



UNIVERSITAS INDONESIA

PENGARUH MEDAN MAGNET
PADA PRESIPITASI CaCO_3 DALAM AIR SADAH

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor bidang
ilmu Teknik Kimia

Nelson Saksono
84 050 000 7X

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK KIMIA
DEPOK
OKTOBER 2008

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Depok, 24 Oktober 2008



Nelson Saksono
NPM : 84 050 000 7X

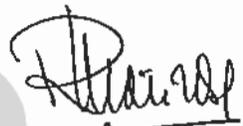
HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh

Nama : Nelson saksono
NPM : 84 050 000 7X
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Disertasi : Pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.

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

DEWAN PENGUJI

Promotor/Ketua penguji : Prof. Dr. Ir. Roeknijati W.S, M.Si ()

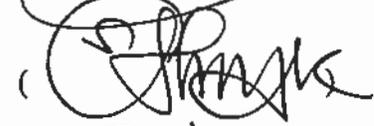
Ko-Promotor 1 : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA ()

Ko-Promotor 2 : Dr. Azwar Manaf, M.Met ()

Tim Penguji :

Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA (Anggota) ()

Dr. Ir. Bardi Murachman, DEA (Anggota) ()

Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng (Anggota) ()

Dr. Ir. Slamet, MT (Anggota) ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Oktober 2008

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Rabb semesta alam, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas penulisan disertasi dapat diselesaikan. Disertasi dengan Judul *Pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO₃ dalam air sadah* merupakan salah satu syarat dalam mengikuti program doktor dalam bidang Teknik Kimia FTUI.

Pada Kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Prof. Dr. Roekmijati Widaningroem Sumantojo M.Si selaku Promotor, Dr. Setijo Bismo, DEA dan Dr. Azwar Manaf, M.Met selaku Ko-promotor, serta ibu Elsa Krisanti PhD atas bimbingan dan arahan serta diskusinya selama penulis melakukan pengkajian, penelitian, dan penyusunan disertasi ini. Tak lupa penulis ucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Dr. Widodo W.P, DEA, Dr. Slamet, MT, Dr. Asep Handaya Saputra, M.Eng, Dr.Ing. Misri Gozan, M.Tech, dan Dr. rer.nat Yuswan Muharam, MT dari Departemen Teknik Kimia FTUI serta Dr. Bardi Murachman, DEA dari Teknik Kimia UGM atas diskusi dan kontribusinya yang sangat berarti dalam penyusunan disertasi ini.

Penulis mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya kepada pimpinan Departemen Teknik Kimia dan Fakultas Teknik UI beserta stafnya yang telah memberikan segala fasilitas yang kondusif, sehingga penulis dapat melakukan penelitian dan penulisan disertasi ini. Begitu pula ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Osaka Gas Fondation yang telah memberikan bantuan finansial atas penelitian ini dan semua pihak yang telah banyak membantu dalam penelitian ini. Akhirnya dengan segala keterbatasan yang mungkin ditemukan dalam laporan disertasi ini, penulis berharap saran dan kritik dari semua pihak, semoga laporan ini dapat bermanfaat.

Depok, Oktober 2008

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Nelson Saksono
NPM : 84 050 000 7X
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Disertasi

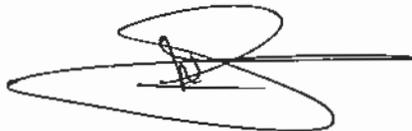
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan Disertasi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 24 Oktober 2008
Yang menyatakan



(Nelson Saksono)

ABSTRAK

Nama : Nelson Saksono
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.

Disertasi ini membahas perilaku presipitasi CaCO_3 dalam air sadah di bawah pengaruh medan magnet beserta aplikasinya dalam pengolahan air sadah dan pencegahan kerak. Penelitian ini merupakan eksperimen bersifat analitik kuantitatif dan disain konsep bersifat deskriptif. Hasil penelitian membuktikan bahwa magnetisasi air sadah mempengaruhi interaksi hidrat ion dan interaksi ion serta presipitasi CaCO_3 baik pada sistem fluida statik maupun dinamik. Magnetisasi larutan CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik meningkatkan presipitasi CaCO_3 dengan sifat deposit yang lebih mudah lepas dari dinding. Hasil tersebut dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem pengolahan air sadah dengan proses magnetisasi yang efektif dalam menurunkan kesadahan dan pencegahan kerak pada air sadah.

