. Perumusan Masalah.

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah perlunya mendapatkan data-data koefisien perpindahan massa pada absorpsi gas  $CO_2$  kedalam larutan potassium carbonat di dalam

seringkali digunakan untuk memperoleh solute yang lebih banyak dari campuran gasnya. Reaksi yang terjadi dalam fase liquid menurunkan kesetimbangan tekanan parsial dari solute dalam larutan, sehingga gaya dorong untuk transfer massa akan meningkat.

Proses absorpsi biasanya dilakukan dalam aliran counter current vertikal melalui packed, plate atau spray tower. Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ertanto dan Nugroho (2004) menghasilkan profil konsentrasi oksigen-air pada sistem plate tower dan bubble column. Dari hasil penelitian di atas, dapat dilihat bahwa pada bubble column dan plate tower akan menghasilkan pressure drop besar. Pressure drop yang besar ini akan berpengaruh pada peningkatan kecepatan aliran liquid di dalam kolom, sehingga waktu kontak antara liquid dan gas akan menjadi lebih singkat. Sedangkan pada proses absorpsi, diinginkan waktu tinggal yang lama, sehingga jumlah gas yang diserap atau bereaksi dengan liquid akan semakin besar. Untuk mencapai hal ini, dapat digunakan alternatif packed column, yang akan dipelajari pada penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Aroonwilas (1999) menghasilkan skema split flow pada proses absorpsi  $\text{CO}_2$  dengan transfer massa mekanis dan permodelan hidrodinamik, sedangkan Astarita (1989) melakukan penelitian untuk menentukan koefisien perpindahan massa pada absorpsi gas  $\text{CO}_2$  ke dalam larutan alkali pada packed towers. Doan dan Fayed (2000) meneliti tentang pengaruh flow rate dan koefisien perpindahan massa di lapisan film gas dalam diameter packed column yang besar.

Sanyal, dkk. (1998) telah meneliti tentang model absorpsi dengan model persamaan dan simulasi untuk menghitung pengaruh laju alir gas  $\text{CO}_2$  dan laju alir larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  terhadap temperatur dan ketinggian kolom absorber. Kesimpulan yang dihasilkan penelitian ini menunjukkan bahwa dengan tinggi absorber yang sama, semakin besar laju alir gas  $\text{CO}_2$  dan laju alir larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , temperturnya semakin rendah pada setiap laju alir gas  $\text{CO}_2$  dan larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Namun di dalam penelitian ini

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang.

Selain proses distilasi dan ekstraksi, absorpsi merupakan salah satu metode pemisahan yang sering diaplikasikan di dalam dunia industri. Pada proses absorpsi, suatu gas diserap oleh larutan zat tertentu sehingga suatu komponen gas ini akan terlarut. Tujuan dari penerapan fenomena ini di dalam industri adalah untuk mengambil suatu komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi. Proses absorpsi bisa dipengaruhi oleh difusi dan konveksi dalam fase gas, juga difusi, konveksi dan reaksi pada sisi liquid. Seringkali proses absorpsi diikuti dengan kenaikan suhu yang besar pengaruhnya terhadap laju absorpsi.

Salah satu peralatan yang dapat digunakan dalam proses absorpsi adalah packed column. Aliran fluida di dalam packed column ada dua jenis, yaitu secara cocurrent dan counter-current. Pada aliran cocurrent, gas dan liquid masuk ke dalam kolom dari arah yang sama. Sedangkan pada aliran counter-current, aliran liquid masuk dari bagian atas sedangkan aliran gas melalui bagian bawah kolom. Aliran liquid masuk dari bagian atas melalui suatu distributor liquid yang dirancang sedemikian rupa supaya liquid dapat membasahi seluruh kolom dengan merata. Sedangkan kontak antara gas dan liquid terjadi di bed yang berisi packing material. Dengan adanya packing material dalam packed column, maka kontak antara gas dan liquid yang terjadi akan semakin lama sehingga transfer massa dapat berjalan dengan baik. Packing material ini biasanya terbuat dari bahan-bahan tertentu, misalnya plastik, tanah liat, keramik, dll.

Absorpsi secara fisik hanya merupakan absorpsi gas dalam liquid tanpa terjadi suatu reaksi kimia. Sedangkan absorpsi dengan reaksi kimia merupakan peristiwa absorpsi yang diikuti dengan reaksi kimia. Proses absorpsi dengan reaksi kimia



**BAB I**  
**PENDAHULUAN**

5. Harganya murah dan mudah didapat
6. Hal-hal lain yang perlu diperhatikan adalah solvent harus non-toxic, non-flammable, memiliki komposisi kimia yang stabil, dan titik bekunya rendah.

Telah banyak tipe packing material yang telah dikembangkan dan ada beberapa diantaranya yang telah digunakan secara umum. Packing material komersial tersedia dalam ukuran 3 mm sampai sekitar 75 mm. Kebanyakan packing material dibuat inert terhadap fluida dan dibuat dengan bahan yang murah seperti misalnya tanah liat, porselin, grafit, atau plastik. Kekosongan ruang (void spaces) yang tinggi sekitar 60% sampai 90% merupakan karakteristik dari packing material yang baik. Packing material memungkinkan volume liquid relatif besar untuk melalui aliran gas secara counter-current melewati celah-celah dari packed bed dengan pressure drop gas yang relative rendah.

Syarat kontak yang baik antara gas dan liquid sulit dicapai, khususnya untuk ukuran tower yang besar. Idealnya liquid terdistribusi satu kali melalui bagian atas dari packing, aliran dalam lapisan film tipis yang melalui seluruh bagian permukaan packing turun ke bagian bawah tower. Namun dalam kenyataannya lapisan film cenderung menjadi lebih tebal pada beberapa bagian, dan lebih tipis pada bagian yang lainnya, sehingga liquid menggenang menjadi sungai kecil dan mengalir sepanjang jalan kecil yang dibatasi oleh packing. Pada laju liquid rendah, banyak permukaan packing menjadi kering atau ditutupi oleh film liquid yang stagnan, hal ini biasanya disebut sebagai channeling. Peristiwa channeling merupakan sebab utama yang menyebabkan performance packed column menjadi kecil.

## 2. 2. Tipe Packing.

Tabel 2.1. Tipe dan Ciri Packing

No	Type Packing	Ciri-ciri
1	Raschig Rings	Tipe yang paling banyak dipakai. Biasanya biaya per unitnya lebih rendah, namun kurang efisien bila dibandingkan dengan packing tipe yang lain. Tersedia dalam bermacam-macam bahan, stukturanya sangat kuat. Biasanya ditempatkan begitu saja dalam keadaan basah atau kering. Untuk ukuran yang lebih besar, 4-6 inch biasanya disusun dengan tangan. Ketebalan dinding berubah-ubah. Perubahan permukaan terhadap ketebalan dinding menghasilkan gaya dorong dalam tower. Biasanya terdapat channeling liquid, dan mengarahkan lebih banyak liquid ke dinding tower.
2.	Berl Saddles	Dalam aplikasinya lebih efisien dibandingkan tipe Raschig Rings, namun harganya lebih mahal. Packing mengumpul dan penyusunannya dalam bed sulit, sehingga menyebabkan chanelling meski tidak sebanyak Raschig Rings. Packing ini tidak menghasilkan gaya dorong, namun mempunyai HTU dan pressure drop lebih rendah serta limit flooding point lebih tinggi daripada Raschig Rings. Packing ini lebih mudah rusak di dalam bed daripada tipe Raschig Rings.

Tabel 2.1. Lanjutan

No	Type Packing	Ciri-ciri
3.	Intalox Saddles	Salah satu packing yang paling efektif, tetapi lebih mahal. Kecenderungan untuk mengumpul lebih sedikit. Flooding limit lebih tinggi dan pressure drop lebih rendah daripada Raschig Rings maupun Berl Saddles. Harga HTU lebih rendah untuk kebanyakan system. Lebih mudah rusak daripada Raschig Rings.
4.	Pall Rings	Pressure drop lebih rendah daripada Raschig Rings. Harga HTU lebih rendah (dalam beberapa system juga lebih rendah daripada Berl Saddles). Flooding limit lebih besar. Distribusi liquid baik, kapasitasnya besar. Ada gaya dorong di sisi dinding column, tersedia dengan bahan logam, plastik dan keramik.
5.	Lessing Rings	Tidak banyak data yang tersedia, tetapi secara umum sedikit lebih baik daripada Raschig Rings. Pressure drop-nya sedikit lebih besar. Gaya dorong di sisi dinding tinggi.
6.	Super Rings	Tidak banyak data yang tersedia dikarenakan ini merupakan packing jenis terbaru. Tetapi kebanyakan industri sudah menggunakan packing jenis ini. Kelebihannya jika dibandingkan dengan jenis packing yang lain adalah memiliki luas permukaan yang besar.

(Ludwig, 1995)

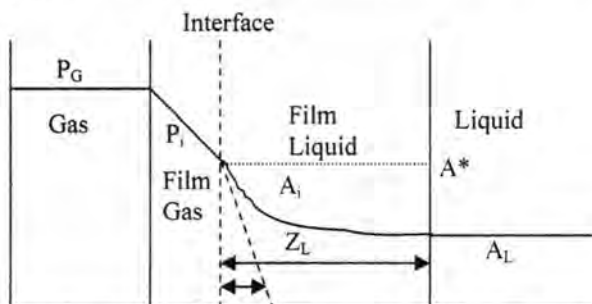
### 2.3. Teori Absorpsi.

Terdapat beberapa penjelasan mengenai proses absorpsi gas oleh liquid, yaitu :

### 1. Teori Dua Film

Dalam berbagai proses pemisahan, materi berdifusi dari satu fase ke fase yang lain, dan laju difusi dalam kedua fase tersebut mempengaruhi laju transfer massa keseluruhan. Dalam teori dua film yang dinyatakan oleh Whitman, dianggap film liquid dalam keadaan stagnan, sehingga proses perpindahan massa di dalam film liquid terjadi karena difusi saja, sedangkan badan liquid berada dalam keadaan tercampur sempurna. Kesetimbangan diasumsikan terjadi pada permukaan batas (interface), dan ketahanan terhadap transfer massa dalam kedua fase ditambahkan untuk memperoleh ketahanan overall.

Model ini menggambarkan tentang adanya lapisan difusi. Perpindahan massa yang terjadi akan ditentukan oleh konsentrasi dan jarak perpindahan massa, yaitu ketebalan film tersebut. Jika liquid mempunyai komposisi yang tetap, konsentrasi pada bagian film akan menurun dari  $A^*$  pada permukaan sampai  $A_L$  pada bagian liquid. Di sini, tidak ada konveksi dalam film dan gas terlarut melewati film tersebut hanya oleh difusi molekuler.



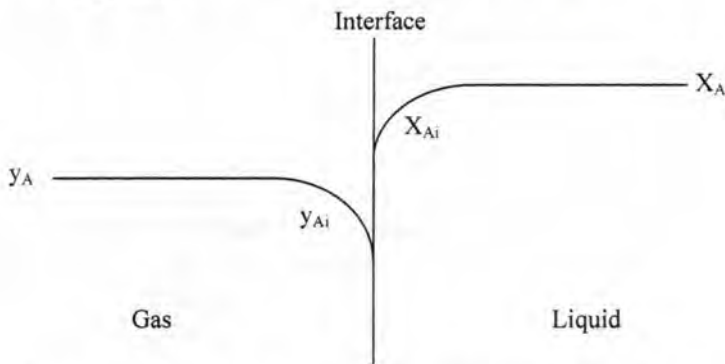
Gambar 2.2. Profil Model Teori Absorpsi Dua Film

Proses difusi berlangsung efektif bila lapisan film tipis. Lapisan film yang tipis akan meniadakan terjadinya tahanan dari lapisan itu (tahanan makin kecil), sehingga



proses perpindahan massa tidak terganggu. Untuk mendapatkan lapisan yang tipis, kondisi kedua aliran fasa harus diatur, yaitu diusahakan membuat aliran yang turbulen, karena pada lapisan film yang tipis akan diperoleh gradien konsentrasi yang kecil, maka proses absorpsi kedua aliran akan berjalan dengan cepat dan keadaan menjadi steady state.

Model ini kurang realistis, karena sulit menemukan adanya lapisan tipis dengan ketebalan di dekat permukaan fluida, di mana akan tampak seperti mempunyai ketebalan yang sama



Gambar 2.3. Gradien Konsentrasi di Sekitar Interface Gas-Liquid

Untuk absorpsi gas yang sangat larut, fraksi mol dalam liquid pada interface akan lebih besar daripada dalam gas, seperti ditunjukkan dalam Gambar 11.3. di atas.

Proses perpindahan massa didalam film liquid terjadi karena difusi saja. Sedang badan liquid berada dalam keadaan tercampur sempurna. Fluks absorpsi dengan model ini dinyatakan dengan :

$$\bar{R} = \frac{D_A (A^* - A^0)}{\delta} \dots\dots\dots(2-1)$$

Berarti :

$$k_L = \frac{D_A}{\delta} \dots\dots\dots(2-2)$$

Sifat-sifat hidrodinamik sistem diperhitungkan dengan parameter  $\delta$  yang bergantung pada geometri, agitasi liquid, sifat-sifat fisik, dan sebagainya. Model ini tidak realistik, tapi prediksi dengan film model mendekati prediksi dengan model-model yang lebih canggih. Oleh karena itu model ini sering digunakan.

## 2. Teori Penetrasi atau Surface Renewal

Dengan model ini, proses absorpsi gas digambarkan sebagai penggantian pada interval waktu tertentu elemen-elemen liquid pada permukaan dengan liquid dari dalam yang mempunyai komposisi bulk rata-rata. Karena elemen liquid adalah pada permukaan dan berkontak dengan gas, maka elemen ini menyerap gas seolah-olah dalam keadaan stagnan dan mempunyai kedalaman yang tak berhingga. Laju absorpsi  $R$  adalah fungsi waktu kontak elemen dengan gas. Pada umumnya, laju absorpsi cepat pada keadaan awal dan kemudian menurun seiring dengan waktu. Penggantian elemen liquid pada permukaan oleh liquid dari dalam dengan komposisi bulk bisa dilaksanakan karena adanya gerakan turbulen dari liquid.

Higbie, yang untuk pertama kalinya menerapkan teori ini untuk absorpsi gas dalam liquid, menunjukkan bahwa molekul-molekul yang berdifusi tidak akan mencapai sisi lapisan tipis yang lain jika waktu kontaknya pendek. Oleh karena itu Higbie menekankan agar waktu kontak lebih lama. Berdasarkan anggapan ini maka teori dua film tidak berlaku untuk keadaan steady karena gradien konsentrasinya.

Teori Higbie ini menyebutkan bahwa turbulensi akan menaikkan difusivitas pusaran, hal ini akan menentukan waktu perpindahan massa yang akan terjadi dan kontak untuk setiap keadaan massa. Difusivitas pusaran ini terjadi dalam keadaan setimbang antara fase gas dan liquid

Kedalaman penetrasi didefinisikan sebagai jarak dimana konsentrasi berubah 1% dari harga akhir. Dalam peralatan untuk absorpsi gas, tetesan-tetesan dan gelembung-gelembung seringkali hanya berumur pendek karena adanya persenyawaan, oleh karena itu teori penetrasi dapat diterapkan.

Dengan model Higbie ini (yang sering disebut juga dengan model penetrasi), waktu kontak elemen-elemen liquid dipermukaan dengan gas dianggap sama yaitu  $\theta$ . Harga  $\theta$  ditentukan oleh sifat-sifat hidrodinamika sistim. Makin turbulen liquidnya, penggantian elemen-elemen liquid makin sering, sehingga harga  $\theta$  makin kecil. Dengan model Higbie, jumlah penyerapan per satuan luas interface dan fluksi penyerapan dinyatakan sebagai berikut :

$$Q = 2(A^* - A^0) \sqrt{\frac{D_A \theta}{\pi}} \dots\dots\dots(2-3)$$

$$\bar{R} = \frac{Q}{\theta} = 2(A^* - A^0) \sqrt{\frac{D_A}{\pi \theta}} \dots\dots\dots(2-4)$$

dan harga  $k_L$  dinyatakan sebagai berikut :

$$k_L = \frac{\bar{R}}{A^* - A^0} = 2 \sqrt{\frac{D_A}{\pi \theta}} \dots\dots\dots(2-5)$$

Danckwertz tidak mengasumsikan bahwa waktu kontak elemen-elemen liquid dengan gas sama. Namun dia mengusulkan bahwa fraksi permukaan yang berkontak dengan gas pada saat tertentu untuk waktu antara  $\theta$  dan  $(\theta + d\theta)$  adalah  $se^{-S\theta} d\theta$ . Disini S adalah fraksi luas permukaan yang diganti dengan liquid dari dalam per satu satuan waktu. Jadi bila R adalah laju absorpsi sesaat per satuan luas permukaan liquid yang telah berkontak dengan gas untuk waktu t (untuk

absorpsi fisik adalah  $A^* - A^0 \sqrt{\frac{D_A}{\pi \theta}}$ ,) maka laju absorpsi

rata-rata kedalam liquid adalah harga  $R$  yang dirata-ratakan keseluruhan permukaan yang mempunyai umur antara 0 dan  $\infty$ .

$$\bar{R} = S \int_0^{\infty} R e^{-s\theta} d\theta \dots\dots\dots(2-6)$$

$$= (A^* - A^0) S \sqrt{\frac{D_A}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-s\theta}}{\sqrt{\theta}} d\theta \dots\dots\dots(2-7)$$

$$= (A^* - A^0) \sqrt{D_A S} \dots\dots\dots(2-8)$$

atau,

$$k_L = \sqrt{D_A S} \dots\dots\dots(2-9)$$

Disini sifat hidrodinamika sistim dinyatakan dengan parameter  $S$  (yang satuannya waktu<sup>-1</sup>). Bentuk distribusi yang lain juga dimungkinkan. Pada umumnya bila fraksi luas permukaan yang telah berkontak dengan gas selama waktu antara  $\theta$  dan  $(\theta + d\theta)$  adalah  $f(\theta) d\theta$ , maka laju absorpsi fisik rata-rata per satuan luas adalah :

$$\bar{R} = (A^* - A^0) \sqrt{\frac{D_A}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{f(\theta)}{\sqrt{\theta}} d\theta \dots\dots\dots(2-10)$$

dan

$$k_L = \sqrt{\frac{D_A}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{f(\theta)}{\sqrt{\theta}} d\theta \dots\dots\dots(2-11)$$

### 3. Teori Danckwerts

Teori penetrasi juga dikembangkan oleh Danckwerts yang menyatakan bahwa unsur-unsur fluida pada permukaan transfer secara acak akan diganti oleh fluida lain yang lebih segar dari aliran lindak.

