

# KINETIKA REAKSI KARBONATASI SUSPENSI SERBUK BATUAN MARMER DALAM REAKTOR KOLOM GELEMBUNG BERSEKAT MIRING

Soemargono \*)

## Abstrak

Secara umum kinetika reaksi heterogen ditentukan oleh kecepatan perpindahan massa, atau kecepatan reaksi kimia, atau dapat pula oleh keduanya. Kinetika reaksi karbonatasi suspensi serbuk batuan marmer dalam air yang dicari dengan model persamaan diferensial simultan hasil penjabaran neraca bahan menurut reaksi dalam fase cair.

Penelitian dilakukan secara sinambung dalam reaktor kolom berdiameter 2,54 cm terbuat dari kaca dengan sekat miring dan tinggi kolom aktif 150 cm. Suspensi ditempatkan pada bagian atas kolom sebagai umpan. Gas karbon dioksida dialirkan melalui bagian bawah kolom dengan kecepatan alir yang diinginkan.

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa reaksi dapat balik dengan model reaksi terjadi dalam fase cair, yang dikendalikan oleh perpindahan massa dan reaksi kimia bersama-sama. Hubungan  $k_1$  dengan  $G$  berbentuk:

$$k_1 a = 4,3509 G^{0,5276}$$

dan hubungan  $k_1$  dengan suhu sesuai persamaan Arrhenius, yaitu:

$$k_1 = 6,5547 e^{2886,8/RT}$$

**Kata kunci:** kinetika reaksi; karbonatasi; reaktor kolom

## Pendahuluan

Karbonatasi batuan marmer (kalsium karbonat) merupakan reaksi pembentukan kalsium bikarbonat. Hasil reaksi ini mudah terurai kembali menjadi kalsium karbonat dan gas karbon dioksida. Kalsium karbonat yang dihasilkan secara kimia umumnya mempunyai kemurnian dan kehalusan yang tinggi untuk digunakan dalam industri. Indonesia masih mendatangkan bahan seperti itu dari luar negeri.

Pembentukan kalsium bikarbonat itu melibatkan reaksi antara gas, cairan, dan padatan. Pada sistem tiga fasa, secara umum kinetika reaksi ditentukan oleh kecepatan perpindahan massa, atau kecepatan reaksi kimia, atau dapat pula oleh keduanya (Levenspiel, 1972).

Jenis reaktor kolom gelembung sangat digemari karena operasinya yang sederhana, mudah, membutuhkan tempat yang relatif sempit, dan ongkosnya yang relatif murah. Proses yang dilaksanakan bisa secara batch maupun kontinu dengan sistem pengalirannya searah (cocurrent) atau dua arah (countercurrent). Pada proses kontinu, pola alir dalam reaktor pipa gelembung sering kali mengalami gangguan terutama pada aliran gas dengan kecepatan tinggi. Hal itu menyebabkan pola alir slug dan "churn turbulent" (resim heterogen) yang tidak

dikehendaki (Shah dkk., 1982). Reaktor pipa gelembung bersekat miring diharapkan dapat mengurangi masalah pola alir gas sebab, sekat miring bergerigi berfungsi sebagai pemecah gelembung yang dapat mengganti pengaduk mekanik (Agra, 1981).

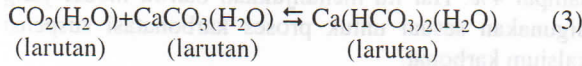
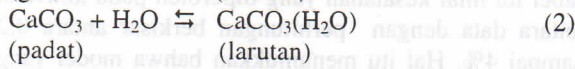
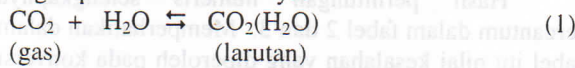
Penelitian ini mempelajari kinetika reaksi karbonatasi suspensi serbuk batuan marmer dalam air yang dicari dengan model persamaan diferensial simultan. Pengolahan data dilakukan menurut reaksi dalam fase cair dengan model persamaan diferensial simultan hasil penjabaran neraca bahan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat digunakan untuk merancang reaktor bila diperlukan.