Kata kunci :
Magnetisasi air sadah, presipitasi CaCO_3 , pencegahan kerak

CaCO_3 precipitation mechanism in hard water under magnetic field and anti-scale magnetic water treatment were comprehensively discussed in this dissertation. These are carried out quantitatively by experiment and descriptive conceptual-design research. Results showed that hard water magnetization influences hydrate-ion and inter-ionic interactions as well as CaCO_3 precipitation occurring both in static and dynamic fluid systems. Magnetization of CaCO_3 solution increases CaCO_3 precipitation whose deposit formed is easily removed from wall. The results are expected to become scientific basis for the development of an effective anti-scale magnetic water treatment to reduce the hardness and prevent the scale formation in hard water.

Key words :
Magnetic water treatment, CaCO_3 precipitation, scale prevention

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	i
PENGESAHAN	ii
UCAPAN TERIMA KASIH	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN	xvii
DAFTAR ISTILAH	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
RINGKASAN	xx
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Hipotesis	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN TEORI	6
2.1. Mekanisme pembentukan partikel CaCO_3 tanpa medan magnet	6
2.1.1 Reaksi kesetimbangan dan aspek termodinamik pembentukan partikel CaCO_3	6
2.1.2 Mekanisme presipitasi dan terbentuknya kristal CaCO_3 dalam larutan	8
2.1.3 Mekanisme terbentuknya kristal CaCO_3 pada deposit	11
2.1.4 Pengaruh hidrodinamika fluida terhadap proses pembentukan CaCO_3	12
2.1.5 Pengaruh suhu larutan pada pembentukan deposit CaCO_3	13
2.2. Pembentukan partikel CaCO_3 dalam medan magnet.	14
2.2.1 Sistem fluida statik dan dinamik	14
2.2.2 Interaksi antar partikel pada sistem koloid	15
2.2.3 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik	16
2.2.4 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik	18
2.2.5 Efek interaksi ion pada sistem fluida statik	18
2.2.6 Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik	19
2.2.7 Pembentukan kristal CaCO_3	23
2.2.8 Pengaruh suhu dan parameter pH	24
2.2.9 Orientasi magnet	26

2.3. Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan elektrolit	27
2.3.1 Konduktivitas dan sifat-sifat ion dalam larutan	26
2.3.2 Konduktivitas larutan elektrolit di bawah pengaruh medan magnet	29
BAB III. KERANGKA PEMIKIRAN	31
3.1 Dasar pemikiran	31
3.2 Metode dan ruang lingkup penelitian	35
3.2.1 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik	35
3.2.2 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik	35
3.2.3 Efek interaksi ion pada sistem fluida statik	36
3.2.4 Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik dan uji efektivitas tahapan proses sistem AMT	36
3.3 Tahapan Penelitian	37
3.3.1 Tahap I : Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik	37
3.3.2 Tahap II : Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik	38
3.3.3 Tahap III : Efek interaksi ion pada sistem fluida statik	40
3.3.4 Tahap IV: Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik dan uji efektivitas AMT	41
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida statik	43
4.1.1 Pengaruh medan magnet terhadap konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dan presipitasi CaCO_3	43
4.1.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3	47
4.1.2.1 Pengaruh waktu magnetisasi pada presipitasi CaCO_3	47
4.1.2.2 Pengaruh kuat medan magnet dan suhu pada presipitasi CaCO_3	51
4.1.2.3 Pengaruh konsentrasi dan waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 pada presipitasi CaCO_3	53
4.1.3 Sifat dan morfologi deposit CaCO_3	55
4.2 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik	57
4.2.1 Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3	57
4.2.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3	59
4.2.2.1 Pengaruh suhu dan konsentrasi larutan pada presipitasi CaCO_3	59
4.2.2.2 Pengaruh kecepatan alir, panjang magnet, dan waktu sirkulasi pada presipitasi CaCO_3	61
4.2.2.3 Pengaruh waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3	64
4.2.3 Morfologi dan sifat deposit CaCO_3	65
4.2.4 Kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi sistem fluida statik dan dinamik	67
4.2.4.1 Model persamaan kinetika empiris	67
4.2.4.2 Persamaan kinetika sistem fluida statik	68
4.2.4.3 Persamaan kinetika sistem fluida dinamik	72