Teori ini digunakan dalam keadaan khusus di mana dianggap massa difusivitas pusran berlangsung dalam waktu yang bervariasi dan dianggap bahwa laju perpindahan massa tidak tergantung dari waktu perpindahan unsur dalam fasa

liquid lindak pada keadaan stagnant. Sehingga perpindahan massa yang terjadi di interface merupakan harga dari jumlah zat yang terabsorpsi. Jadi dianggap bahwa perpindahan unsur lindak fase liquid menuju interface tidak akan mempengaruhi kecepatan perpindahan massanya.

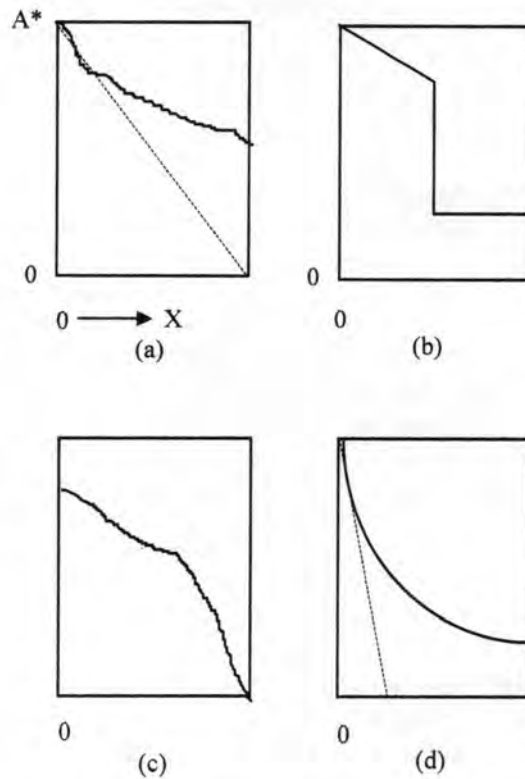
#### 4. Still Surface Model

Pada model ini, perpindahan gas kedalam liquid disebabkan karena diffusi dan konveksi. Pada bagian didekat interface terjadi diffusi, dan pada bagian yang jauh dari interface, terjadi peristiwa konveksi yang lebih dominan.

Menurut King, perpindahan ini adalah hasil kombinasi molekuler diffusivity dan eddy diffusivity yang sebanding dengan jarak dari interface dipangkatkan  $n$ . Dalam keadaan ini  $k_L$  akan sebanding dengan  $D_A$  pangkat suatu bilangan antara 0 dan 1, sesuai dengan harga  $n$  yang digunakan. Maka pada model ini  $k_L$  dinyatakan dalam dua parameter yang berhubungan dengan kondisi hidrodinamik. Model ini sulit diterapkan terutama bila ada reaksi.

Still Surface Model kedua adalah Surface Rejuvenation oleh Andrew dan Danckwartz. Model ini menggambarkan proses perpindahan gas seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Diffusi terjadi selama suatu periode dengan laju yang menurun ke suatu liquid yang stagnan/ diam (a). Kemudian suatu gangguan konvektif menggantikan liquid ini sampai kedalaman tertentu dibawah permukaan oleh liquid yang konsentrasinya sama dengan konsentrasi dibadan liquid (b). Suatu diffusi tenang dimulai lagi dengan gradien konsenrasi yang lebih tajam dan sehingga laju absorpsinya lebih cepat dari pada sebelum ada gangguan (c), dan berlanjut sampai gangguan berikutnya (d). Mungkin ini merupakan gambaran yang benar tentang apa yang terjadi bila liquid mengalir pada packing. Tapi model ini sulit diterapkan dan paling tidak memerlukan dua parameter.



Gambar 2.4. Pengaruh Diskontinuitas Pada Profil Konsentrasi  
 (a) sebelum discontinuity ;  
 (b) segera sesudah discontinuity ;  
 (c) dan (d) tahap-tahap selanjutnya.

#### 2.4. Absorpsi Dengan Reaksi Kimia.

Absorpsi diikuti dengan reaksi kimia dalam fase liquid sering digunakan untuk memperoleh pemindahan zat terlarut yang lebih banyak dari suatu campuran gas. Sebagai contoh, larutan asam encer dapat digunakan untuk menyerap  $\text{NH}_3$ , dan larutan

dasar digunakan untuk memindahkan CO<sub>2</sub> dan gas-gas asam yang lain. Reaksi dalam fase liquid mereduksi kesetimbangan tekanan parsial dari zat terlarut pada larutan, dimana penambahan driving force yang besar untuk transfer massa. Jika reaksi irreversible pada kondisi absorpsi, kesetimbangan tekanan prsial adalah nol dan N<sub>oy</sub> dapat dihitung hanya dari rubahan komposisi gas. Untuk y<sup>∞</sup> = 0, maka berlaku rumus :

$$N_{oy} = \int \frac{dy}{y} = \ln \left( \frac{y_b}{y_a} \right) \dots\dots\dots(2-12)$$

Keuntungan dari absorpsi dengan reaksi kimia adalah untuk memperbesar koefisien transfer massa. Hal ini karena keefektifan interfacial area yang lebih besar, dimana absorpsi dapat menggantikan bagian yang stagnan (static hold up) yang dekat, seperti dalam bagian cairan yang bergerak (dynamic liquid hold up). Jika resistensi lapisan gas (gas-film resistance) yang mengontrol, maka efeknya adalah penambahan efektif area. Pada absorpsi NH<sub>3</sub>, harga k<sub>g</sub>a dalam larutan asam hampir sama dengan penguapan air, dimana seluruh interfacial area diharapkan

menjadi efektif. Faktor  $\frac{k_G a_{vap}}{k_G a_{abs}}$  dan  $\frac{k_G a_{react}}{k_G a_{abs}}$  berkurang dengan adanya penambahan laju liquid dan hampir sama ketika daerah total (total hold up) lebih besar dari daerah stagnan (static hold up).

Jika liquid film resistance lebih dominan seperti pada absorpsi CO<sub>2</sub> atau H<sub>2</sub>S dalam aqueous solutions, reaksi kimia yang cepat dalam liquid dapat memberikan penambahan harga koefisien transfer massa yang sangat besar.

Ketika absorpsi diikuti oleh reaksi yang sangat lambat, penampakan harga k<sub>g</sub>a mungkin lebih rendah daripada jika hanya terjadi absorpsi saja. Sebagai contoh adalah absorpsi Cl<sub>2</sub> dalam air yang diikuti dengan hidrolisis klor yang terlarut. Laju hidrolisis yang lambat mengontrol laju absorpsi overall. (Mc Cabe, 1976)

Dalam suatu proses dimana terdapat gas terlarut yang terabsorpsi bereaksi dengan liquid atau komponen pada liquid,

maka reaksi tersebut akan menghilangkan solute gas. Laju kehilangan ini tergantung konsentrasi gas yang terabsorpsi dan jenis reaksi serta orde reaksinya. Dalam hal ini, temperatur, kelarutan, diffusivitas dan koefisien kecepatan reaksi dianggap tetap. Menurut persamaan Danckwerts, laju transfer gas rata-ratanya adalah :

$$R = k_G (p - p_i) = E k_l (A^* - A^0) \dots \dots \dots (2-13)$$

Dimana :

$k_G$  = koefisien transfer massa untuk fasa gas

$p$  = tekanan gas

$p_i$  = tekanan partial gas

$E$  = faktor kenaikan

$R$  = Laju transfer rata-rata tiap satuan luas

Harga koefisien  $E$  merupakan ratio dari jumlah gas yang di absorpsi dalam suatu waktu terhadap yang diabsorpsi jika ada reaksi, yaitu sebesar :

$$2(A^* - A^0) \sqrt{\frac{D_A t}{\pi}} \dots \dots \dots (2-14)$$

dimana  $D_A$  merupakan koefisien diffusivitas gas terlarut.

(Danckwerts, 1970)

### 2.5. Absorpsi CO<sub>2</sub> Oleh Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Proses absorpsi ini sangat penting dalam industri kimia, terutama untuk proses-proses yang menyangkut manufaktur gas hidrogen. Reaksi-reaksi yang terjadi jika CO<sub>2</sub> diabsorpsi oleh larutan alkali :



Reaksi (a) adalah reaksi orde 2 (laju reaksi sebanding dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan OH<sup>-</sup>). Laju ini konstan pada suhu 20°C dan dalam larutan encer sekitar 6000 lt/gmol.s. Sedangkan reaksi (b) merupakan reaksi orde 1, dimana laju konstan kira-kira sebesar 0,02 s<sup>-1</sup> pada temperatur 20°C. Sehingga konsentrasi OH<sup>-</sup> dalam larutan lebih besar dari 10<sup>-4</sup> g ion/lt (pH > 10). Adapun



laju reaksi  $\text{CO}_2$  oleh reaksi (a) akan lebih besar dari  $0,6 \text{ s}^{-1}$  dan 30 kali lebih cepat daripada reaksi (b). Sehingga reaksi (b) dapat diabaikan untuk penentuan laju reaksi  $\text{CO}_2$  dalam larutan alkali dengan  $\text{pH} > 10$ . Akan tetapi, reaksi ini dapat pula dipercepat dengan adanya penggunaan katalis. Konstanta kecepatan reaksi  $k_{\text{OH}}$  untuk reaksi (a) bervariasi terhadap suhu dan dinyatakan sebagai :

$$\text{Log } k_{\text{OH}} = 13,635 - \frac{2895}{T} \dots\dots\dots(2-15)$$

Dimana : T = Suhu (K)

(Danckwerts,1970)

## 2.6. Koefisien Perpindahan Massa.

Pada umumnya, koefisien perpindahan massa gas-liquid diukur dengan menjaga agar regime reaksi pada proses reaksi gas-liquid ini adalah regime reaksi lambat, namun reaksi yang terjadi cukup cepat sehingga sebagian besar gas yang terabsorpsi bereaksi. Regime reaksi lambat dapat diketahui dari kriteria pada persamaan (2-18) yang dapat diperoleh dari penjabaran persamaan-persamaan dibawah ini :

Kriteria reaksi lambat adalah reaksi yang terjadi pada lapisan film jauh lebih kecil daripada transfer massa yang terjadi dalam lapisan film. Hal ini ditunjukkan pada persamaan (2-16). Untuk reaksi lambat yang terjadi pada packed column berlaku persamaan sebagai berikut :

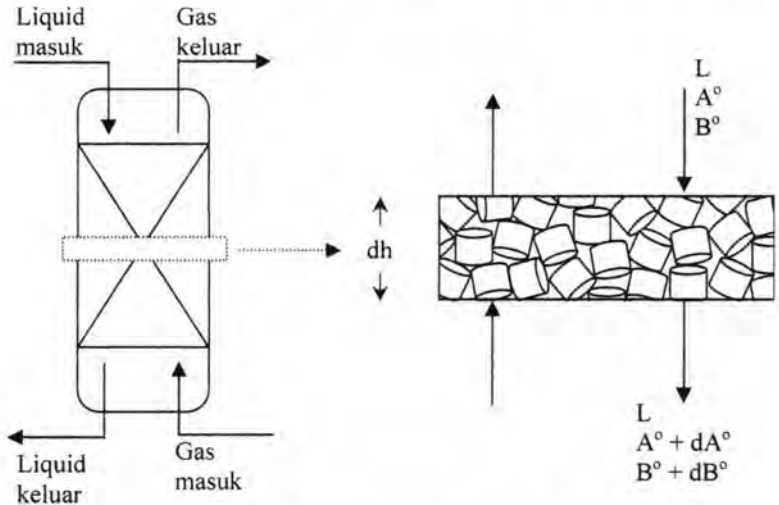
$$\frac{D_A}{k_L} \cdot k_2 \cdot A^* \cdot B^0 \ll K_L (A^* - A^0) \dots\dots\dots(2-16)$$

$$\frac{D_A \cdot k_2 \cdot B^0}{k_L^2} \ll 1 \dots\dots\dots(2-17)$$

$$M_H = \sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot B^0} / k_L \ll 1 \dots\dots\dots(2-18)$$

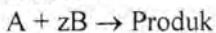
$$M_H \leq 0.5 \dots\dots\dots(2-19)$$

Untuk regime reaksi lambat, harga koefisien perpindahan massa  $k_L a$  ditentukan berdasarkan analisa neraca massa sebagai berikut :



Gambar 2.5. Neraca Massa Pada Proses Absorpsi di Packed Column

Reaksi :



Neraca Massa :

Akumulasi = Input – Output – bereaksi

Komponen A :

$$0 = LA^\circ + R.a.dh - L(A^\circ + dA^\circ) - r\{A^\circ, B^\circ\} l.dh \dots \dots \dots (2-20)$$

$$R.a.dh = LdA^\circ + r\{A^\circ, B^\circ\} l.dh \dots \dots \dots (2-21)$$

$$\bar{R}adh = k_L(A^* - A_e)a.dh = LdA_e + lr\{A^\circ, B^\circ\}dh \dots \dots \dots (2-22)$$

Komponen B :

$$0 = L.B^\circ - L(B^\circ + dB^\circ) - z.r\{A^\circ, B^\circ\} l.dh \dots \dots \dots (2-23)$$

$$LdB^0 = -z \cdot r \{A^0, B^0\} \cdot dh \dots \dots \dots (2-24)$$

$$-LdB^0 = zlr \{A^0, B^0\} dh \dots \dots \dots (2-25)$$

Dari persamaan 2-22 dan 2-25 diperoleh :

$$k_L (A^* - A_e) a dh = -\frac{L}{z} dB^0 \dots \dots \dots (2-26)$$

$$\int_0^H k_L a \cdot dh = \int_{B_m}^{B_{out}} -\frac{L}{z} \frac{dB^0}{A^* - A_e} \dots \dots \dots (2-27)$$

$$k_L a = \left(\frac{1}{H}\right) \left(-\frac{L}{Z}\right) \int_{B_m}^{B_{out}} \frac{dB^0}{A^* - A_e} \dots \dots \dots (2-28)$$

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mendapatkan korelasi koefisien perpindahan massa, antara lain korelasi Onda dari Danckwerts (1970) dan korelasi Mohunta, Schulman, dan Ramm dari Bischoff (1967) :

Persamaan Onda :

$$k_L \left(\frac{\rho}{\mu g}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,005 \left(\frac{L}{a\mu}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu}{\rho D_A}\right)^{-\frac{1}{2}} (a, d)^{0,4} \dots \dots \dots (2-29)$$

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left\{ -1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma}\right)^{0,75} \left(\frac{L}{a_t \mu}\right)^{0,1} \left(\frac{L^2 a_t}{\rho_G^2}\right)^{-0,05} \left(\frac{L^2}{\rho \sigma a_t}\right)^{0,2} \right\} \dots \dots \dots (2-30)$$

Persamaan Mohunta :

$$k_L a = 0,0025 \left(\frac{L^3 a_t^3 \mu_L}{g^2 \rho_L}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{AB}}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a_t \mu_L}{g \rho_L}\right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu_L}{g^2 \rho_L}\right)^{\frac{1}{9}} \dots \dots \dots (2-31)$$

Persamaan Schulman :

$$\frac{k_L d_p}{D_{AB}} = 25,1 \left( \frac{d_p \rho_L L}{\mu_L} \right)^{0,45} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_{AL}} \right)^{0,5} \dots\dots\dots(2-32)$$

Persamaan Ramm :

$$\frac{k_L d_p}{D_{AB}} = 0,02 \left( \frac{d_p \rho_L L}{\mu_L} \right)^{0,67} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_{AL}} \right)^{0,33} \left( \frac{g \rho_L^2 d_p^3}{\mu_L^2} \right)^{0,33} \left( \frac{Z}{d_p} \right)^{-0,33} \dots\dots\dots(2-33)$$



**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Peralatan.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dibagi menjadi :

#### 1. Alat Utama.

Alat utama dalam penelitian ini terdiri dari :

##### a. *Packed Column*

Peralatan utama dari percobaan ini adalah *packed column*. *Column* terbuat dari bahan fiberglass putih bening berbentuk pipa dengan ukuran :

- Diameter : 10 cm
- Panjang column : 2 m

##### b. *Sparger Gas*

Digunakan sebagai alat untuk mendistribusikan gas yang masuk ke dalam *packed column*

##### c. Distributor liquid

Digunakan sebagai alat untuk mendistribusikan liquid yang masuk ke dalam *packed column*

##### d. *Pompa*

Digunakan untuk mengalirkan air dari tangki penyimpanan  $K_2CO_3$  ke tangki overflow

##### e. *Packing Raschig Rings*

Digunakan untuk memperluas permukaan kontak gas-liquid

#### 2. Alat Bantu

Alat bantu yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

##### a. Tangki Penampung $K_2CO_3$

Digunakan untuk menampung air sebelum dialirkan ke tangki *overflow* dan tempat untuk melakukan *pre-treatment* air.