## Model Matematis Kinetika Reaksi

Penelitian yang dilakukan oleh Evans dan Clair (1949), menemukan bahwa magnesium bikarbonat dan kalsium bikarbonat mempunyai sifat metastabil yang mudah terurai kembali menjadi bentuk karbonat. Hal itu menunjukkan bahwa reaksi antara  $\text{CaCO}_3$  dan  $\text{CO}_2$  yang membentuk kalsium bikarbonat merupakan reaksi dapat balik. Reaksi terjadi dalam cairan mengikuti langkah yang dilalui, meliputi: a) pelarutan gas  $\text{CO}_2$  ke dalam cairan, b) pelarutan  $\text{CaCO}_3$  padat dalam cairan, dan c) reaksi antara  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CaCO}_3$  yang larut membentuk



Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Peristiwa itu terlukis pada gambar 1 dengan persamaan reaksinya:



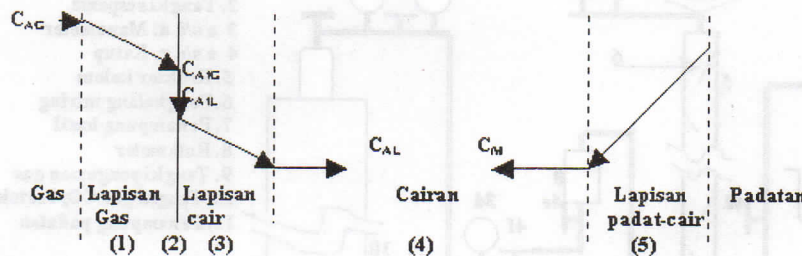
(I). Kecepatan perpindahan massa CO<sub>2</sub> ke dalam cairan secara bertahap melalui langkah-langkah: (1) perpindahan massa pada lapisan gas, (2) perpindahan massa gas pada tapal batas lapisan gas-cair, sesuai hukum Henry, (3) perpindahan massa CO<sub>2</sub> pada lapisan cair.

Menurut konsep dua film, tahanan perpindahan massa pada tapal batas antar fase tidak dapat diukur, dan yang dapat diukur adalah konsentrasi pada badan gas dan cair. Oleh karena itu, dalam mempelajari kecepatan perpindahan massanya akan lebih mudah kalau dihitung berdasarkan tahanan perpindahan massa menyeluruh, 1/K<sub>Ga</sub>, dan dinyatakan dengan persamaan (Van Krevelen dan Hoffijzer, 1948):

$$1/K_{Ga} = (1/Hk_{La}) + (1/k_{Ga}) \quad (4)$$

Dengan anggapan gas ideal bagi CO<sub>2</sub>, maka kecepatan perpindahan massa CO<sub>2</sub> ke dalam cairan, r<sub>A</sub>, adalah:

$$r_A = K_{Ga} [(P_A/H') - C_{AL}] \quad (5)$$



Gambar 1. Diagram perpindahan massa pereaksi dan reaksi dalam cairan

dengan: H' = HRT, cm<sup>3</sup> atm/mol.

II). Kecepatan perpindahan massa CaCO<sub>3</sub> padat ke dalam cairan (5), mempunyai bentuk:

$$r_M = k_c (C_{Ms} - C_M) \quad (6)$$

III). Reaksi yang terjadi dalam cairan (4) menurut persamaan 3, mempunyai kecepatan:

$$r_D = k_1 C_{AL} C_M - k_2 C_D \quad (7)$$

Zat pereaksi dalam cairan akan berkurang dengan adanya reaksi pembentukan hasil. Demikian pula jari-jari butir padat batu kapur berkurang akibat pelarutan dan reaksi. Dengan memperhatikan:

a) serbuk adalah padatan pejal berbentuk bola dengan ukuran serba sama sehingga jumlah butir per satuan volum suspensi adalah:

$$N = (Cb_p/\rho_p)/(4/3)\pi r_s^3 \quad (8)$$

b) reaksi dapat balik, dengan demikian:

$$K = k_1/k_2 \quad (9)$$

c) konsentrasi Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sebagai hasil, C<sub>D</sub>, dapat dinyatakan dengan konversi CaCO<sub>3</sub>, x<sub>p</sub>, dan konsentrasi awal CaCO<sub>3</sub>, C<sub>M0</sub>, yaitu:

$$C_D = C_{M0} x_p \quad (10)$$

d) tekanan gas CO<sub>2</sub> sepanjang kolom reaktor relatif tetap, sehingga cairan dianggap mengalami proses batch sambil berjalan. Oleh karena itu, dengan pendekatan Lagrange (Mikley, dkk.,1981) neraca bahan dalam cairan, adalah:

(kecepatan perpindahan massa)-(kecepatan bereaksi) = (kecepatan bahan terakumulasi).