4.3 Pengaruh medan magnet terhadap interaksi ion dan presipitasi CaCO_3 pada larutan CaCO_3 dengan sistem fluida statik	77
4.3.1 Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi	77
4.3.2 Morfologi dan sifat deposit larutan CaCO_3	79
4.3.3 Pengaruh medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.	81
4.4 Pengaruh medan magnet pada interaksi ion dan presipitasi CaCO_3 pada larutan CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik	82
4.4.1 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi	83
4.4.1.1 Pengaruh pH larutan	83
4.4.1.2 Pengaruh kecepatan alir larutan.	84
4.4.1.3 Pengaruh kuat medan, waktu magnetisasi, dan panjang magnet.	86
4.4.1.4 Pengaruh konsentrasi sampel	89
4.4.1.5 Pengaruh volume sampel.	90
4.4.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi	92
4.4.2.1 Pengaruh kuat medan magnet	92
4.4.2.2 Pengaruh kecepatan alir	95
4.4.2.3 Morfologi dan sifat deposit	95
4.4.3 Model laju presipitasi CaCO_3	98
4.4.3.1 Persamaan laju presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida sirkulasi	98
4.4.3.2 Regresi data variabel proses sebagai fungsi $\ln(K_2)$ untuk mendapatkan nilai a dan b	101
4.4.3.3 Kurva hasil perhitungan menggunakan model persamaan laju presipitasi CaCO_3	103
4.4.3.4 Perhitungan waktu efektif magnetisasi dan penurunan Ca/Ca_i .	107
4.5 Rangkuman hasil percobaan pengaruh magnetisasi Pada presipitasi CaCO_3 dalam larutan air sadah	116
4.6 Konsep sistem AMT penurun kesadahan air dan pencegahan kerak	117
4.6.1 Proses magnetisasi larutan air sadah dengan sistem sirkulasi fluida dinamik	117
4.6.2 Proses agitasi mekanik dengan aliran sirkulasi pada larutan air sadah	118
4.6.3 Proses pengendapan.	118
6.6.4 Konfigurasi sistem AMT	119
6.6.4.1 Sistem AMT 1	119
6.6.4.2 Sistem AMT 2	120
4.7 Presipitasi CaCO_3 pada air sadah alam	122
BAB V. KESIMPULAN	124
DAFTAR ACUAN	126
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	130
LAMPIRAN	132