- b. Tangki *Overflow*  
Digunakan untuk menampung air sebelum masuk ke dalam packed column dan untuk menjaga agar rate air yang masuk ke dalam packed column konstan.
  - c. *Valve*  
Untuk mengatur laju alir liquida maupun gas
3. Alat Ukur
- Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :
- a. Orifice dan manometer  
Digunakan untuk mengukur besar laju aliran liquida dan gas yang masuk ke *packed column* dari  $\Delta h$  yang terlihat di manometer
  - b. Stopwatch  
Digunakan untuk mengukur waktu
  - c. Gelas ukur  
Digunakan untuk mengukur volume liquid
  - d. pH meter  
Digunakan untuk mengukur pH
  - e. Viscometer  
Digunakan untuk menghitung viscositas
  - f. Picnometer  
Digunakan untuk menghitung densitas
  - g. Timbangan elektrik  
Digunakan untuk menghukur berat

### 3.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Gas  $\text{CO}_2$
2. Larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$
3. Surfaktan (CMC)

### 3.3. Variabel Percobaan

Konsentrasi larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0,045 M dengan laju alir gas  $\text{CO}_2$  sebesar

299,065 cm<sup>3</sup>/s. Sedangkan variabel percobaan yang digunakan antara lain adalah :

1. Laju alir larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 50,675 cm<sup>3</sup>/s; 71,665 cm<sup>3</sup>/s; 87,771 cm<sup>3</sup>/s; 101,350 cm<sup>3</sup>/s; 113,312 cm<sup>3</sup>/s; 124,127 cm<sup>3</sup>/s; 134, 073 cm<sup>3</sup>/s dan 143,330 cm<sup>3</sup>/s.
2. Viskositas larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dengan cara menambahkan CMC 0%; 0,05%; 0,1%; 0,15% dan 0,2%

### 3.4. Prosedur Penelitian

#### 1. Kalibrasi Alat Ukur.

##### a. Kalibrasi Laju Alir Air

Kalibrasi laju alir air dilakukan dengan menggunakan gelas ukur, stopwatch, orifice, dan manometer raksa. Laju alir air diperoleh dengan cara membuka valve hingga manometer raksa menunjukkan  $\Delta h$  tertentu. Air yang keluar diukur volumenya dan dicatat waktunya.

##### b. Kalibrasi Laju Alir Gas CO<sub>2</sub>

Kalibrasi laju alir gas CO<sub>2</sub> dilakukan dengan menggunakan orifice, manometer KmnO<sub>4</sub>, stopwatch dan tabung kaca dengan ketinggian tertentu. Pada bagian bawah tabung kaca, terdapat karet yang berisi air sabun. Gas CO<sub>2</sub> dialirkan hingga manometer menunjukkan  $\Delta h$  tertentu, kemudian karet ditekan sehingga terbentuk gelembung sabun yang bergerak naik setinggi tabung kaca dan dicatat waktu yang diperlukan gelembung sabun dari bagian bawah hingga bagian atas tabung kaca. Volume gas CO<sub>2</sub> dapat dihitung dari luas penampung tabung dikalikan jarak yang ditempuh gelembung sabun di dalam tabung kaca.

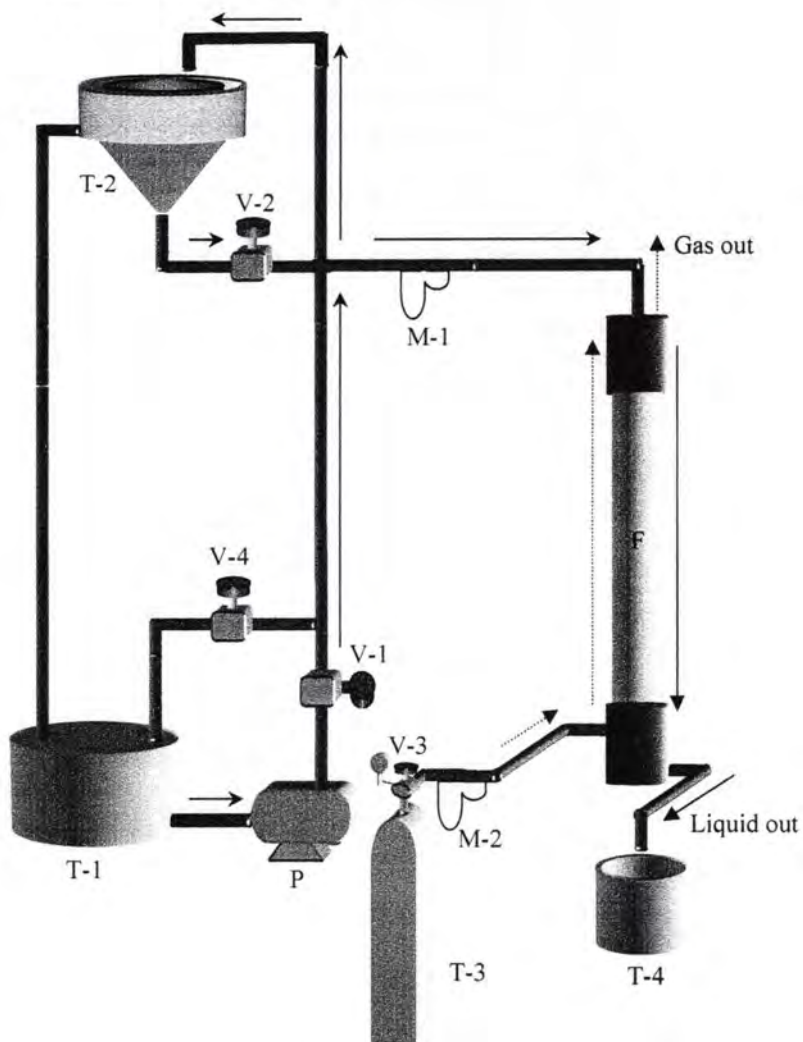
#### 2. Langkah Kerja

- a. Mengisi tangki penyimpanan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (T-1) dengan 40 L larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- b. Menghidupkan pompa air untuk mengisi T-2 hingga overflow, dan overflow diatur dengan V-1.



- c. Membuka dan mengatur valve V-2 sehingga larutan mengalir ke dalam kolom dengan laju alir yang dikehendaki.
- d. Membuka dan mengatur valve V-3 sehingga laju alir gas  $\text{CO}_2$  sesuai dengan yang dikehendaki.
- e. Menampung larutan yang keluar dalam kolom F ke dalam tangki penampung T-3 dan menjaga agar tidak mengalami kontak dengan udara.
- f. Menganalisa hasil yang telah ditampung dengan menggunakan pH meter.
- g. Mengulangi percobaan diatas untuk variabel yang lain dan dengan viscositas yang berbeda (dengan penambahan CMC).

### 3.5. Gambar Peralatan



Gambar 3.1. Gambar Alat Absorpsi

## Keterangan:

- T-1 : Tangki penyimpan larutan  $K_2CO_3$
- T-2 : Tangki overflow
- T-3 : Tabung gas  $CO_2$
- T-4 : Tangki penampung larutan produk
- V-1 : Valve aliran larutan dari tangki penyimpan  $K_2CO_3$  ke tangki overflow
- V-2 : Valve aliran  $K_2CO_3$  ke packed kolom
- V-3 : Valve aliran gas  $CO_2$
- V-4 : Valve by pass
- M-1 : Orifice liquid
- M-2 : Orifice gas
- P : Pompa
- F : Packed kolom
- : Aliran utama liquid
- .....→ : Aliran utama gas



**BAB IV**  
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

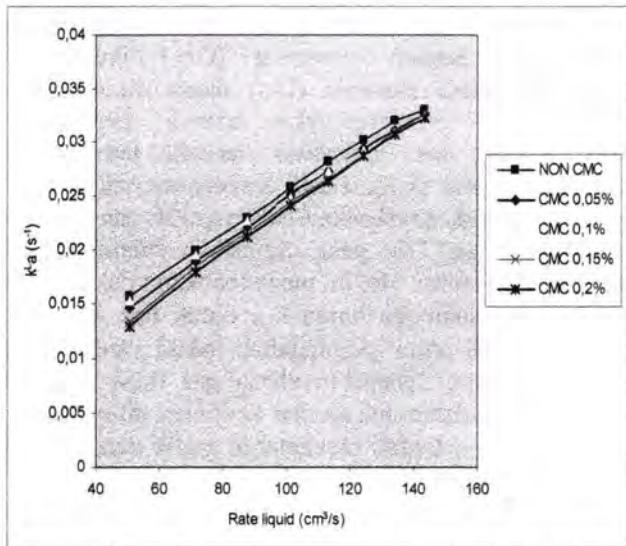
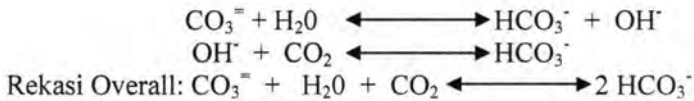
## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat diketahui konsentrasi  $[\text{OH}^-]$  yang terkandung dalam larutan kesetimbangan. Setelah konsentrasi  $[\text{OH}^-]$  diketahui, koefisien perpindahan massa absorpsi ( $k_L a$ ) dapat dihitung. Kemudian dibuat grafik yang menunjukkan adanya pengaruh laju alir larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  dan viskositas larutan terhadap koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ). Hasil eksperimen untuk laju alir gas  $\text{CO}_2$  tertentu tidak ditampilkan dalam grafik dan tabel dalam bab ini disebabkan gas  $\text{CO}_2$  yang digunakan dalam eksperimen ini adalah gas  $\text{CO}_2$  murni. Hal ini menyebabkan tidak adanya tahanan pada film gas, sehingga harga  $k_L a$  untuk tiap rate gas tertentu relatif sama, jadi untuk perpindahan massa yang dikontrol oleh difusi film cairan, kecepatan aliran gas tidak memengaruhi kecepatan perpindahan massa dan koefisien difusi film cairan,  $k_L$  (Lewis dan Whitman, 1924). Untuk mengetahui grafik dan tabel untuk rate gas tertentu dapat dilihat pada appendix C. Hasil analisa perhitungan untuk rate larutan tertentu dapat dilihat pada tabel 4.1.

### 4.1. Pengaruh Laju Larutan $\text{K}_2\text{CO}_3$ Dan Viskositas Terhadap Koefisien Perpindahan Massa ( $k_L a$ )

Hasil analisa perhitungan yang terlihat pada tabel IV.1 diatas menunjukkan penurunan harga  $k_L a$  pada kenaikan viskositas larutan seperti yang digambarkan dapat dilihat pada gambar 4.1.

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa rate larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  mempengaruhi koefisien perpindahan massa. Kenaikan rate larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  menyebabkan adanya kenaikan koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ). Hal ini disebabkan karena makin besar larutan yang masuk ke packed column, maka semakin banyak  $\text{CO}_2$  yang terlarut dalam larutan yang bereaksi dengan  $[\text{OH}^-]$  membentuk  $[\text{HCO}_3^-]$ , dengan reaksi sebagai berikut:



Gambar 4.1. Pengaruh  $k_{La}$  terhadap rate larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$

Semakin sedikit  $\text{CO}_2$  bebas dalam kondisi kesetimbangan menyebabkan pH larutan semakin basa dan harga  $k_{La}$  semakin besar, karena semakin besar  $\text{CO}_2$  yang bereaksi menyebabkan rate absorpsi semakin besar seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:

$$R = k_{La}(A^* - A_e)dh \dots\dots\dots(4.1)$$

Rate absorpsi pada persamaan diatas berbanding lurus dengan harga  $k_{La}$ , sehingga, bila rate absorpsi semakin besar hal itu dipengaruhi oleh  $k_{La}$  yang semakin besar. Karena laju absorpsi semakin besar nilai koefisien perpindahan massanya ( $k_L$ ) juga makin naik (M.Z Anabtawi dan Ghalib Ali Ibrahim, 1995 )



Tabel IV.1 Hasil Analisa Absorpsi Pada Rate Gas CO<sub>2</sub> 299.065 cm<sup>3</sup>/s

$\mu$ (gr/cms)	$V_{K_2CO_3}$ (cm <sup>3</sup> /s)	[OH] (gmole/L)	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>t</sub> (gmole/L)	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (gmole/L)	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub> (gmole/L)	k <sub>La</sub> (s <sup>-1</sup> )
0,00876	50,675	2,88.10 <sup>-07</sup>	0,00014	0,09007	0,00705	0,01563
	71,665	4,57.10 <sup>-07</sup>	0,00021	0,08992	0,00444	0,01981
	87,771	6,66.10 <sup>-07</sup>	0,00031	0,08972	0,00304	0,02296
	101,350	8,51.10 <sup>-07</sup>	0,00040	0,08955	0,00237	0,02582
	113,312	1,13.10 <sup>-06</sup>	0,00053	0,08929	0,00178	0,02818
	124,127	1,60.10 <sup>-06</sup>	0,00074	0,08886	0,00126	0,03016
	134,073	2,22.10 <sup>-06</sup>	0,00103	0,08829	0,00090	0,03197
	143,330	4,07.10 <sup>-06</sup>	0,00185	0,08665	0,00048	0,03307
0,00888	50,675	3,77.10 <sup>-07</sup>	0,00018	0,08999	0,00538	0,01456
	71,665	6,26.10 <sup>-07</sup>	0,00029	0,08976	0,00324	0,01889
	87,771	1,02.10 <sup>-06</sup>	0,00048	0,08939	0,00197	0,02200
	101,350	1,20.10 <sup>-06</sup>	0,00056	0,08922	0,00168	0,02509
	113,312	1,85.10 <sup>-06</sup>	0,00086	0,08863	0,00108	0,02730
	124,127	2,69.10 <sup>-06</sup>	0,00124	0,08787	0,00074	0,02929
	134,073	3,74.10 <sup>-06</sup>	0,00170	0,08694	0,00052	0,03108
	143,330	5,37.10 <sup>-06</sup>	0,00240	0,08554	0,00036	0,03251

Tabel IV.1 Lanjutan

$\mu$ (gr/cms)	$v_{K_2CO_3}$ ( $cm^3/s$ )	$[OH^-]$ (gmole/L)	$[CO_3^{2-}]_t$ (gmole/L)	$[HCO_3^-]$ (gmole/L)	$[CO_2]_e$ (gmole/L)	$k_L a$ ( $s^{-1}$ )
0,00901	50,675	$3,14 \cdot 10^{-07}$	0,00015	0,09005	0,00648	0,01525
	71,665	$5,05 \cdot 10^{-07}$	0,00024	0,08987	0,00402	0,01948
	87,771	$7,53 \cdot 10^{-07}$	0,00035	0,08964	0,00269	0,02264
	101,350	$1,32 \cdot 10^{-06}$	0,00061	0,08912	0,00153	0,02493
	113,312	$1,92 \cdot 10^{-06}$	0,00089	0,08857	0,00104	0,02724
	124,127	$2,73 \cdot 10^{-06}$	0,00126	0,08784	0,00073	0,02927
	134,073	$4,01 \cdot 10^{-06}$	0,00182	0,08671	0,00049	0,03096
	143,330	$5,25 \cdot 10^{-06}$	0,00235	0,08565	0,00037	0,03256
0.01046	50,675	$6,61 \cdot 10^{-07}$	0,00031	0,08973	0,00307	0,01327
	71,665	$7,70 \cdot 10^{-07}$	0,00036	0,08962	0,00263	0,01844
	87,771	$1,38 \cdot 10^{-06}$	0,00064	0,08906	0,00146	0,02152
	101,350	$1,83 \cdot 10^{-06}$	0,00085	0,08865	0,00109	0,02442
	113,312	$2,91 \cdot 10^{-06}$	0,00133	0,08768	0,00068	0,02663
	124,127	$3,80 \cdot 10^{-06}$	0,00173	0,08689	0,00052	0,02875
	134,073	$4,23 \cdot 10^{-06}$	0,00192	0,08652	0,00046	0,03086
	143,330	$6,41 \cdot 10^{-06}$	0,00284	0,08467	0,00030	0,03211



Tabel IV.1 Lanjutan

$\mu$ (gr/cms)	$V_{K_2CO_3}$ ( $cm^3/s$ )	[OH] (gmole/L)	$[CO_3^{2-}]_t$ (gmole/L)	$[HCO_3^-]_t$ (gmole/L)	$[CO_2]_e$ (gmole/L)	$k_{1a}$ ( $s^{-1}$ )
0,01096	50,675	$8,78 \cdot 10^{-07}$	0,00041	0,08952	0,00230	0,01287
	71,665	$1,12 \cdot 10^{-06}$	0,00052	0,08930	0,00180	0,01783
	87,771	$1,86 \cdot 10^{-06}$	0,00086	0,08862	0,00107	0,02113
	101,350	$2,40 \cdot 10^{-06}$	0,00111	0,08814	0,00083	0,02407
	113,312	$3,72 \cdot 10^{-06}$	0,00169	0,08697	0,00053	0,02628
	124,127	$4,07 \cdot 10^{-06}$	0,00185	0,08665	0,00048	0,02864
	134,073	$4,79 \cdot 10^{-06}$	0,00215	0,08604	0,00041	0,03063
	143,330	$6,07 \cdot 10^{-06}$	0,00270	0,08495	0,00032	0,03224

Kenaikan koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ) ini disebabkan karena yang mengontrol dalam proses absorpsi tersebut adalah larutan  $K_2CO_3$ , dan karena dalam experimen ini gas yang digunakan adalah gas  $CO_2$  murni maka tidak ada tahanan pada film gas.