Neraca untuk masing-masing bahan, yaitu:

(1) Neraca CO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O) dalam cairan, (2) Neraca CaCO<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O) dalam cairan, dan 3) Neraca

Neraca CaCO<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O) dalam padatan yang dicari berdasarkan: berkurangnya ukuran butir = kecepatan kelarutannya. Hasil penjabaran neraca bahan itu dan memperhatikan ketentuan yang ada di atas, melalui penyederhanaan dan pengaturan letak diperoleh:

$$-dr_c/dt = (k_c/\rho_M)(C_{Ms} - C_M) \quad (11)$$

$$dC_A/dt = K_{Ga}[(P_A/H') - C_A] - k_1(C_{AL}C_M - C_{M0}x_p/K) \quad (12)$$

$$dC_M/dt = k_c(C_{Ms} - C_M)(3r_c^2/r_s^3)N - k_1(C_{AL}C_M - C_{M0}x_p/K) \quad (13)$$

Persamaan-persamaan (11), (12), dan (13) merupakan persamaan differensial simultan yang dapat diselesaikan dengan metode Runge-Kutta (Mickley, dkk,1981). Pada saat awal, t=0, nilai awal C<sub>A</sub> = 0, C<sub>M</sub> = C<sub>M<sub>s</sub></sub>, r<sub>c</sub> = r<sub>s</sub>. Data yang dapat diperoleh

dari pustaka adalah konstante Henry (H') dan konsentrasi jenuh CaCO<sub>3</sub>, C<sub>M<sub>s</sub></sub>, sedangkan yang dicari dan dihitung adalah densitas padatan, ρ<sub>p</sub>, jari-jari awal butir, r<sub>s</sub>, dan jumlah butir per volum, N'. Besaran yang tidak diketahui adalah K<sub>Ga</sub>, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, dan K. Nilai-nilai konstante itu dicari dengan cara minimasi penyimpangan hasil hitungan dari data percobaan, yang dinyatakan dengan *Sum of Squares of Error* (SSE). Minimasi ini dijalankan secara numeris menurut Hooke-Jeeves (Beveridge and Schechter, 1970; Rudd and Watson,1968).

### Cara Penelitian

Penelitian menggunakan gas karbon dioksida dan serbuk batuan marmer yang disuspensikan dalam air. Kolom berdiameter 2,54 cm terbuat dari kaca dengan sekat miring dari plastik bekas tempat es.



Tinggi kolom aktif 150 cm dengan jumlah penghalang miring 34 buah. Penghalang ini berupa elips dengan sumbu pendek sama dengan diameter kolom dan sumbu panjang 5,0 cm. Elips-elips itu dipotong menjadi dua sepanjang sumbu pendek, dan selanjutnya sisi ini diiris bergerigi. Penghalang ini dipasang berselang seling. Rangkaian alat penelitian tersusun seperti gambar 1.

Suspensi dengan kadar batuan marmer dan diameter butir tertentu ditempatkan pada bagian atas kolom sebagai umpan. Suspensi itu juga dimasukkan dalam kolom dengan ketinggian tertentu. Gas karbon dioksida dialirkan melalui bagian bawah kolom dengan kecepatan alir yang diinginkan. Proses yang berjalan pada suhu dan tekanan tetap dihentikan setelah keadaan ajeg tercapai. Keadaan itu ditandai dengan konsentrasi hasil yang tetap, dilakukan dengan analisis hasil secara volumetri menggunakan larutan titripleks III (Merck. E).

**Hasil Dan Pembahasan**

Karbonatasi suspensi batu kapur dalam air dengan gas karbon dioksida membentuk kalsium bikarbonat dijalankan secara sinambung. Data yang diperoleh dikumpulkan setelah proses mencapai keadaan ajeg.