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1.	Efek perubahan pH terhadap Fraksi CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} dalam larutan 8
Gambar 2.2.	a) Kurva Log IAP ($\log [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$) dan deposit CaCO_3 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) b) kurva persen komposisi Kristal ACC, Vaterit, Kalsit dalam larutan sebagai fungsi waktu pada suhu 25°C 9
Gambar 2.3.	c) Persen pembentukan pearlite pada proses transformasi isothermal Tahapan pembentukan kristal CaCO_3 dalam larutan pada berbagai suhu 10
Gambar 2.4.	Gambar SEM pada permukaan logam emas untuk presipitasi CaCO_3 selama (a) 8 menit dan (b) 1,5 jam 11
Gambar 2.5.	Analisis SEM dari deposit CaCO_3 pada permukaan logam emas pada kondisi larutan : 120 ppm Ca^{2+} , 25°C dan laju alir 300 mL/min untuk (a) Deposit 7 menit presipitasi: kristal vaterit, (b) Deposit 25 menit presipitasi : vaterit & kalsit 12
Gambar 2.6.	Orientasi molekul air terhadap ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah 13
Gambar 2.7.	Foto SEM pada permukaan deposit CaCO_3 pada suhu 50°C dan 14 menit presipitasi di deposit : kristal Aragonit 14
Gambar 2.8.	Model kurva energi interaksi pada dua partikel dalam sistem larutan koloid meta-stabil 16
Gambar 2.9.	Absorbansi campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 (a) sampel Na_2CO_3 non-magnetisasi, (b) sampel Na_2CO_3 termagnetisasi 18
Gambar 2.10.	Absorbansi campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan sistem fluida dinamik 19
Gambar 2.11.	Pengaruh magnetisasi terhadap proses nukleasi dan presipitasi partikel CaCO_3 melalui pengamatan turbiditas sebagai fungsi waktu 20
Gambar 2.12.	Rasio penurunan ion Ca sesudah magnetisasi (Ca^{++}) dan sebelum magnetisasi (Ca_i^{++}) di larutan pada proses magnetisasi larutan CaCO_3 pada berbagai kecepatan alir larutan 21
Gambar 2.13.	Waktu induksi t_{ind} vs laju alir pada pH awal yang berbeda 22
Gambar 2.14.	Rasio presipitasi total CaCO_3 pada berbagai laju alir dan pH awal larutan untuk waktu presipitasi 90 menit dan konsentrasi ion Ca^{2+} mula-mula 200 ppm 22
Gambar 2.15.	Analisis SEM pembentukan kristal CaCO_3 dari larutan CaCO_3 : a) sampel non-magnetisasi dan b) sampel termagnetisasi 24
Gambar 2.16.	Perubahan pH fungsi waktu pada proses presipitasi CaCO_3 untuk larutan Na_2CO_3 termagnetisasi (MF) dan non-magnetisasi (no MF) pada suhu 20°C . 25
Gambar 2.17.	Perubahan pH fungsi waktu pada proses presipitasi CaCO_3 untuk larutan termagnetisasi (M1, M3, M5) dan non-magnetisasi (NM1, NM3, NM5) 25
Gambar 2.18 a	Paralel flow 26
Gambar 2.18 b	Orthogonal 26
Gambar 2.19.	Susunan inversi dan non inversi 26
Gambar 2.20.	Pergerakan ion-ion di dalam larutan elektrolit yang diberikan plat elektroda dan tegangan listrik 27
Gambar 2.21.	Pengaruh suhu dan konsentrasi terhadap konduktivitas Na_2SeO_3 (1) dan K_2TeO_3 (2) 28
Gambar 2.22.	Jenis interaksi molekul air disekitar ion 28