Untuk meneliti tentang pengaruh viskositas larutan terhadap koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ), maka dalam experimen ini dibuat lima variabel viskositas larutan yang berbeda, yaitu : larutan tanpa ditambah CMC, larutan dengan penambahan CMC sebesar 0,05%, 0,1%, 0,15%, dan 0,2%. Variabel tersebut dipilih atas pertimbangan pada konsentrasi CMC < 0,25% merupakan fluida Newton sedangkan konsentrasi CMC > 0,25% merupakan fluida non Newton (Jadhav dan Pangarkar). Pada fluida Newton perpindahan massa lebih besar dibandingkan fluida non Newton. Kemudian, dari hasil penelitian yang didapat, dibuat grafik  $k_L$  terhadap berbagai larutan  $K_2CO_3$  seperti yang tampak pada gambar 4.1.

Dari gambar tersebut, dapat ditunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ) juga dipengaruhi oleh viskositas larutan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar viskositas larutan, maka semakin kecil harga koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ )-nya. Hal ini dikarenakan makin besarnya tahanan yang terjadi sehingga mempengaruhi koefisien perpindahan massanya (Onda et al 1968, Young seok kim and seung man yang 2000). Pengaruh viskositas larutan. Viskositas larutan tidak hanya berpengaruh terhadap difusifitas saja tetapi juga berpengaruh terhadap koefisien perpindahan massa. Semakin tinggi konsentrasi surfaktan (CMC) akan menaikkan viskositas larutan (Harriot, 1962; Levins dan Glastonbury, 1972).

#### 4.2. Korelasi Empiris

Data-data eksperimen di fit dengan model empiris :

$$N_{Sh} = k_1 N_{Re}^{k_2} N_{Sc}^{k_3}$$

Harga konstanta  $k_1, k_2, k_3$  diperoleh dengan cara Least Square menggunakan software excel dan diperoleh harga :

$$k_1 = 36,6201$$

$$k_2 = 0,7955$$

$$k_3 = 0,5089$$

Sehingga diperoleh persamaan empiris seperti tertulis pada persamaan (4.2).

$$\frac{k_L \cdot D}{D_{AB}} = 36,6201 \left[ \left( \frac{V_L \cdot \rho_L \cdot D}{\mu_L} \right)^{0,7955} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_{AB}} \right)^{0,5089} \right] \quad \dots(4.2)$$

Persamaan empiris yang diperoleh diatas menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa ( $k_L$ ) dipengaruhi oleh laju larutan yang masuk, viskositas, diameter kolom, diffusivitas, viskositas larutan dan massa jenis larutan. Dari persamaan empiris yang kita dapat bahwa koefisien perpindahan massa ( $k_L$ ) berbanding terbalik dengan viskositas. Hal ini sesuai dengan grafik yang telah ditampilkan diatas bahwa makin besar viskositasnya, maka nilai koefisien perpindahan massa ( $k_L a$ ) akan semakin kecil.

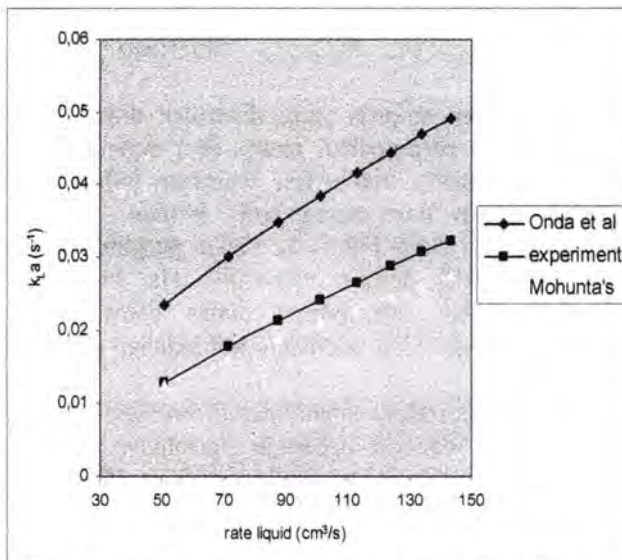
Disini juga akan dibandingkan korelasi yang dihasilkan dari experiment dengan beberapa persamaan untuk koefisien perpindahan massa pada sisi liquid. *Onda et al pada 1986* telah mengembangkan persamaan sebagai berikut:

$$k_L \left( \frac{\rho}{\mu g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.005 \left( \frac{L}{a \mu} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\mu}{\rho D_A} \right)^{-\frac{1}{2}} (a, d)^{0.4} \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

Selain *Onda, Mohunta* juga telah meneliti tentang koefisien perpindahan massa dan menghasilkan korelasi empiris untuk koefisien perpindahan massa sebagai berikut:

$$k_L a = 0.0025 \left( \frac{L^3 a_1 \mu_L}{g^2 \rho_L} \right)^{1/4} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_{AB}} \right)^{-0.5} \left( \frac{a, \mu_L}{g \rho_L} \right)^{-(2/3)} \left( \frac{\mu_L}{g^2 \rho_L} \right)^{-(1/9)} \quad \dots\dots\dots(4.4)$$


Kedua persamaan diatas berlaku untuk range sebagai berikut:  $\rho/L$ : 360 – 151.200 kg/m<sup>2</sup> jam;  $\mu_L$ : 2,62 – 5,33 kg/m jam;  $N_{Sc}$ : 142 – 1030;  $d_p$ : 0,006 – 0,05 m;  $D_{kolom}$ : 0,06 -0,5 m;  $D_{kolom}:D_{packing}$ : 5 – 40. Dari gambar 4.2 terlihat bahwa harga  $k_L a$  versi *Onda et al* dan *Mohunta* memiliki perbedaan harga yang cukup besar. Dari kedua persamaan diatas didapatkan harga  $k_L a$  yang bervariasi seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafik  $k_L a$  terhadap rate liquid untuk viskositas larutan  $8,88 \times 10^{-4}$  kg/ms (0,05% cmc).

Dari hasil perbandingan antara persamaan diperoleh dari eksperimen dari dengan persamaan *Onda et al (1986)* terdapat error dengan rata-rata 31% dari nilai yang didapat. Sedangkan dari persamaan *Mohunta's equation* error yang didapatkan rata-rata 29%. Adanya penyimpangan ini dikarenakan regime reaksi yang terjadi adalah regime reaksi lambat, sehingga ada batasan

yang harus dipenuhi agar didalam film tidak terjadi reaksi. Dalam kesetimbangan larutan hasil absorpsi juga masih terdapat  $\text{CO}_2$  bebas yang bersifat asam yang menyebabkan konsentrasi dari  $[\text{OH}^-]$  menjadi kecil. Kandungan  $\text{CO}_2$  bebas inilah yang menyebabkan harga  $k_{\text{L}}a$  menjadi kecil.



**BAB V**  
**KESIMPULAN DAN SARAN**

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian Absorpsi Gas  $\text{CO}_2$  Dalam Larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  di dalam Packed Column dengan menggunakan packing jenis Raschig Ring dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan naiknya rate larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$  maka akan naik pula  $k_{L,a}$ . Harga  $k_{L,a}$  yang diperoleh dari penelitian ini berkisar antara  $0,012873 - 0,033067 \text{ s}^{-1}$
2. Penambahan Surfaktan (CMC) akan menaikkan viskositas larutan. Hubungan antara viskositas larutan dengan  $k_{L,a}$  adalah berbanding terbalik. Makin besar viskositasnya maka makin kecil koefisien perpindahan massanya  $k_L$ .
3. Hasil persamaan empiris dari data yang diperoleh pada penelitian adalah sebagai berikut :

$$\frac{k_L \cdot D}{D_{AB}} = 36,6201 \left[ \left( \frac{V_G \cdot \rho \cdot D}{\mu} \right)^{0,7955} \left( \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \right)^{0,5089} \right]$$

Dengan rata-rata kesalahan 2,426 %

4. Nilai  $k_{L,a}$  yang didapatkan dari hasil penelitian memiliki deviasi rata-rata 31% bila dibandingkan dengan persamaan *onda et al 1968*. Sedangkan perbandingan dengan Mohunta's equation didapatkan deviasi sebesar 29%.

### 5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan kalibrasi pH meter dengan benar-benar teliti, karena besarnya pH larutan sangat mempengaruhi harga  $k_{L,a}$ . Selain itu disarankan memperhatikan pengaruh udara lingkungan karena ini akan sangat berpengaruh terhadap hasil yang akan diperoleh. Selain itu juga isolasi terhadap pengaruh dari luar agar diperhatiakn

sehingga hasil yang diperoleh bisa betul-betul sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan.





**DAFTAR NOTASI**

## DAFTAR NOTASI

A	:	Luas permukaan antar fase per satu satuan volume packing, $\text{cm}^{-1}$
$a_t$	:	Luas permukaan total packing per satuan volume packing, $\text{cm}^{-1}$
$A^*$	:	Konsentrasi gas terlarut A pada antar fase yang berkesetimbangan dengan gas pada antar fase, $\text{gmol}/\text{cm}^3$
$A^o$	:	Konsentrasi gas terlarut A didalam badan liquid, $\text{gmol}/\text{cm}^3$
$A_e$	:	Konsentrasi A berkesetimbangan di badan liquid, $\text{gmol}/\text{cm}^3$
$B^o$	:	Konsentrasi B didalam liquid, $\text{gmol}/\text{cm}^3$
D	:	Diameter kolom, cm
$D_A$	:	Koefisien difusi gas A, $\text{cm}^2/\text{s}$
$D_{AB}$	:	Koefisien difusi gas A kedalam B, $\text{cm}^2/\text{s}$
E	:	Enhancement factor
g	:	Percepatan gravitasi, $\text{cm}/\text{s}^2$
h	:	Tinggi packing, cm
H	:	Tinggi packed column, cm
$k_L$	:	Koefisien perpindahan massa film liquid, cm/s
$k_2$	:	Konstanta kecepatan reaksi orde dua dari pada A, $\text{cm}^3/\text{gmol} \cdot \text{s}$
L	:	Kecepatan superficial liquid, cm/s
l	:	Liquid hold-up, volume per unit volume ruang kosong packed
$M_H$	:	Bilangan Hatta
$N_{Re}$	:	Bilangan Reynold
$N_{Sc}$	:	Bilangan Schmidt
$N_{Sh}$	:	Bilangan Sherwood
R	:	Laju absorpsi per satuan luas sesudah waktu kontak t, $\text{gmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
$\bar{R}$	:	Laju absorpsi rata-rata dalam waktu kontak t atau laju absorpsi ke dalam liquid yang bergolak, $\text{gmol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

T	:	Temperatur, K
$V_L$	:	Kecepatan alir liquid, cm/s
z	:	Jumlah mol reaktan yang bereaksi dengan setiap mol A
$\mu$	:	Viskositas liquid, g/ (cm. s)
$\rho$	:	Densitas liquid, g/ cm <sup>3</sup>
$\sigma_e$	:	Tegangan permukaan, dyne/ cm

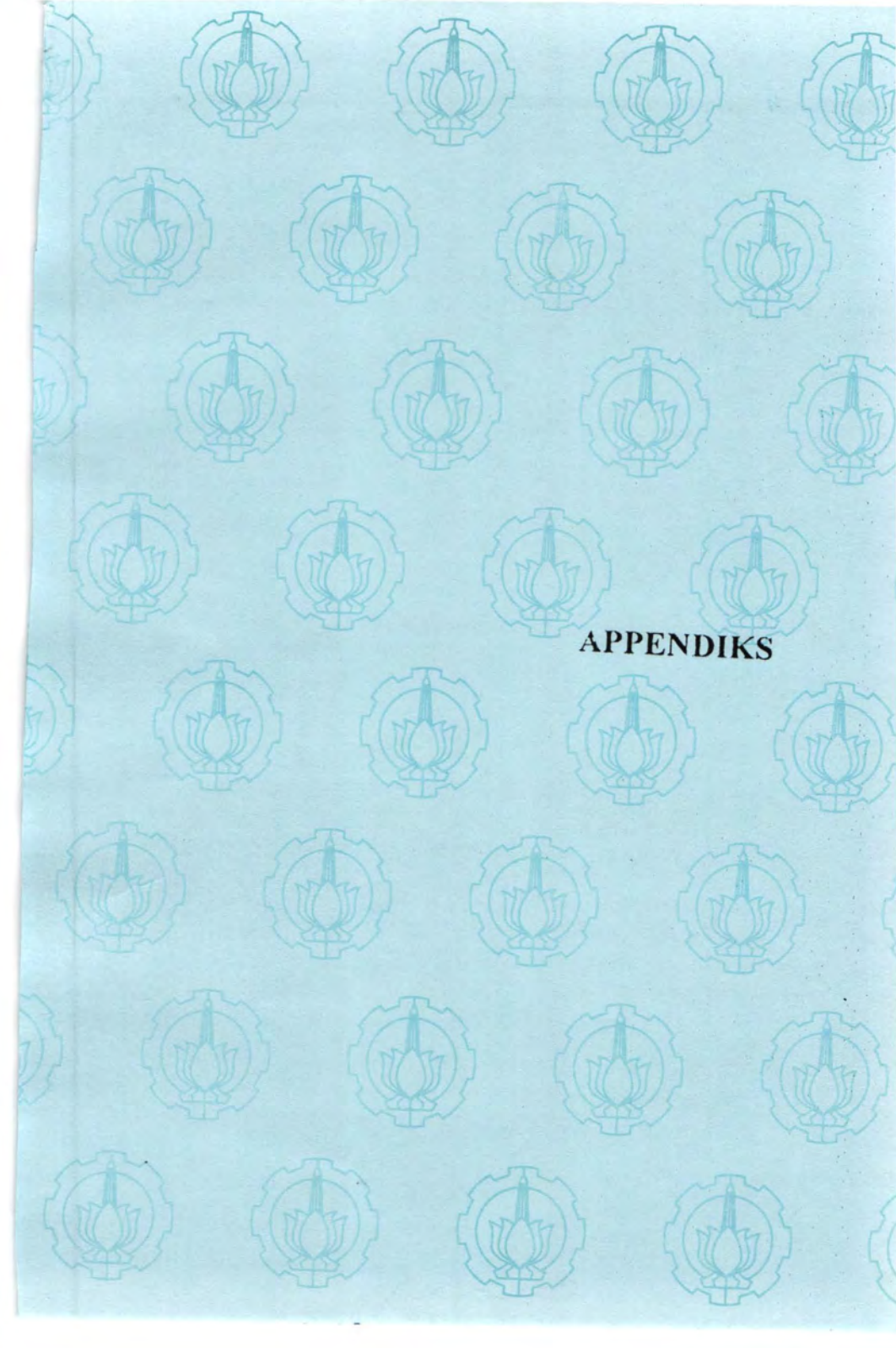


**DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR PUSTAKA

- Aroonwilas, A., Veawab A., dan Tontiwachwuthikul P., 1999. "Behavior of The Mass Transfer Coefficient of Structured packings in CO<sub>2</sub> Absorber with Chemical Reactions", **Industrial and Engineering Chemistry Research** 38, 5: 2044 – 2050.
- Astarita, G., 1963, "CO<sub>2</sub> Absorption in Alkaline with Packed Tower", **AIChE Journal** 24, 4: 484
- Danckwertz FRS, P.V. 1970. **Gas Liquid Reaction** New York : McGraw Hill Book Company
- Sanyal D., Vasishta N., dan Saraf, D. N., 1988. "Modeling of Carbon Dioxide Absorber Using Hot Carbonate Process", **Industrial and Engineering Chemistry Research** 27, 2 : 2149 - 2156
- Doan, H.D. dan Fayed, M. E., 2000. "Entrance Effect and Gas Film mass Transfer Coefficient in a Large Diameter Packed Column", **Industrial and Engineering Chemistry Research** 39, 4 : 1039 – 1047
- Ertanto, D. B., dan Nugroho, H., 2004. "Profil Konsentrasi Oksigen – Air Dalam Kolom Bersekat" **Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS**, Surabaya
- Froment and Bischoff. 1979. **Chemical Reactor Analysis and Design**, Canada : John Wiley & Sons Inc.
- Geankoplis, C.J. 1997. **Transport Process And Unit Operations**, 3<sup>rd</sup> edition, New Delhi : Prentice Hall of India.
- Hardi T.S., dan Pancasari R., 2006. "Absorpsi Gas CO<sub>2</sub> ke dalam Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> pada Packed Column dengan menggunakan packing Raschig Rings dari bahan Logam Aluminium", **Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS**, Surabaya
- Kirk and Othmer, D.F. 1959. **Encyclopedia of Chemical Technology**, 2<sup>nd</sup> edition, New York : John Wiley & Sons.
- Ludwig, E.E., 1995. **Applied Process Design for Chemical And Petrochemical Plants**, Texas : Gulf Publishing Company,

- McCabe, W.L., Smith, J.C., & Harriott, P. 1956 **Unit Operation of Chemical Engineering**, 4<sup>th</sup> edition, New York : McGraw Hill Book Company.
- Perry, J.H., 1999. **Perry's Chemical Engineering Handbook**, 7<sup>th</sup> ed., Tokyo : McGraw Hill Book Company.
- Treybal, Robert E. 1985. **Mass Transfer Operations**, 3<sup>rd</sup> edition, New York : McGraw Hill Book Company
- Rohmatin, S.U., dan Andrayani, I. C., 2002. "*Penentuan Koefisien Perpindahan Massa Total pada Proses Absorpsi Gas CO<sub>2</sub> Dengan Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Dalam Packed Column*", **Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS**, Surabaya
- Vazquez, G. 1999. "Enhancement of The Absorption of CO<sub>2</sub> in Alkaline Buffer Solutions : Joint Action of Two Enhancers" **Industrial and Engineering Chemistry Research**. 38, 5 : 2160 – 2162.