**Pengujian model**

Hasil perhitungan numeris selengkapnya tercantum dalam tabel 2 dan 3. Memperhatikan dalam tabel itu nilai kesalahan yang diperoleh pada konversi antara data dengan perhitungan berkisar antara 0,2 sampai 4%. Hal itu menunjukkan bahwa model yang digunakan sesuai untuk proses karbonatasi suspensi kalsium karbonat.

**Langkah pengendali**

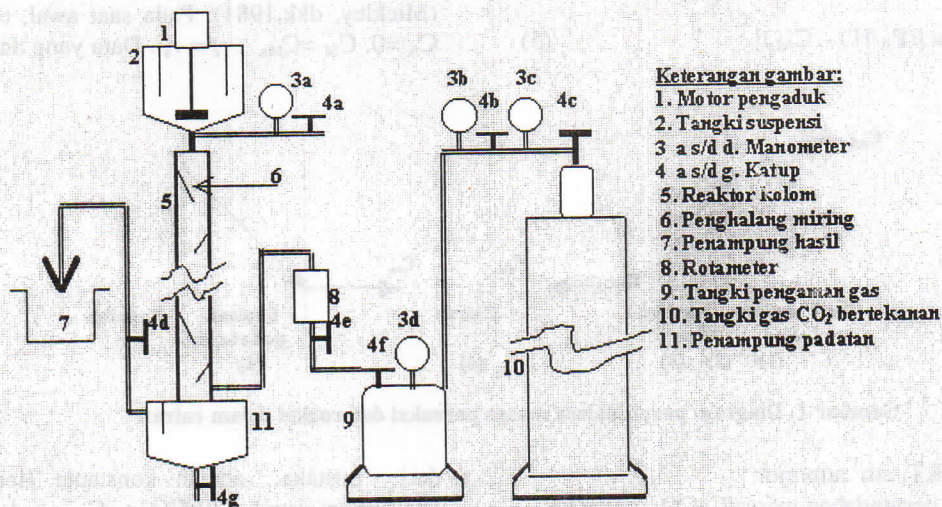
Hasil penelitian reaksi heterogen seperti yang telah dilakukan oleh Juvekar & Sharma (1973), Koch dkk.(1949), dan Onda dkk (1959) memperoleh hubungan tetapan perpindahan massa dengan kecepatan alir gas secara umum berbentuk:

$$K_G a = n G^z \tag{15}$$

Tabel 1. Pengaruh G terhadap V

G, mL/men	261	301	362	422	503	543	603	704	805
V, mL	428	423	411	402	390	386	381	372	362

Konstante z disebut dengan indeks Reynolds yang merupakan indikasi resim yang berperan (Johnstone and Thring, 1957). Pada penelitian ini, gas CO<sub>2</sub> relatif murni dan konstante Henry cukup besar,



- Keterangan gambar:**  
 1. Motor pengaduk  
 2. Tangki suspensi  
 3 a s/d d. Manometer  
 4 a s/d g. Katup  
 5. Reaktor kolom  
 6. Penghalang miring  
 7. Penampung hasil  
 8. Rotameter  
 9. Tangki pengaman gas  
 10. Tangki gas CO<sub>2</sub> bertekanan  
 11. Penampung padatan

Gambar 2. Susunan alat karbonatasi suspensi serbuk batuan marmer

**Waktu tinggal**

Suspensi dalam reaktor, t menit, ditentukan oleh kecepatan alir suspensi, L cm<sup>3</sup>/menit, dan volum suspensi yang tertinggal dalam reaktor, V cm<sup>3</sup>, sedangkan V tergantung pada G seperti yang terlihat dalam tabel 1. Persamaan waktu tinggal yang diperoleh adalah:

$$t = (990,72G^{-0.1497})/L \tag{14}$$

Konversi sangat dipengaruhi oleh waktu kontak antar bahan di dalam reaktor untuk bereaksi. Oleh karena itu, kecepatan alir suspensi, L cm /menit, selalu divariasi.