Gambar 2.23.	Kurva kenaikan konduktivitas ($\Delta\kappa$) fungsi waktu dari larutan elektrolit KCl, NaCl, Na_3PO_4 dan CaCl_2 sebagai pengaruh medan magnet pada konsentrasi 0.1 M dan suhu 20 °C	30
Gambar 2.24.	Kurva kenaikan konduktivitas larutan sebagai fungsi ($\Delta r/r$). $\Delta_{\text{hyd}}G$ dan ($\Delta r/r$). $\Delta_{\text{hyd}}H$ pada larutan elektrolit dengan konsentrasi 0.1 M setelah 3 menit dan 31 menit proses magnetisasi	30
Gambar 3.1.	Kerangka berfikir pengembangan sistem AMT yang efektif melalui pemahaman efek interaksi hidrat ion dan interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi	31
Gambar 3.2.	Skema proses sistem AMT pencegahan kerak	33
Gambar 3.3.	Skema diagram alir penelitian	34
Gambar 3.4.	Skema proses pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik	37
Gambar 3.5.	Skema proses pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik	39
Gambar 3.6.	Skema proses pengujian efek interaksi ion pada Sistem Fluida statik.	40
Gambar 3.7.	Skema proses pengujian efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik	42
Gambar 4.1.	Konduktivitas larutan 0.01 M Na_2CO_3 dan 0.01 M CaCl_2 setelah proses magnetisasi. Waktu magnetisasi larutan (t_m) dilakukan selama 30 menit dengan kuat medan (B) : 5,2 kG dan T : 28 °C	44
Gambar 4.2.	Kurva presipitasi total CaCO_3 untuk : (♦) magnetisasi larutan Na_2CO_3 . (□) magnetisasi larutan CaCl_2 . dan (X) tanpa perlakuan magnetisasi. Waktu magnetisasi t_m : 30 menit, kuat medan B : 5,2 kG, dan T : 28 °C	45
Gambar 4.3.	Kurva konduktivitas larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dan tanpa magnetisasi pada berbagai suhu. t_m : 30 menit dan B : 5,2 kG	46
Gambar 4.4.	Persen presipitasi total CaCO_3 pada berbagai waktu magnetisasi Na_2CO_3 pada kuat medan 5,2 kG dan T : 28 °C	48
Gambar 4.5.	Persen deposit CaCO_3 pada berbagai waktu magnetisasi Na_2CO_3 untuk kuat medan 5,2 kG dan T : 28 °C	49
Gambar 4.6.	Persen presipitasi CaCO_3 di larutan pada berbagai waktu magnetisasi Na_2CO_3 untuk B : 5,2 kG dan T : 28 °C	50
Gambar 4.7.	Persen presipitasi total CaCO_3 fungsi kuat medan pada waktu magnetisasi larutan Na_2CO_3 30 menit. dan T : 28 °C	51
Gambar 4.8.	Pengaruh suhu pada presipitasi total CaCO_3 untuk sampel tanpa magnetisasi (NMS) dan sampel termagnetisasi (MS) dengan waktu magnetisasi Na_2CO_3 30 menit dan kuat medan 5,2 kG	52
Gambar 4.9.	Pengaruh konsentrasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada persen presipitasi total CaCO_3 . Waktu magnetisasi Na_2CO_3 30 menit pada B : 5,2 kG dan T : 28 °C	53
Gambar 4.10.	Kurva presipitasi total CaCO_3 untuk waktu presipitasi 120 menit sebagai fungsi waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 termagnetisasi. Waktu magnetisasi 30 menit, dengan B : 5,2 kG dan T : 28 °C	54
Gambar 4.11.	Hasil uji SEM deposit CaCO_3 selama 120 menit presipitasi: (a) Sampel non-magnetisasi perbesaran 3000 X; (b) sampel termagnetisasi perbesaran 3000 X; Waktu magnetisasi 30 menit dan T : 28 °C	55
Gambar 4.12	Analisis XRD deposit kristal CaCO_3 pada 120 menit Presipitasi dan T : 28 °C: (a) non-magnetisasi ; (b) termagnetisasi dengan t_m : 30 menit dan B : 5,2 kG	56