**APPENDIKS**

## APPENDIKS A

### A.1. Kalibrasi Laju Alir Gas CO<sub>2</sub>

Data :

Tinggi tabung kaca = 90 cm (pengukuran)

Diameter tabung kaca = 3.5 cm (pengukuran)

$$\begin{aligned} \text{Volume tabung kaca} &= \frac{1}{4} \pi D^2 t = \frac{1}{4} \pi (3,5)^2 (90) \\ &= 865,901 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Perhitungan :

Misal pada  $\Delta h$  manometer gas = 0.4 cm

$$t_{\text{rata}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} = \frac{14,90 + 14,72 + 14,71}{3} = 14,777 \text{ s}$$

$$\text{Laju alir CO}_2 = \frac{\text{Volume}}{\text{waktu}} = \frac{865,901}{14,777} = 58,599 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, diperoleh Tabel A.1.

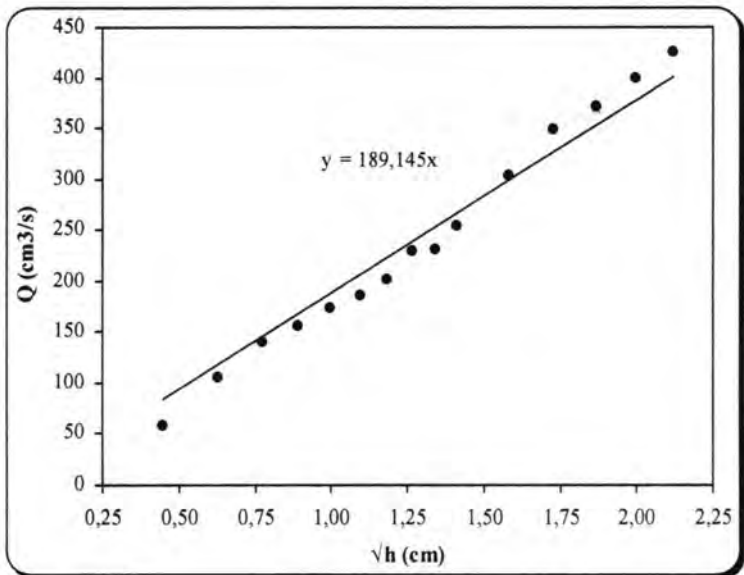
Tabel A.1. Data Kalibrasi Laju Alir CO<sub>2</sub>

$\Delta h$ (cm)	$\sqrt{\Delta h}$	t (s)				Rata-rata	$v_G$ (cm <sup>3</sup> /s)
		I	II	III			
0,2	0,447	14,90	14,72	14,71	14,777	58,599	
0,4	0,632	8,30	8,23	8,09	8,207	105,512	
0,6	0,775	6,24	6,16	6,16	6,187	139,963	
0,8	0,894	5,63	5,41	5,59	5,543	156,206	
1,0	1,000	5,05	5,01	4,95	5,003	173,065	
1,2	1,095	4,70	4,71	4,56	4,657	185,949	
1,4	1,183	4,28	4,20	4,39	4,290	201,842	
1,6	1,265	3,74	3,81	3,81	3,787	228,671	
1,8	1,342	3,68	3,81	3,74	3,743	231,318	
2,0	1,414	3,52	3,42	3,30	3,413	253,682	
2,5	1,581	2,82	2,86	2,89	2,857	303,116	
3,0	1,732	2,49	2,60	2,37	2,487	348,218	



Tabel A.1. Lanjutan

$\Delta h$ (cm)	$\sqrt{\Delta h}$	t (s)				Rata-rata	$v_G$ (cm <sup>3</sup> /s)
		I	II	III			
3,5	1,871	2,30	2,37	2,34	2,337	370,571	
4,0	2,000	2,16	2,15	2,20	2,170	399,033	
4,5	2,121	2,04	2,02	2,05	2,037	425,156	

Gambar A.1. Kalibrasi Laju Alir Gas CO<sub>2</sub>A.2. Kalibrasi Laju Alir Air

Data :

Volume = 1000 ml (pengukuran)

Perhitungan :

Misal pada  $\Delta h$  manometer liquid = 0,4 cm

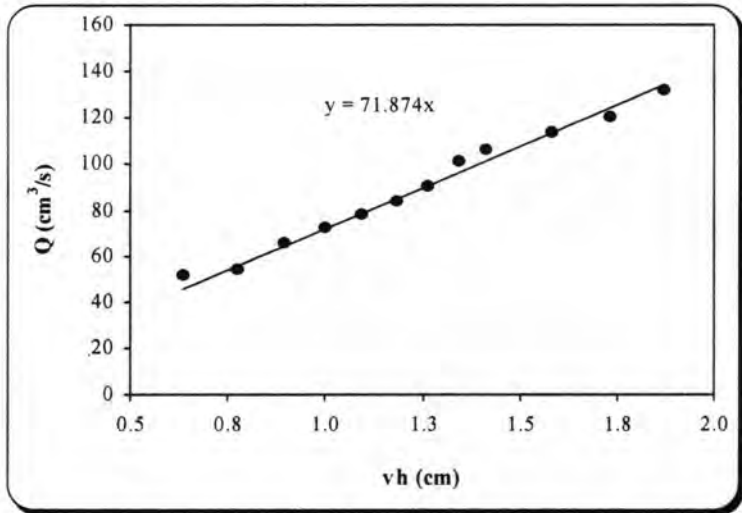
$$t_{rata} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} = \frac{19,42 + 19,36 + 19,30}{3} = 19,36s$$

$$\text{Laju alir air} = \frac{\text{Volume}}{\text{waktu}} = \frac{1000}{19,36} = 51,653 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, diperoleh Tabel A.2.

Tabel A.2. Data Kalibrasi Laju Alir Air

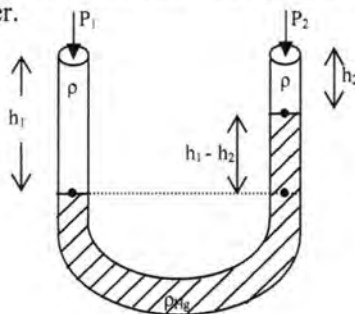
$\Delta h$ (cm)	$\sqrt{\Delta h}$	t (s)				Rata-rata	v ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
		I	II	III			
0,4	0,632	19,42	19,36	19,30	19,360	51,653	
0,6	0,775	18,74	18,53	18,58	18,617	53,715	
0,8	0,894	15,22	15,32	15,22	15,253	65,559	
1,0	1,000	13,96	13,83	13,86	13,883	72,029	
1,2	1,095	12,79	12,77	12,88	12,813	78,044	
1,4	1,183	11,93	11,86	12,04	11,943	83,729	
1,6	1,265	11,20	11,13	10,90	11,077	90,280	
1,8	1,342	9,95	9,78	9,94	9,890	101,112	
2,0	1,414	9,50	9,31	9,46	9,423	106,120	
2,5	1,581	8,74	8,86	8,84	8,813	113,464	
3,0	1,732	8,25	8,41	8,27	8,310	120,337	
3,5	1,871	7,51	7,76	7,56	7,610	131,406	



Gambar A.2. Kalibrasi Laju Alir Air

### A.3. Kalibrasi Laju Alir Larutan $K_2CO_3$

Kalibrasi laju alir  $K_2CO_3$  diperoleh dari data-data kalibrasi air yang telah dikoreksi dengan persamaan kecepatan untuk orificemeter.



Gambar A.3. Manometer

Persamaan manometer :

$$P_1 + h_1 \rho g = P_2 + h_2 \rho g + (h_1 - h_2) \rho_{Hg} g$$

$$P_1 - P_2 = h_2 \rho g - h_1 \rho g + \Delta h \rho_{Hg} g$$

$$\Delta P = (h_2 - h_1) \rho g + \Delta h \rho_{Hg} g$$

$$\Delta P = -(h_1 - h_2) \rho g + \Delta h \rho_{Hg} g$$

$$\Delta P = -\Delta h \rho g + \Delta h \rho_{Hg} g$$

$$\Delta P = \Delta h g (\rho_{Hg} - \rho)$$

Persamaan orificemeter :

$$V_o = \frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$V_o = \frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta h g (\rho_{Hg} - \rho)}{\rho}}$$

$$V_o = \frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{2\Delta h g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho} - 1\right)}$$

$$V_o = \frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho} - 1\right)} \sqrt{\Delta h}$$

Dimana untuk liquid air :

$$C_{air} = \frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho} - 1\right)}$$

Jadi diperoleh persamaan garis lurus :

$$V_{O(air)} = C_{air} \sqrt{\Delta h}$$

Dari data kalibrasi air diperoleh persamaan :

$$y = 71,874 x$$

Jadi  $C_{air} = 71,874$

Untuk liquid  $K_2CO_3$  :

$$V_{O(K_2CO_3)} = C_{K_2CO_3} \sqrt{\Delta h}$$

$$\frac{C_{K_2CO_3}}{C_{air}} = \frac{\frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{K_2CO_3}} - 1\right)}}{\frac{C_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_o}{D_i}\right)^2}} \sqrt{2g \left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho} - 1\right)}}$$

$$\frac{C_{K_2CO_3}}{C_{air}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho_{K_2CO_3}} - 1\right)}{\left(\frac{\rho_{Hg}}{\rho} - 1\right)}}$$

$$\rho_{Hg} (30^\circ C) = 13521,36 \text{ kg/m}^3 = 13,52136 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{air} (30^\circ C) = 996,647 \text{ kg/m}^3 = 0,996647 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{K_2CO_3} (30^\circ C) = 1,00203 \text{ g/cm}^3$$

$$\frac{C_{K_2CO_3}}{71,874} = \frac{\sqrt{\left(\frac{13,52136}{1,00203} - 1\right)}}{\sqrt{\left(\frac{13,52136}{0,996647} - 1\right)}}$$

$$C_{K_2CO_3} = 71,665$$

Jadi diperoleh persamaan untuk laju alir  $K_2CO_3$  :  $y = 71,665 x$

Misal pada  $\Delta h$  manometer liquid = 0,4 cm

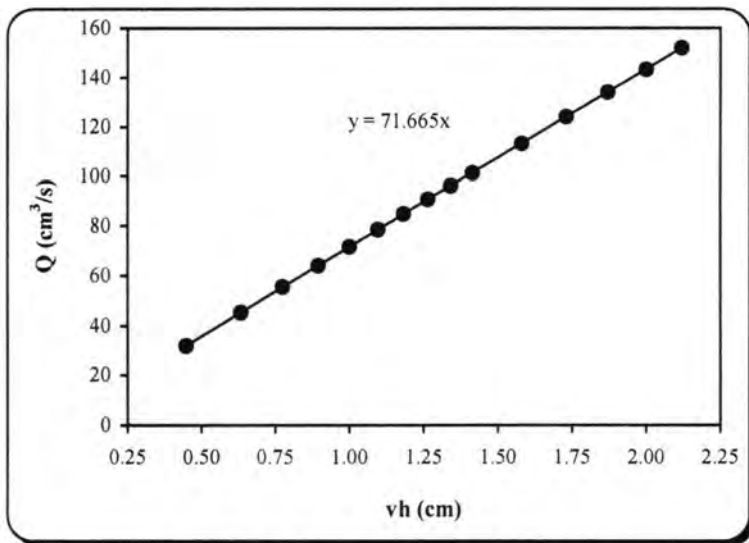
$$v = 71,665 (0,632) = 45,325 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Tabel A.3. Data Kalibrasi Laju Alir  $K_2CO_3$

$\Delta h$ (cm)	$\sqrt{\Delta h}$	V ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
0,4	0,632	45,325
0,6	0,775	55,511

Tabel A.3. Lanjutan

$\Delta h$ (cm)	$\sqrt{\Delta h}$	V (cm <sup>3</sup> /s)
0,8	0,894	64,099
1,0	1,000	71,665
1,2	1,095	78,505
1,4	1,183	84,795
1,6	1,265	90,650
1,8	1,342	96,149
2,0	1,414	101,350
2,5	1,581	113,312
3,0	1,732	124,127
3,5	1,871	134,073

Gambar A.4. Kalibrasi Laju Alir K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

## APPENDIKS B

### B.1. Perhitungan Densitas Larutan.

Data :

T = 27°C (pengukuran)

$\rho_{\text{air}} = 0,9965 \text{ gr/ cm}^3$  (Geankoplis, 1997)

Tabel B.1. Data Untuk Perhitungan Densitas

Variabel	W (gr)			
	I	II	III	rata-rata
Pikno kosong	16,886	16,886	16,886	16,886
Pikno+air	27,037	27,037	27,037	27,037
Pikno+larutan $K_2CO_3$	27,094	27,095	27,094	27,094
Pikno+larutan $K_2CO_3$ (0.05% CMC)	27,095	27,094	27,096	27,095
Pikno+larutan $K_2CO_3$ (0.1% CMC)	27,096	27,096	27,097	27,096
Pikno+larutan $K_2CO_3$ (0.15% CMC)	27,099	27,101	27,100	27,100
Pikno+larutan $K_2CO_3$ (0.2% CMC)	27,101	27,104	27,107	27,104

Perhitungan

$$W_{\text{air}} = W_{\text{picnometer+air}} - W_{\text{picnometer kosong}}$$

$$W_{\text{air}} = 27,037 - 16,886 = 10,151 \text{ gr}$$

$$V_{\text{air}} = V_{\text{picnometer}} = \frac{W_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{10,151}{0,9965} = 10,187 \text{ ml}$$

$$W_{\text{laru tan } K_2CO_3} = W_{\text{picnometer+laru tan } K_2CO_3} - W_{\text{picnometerkosong}}$$

$$W_{\text{laru tan } K_2CO_3} = 27,094 - 16,886 = 10,209 \text{ gr}$$

$$\rho_{\text{laru tan } K_2CO_3} = \frac{W_{\text{laru tan } K_2CO_3}}{V_{\text{laru tan } K_2CO_3}} = \frac{10,209}{10,187} = 1,002 \text{ gr/ cm}^3$$

Dengan cara perhitungan yang sama, diperoleh :

$$\rho_{\text{larutan } K_2CO_3 + 0.05\% CMC} = 1,0023 \text{ gr/ cm}^3$$

$$\rho_{\text{larutan } K_2CO_3 + 0.1\% CMC} = 1,0025 \text{ gr/ cm}^3$$

$$\rho_{\text{larutan } K_2CO_3 + 0.15\% CMC} = 1,0030 \text{ gr/ cm}^3$$

$$\rho_{\text{larutan } K_2CO_3 + 0.2\% CMC} = 1,0031 \text{ gr/ cm}^3$$

### B.2. Perhitungan Viskositas Larutan.

Data :

T = 27°C (pengukuran)

$\mu_{\text{air}} = 8,549 \times 10^{-3} \text{ g/ cm. s}$  (Geankoplis, 1997)

$\rho_{\text{air}} = 0,9965 \text{ gr/ cm}^3$  (Geankoplis, 1997)

$\rho_{K_2CO_3} = 1,002 \text{ gr/ cm}^3$  (perhitungan B.1.)