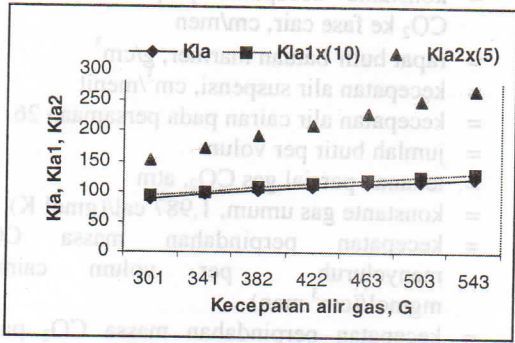
sehingga tahanan fase gas dapat diabaikan. Dengan demikian, nilai K<sub>G</sub> a = k<sub>L</sub> a. Hubungan ln k<sub>L</sub> a dengan ln G secara umum berbentuk linear, dalam hal ini diperoleh:

$$k_L a = 4,3509 G^{0.5276} \tag{16}$$

dengan penyimpangan 8,68%.

Suhu berpengaruh terhadap konstante Henry (Washburn,1926), dan juga mempengaruhi konsentrasi jenuh kalsium karbonat dalam air, C<sub>Ms</sub>, (Perry dan Chilton, 1973). Oleh karena itu, pada peningkatan suhu, nilai k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, K, k<sub>L</sub>a, dan k<sub>c</sub> yang terdapat dalam tabel 3 mengalami perubahan.





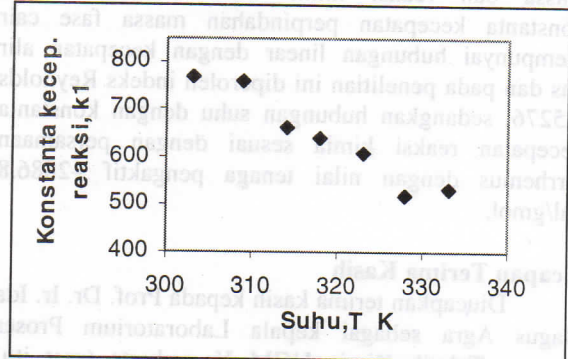
Gambar 3. Pengaruh G terhadap K<sub>L</sub>a penelitian sejenis

Hubungan k<sub>1</sub> dengan suhu terlukis pada gambar 3. Bentuk persamaan yang diperoleh menurut persamaan Arrhenius, yaitu:

$$k_1 = 6,5547 e^{-2886,8/RT} \quad (17)$$

dengan penyimpangan rerata 3,09%. Faktor frekuensi bernilai 6,5547 men<sup>-1</sup> dan tenaga pengaktif -2886,8 cal/gmol. Nilai negatif tenaga pengaktif itu berkaitan dengan daya larut CO<sub>2</sub> dan kesetabilan Ca(HCO<sub>2</sub>)<sub>3</sub> atau konsentrasi Ca(HCO<sub>2</sub>)<sub>3</sub> pada setiap saat yang makin turun, jika suhu bertambah. Nilai absolut tenaga pengaktif tidak besar (kurang dari 10000 cal/gmol), sehingga tidaklah dapat dikatakan reaksi kimia yang mengendali. Peningkatan suhu 10° memperkecil konstanta kecepatan reaksi yang jauh lebih kecil dua kalinya. Dengan begitu ternyata perubahan suhu 10° tidak dapat dipakai untuk menentukan bahwa reaksi kimia yang mengendali.

Dari kenyataan-kenyataan pada perubahan suhu 10 °C dan nilai tenaga pengaktif, yang diperkuat oleh indeks Reynolds, dapat disimpulkan bahwa perpindahan massa dan reaksi kimia sama-sama mengendalikan proses sesuai dengan hasil perhitungan secara numeris.



Gambar 4. Pengaruh suhu terhadap k<sub>1</sub>

Sebagai pembandingan penelitian terhadap sistem heterogen dalam memperoleh persamaan hubungan G dengan k<sub>L</sub>a (Gambar 2), Koch dkk (1949) memperoleh persamaan:

$$(k_{L1}a)_1 = 0,25 (L')^{0,96} \quad (18)$$

sedangkan Juvekar dan Sharma (1973) yang membuat kalsium karbonat yang menitik-beratkan mekanisme penyerapan gas CO<sub>2</sub> oleh suspensi kapur padam dalam air, memperoleh rumusan:

$$(k_{L1}a)_2 = 5,65 10^{-3} (G')^{0,58} \quad (19)$$

dan menyatakan reaksi kimia dan perpindahan massa mengendalikan bersama-sama.