Gambar 4.13.	Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 untuk sampel termagnetisasi (M) dan non-magnetisasi (NM) pada sistem fluida statik dan fluida dinamik.	57
Gambar 4.14.	Kurva presipitasi total CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada sistem fluida statik dan fluida dinamik untuk sampel dimagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM). Fluida dinamik dilakukan pada $v : 0,554 \text{ m/s}$ dan $t_s : 10 \text{ menit}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	58
Gambar 4.15.	Efek suhu pada presipitasi total CaCO_3 untuk sampel Na_2CO_3 termagnetisasi (MD) dan non-magnetisasi (NMD) pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, waktu sirkulasi $t_s : 10 \text{ menit}$, panjang magnet $L_m : 0,35 \text{ m}$, dan $B : 5,2 \text{ kG}$	59
Gambar 4.16.	Efek konsentrasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada presipitasi total CaCO_3 ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	60
Gambar 4.17.	Efek kecepatan alir pada presipitasi total CaCO_3 untuk sampel non-magnetisasi (NM) dan sampel termagnetisasi (M) pada $t_s : 5 \text{ menit}$. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	62
Gambar 4.18.	Efek waktu sirkulasi pada presipitasi total CaCO_3 ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	63
Gambar 4.19.	Efek panjang magnet pada presipitasi total CaCO_3 . Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	64
Gambar 4.20.	Efek Waktu penyimpanan pada larutan Na_2CO_3 termagnetisasi terhadap presipitasi total CaCO_3 . Sistem fluida dinamik dilakukan pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$; $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	65
Gambar 4.21.a	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 selama 120 menit presipitasi suhu $28 \text{ }^\circ\text{C}$ Pembesaran 500 X dimana larutan Na_2CO_3 tanpa magnetisasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, dan $t_s : 10 \text{ menit}$.	67
Gambar 4.21.b	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 selama 120 menit suhu $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Pembesaran 500 X dimana Na_2CO_3 tanpa magnetisasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $L_m : 0,35 \text{ m}$	67
Gambar 4.22.	Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/1-Y)$ terhadap $\ln(t)$ untuk sampel non magnetisasi (NMS) dan sampel termagnetisasi (MS) pada sistem fluida statik dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $t_m : 30 \text{ menit}$	68
Gambar 4.23.	Kurva persamaan linier $\ln k$ terhadap $1/RT$ pada sampel non-magnetisasi dan sampel termagnetisasi dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $t_m : 30 \text{ menit}$	69
Gambar 4.24.	Kurva fraksi CaCO_3 terbentuk (Y) hasil perhitungan dan data percobaan untuk sampel non-magnetisasi statik (NMS) dan sampel termagnetisasi statik (MS) pada $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $t_m : 30 \text{ menit}$	70
Gambar 4.25.	Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/1-Y)$ terhadap $\ln t$ untuk sampel non magnetisasi (NMD) dan sampel termagnetisasi (MD) pada berbagai suhu presipitasi.dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $L_m : 0,3 \text{ m}$	73

Gambar 4.26.	Kurva fraksi CaCO_3 terbentuk (Y) hasil perhitungan dan data percobaan untuk sampel non-magnetisasi dinamik (NMD) dan sampel termagnetisasi dinamik (MD) pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10$ menit, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$	74
Gambar 4.27.	Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 di bawah pengaruh medan magnet dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.	78
Gambar 4.28.	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 selama 24 jam presipitasi tanpa magnetisasi pada pH awal larutan CaCO_3 sebesar 8,5 dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	80
Gambar 4.29.	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 selama 24 jam presipitasi dengan magnetisasi pada pH awal larutan CaCO_3 sebesar 8,5 dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	80
Gambar 4.30.	Pengaruh medan magnet pada presipitasi total CaCO_3 selama 2 jam magnetisasi dan dilanjutkan 2 jam presipitasi pada pH larutan CaCO_3 7,5 dan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.	81
Gambar 4.31.	Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan CaCO_3 setelah 2 jam dimagnetisasi untuk pH larutan CaCO_3 sebesar 7,5 dan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	82
Gambar 4.32.	Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 ($B : 5,2 \text{ kG}$, panjang magnet (L_m) 0,35 m, Kecepatan alir (v) : 0,554 m/s, konsentrasi awal CaCO_3 (Ca_i) 0,004 M, volume sampel (V) 240 mL dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	83
Gambar 4.33.	Presipitasi total CaCO_3 dan pH larutan ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	84
Gambar 4.34.	Pengaruh kecepatan alir terhadap presipitasi total CaCO_3 ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	85
Gambar 4.35.	Pengaruh kuat medan terhadap presipitasi total CaCO_3 (L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	86
Gambar 4.36.	Pengaruh waktu magnetisasi terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	87
Gambar 4.37.	Pengaruh panjang magnet terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	89
Gambar 4.38.	Pengaruh konsentrasi sampel terhadap presipitasi total CaCO_3 ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	90
Gambar 4.39.	Pengaruh volume sampel terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	91
Gambar 4.40.	Pengaruh kuat medan magnet terhadap presipitasi total CaCO_3 ($t_s : 10$ menit, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	93
Gambar 4.41.	Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan CaCO_3 setelah 10 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	94
Gambar 4.42.	Pengaruh kecepatan alir larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 ($t_s : 10$ menit; $B : 5,2 \text{ kG}$, L_m 0,35 m, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	95