Tabel B.2. Data Untuk Perhitungan Viskositas

Variabel	t (s)			
	I	II	III	rata-rata
Air	15,20	15,18	15,17	15,183
Larutan $K_2CO_3$	15,52	15,49	15,42	15,477
Larutan $K_2CO_3$ (0.05% CMC)	15,75	15,68	15,66	15,695
Larutan $K_2CO_3$ (0.1% CMC)	15,97	15,87	15,90	15,913
Larutan $K_2CO_3$ (0.15% CMC)	17,71	17,70	17,49	17,630
Larutan $K_2CO_3$ (0.2% CMC)	19,45	19,52	19,07	19,347

$$\mu_{\text{larutan } K_2CO_3} = \frac{\mu_{\text{air}} \times \rho_{\text{larutan } K_2CO_3} \times t_{\text{larutan } K_2CO_3}}{\rho_{\text{air}} \times t_{\text{air}}}$$

$$\mu_{\text{larutan } K_2CO_3} = \frac{(8,549 \times 10^{-3})(1,002)(15,477)}{(0,9965)(15,183)} = 8,763 \times 10^{-3} \text{ g/ cm.s}$$

Dengan cara perhitungan yang sama, diperoleh :

$$\mu_{\text{larutan } K_2CO_3 + 0.05\% CMC} = 8,881 \times 10^{-3} \text{ g/ cm. s}$$



$$\mu_{\text{laru tan } K_2CO_3+0.1\%CMC} = 9,012 \times 10^{-3} \text{ g/ cm. s}$$

$$\mu_{\text{laru tan } K_2CO_3+0.15\%CMC} = 10,460 \times 10^{-3} \text{ g/ cm. s}$$

$$\mu_{\text{laru tan } K_2CO_3+0.2\%CMC} = 10,964 \times 10^{-3} \text{ g/ cm. s}$$

### B.3. Perhitungan B<sup>o</sup>

Data :

$$OD_{\text{column}} = 10 \text{ cm (pengukuran)}$$

$$ID_{\text{column}} = 9 \text{ cm (pengukuran)}$$

$$v = 134,073 \text{ cm}^3/\text{s (perhitungan A.3.)}$$

$$a_t = 4,2 \text{ cm}^{-1} \text{ (Dankwertz, 1970)}$$

$$\frac{\delta_c}{\delta} = 0,85 \text{ (Dankwertz, 1970)}$$

$$\mu = 8,763 \times 10^{-3} \text{ kg/ m.s (perhitungan B.2.)}$$

$$\rho = 1,002 \text{ gr/ cm}^3 \text{ (perhitungan B.1.)}$$

$$\delta = 2,442 \text{ gr/ s}^2 \text{ (Perry, 1999)}$$

$$D_A = 1,65 \times 10^{-5} \text{ (Perry, 1999)}$$

$$g = 980,665 \text{ cm/ s}^2 \text{ (Geankoplis, 1997)}$$

$$d = 1 \text{ cm (pengukuran)}$$

Perhitungan :

$$A_{\text{column}} = \frac{1}{4} \pi ID_{\text{column}}^2 = \frac{1}{4} \pi (9)^2 = 63,617 \text{ cm}^2$$

$$L = \frac{v}{A_{\text{column}}} = \frac{134,073}{63,617} = 2,107 \text{ cm/s}$$

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left\{ -1,45 \left( \frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0,75} \left( \frac{L}{a_t \mu} \right)^{0,1} \left( \frac{L^2 a_t}{\rho^2 g} \right)^{-0,05} \left( \frac{L^2}{\rho \sigma a_t} \right)^{0,2} \right\}$$

$$\frac{a}{4,2} = 1 - \exp \left\{ -1,45 (0,85)^{0,75} \left( \frac{2,107}{4,2 \times 8,763 \times 10^{-3}} \right)^{0,1} \left( \frac{2,107^2 \times 4,2}{(1,002)^2 (980,665)} \right)^{-0,05} \left( \frac{2,107^2}{1,002 \times 2,442 \times 4,2} \right)^{0,2} \right\}$$

$$a = 1,004 \text{ cm}^{-1}$$

$$k_L \left( \frac{\rho}{\mu \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,005 \left( \frac{L}{a\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\mu}{\rho D_A} \right)^{-\frac{1}{2}} (a, d)^{0,4}$$

$$k_L \left( \frac{1,002}{(8,763 \times 10^{-3})(980,665)} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,005 \left( \frac{2,017}{(1,004)(8,763 \times 10^{-3})} \right)^{\frac{2}{3}} \times \left( \frac{8,763 \times 10^{-3}}{(1,002)(1,65 \times 10^{-5})} \right)^{-\frac{1}{2}} (4,2 \times 1)^{0,4}$$

$$k_L = 3,045 \times 10^{-2}$$

$$\log k_2 = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (\text{Danckwertz, 1970})$$

$$\text{Pada } T = 27^\circ\text{C} = 300,15 \text{ K}$$

$$\log k_2 = 13,635 - \frac{2895}{300,15}$$

$$k_2 = 9768,381$$

$$M_H = \frac{D_A \cdot k_2 B^0}{k_L^2} \ll 1$$

$$M_H = \frac{D_A \cdot k_2 B^0}{k_L^2} \leq 0,5$$

$$\frac{D_A \cdot k_2 B^0}{k_L^2} \leq 0,5$$

$$\frac{(1,65 \times 10^{-5})(9768,381)B^0}{(3,046 \times 10^{-2})^2} \leq 0,5$$

$$B^0 = 2,878 \times 10^{-3} \text{ M}$$

#### B.4. Perhitungan Penambahan CMC

Perhitungan berat CMC yang ditambahkan (0.05%) :

$$W_{\text{laru tan } K_2CO_3 + 0.05\% \text{ CMC}} = (\rho_{\text{laru tan } K_2CO_3 + 0.05\% \text{ CMC}})(V_{\text{laru tan } K_2CO_3 + 0.05\% \text{ CMC}})$$

$$W_{\text{laru tan } K_2CO_3 + 0.05\% \text{ CMC}} = 1,0022 \times 40000 = 40086,5 \text{ gram}$$

$$\text{Penambahan CMC } 0,05 \% = \frac{0,1}{100} \times 40086,5 = 20,043 \text{ gr}$$

Dengan cara yang sama diperoleh :

$$\text{Penambahan CMC } 0,1 \% = 40,087 \text{ gr}$$

$$\text{Penambahan CMC } 0,15 \% = 60,129 \text{ gr}$$

$$\text{Penambahan CMC } 0,2 \% = 80,174 \text{ gr}$$

### B.5. Perhitungan $K_1$ dan $K_2$ Pada Suhu $30^\circ\text{C}$

Dari Dackwertz, 1970 hlm 194 dan 242 diperoleh data :

$$\text{Pada suhu } 20^\circ\text{C} : K_1 = 4,16 \times 10^{-7} \text{ dan } K_2 = 4,2 \times 10^{-11}$$

$$\text{Pada suhu } 60^\circ\text{C} : K_1 = 4,9 \times 10^{-7} \text{ dan } K_2 = 7,4 \times 10^{-11}$$

$T = 27^\circ\text{C}$  (pengukuran)

$$R = 1,987 \text{ (Geankoplis, 1997)}$$

$$\ln \left( \frac{K_{1,T}}{K_{1,T_0}} \right) = \frac{\Delta H_{RX1}}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\ln \left( \frac{4,9 \times 10^{-7}}{4,16 \times 10^{-7}} \right) = \frac{\Delta H_{RX1}}{1,987} \left( \frac{1}{20} - \frac{1}{60} \right)$$

$$\Delta H_{RX1} = 9,759$$

$$\ln \left( \frac{K_{1,T}}{K_{1,T_0}} \right) = \frac{\Delta H_{RX1}}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\ln \left( \frac{4,9 \times 10^{-7}}{K_{1,T_0}} \right) = \frac{9,759}{1,987} \left( \frac{1}{27} - \frac{1}{60} \right)$$

$$K_1 (27^\circ\text{C}) = 4,433 \times 10^{-7}$$

$$\ln \left( \frac{K_{2,T}}{K_{2,T_0}} \right) = \frac{\Delta H_{RX2}}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\ln \left( \frac{7,4 \times 10^{-11}}{4,2 \times 10^{-11}} \right) = \frac{\Delta H_{RX2}}{1,987} \left( \frac{1}{20} - \frac{1}{60} \right)$$

$$\Delta H_{RX} = 33,763$$

$$\ln \left( \frac{K_{2,T}}{K_{2,T_0}} \right) = \frac{\Delta H_{RX2}}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

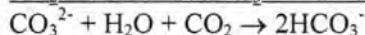
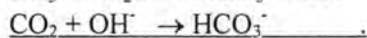
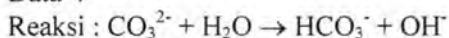
$$\ln \left( \frac{7,4 \times 10^{-11}}{K_{2,T_0}} \right) = \frac{33,763}{1,987} \left( \frac{1}{27} - \frac{1}{60} \right)$$

$$K_2 (27^\circ\text{C}) = 5,235 \times 10^{-11}$$

## APPENDIKS C

### C.1. Perhitungan Sampel Awal.

Data :



$V_{\text{sampel}} = 15 \text{ ml}$  (pengukuran)

$M_{\text{HCl}} = 0,045 \text{ M}$

Tabel C.1. Data Sampel

run	I	II	III	rata2
pH sampel	11,03	11,05	11,05	11,04
Titration HCl 0.044 M	15,4	15,5	15,3	15,40

Perhitungan :

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH} = 14 - 11,04 = 2,96$$

$$N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} = [\text{OH}^-] \times V_{\text{sampel}}$$

$$0,044 \times 1 \times 28,43 = [\text{OH}^-] \times 15$$

$$[\text{OH}^-] = 0,0417 \text{ M}$$

$$[\text{OH}^-] \approx [\text{CO}_3^{2-}]_0 = 0,04517 \text{ M}$$

### C.2. Perhitungan Sampel Setelah Melewati Packed Column.

Data :

$$K_1 = 4,433 \times 10^{-7} \text{ (perhitungan B.5.)}$$

$$K_2 = 5,235 \times 10^{-11} \text{ (perhitungan B.5.)}$$

$$K_w = 10^{-14} \text{ (Danckwertz, 1970)}$$

$$Z = 1$$

$$H_i = 100 \text{ (pengukuran)}$$

$$H_o = 0 \text{ (pengukuran)}$$

$$A^* = 0,03 \text{ (Danckwertz, 1970)}$$

$$\text{Persamaan kalibrasi } \text{CO}_2 : y = 189,145 x \text{ (perhitungan A.1.)}$$

$$\text{Persamaan kalibrasi } \text{K}_2\text{CO}_3 : y = 71,665 x \text{ (perhitungan A.3.)}$$

Perhitungan :

Misal untuk  $\Delta h \text{ CO}_2 = 2,5 \text{ cm}$  dan  $\Delta h \text{ K}_2\text{CO}_3$  tanpa CMC = 0,5 cm

$$v_{\text{CO}_2} = 189,145 \times \sqrt{2,5} = 299,065 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$v_{\text{K}_2\text{CO}_3} = 71,665 \times \sqrt{0,5} = 50,675 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Tabel C.2. Data Sampel setelah keluar packed column

run	I	II	III	rata2
pH sampel	7,48	7,45	7,45	7,46

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH} = 14 - 7,46 = 6,54$$

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$$

$$6,54 = -\log [\text{OH}^-]$$

$$[\text{OH}^-] = 2,884 \times 10^{-7}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}]_t = \frac{\frac{K_2}{K_w} [\text{OH}^-] [\text{CO}_3^{2-}]_0}{0,5 + \frac{K_2}{K_w} [\text{OH}^-]} \quad (\text{Danckwertz, 1970})$$

$$[\text{CO}_3^{2-}]_t = \frac{5,235 \times 10^{-11} (2,884 \times 10^{-7}) (0,04517)}{0,5 + \frac{5,235 \times 10^{-11}}{10^{-14}} (2,884 \times 10^{-7})} = 1,36 \times 10^{-4}$$

$$\Delta[\text{CO}_3^{2-}] = [\text{CO}_3^{2-}]_0 - [\text{CO}_3^{2-}]_t$$

$$\Delta[\text{CO}_3^{2-}] = 0,04517 - 1,36 \times 10^{-4} = 4,504 \times 10^{-2}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 2 \times \Delta[\text{CO}_3^{2-}]$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 2 \times (4,504 \times 10^{-2}) = 9,007 \times 10^{-2}$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_2 [\text{HCO}_3^-]^2}{K_1 \Delta[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (\text{Danckwertz, 1970})$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{(5,235 \times 10^{-11}) (9,007 \times 10^{-2})^2}{(4,433 \times 10^{-7}) (4,504 \times 10^{-2})} = 7,045 \times 10^{-3}$$

$$L = \frac{v}{A_{\text{column}}} = \frac{50,675}{63,617} = 0,7966$$

$$k_L a = \frac{\Delta[CO_3^{2-}]xL}{Zx(H_t - H_o)x(A^* - A_e)} \quad (\text{Danckwertz, 1970})$$

Dimana :

$$A_e \lll A^*$$

$$k_L a = \frac{4,504 \times 10^{-2} \times 0,7966}{1 \times (100 - 0) \times (0,03)} = 1,196 \times 10^{-2}$$



Tabel C.3 Perhitungan  $k_{La}$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  non CMC

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Q CO <sub>2</sub>	Q K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	pH				[OH]
				I	II	III	Rata2	
2,5	0,5	299,065	50,675	7,48	7,45	7,45	7,460	$2,884 \times 10^{-7}$
	1,0		71,665	7,63	7,67	7,68	7,660	$4,571 \times 10^{-7}$
	1,5		87,771	7,83	7,82	7,82	7,823	$6,658 \times 10^{-7}$
	2,0		101,350	7,94	7,94	7,91	7,930	$8,511 \times 10^{-7}$
	2,5		113,312	8,05	8,04	8,07	8,053	$1,131 \times 10^{-6}$
	3,0		124,127	8,23	8,20	8,18	8,203	$1,597 \times 10^{-6}$
	3,5		134,073	8,34	8,35	8,35	8,347	$2,222 \times 10^{-6}$
	4,0		143,330	8,61	8,62	8,60	8,610	$4,074 \times 10^{-6}$

Tabel C.3 Lanjutan

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>t</sub>	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub>	L	$k_{La}$	Cek A <sub>e</sub> ε
2,5	0,5	0,000136	0,090075	$7,045 \times 10^{-3}$	0,797	$1,196 \times 10^{-2}$	0,0521
	1,0	0,000215	0,089917	$4,441 \times 10^{-3}$	1,126	$1,981 \times 10^{-2}$	0,0209
	1,5	0,000312	0,089722	$3,042 \times 10^{-3}$	1,380	$2,296 \times 10^{-2}$	0,0099
	2,0	0,000399	0,089549	$2,375 \times 10^{-3}$	1,593	$2,582 \times 10^{-2}$	0,0061
	2,5	0,000528	0,089291	$1,783 \times 10^{-3}$	1,781	$2,818 \times 10^{-2}$	0,0035
	3,0	0,000742	0,088862	$1,256 \times 10^{-3}$	1,951	$3,016 \times 10^{-2}$	0,0017
	3,5	0,001026	0,088295	$8,972 \times 10^{-3}$	2,107	$3,197 \times 10^{-2}$	0,0009
	4,0	0,001846	0,086654	$4,802 \times 10^{-3}$	2,253	$3,307 \times 10^{-2}$	0,0003



Tabel C.4. Perhitungan  $k_{1a}$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  0,05%CMC

$\Delta h$ $CO_2$	$\Delta h$ $K_2CO_3$	Q $CO_2$	Q $K_2CO_3$	pH				[OH <sup>-</sup> ]
				I	II	III	Rata2	
2,5	0,5	299,065	50,675	7,59	7,57	7,57	7,577	$3,77 \times 10^{-7}$
	1,0		71,665	7,80	7,80	7,79	7,797	$6,26 \times 10^{-7}$
	1,5		87,771	8,01	8,00	8,02	8,010	$1,02 \times 10^{-6}$
	2,0		101,350	8,07	8,07	8,10	8,080	$1,20 \times 10^{-6}$
	2,5		113,312	8,29	8,27	8,24	8,267	$1,85 \times 10^{-6}$
	3,0		124,127	8,42	8,44	8,43	8,430	$2,69 \times 10^{-6}$
	3,5		134,073	8,58	8,57	8,57	8,573	$3,74 \times 10^{-6}$
	4,0		143,330	8,72	8,73	8,74	8,730	$5,37 \times 10^{-6}$

Tabel C.4 Lanjutan

$\Delta h$ $CO_2$	$\Delta h$ $K_2CO_3$	$[CO_3^{2-}]_i$	$[HCO_3^-]$	$[CO_2]_e$	L	$k_{1a}$	Cek $A_e \epsilon$
2,5	0,5	0,000178	0,089992	$5,384 \times 10^{-3}$	0,797	1,456E-02	0,0306
	1,0	0,000294	0,089759	$3,236 \times 10^{-3}$	1,126	1,889E-02	0,0112
	1,5	0,000478	0,089390	$1,972 \times 10^{-3}$	1,380	2,200E-02	0,0042
	2,0	0,000561	0,089225	$1,675 \times 10^{-3}$	1,593	2,509E-02	0,0031
	2,5	0,000857	0,088634	$1,083 \times 10^{-3}$	1,781	2,730E-02	0,0013
	3,0	0,001237	0,087873	$7,370 \times 10^{-4}$	1,951	2,929E-02	0,0006
	3,5	0,001702	0,086942	$5,242 \times 10^{-4}$	2,107	3,108E-02	0,0003
	4,0	0,002403	0,085541	$3,596 \times 10^{-4}$	2,253	3,251E-02	0,0002

Tabel C.5. Perhitungan  $k_1 a$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  0,1%CMC

$\Delta h$ $CO_2$	$\Delta h$ $K_2CO_3$	Q $CO_2$	Q $K_2CO_3$	pH				[OH]
				I	II	III	Rata2	
2,5	0,5	299,065	50,675	7,49	7,50	7,50	7,497	$3,138 \times 10^{-7}$
	1,0		71,665	7,70	7,72	7,69	7,703	$5,050 \times 10^{-7}$
	1,5		87,771	7,87	7,88	7,88	7,877	$7,528 \times 10^{-7}$
	2,0		101,350	8,07	8,13	8,16	8,120	$1,318 \times 10^{-6}$
	2,5		113,312	8,28	8,30	8,27	8,283	$1,920 \times 10^{-6}$
	3,0		124,127	8,44	8,44	8,43	8,437	$2,733 \times 10^{-6}$
	3,5		134,073	8,62	8,59	8,60	8,603	$4,012 \times 10^{-6}$
	4,0		143,330	8,73	8,72	8,71	8,720	$5,248 \times 10^{-6}$

Tabel C.5 Lanjutan

$\Delta h$ $CO_2$	$\Delta h$ $K_2CO_3$	$[CO_3^{2-}]_i$	$[HCO_3^-]$	$[CO_2]_e$	L	$k_1 a$	Cek $A_e \epsilon$
2,5	0,5	0,000148	0,090051	$6,478 \times 10^{-3}$	0,797	$1,525 \times 10^{-2}$	0,0441
	1,0	0,000237	0,089872	$4,017 \times 10^{-3}$	1,126	$1,948 \times 10^{-2}$	0,0171
	1,5	0,000353	0,089641	$2,688 \times 10^{-3}$	1,380	$2,264 \times 10^{-2}$	0,0077
	2,0	0,000614	0,089118	$1,526 \times 10^{-3}$	1,593	$2,493 \times 10^{-2}$	0,0026
	2,5	0,000889	0,088568	$1,041 \times 10^{-3}$	1,781	$2,724 \times 10^{-2}$	0,0012
	3,0	0,001256	0,087836	$7,254 \times 10^{-4}$	1,951	$2,927 \times 10^{-2}$	0,0006
	3,5	0,001819	0,086708	$4,879 \times 10^{-4}$	2,107	$3,096 \times 10^{-2}$	0,0003
	4,0	0,002351	0,085645	$3,684 \times 10^{-4}$	2,253	$3,256 \times 10^{-2}$	0,0002