Tabel 2. Pengaruh kecepatan alir gas (G) terhadap x<sub>p</sub>  
(kadar batu kapur 40 g/L, suhu 30,3°C, tekanan 1 atm)

G = 341 mL/menit			G = 382 mL/menit			G = 422 mL/menit			G = 462 mL/menit			G = 503 mL/menit		
No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung
21	11,30	2,109 / 2,084	31	11,11	2,209 / 2,202	42	11,03	2,238 / 2,221	49	10,87	2,439 / 2,418	60	10,66	2,668 / 2,661
22	13,32	2,180 / 2,184	32	13,20	2,195 / 2,304	43	12,06	2,310 / 2,293	50	11,83	2,467 / 2,479	61	12,62	2,740 / 2,763
23	14,63	2,223 / 2,233	33	14,45	2,353 / 2,348	44	13,35	2,367 / 2,369	51	13,70	2,553 / 2,573	62	13,30	2,797 / 2,790
24	17,26	2,281 / 2,303	34	16,84	2,410 / 2,409	45	16,60	2,467 / 2,503	52	16,46	2,668 / 2,664	63	16,13	2,883 / 2,867
25	24,73	2,381 / 2,303	35	24,43	2,474 / 2,489	46	23,92	2,611 / 2,643	53	23,58	2,769 / 2,765	64	23,39	2,926 / 2,937
26	29,59	2,410 / 2,410	36	28,73	2,496 / 2,505	47	28,63	2,682 / 2,675	54	27,88	2,797 / 2,785	65	26,89	2,955 / 2,947
k <sub>1</sub> = 111 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,71 K(10 <sup>-3</sup> ) = 1,57 K <sub>1</sub> a = 95,60 ; k <sub>c</sub> = 15,04			k <sub>1</sub> = 134 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,80 K(10 <sup>-3</sup> ) = 1,66 K <sub>1</sub> a = 97,40 ; k <sub>c</sub> = 15,06			k <sub>1</sub> = 134 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,77 K(10 <sup>-3</sup> ) = 1,73 K <sub>1</sub> a = 111,0 ; k <sub>c</sub> = 15,20			k <sub>1</sub> = 167 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,94 K(10 <sup>-3</sup> ) = 1,77 K <sub>1</sub> a = 100,0 ; k <sub>c</sub> = 15,10			k <sub>1</sub> = 199 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,99 K(10 <sup>-3</sup> ) = 2,00 K <sub>1</sub> a = 122,0 ; k <sub>c</sub> = 15,50		

Tabel 3. Pengaruh suhu terhadap x<sub>p</sub>

(kadar batu kapur 10 g/L, G 503 mL/menit, tekanan 1 atm)  
Waktu tinggal, t menit, dan konversi, x<sub>p</sub> 100%, pada suhu:

Suhu 30,3 K			Suhu 30,9 K			Suhu 31,4 K			Suhu 31,8 K			Suhu 31,4 K		
No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung	No. Perc.	t menit	x <sub>p</sub> 100% Data / Hitung
103	10,54	10,902 / 10,819	135	11,12	9,869 / 9,795	146	11,03	8,213 / 8,639	154	10,99	7,803 / 7,687	161	11,02	7,230 / 7,161
104	12,99	11,189 / 11,315	136	12,92	10,099 / 10,128	147	12,92	9,008 / 9,021	155	12,85	7,909 / 8,129	162	12,88	7,402 / 7,488
105	13,80	11,476 / 11,431	137	14,68	10,326 / 10,355	148	14,54	9,238 / 9,259	156	13,61	8,492 / 8,547	163	14,91	7,631 / 7,742
106	17,30	11,750 / 11,749	138	18,29	10,558 / 10,628	149	17,30	9,467 / 9,534	157	17,38	8,664 / 8,603	164	18,11	8,033 / 7,995
107	22,06	11,935 / 11,933	139	23,05	10,730 / 10,784	150	23,48	9,697 / 9,820	158	22,83	8,894 / 8,836	165	21,23	8,263 / 8,136
108	28,01	10,240 / 10,262	140	28,23	10,902 / 10,846	151	28,09	9,926 / 9,899	159	29,01	8,951 / 8,927	166	29,01	8,607 / 8,278
k <sub>1</sub> = 770 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,3990 K = 1930 K <sub>1</sub> a = 241 ; k <sub>c</sub> = 10,6			k <sub>1</sub> = 759 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,3847 K = 1923 K <sub>1</sub> a = 219 ; k <sub>c</sub> = 11,2			k <sub>1</sub> = 661 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,3524 K = 1875 K <sub>1</sub> a = 216 ; k <sub>c</sub> = 11,4			k <sub>1</sub> = 606 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,3316 K = 1827 K <sub>1</sub> a = 172 ; k <sub>c</sub> = 11,9			k <sub>1</sub> = 518 ; k <sub>1</sub> (10) = 0,2855 K = 1814 K <sub>1</sub> a = 113 ; k <sub>c</sub> = 12,7		



### Kesimpulan

Karbonatasi suspensi batuan marmer dalam air merupakan reaksi pembentukan kalsium bikarbonat adalah reaksi dapat balik dengan model reaksi terjadi dalam fase cair, yang dikendalikan oleh perpindahan massa dan reaksi kimia bersama-sama, dengan konstanta kecepatan perpindahan massa fase cair mempunyai hubungan linear dengan kecepatan alir gas dan pada penelitian ini diperoleh indeks Reynolds 0,5276, sedangkan hubungan suhu dengan konstanta kecepatan reaksi kimia sesuai dengan persamaan Arrhenius dengan nilai tenaga pengaktif -2886,8 cal/gmol.

### Ucapan Terima Kasih

Diucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Ida Bagus Agra sebagai kepala Laboratorium Proses Jurusan Teknik Kimia UGM Yogyakarta (saat itu) sekaligus sebagai pembimbing utama disertasi penulis, yang telah memberi ijin untuk melakukan penelitian ini dan atas arahan, saran, dan bimbingannya. Demikian pula ucapan ini ditujukan kepada Prof. Ir. Boma Wikan Tyoso, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Wahyudi Budi Sediawan, S.U., Ph.D. yang banyak membantu dalam pengembangan dan penyelesaian masalah dalam penelitian ini.

### Daftar Notasi

- A = luas bidang persentuhan padatan per satuan volum suspensi,  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$   
 $C_{AG}$  = konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada fase gas,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{AiG}$  = konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada tapal batas fase gas,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{AiL}$  = konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada tapal batas fase cair,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{AL}$  = konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada fase cair,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{bp}$  = kadar batuan marmer dalam suspensi, g/L  
 $C_D$  = konsentrasi  $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_3$ ,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_M$  = konsentrasi  $\text{CaCO}_3$  dalam cairan,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{M0}$  = konsentrasi  $\text{CaCO}_3$  padat dalam suspensi,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $C_{Ms}$  = konsentrasi jenuh  $\text{CaCO}_3$  dalam cairan,  $\text{mgmol}/\text{cm}^3$   
 $G$  = kecepatan alir gas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{cm}^3/\text{menit}$   
 $G'$  = kecepatan alir gas  $\text{CO}_2$  pada persamaan 19,  $\text{cm}^3/\text{s}$   
 $H$  = konstante Henry  
 $K$  = konstante keseimbangan reaksi,  $\text{cm}^3/\text{mgmol}$   
 $k_1$  = konstante kecepatan reaksi ke kanan,  $\text{cm}^3/(\text{mgmol men})$   
 $k_2$  = konstante kecepatan reaksi ke kiri,  $1/\text{menit}$   
 $k_c$  = konstante kecepatan perpindahan massa  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{cm}/\text{men}$   
 $K_G$  = konstante kecepatan perpindahan massa menyeluruh fase gas,  $\text{cm}/\text{men}$   
 $k_G$  = konstante kecepatan perpindahan massa  $\text{CO}_2$  fase gas,  $\text{cm}/\text{men}$