Tabel C.6. Perhitungan  $k_{L,a}$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  0,15%CMC

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Q CO <sub>2</sub>	Q K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	pH				[OH <sup>-</sup> ]
				I	II	III	Rata2	
2,5	0,5	299,065	50,675	7,81	7,82	7,83	7,820	6,607x10 <sup>-7</sup>
	1,0		71,665	7,87	7,89	7,90	7,887	7,703x10 <sup>-7</sup>
	1,5		87,771	8,14	8,13	8,15	8,140	1,380x10 <sup>-7</sup>
	2,0		101,350	8,28	8,25	8,26	8,263	1,834x10 <sup>-7</sup>
	2,5		113,312	8,45	8,47	8,47	8,463	2,906x10 <sup>-7</sup>
	3,0		124,127	8,59	8,57	8,58	8,580	3,802x10 <sup>-7</sup>
	3,5		134,073	8,61	8,63	8,64	8,627	4,233x10 <sup>-7</sup>
	4,0		143,330	8,79	8,82	8,81	8,807	6,407x10 <sup>-7</sup>

Tabel C.6 Lanjutan

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>i</sub>	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub>	L	$k_{L,a}$	Cek A <sub>e</sub> ε
2,5	0,5	0,000310	0,089727	3,066E-03	0,797	1,327x10 <sup>-2</sup>	0,0100
	1,0	0,000361	0,089625	2,626E-03	1,126	1,844x10 <sup>-2</sup>	0,0074
	1,5	0,000643	0,089061	1,456E-03	1,380	2,152x10 <sup>-2</sup>	0,0023
	2,0	0,000850	0,088646	1,091E-03	1,593	2,442x10 <sup>-2</sup>	0,0013
	2,5	0,001333	0,087681	6,810E-04	1,781	2,663x10 <sup>-2</sup>	0,0005
	3,0	0,001728	0,086891	5,159E-04	1,951	2,875x10 <sup>-2</sup>	0,0003
	3,5	0,001915	0,086516	4,613E-04	2,107	3,086x10 <sup>-2</sup>	0,0003
	4,0	0,002837	0,084672	2,983E-04	2,253	3,211x10 <sup>-2</sup>	0,0001

Tabel C.7. Perhitungan  $k_{1a}$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  0,2%CMC

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Q CO <sub>2</sub>	Q K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	pH				[OH]
				I	II	III	Rata2	
2,5	0,5	299,065	50,675	7,94	7,94	7,95	7,943	8,777x10 <sup>7</sup>
	1,0		71,665	8,06	8,04	8,05	8,050	1,122x10 <sup>-6</sup>
	1,5		87,771	8,27	8,27	8,27	8,270	1,862x10 <sup>-6</sup>
	2,0		101,350	8,40	8,37	8,37	8,380	2,399x10 <sup>-6</sup>
	2,5		113,312	8,58	8,56	8,57	8,570	3,715x10 <sup>-6</sup>
	3,0		124,127	8,60	8,61	8,62	8,610	4,074x10 <sup>-6</sup>
	3,5		134,073	8,68	8,69	8,67	8,680	4,786x10 <sup>-6</sup>
	4,0		143,330	8,78	8,79	8,78	8,783	6,072x10 <sup>-6</sup>

Tabel C.7. Lanjutan

$\Delta h$ CO <sub>2</sub>	$\Delta h$ K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>i</sub>	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub>	L	$k_{1a}$	Cek A <sub>e</sub> ε
2,5	0,5	0,000411	0,089525	2,303E-03	0,797	1,287x10 <sup>-2</sup>	0,0057
	1,0	0,000524	0,089299	1,797E-03	1,126	1,783x10 <sup>-2</sup>	0,0035
	1,5	0,000863	0,088621	1,074E-03	1,380	2,113x10 <sup>-2</sup>	0,0013
	2,0	0,001106	0,088135	8,294E-04	1,593	2,407x10 <sup>-2</sup>	0,0008
	2,5	0,001690	0,086967	5,284E-04	1,781	2,628x10 <sup>-2</sup>	0,0003
	3,0	0,001846	0,086654	4,802E-04	1,951	2,864x10 <sup>-2</sup>	0,0003
	3,5	0,002154	0,086039	4,058E-04	2,107	3,063x10 <sup>-2</sup>	0,0002
	4,0	0,002698	0,084951	3,158E-04	2,253	3,224x10 <sup>-2</sup>	0,0001

Tabel C.8. Perhitungan  $k_{La}$  Pada Larutan  $K_2CO_3$  0%CMC Dengan Variabel Rate Gas  $CO_2$  Yang Lain

rate $CO_2$ ( $cm^3/s$ )	$V_{K_2CO_3}$ ( $cm^3/s$ )	$[OH^-]$ (gmole/L)	$[CO_3^{2-}]_i$ (gmole/L)	$[HCO_3^-]$ (gmole/L)	$[CO_2]_e$ (gmole/L)	L (cm/s)	$k_{La}$ ( $s^{-1}$ )
133,746	50,675	$3,29 \cdot 10^{-07}$	0,000155	0,09004	0,006185	0,797	0,01195
	71,665	$4,75 \cdot 10^{-07}$	0,000223	0,08990	0,004273	1,126	0,01688
	87,771	$7,30 \cdot 10^{-07}$	0,000342	0,08966	0,002772	1,380	0,02062
	101,350	$8,58 \cdot 10^{-07}$	0,000402	0,08954	0,002357	1,593	0,02377
	113,312	$1,17 \cdot 10^{-06}$	0,000544	0,08926	0,001728	1,781	0,02650
	124,127	$1,78 \cdot 10^{-06}$	0,000825	0,08870	0,001126	1,951	0,02884
	134,073	$2,27 \cdot 10^{-06}$	0,001049	0,08825	0,000876	2,107	0,03100
	143,330	$4,30 \cdot 10^{-06}$	0,001944	0,08646	0,000454	2,253	0,03246
189,145	50,675	$3,29 \cdot 10^{-07}$	0,000155	0,09004	0,006185	0,797	0,01195
	71,665	$4,61 \cdot 10^{-07}$	0,000217	0,08991	0,004406	1,126	0,01688
	87,771	$7,41 \cdot 10^{-07}$	0,000348	0,08965	0,002730	1,380	0,02061
	101,350	$8,64 \cdot 10^{-07}$	0,000405	0,08954	0,002338	1,593	0,02377
	113,312	$1,19 \cdot 10^{-06}$	0,000557	0,08923	0,001688	1,781	0,02649
	124,127	$1,72 \cdot 10^{-06}$	0,000800	0,08875	0,001162	1,951	0,02886
	134,073	$2,22 \cdot 10^{-06}$	0,001026	0,08829	0,000897	2,107	0,03101
	143,330	$4,27 \cdot 10^{-06}$	0,001930	0,08649	0,000458	2,253	0,03247

Tabel C.8. Lanjutan

rate CO <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	V <sub>K2CO3</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	[OH <sup>-</sup> ] (gmole/L)	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>i</sub> (gmole/L)	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (gmole/L)	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub> (gmole/L)	L (cm/s)	k <sub>1,a</sub> (s <sup>-1</sup> )
231,654	50,675	3,19.10 <sup>-07</sup>	0,000150	0,09005	0,006379	0,797	0,01195
	71,665	4,61.10 <sup>-07</sup>	0,000217	0,08991	0,004406	1,126	0,01688
	87,771	7,08.10 <sup>-07</sup>	0,000332	0,08968	0,002860	1,380	0,02062
	101,350	8,84.10 <sup>-07</sup>	0,000414	0,08952	0,002285	1,593	0,02377
	113,312	1,19.10 <sup>-06</sup>	0,000557	0,08923	0,001688	1,781	0,02649
	124,127	1,61.10 <sup>-06</sup>	0,000748	0,08885	0,001246	1,951	0,02889
	134,073	2,26.10 <sup>-06</sup>	0,001041	0,08826	0,000883	2,107	0,03100
	143,330	4,27.10 <sup>-06</sup>	0,001930	0,08649	0,000458	2,253	0,03247
267,491	50,675	3,04.10 <sup>-07</sup>	0,000143	0,09006	0,006680	0,797	0,01196
	71,665	4,50.10 <sup>-07</sup>	0,000212	0,08992	0,004510	1,126	0,01688
	87,771	6,92.10 <sup>-07</sup>	0,000325	0,08970	0,002927	1,380	0,02062
	101,350	8,58.10 <sup>-07</sup>	0,000402	0,08954	0,002357	1,593	0,02377
	113,312	1,14.10 <sup>-06</sup>	0,000532	0,08928	0,001769	1,781	0,02650
	124,127	1,58.10 <sup>-06</sup>	0,000737	0,08887	0,001266	1,951	0,02890
	134,073	2,14.10 <sup>-06</sup>	0,000988	0,08837	0,000933	2,107	0,03104
	143,330	4,14.10 <sup>-06</sup>	0,001874	0,08660	0,000473	2,253	0,03252

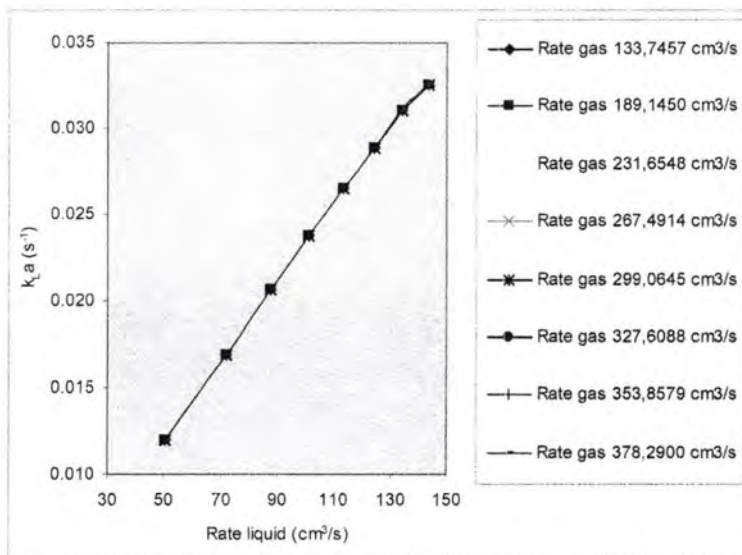
Tabel C.8. Lanjutan

rate CO <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	V <sub>K2CO3</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	[OH] (gmole/L)	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>i</sub> (gmole/L)	[HCO <sub>3</sub> ] (gmole/L)	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub> (gmole/L)	L (cm/s)	k <sub>1a</sub> (s <sup>-1</sup> )
299,065	50,675	2,88.10 <sup>-07</sup>	0,000136	0,09007	0,007050	0,797	0,01196
	71,665	4,57.10 <sup>-07</sup>	0,000215	0,08992	0,004441	1,126	0,01688
	87,771	6,66.10 <sup>-07</sup>	0,000312	0,08972	0,003042	1,380	0,02063
	101,350	8,51.10 <sup>-07</sup>	0,000399	0,08955	0,002375	1,593	0,02378
	113,312	1,13.10 <sup>-06</sup>	0,000528	0,08929	0,001783	1,781	0,02651
	124,127	1,60.10 <sup>-06</sup>	0,000742	0,08886	0,001256	1,951	0,02890
	134,073	2,22.10 <sup>-06</sup>	0,001026	0,08829	0,000897	2,107	0,03101
	143,330	4,07.10 <sup>-06</sup>	0,001846	0,08665	0,000480	2,253	0,03254
327,609	50,675	2,91.10 <sup>-07</sup>	0,000137	0,09007	0,006996	0,797	0,01196
	71,665	4,23.10 <sup>-07</sup>	0,000199	0,08995	0,004796	1,126	0,01689
	87,771	6,17.10 <sup>-07</sup>	0,000289	0,08977	0,003286	1,380	0,02064
	101,350	8,19.10 <sup>-07</sup>	0,000384	0,08958	0,002469	1,593	0,02378
	113,312	1,05.10 <sup>-06</sup>	0,000489	0,08937	0,001927	1,781	0,02653
	124,127	1,57.10 <sup>-06</sup>	0,000731	0,08888	0,001276	1,951	0,02890
	134,073	2,12.10 <sup>-06</sup>	0,000981	0,08839	0,000940	2,107	0,03104
	143,330	4,01E-06	0,001819	0,08671	0,000488	2,253	0,03256

Tabel C.8. Lanjutan

rate CO <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	V <sub>K2CO3</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	[OH] (gmole/L)	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sub>t</sub> (gmole/L)	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (gmole/L)	[CO <sub>2</sub> ] <sub>e</sub> (gmole/L)	L (cm/s)	k <sub>L</sub> a (s <sup>-1</sup> )
353,858	50,675	2,84.10 <sup>-07</sup>	0,000134	0,09008	0,007160	0,797	0,01196
	71,665	3,98.10 <sup>-07</sup>	0,000187	0,08997	0,005102	1,126	0,01689
	87,771	5,93.10 <sup>-07</sup>	0,000279	0,08979	0,003416	1,380	0,02065
	101,350	7,76.10 <sup>-07</sup>	0,000364	0,08962	0,002606	1,593	0,02379
	113,312	1,04E-06	0,000486	0,08938	0,001942	1,781	0,02653
	124,127	1,60E-06	0,000742	0,08886	0,001256	1,951	0,02890
	134,073	2,04E-06	0,000945	0,08846	0,000978	2,107	0,03107
	143,330	3,92E-06	0,001779	0,08679	0,000500	2,253	0,03259
378,290	50,675	2,84.10 <sup>-07</sup>	0,000134	0,09008	0,007160	0,797	0,01196
	71,665	3,83.10 <sup>-07</sup>	0,000180	0,08999	0,005302	1,126	0,01689
	87,771	5,93.10 <sup>-07</sup>	0,000279	0,08979	0,003416	1,380	0,02065
	101,350	7,36.10 <sup>-07</sup>	0,000345	0,08966	0,002751	1,593	0,02380
	113,312	1,02E-06	0,000475	0,08940	0,001987	1,781	0,02654
	124,127	1,56E-06	0,000726	0,08890	0,001286	1,951	0,02891
	134,073	1,93E-06	0,000896	0,08855	0,001033	2,107	0,03110
	143,330	3,66E-06	0,001665	0,08702	0,000537	2,253	0,03267





Gambar C.1. Pengaruh rate liquid terhadap  $k_1a$  untuk berbagai macam variabel rate gas  $\text{CO}_2$ .

## APPENDIKS D PENURUNAN PERSAMAAN EMPIRIS

Korelasi atau hubungan antara koefisien perpindahan massa absorpsi gas ke dalam larutan dalam *packed column* dengan bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) yaitu  $N_{Sh}$  (*Sherwood Number*),  $N_{Re}$  (*Reynold Number*), dan  $N_{Sc}$  (*Schmidt Number*), dimana harga koefisien perpindahan massa ( $k_L$ ) dipengaruhi oleh: Kecepatan larutan ( $V_L$ ), densitas ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), diameter kolom ( $D$ ), diameter packing ( $d_p$ ), diffusifitas ( $D_{AB}$ ) dan tinggi kolom ( $H$ ).