- $k_L$  = konstante kecepatan perpindahan massa  $\text{CO}_2$  ke fase cair,  $\text{cm}/\text{men}$   
 $\rho_p$  = rapat butir batuan marmer,  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $L$  = kecepatan alir suspensi,  $\text{cm}^3/\text{menit}$   
 $L'$  = kecepatan alir cairan pada persamaan 26.  
 $N$  = jumlah butir per volum  
 $P_A$  = tekanan parsial gas  $\text{CO}_2$ , atm  
 $R$  = konstante gas umum,  $1,987 \text{ cal}/(\text{gmol K})$   
 $r_A$  = kecepatan perpindahan massa  $\text{CO}_2$  menyeluruh per volum cairan,  $\text{mgmol}/(\text{cm}^3 \text{ men})$   
 $r_{AG}$  = kecepatan perpindahan massa  $\text{CO}_2$  pada lapisan gas per volum cairan,  $\text{mgmol}/(\text{cm}^3 \text{ men})$   
 $r_{AL}$  = kecepatan perpindahan massa  $\text{CO}_2$  pada lapisan cair per volum cairan,  $\text{mgmol}/(\text{cm}^3 \text{ men})$   
 $r_c$  = jari-jari butir awal, cm  
 $r_D$  = kecepatan reaksi pembentukan  $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_3$ ,  $\text{mgmol}/(\text{cm}^3 \text{ men})$   
 $r_M$  = kecepatan perpindahan massa  $\text{CaCO}_3$  padat ke dalam cairan per satuan luas butir,  $\text{mgmol}/(\text{cm}^2 \text{ men})$   
 $r_s$  = jari-jari butir setiap saat, cm  
 $T$  = suhu absolut, K  
 $V$  = volum,  $\text{cm}^3$   
 $x_p$  = konversi, bagian

### Daftar Pustaka

- Agra, I.B., (1981), "Pembuatan Natrium Bikarbonat dan Kalium Klorid dari Ekstrak Abu: *Disertasi*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Beveridge, G.G. and Schechter, R.S., (1970), "*Optimization: Theory and Practice*", pp. 385-389, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- Johnston, R.E. and Thring, M.W., (1957), "*Pilot Plants Models and Scale Up Methods in Chemical Engineering*", pp.66-71, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Juvekar, V.A and Sharma, M.M., (1973), "Absorbtion of  $\text{CO}_2$  in a Suspension of Lime", *Chem. Eng. Sci.*, 28, 825- 837.
- Koch, Jr., H.A., Stutzman, L.F., Blumm, H.A., and Hutchings, L.E., (1949), "Gas Absorbtion, Liquid Transfer Coefficients for The Carbon Dioxide Air Water System", *Chem. Eng. Progress*, 45, 677-682.
- Levenspiel, O., (1972), *Chemical Reaction Engineering*", 2ed., pp. 409-423, John Wiley & Sons, New York.
- Evans, R.L. and Clair, H.W.ST., (1949), "Carbonatation of Aqueous Suspensions Containing Magnesium Oxides or Hydroxides", *Ind. Eng. Chem.*, 41, 2814-2817
- Micley, H.S., Sherwood, T.S., and Reed, C.E., (1981), "*Applied Mathematics in Chemical*

*Engineering*", 2ed., pp. 163-200, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi.

Onda, K. Sada, E., and Murase, Y., (1959), "Liquid Side Mass Transfer Coefficients in Packed Towers", *A. I. Ch. E. Journal*, 5, 235-239.

Perry, R.H., and Chilton, C.H., (1973), "*Chemical Engineers' Handbook*", 5th ed., pp.3-11, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.

Rudd, D.F. and Watson, C.C., (1968), "*Strategy of Process Engineering*", pp.436-456, John Wiley & Sons, New York.

Shreve, R.N., (1967), "*Chemical Process Industries*", 3ed., pp. 174-189, International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.

Washburn, E.W., (1926), "*International Critical Tables Of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technonology*", Vol. I, pp. 363, McGraw-hill Book Company Inc., New York.

Westerterp, K.R., Van Swaaij, W.P., and Beenackers, A.A.C.M., (1984), "*Chemical Reactor Design and Operation*", pp. 6-19, John Wiley & Sons, Singapore.