Analisa dimensi menggunakan metode Buckingham (Pi Theorem) yang digunakan sebagai dasar untuk mencari *dimensionless group*

Dimensi dasar dari  $\Delta P$  ( $n$ ) yaitu  $M, L, t$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah dimensionless group} &= r - n \\ &= 8 - 3 \\ &= 5 \end{aligned}$$

$$\Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0$$

$$\pi = k_L^a D^b d_p^c V_L^d D_{AB}^e \mu^f \rho^g H^h$$

$$= \left(\frac{m}{s}\right)^a (m)^b (m)^c \left(\frac{m}{s}\right)^d \left(\frac{m^2}{s}\right)^e \left(\frac{kg}{m.s}\right)^f \left(\frac{kg}{m^3}\right)^g (m)^h$$

$$= (L.t^{-1})^a (L)^b (L)^c (L.t^{-1})^d (L^2.t^{-1})^e (M.L^{-1}.t^{-1})^f (M.L^{-3})^g (L)^h$$

$$= L^{a+b+c+d+2e-f-3g+h} + M^{f+g} + t^{-a-d-e-f}$$

$$a + b + c + d + 2e - f - 3g + h = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. D.1})$$

$$f + g = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. D.2})$$

$$-a - d - e - f = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{pers. D.3})$$

### Mencari $\pi_1$

Ditentukan :  $a = 1; c = 0; d = 0; f = 0; g = 0; h = 0$

$$(\text{pers. D.1}). \quad a + b + c + d + 2e - f - 3g + h = 0$$

$$1 + b + 0 + 0 + 0 + 2e - 0 - 0 + 0 = 0$$

$$\begin{aligned}
 & 1 + b + 2e = 0 \\
 \text{(pers. D.2). } & f + g = 0 \\
 & 0 + g = 0 \\
 & g = 0 \\
 \text{(pers. D.3). } & -a - d - e - f = 0 \\
 & -1 - 0 - e - 0 = 0 \\
 & e = -1 \\
 & b = 1
 \end{aligned}$$

$$\text{Jadi } \pi_1 = \frac{k_L \cdot D}{D_{AB}}$$

Mencari  $\pi_2$

$$\begin{aligned}
 \text{Ditentukan: } & a = 0; \quad c = 0; \quad d = 1; \quad e = 0; \quad h = 0; \\
 \text{(pers. D.1). } & a + b + c + d + 2e - f - 3g + h = 0 \\
 & 0 + b + 0 + 1 + 0 + 0 - f - 3g = 0 \\
 & b + 1 - f - 3g = 0 \\
 \text{(pers. D.2). } & f + g = 0 \\
 & f = -g \\
 \text{(pers. D.3). } & -a - d - e - f = 0 \\
 & -0 - 1 - 0 - 0 - f = 0 \\
 & f = -1
 \end{aligned}$$

$$g = 1$$

$$b = 1$$

$$\text{Jadi } \pi_2 = \frac{V_L \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

Mencari  $\pi_3$

$$\begin{aligned}
 \text{Ditentukan: } & a = 0; \quad c = 0; \quad d = 0; \quad f = 1; \quad h = 0; \\
 \text{(pers. D.1). } & a + b + c + d + 2e - f - 3g + h = 0 \\
 & 0 + b + 0 + 0 + 0 + 2e - 1 - 3g + 0 = 0 \\
 & b + 2e - 1 - 3g = 0 \\
 \text{(pers. D.2). } & f + g = 0 \\
 & 1 + g = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &g = -1 \\
 \text{(pers. D.3). } &-a - d - e - f = 0 \\
 &-0 - 0 - e - 1 = 0 \\
 &e = -1 \\
 &b = 0
 \end{aligned}$$

$$\text{Jadi } \pi_3 = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}}$$

Sehingga :

$$\frac{k_L \cdot D}{D_{AB}} = \left[ \left( \frac{V_L \cdot \rho \cdot D}{\mu} \right) \left( \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \right) \right] \dots\dots\dots \text{(pers. D.4)}$$

$$\frac{k_L \cdot D}{D_{AB}} = k_1 \left[ \left( \frac{V_L \cdot \rho \cdot D}{\mu} \right)^{k_2} \left( \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \right)^{k_3} \right] \dots\dots\dots \text{(pers. D.5)}$$

Menentukan korelasi empiris pada packed column

Data-data eksperimen dikorelasikan mengikuti persamaan :

$$N_{Sh} = k_1 N_{Re}^{k_2} N_{Sc}^{k_3}$$

Persamaan diatas kemudian diubah kedalam bentuk log, menjadi:

$$\Sigma \log N_{Sh} = \log k_1 + k_2 \Sigma \log N_{Re} + k_3 \Sigma \log N_{Sc} \dots\dots\dots \text{(pers. D.6)}$$

dimana:

$$\Sigma \log N_{Sh} = Y$$

$$\Sigma \log k_1 = \text{intercept}$$

$$\Sigma \log N_{Re} + \log N_{Sc} = X$$

Tabel D.1. Perhitungan  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ , dan  $\pi_3$ 

$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_L$ (m/s)	$k_L$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$
0,000876	1002,16	0,0080	0,00354	910,9319	214897	529,944
		0,0113	0,00449	1288,2473	272400	529,944
		0,0138	0,00520	1577,7681	315626	529,944
		0,0159	0,00585	1821,8637	354973	529,944
		0,0178	0,00639	2036,8922	387416	529,944
		0,0195	0,00684	2231,3022	414617	529,944
		0,0211	0,00725	2410,0911	439494	529,944
		0,0225	0,00750	2576,4946	454594	529,944
0,000888	1002,3	0,0080	0,00330	898,9509	200168	537,007
		0,0113	0,00428	1271,3037	259683	537,007
		0,0138	0,00499	1557,0166	302452	537,007
		0,0159	0,00569	1797,9017	344948	537,007
		0,0178	0,00619	2010,1020	375257	537,007
		0,0195	0,00666	2201,9551	402729	537,007
		0,0211	0,00705	2378,3925	427283	537,007
		0,0225	0,00737	2542,6073	446931	537,007
0,000901	1002,5	0,0080	0,00345	886,0845	209611	544,804
		0,0113	0,00441	1253,1080	267825	544,804
		0,0138	0,00513	1534,7316	311254	544,804
		0,0159	0,00565	1772,1690	342730	544,804
		0,0178	0,00617	1981,3322	374441	544,804
		0,0195	0,00663	2170,4393	402400	544,804
		0,0211	0,00702	2344,3514	425611	544,804
		0,0225	0,00738	2506,2159	447606	544,804

Tabel D.1. Lanjutan

$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_L$ (m/s)	$k_L$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$
0,001046	1003	0,0080	0,00300	763,7819	182397	632,043
		0,0113	0,00418	1080,1466	253520	632,043
		0,0138	0,00488	1322,8988	295898	632,043
		0,0159	0,00554	1527,5637	335788	632,043
		0,0178	0,00604	1707,8569	366139	632,043
		0,0195	0,00652	1870,8624	395246	632,043
		0,0211	0,00700	2020,7701	424285	632,043
		0,0225	0,00728	2160,2931	441476	632,043
0,001096	1003,1	0,0080	0,00292	728,7141	176974	662,459
		0,0113	0,00404	1030,5534	245167	662,459
		0,0138	0,00479	1262,1601	290545	662,459
		0,0159	0,00545	1457,4282	330856	662,459
		0,0178	0,00596	1629,4436	361275	662,459
		0,0195	0,00649	1784,9649	393689	662,459
		0,0211	0,00694	1927,9899	421155	662,459
		0,0225	0,00731	2061,1069	443193	662,459

Tabel D.2. Perhitungan Korelasi Empiris

$X_1$	$X_2$	Y	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1 X_2$	$X_1 Y$	$X_2 Y$
2,959	2,724	5,332	8,759	7,421	8,062	15,781	14,526
3,110	2,724	5,435	9,672	7,421	8,472	16,903	14,807
3,198	2,724	5,499	10,227	7,421	8,712	17,587	14,981
3,261	2,724	5,550	10,631	7,421	8,882	18,096	15,120
3,309	2,724	5,588	10,949	7,421	9,014	18,491	15,223
3,349	2,724	5,618	11,213	7,421	9,122	18,811	15,304
3,382	2,724	5,643	11,438	7,421	9,213	19,085	15,373

Tabel D.2. Lanjutan

$X_1$	$X_2$	Y	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1 X_2$	$X_1 Y$	$X_2 Y$
3,411	2,724	5,658	11,635	7,421	9,292	19,298	15,413
2,954	2,730	5,301	8,725	7,453	8,064	15,659	14,473
3,104	2,730	5,414	9,636	7,453	8,475	16,808	14,781
3,192	2,730	5,481	10,191	7,453	8,715	17,496	14,962
3,255	2,730	5,538	10,594	7,453	8,885	18,024	15,118
3,303	2,730	5,574	10,911	7,453	9,018	18,413	15,218
3,343	2,730	5,605	11,174	7,453	9,126	18,736	15,302
3,376	2,730	5,631	11,399	7,453	9,217	19,011	15,372
3,405	2,730	5,650	11,596	7,453	9,296	19,241	15,425
2,947	2,736	5,321	8,688	7,487	8,065	15,685	14,561
3,098	2,736	5,428	9,598	7,487	8,477	16,815	14,852
3,186	2,736	5,493	10,151	7,487	8,718	17,501	15,030
3,249	2,736	5,535	10,553	7,487	8,889	17,980	15,145
3,297	2,736	5,573	10,870	7,487	9,021	18,375	15,250
3,337	2,736	5,605	11,133	7,487	9,130	18,700	15,336
3,370	2,736	5,629	11,357	7,487	9,221	18,970	15,402
3,399	2,736	5,651	11,553	7,487	9,301	19,208	15,462
2,883	2,801	5,261	8,312	7,844	8,074	15,167	14,735
3,033	2,801	5,404	9,202	7,844	8,496	16,393	15,135
3,122	2,801	5,471	9,744	7,844	8,743	17,078	15,323
3,184	2,801	5,526	10,138	7,844	8,918	17,595	15,477
3,232	2,801	5,564	10,449	7,844	9,053	17,984	15,582
3,272	2,801	5,597	10,706	7,844	9,164	18,313	15,675
3,306	2,801	5,628	10,926	7,844	9,258	18,602	15,762
3,335	2,801	5,645	11,119	7,844	9,339	18,823	15,810
2,863	2,821	5,248	8,194	7,959	8,076	15,022	14,805
3,013	2,821	5,389	9,079	7,959	8,500	16,239	15,205

Tabel D.2. Lanjutan

$X_1$	$X_2$	$Y$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1 X_2$	$X_1 Y$	$X_2 Y$
3,164	2,821	5,520	10,008	7,959	8,925	17,462	15,572
3,212	2,821	5,558	10,317	7,959	9,062	17,852	15,680
3,252	2,821	5,595	10,573	7,959	9,173	18,193	15,785
3,285	2,821	5,624	10,792	7,959	9,268	18,477	15,867
3,314	2,821	5,647	10,983	7,959	9,350	18,713	15,930

Sehingga didapatkan:

$$\Sigma X_1 = 128,36352$$

$$\Sigma X_1 X_2 = 354,53563$$

$$\Sigma X_2 = 110,49886$$

$$\Sigma X_1 Y = 709,53193$$

$$\Sigma Y = 220,89260$$

$$\Sigma X_2 Y = 1610,19088$$

$$\Sigma X_1^2 = 412,81128$$

$$\Sigma X_2^2 = 305,31486$$

Nilai-nilai yang diketahui kemudian dimasukkan dalam persamaan dibawah ini untuk mencari harga konstantanya.

$$\sum_{i=1}^n y_i = k_1 n + k_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} + k_3 \sum_{i=1}^n x_{2i}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_{1i} = k_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + k_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + k_3 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_{2i} = k_1 \sum_{i=1}^n x_{2i} + k_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + k_3 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2$$

Penyelesaian hubungan persamaan koefisien dengan menggunakan least square pada software excel. Nilai-nilai yang diketahui kemudian dimasukkan dalam persamaan (D.6) untuk mencari harga konstantanya. Sehingga didapatkan:

$$k_1 = 36,6201$$

$$k_2 = 0,7955$$

$$k_3 = 0,5089$$

Sehingga didapatkan persamaan:

$$\frac{k_l \cdot D}{D_{All}} = 36,6201 \left[ \left( \frac{V_l \cdot \rho_l \cdot D}{\mu_l} \right)^{0,7955} \left( \frac{\mu_l}{\rho_l \cdot D_{All}} \right)^{0,5089} \right] \quad \dots(\text{pers. D.6})$$



Tabel D.3. Perbandingan Harga  $k_L$  hasil eksperimen dengan korelasi empiris

$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_L$ (m/s)	$k_L$ eksperimen	$k_L$ korelasi	% Error
0.000876	1002.16	0.0080	0,0035458	0,00332493	6,64
		0.0113	0,0044946	0,00438042	2,61
		0.0138	0,0052078	0,00514743	1,18
		0.0159	0,0058571	0,00577099	1,49
		0.0178	0,0063924	0,00630658	1,36
		0.0195	0,0068412	0,00678091	0,89
		0.0211	0,0072516	0,00720972	0,58
		0.0225	0,0075008	0,00760297	1,34
0.000888	1002.3	0.0080	0,0033028	0,00332493	0,67
		0.0113	0,0042848	0,00438042	2,18
		0.0138	0,0049905	0,00514722	3,04
		0.0159	0,0056916	0,00577099	1,38
		0.0178	0,0061917	0,00630658	1,82
		0.0195	0,0066451	0,00678091	2,00
		0.0211	0,0070502	0,00720971	2,21
		0.0225	0,0073744	0,00760297	3,01
0.000901	1002.5	0.0080	0,0034586	0,00329868	4,85
		0.0113	0,0044191	0,00434583	1,69
		0.0138	0,0051357	0,00510636	0,57
		0.0159	0,005655	0,00572543	1,23
		0.0178	0,0061783	0,00625679	1,26
		0.0195	0,0066396	0,00672738	1,31
		0.0211	0,0070226	0,00715278	1,82
		0.0225	0,0073855	0,00754294	2,09

Tabel D.3 Lanjutan

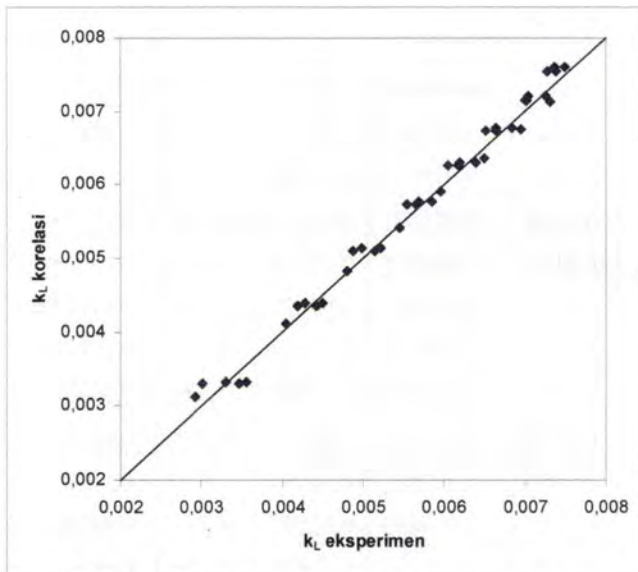
$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_L$ (m/s)	$k_L$ eksperimen	$k_L$ korelasi	% Error
0,001046	1003	0,0080	0,0030095	0,00329868	8,77
		0,0113	0,0041831	0,00434583	3,74
		0,0138	0,0048823	0,00510636	4,39
		0,0159	0,0055405	0,00572543	3,23
		0,0178	0,0060413	0,00625679	3,44
		0,0195	0,0065216	0,00672738	3,06
		0,0211	0,0070007	0,00715278	2,13
		0,0225	0,0072844	0,00754294	3,43
0,001096	1003,1	0,0080	0,002920	0,0031189	6,38
		0,0113	0,004045	0,0041090	1,55
		0,0138	0,004794	0,0048281	0,71
		0,0159	0,005459	0,0054134	0,85
		0,0178	0,005961	0,0059158	0,77
		0,0195	0,006496	0,0063608	2,12
		0,0211	0,006949	0,0067630	2,75
		0,0225	0,007313	0,0071319	2,54

Tabel D.4. Perbandingan Harga  $k_{1a}$  hasil eksperimen dengan korelasi empiris Onda dan Mohunta

$\mu$ (kg/ms)	$V_L$ (m/s)	$k_{1a}$ experiment	$k_{1a}$ onda	% Error	$k_{1a}$ Mohunta	% Error
0,000876	0,0080	0,015631	0,02352	33,551	0,01254	24,644
	0,0113	0,019814	0,03026	34,537	0,01626	21,833
	0,0138	0,022958	0,03503	34,465	0,01893	21,254
	0,0159	0,025820	0,03884	33,525	0,02109	22,423
	0,0178	0,028180	0,04206	33,009	0,02293	22,887
	0,0195	0,030159	0,04488	32,815	0,02455	22,824
	0,0211	0,031968	0,04741	32,579	0,02601	22,881
	0,0225	0,033067	0,04971	33,487	0,02735	20,895
0,000888	0,0080	0,014560	0,02325	37,399	0,01237	17,692
	0,0113	0,018889	0,02992	36,883	0,01604	17,736
	0,0138	0,022000	0,03463	36,487	0,01867	17,785
	0,0159	0,025091	0,03840	34,669	0,02080	20,596
	0,0178	0,027296	0,04159	34,375	0,02262	20,661
	0,0195	0,029294	0,04438	34,001	0,02422	20,937
	0,0211	0,031080	0,04688	33,709	0,02566	21,103
	0,0225	0,032509	0,04915	33,867	0,02698	20,485
0,000901	0,0080	0,015247	0,02297	33,630	0,01218	25,083
	0,0113	0,019481	0,02955	34,095	0,01580	23,240
	0,0138	0,022640	0,03421	33,827	0,01840	23,022
	0,0159	0,024930	0,03793	34,284	0,02050	21,609
	0,0178	0,027236	0,04108	33,706	0,02228	22,196
	0,0195	0,029270	0,04384	33,238	0,02386	22,642
	0,0211	0,030958	0,04631	33,150	0,02528	22,430
	0,0225	0,032558	0,04855	32,947	0,02658	22,468

Tabel D.4. Lanjutan

$\mu$ (kg/ms)	$V_L$ (m/s)	$k_{L,a}$ experiment	$k_{L,a}$ onda	% Error	$k_{L,a}$ Mohunta	% Error
0,001046	0,0080	0,013267	0,02024	34,457	0,01046	26,795
	0,0113	0,018441	0,02605	29,219	0,01357	35,897
	0,0138	0,021523	0,03016	28,638	0,01579	36,241
	0,0159	0,024425	0,03344	26,971	0,01759	38,796
	0,0178	0,026632	0,03622	26,480	0,01913	39,193
	0,0195	0,028750	0,03865	25,633	0,02048	40,329
	0,0211	0,030862	0,04083	24,430	0,02170	42,177
	0,0225	0,032112	0,04282	25,008	0,02282	40,713
0,001096	0,0080	0,012873	0,01944	33,810	0,00997	29,113
	0,0113	0,017833	0,02503	28,764	0,01293	37,924
	0,0138	0,021134	0,02898	27,079	0,01505	40,397
	0,0159	0,024066	0,03213	25,120	0,01676	43,525
	0,0178	0,026279	0,03481	24,512	0,01823	44,141
	0,0195	0,028636	0,03715	22,921	0,01952	46,694
	0,0211	0,030634	0,03924	21,945	0,02068	48,113
	0,0225	0,032237	0,04115	21,665	0,02174	48,251



Gambar D.1 Perbandingan harga  $k_L$  eksperimen dengan  $k_L$  korelasi empiris