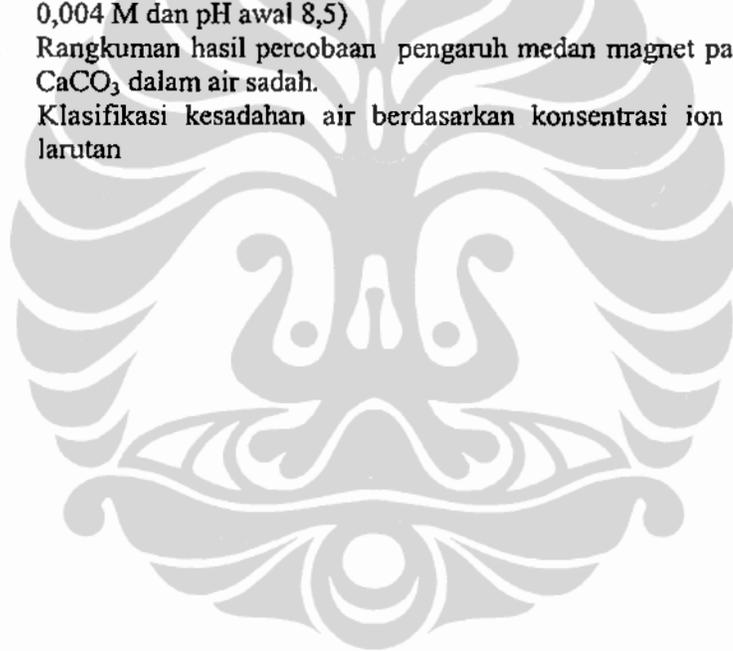
Gambar 4.43.a	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 termagnetisasi selama 24 jam presipitasi (t_s : 10 menit. v : 0,554 m/s, pH awal larutan sebesar 6,4, Ca_i : 0,004 M, dan T : 28 °C, B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m)	96
Gambar 4.43.b	Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 non-magnetisasi selama 24 jam presipitasi dengan t_s : 10 menit. (v : 0,554 m/s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C)	96
Gambar 4.44.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ hasil simulasi dan data percobaan pada berbagai kecepatan alir larutan untuk kondisi B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, Ca_i : 0,004 M. dan V : 240 mL	104
Gambar 4.45.	Kurva $a'(\text{Ca}_i)$ dan $b'(\text{Ca}_i)$ hasil dilatasi dari kurva $a(\text{Ca}_i)$ dan $b(\text{Ca}_i)$	105
Gambar 4.46.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ pada $v = 0,792$ m/s ; $\text{Ca}_i = 0,002$ M hasil simulasi dibandingkan dengan data Kurva percobaan (B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m, V : 240 mL)	106
Gambar 4.47.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai kecepatan alir larutan (B : 5,2 kG, Ca_i 0,002 M , L_m 0,35 m, V : 240 mL dan pH awal 8,5)	108
Gambar 4.48	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai kuat medan (Ca_i 0,004 M , L_m 0,35 m, v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)	109
Gambar 4.49.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ terhadap waktu sirkulasi hasil simulasi pada berbagai panjang magnet (B : 5,2 kG, Ca_i 0,004 M , v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)	110
Gambar 4.50.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai konsentrasi Ca_i (B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m, v : 0,554 m/s, dan V : 240 mL)	112
Gambar 4.51.	Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai volume sampel (B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m, v : 0,554 m/s, dan Ca_i : 0,004 M).	112
Gambar 4.52.	Kurva regresi linier $\Delta(C_p/C_{ai})_{ef}$ terhadap persen kenaikan kecepatan alir (v), kuat medan (B), dan konsentrasi sampel (Ca_i).	114
Gambar 4.53.	Kurva persen kenaikan presipitasi relatif (sumbu y) terhadap harga $\Delta(C_p/C_{ai})_{ef}$ (sumbu x) hasil regresi	115
Gambar 4.54.	Skema proses Konsep sistem AMT 1 untuk umpan dengan supersaturasi tinggi	120
Gambar 4.55.	Skema proses Konsep sistem AMT 2 untuk umpan dengan supersaturasi rendah	121

DAFTAR TABEL

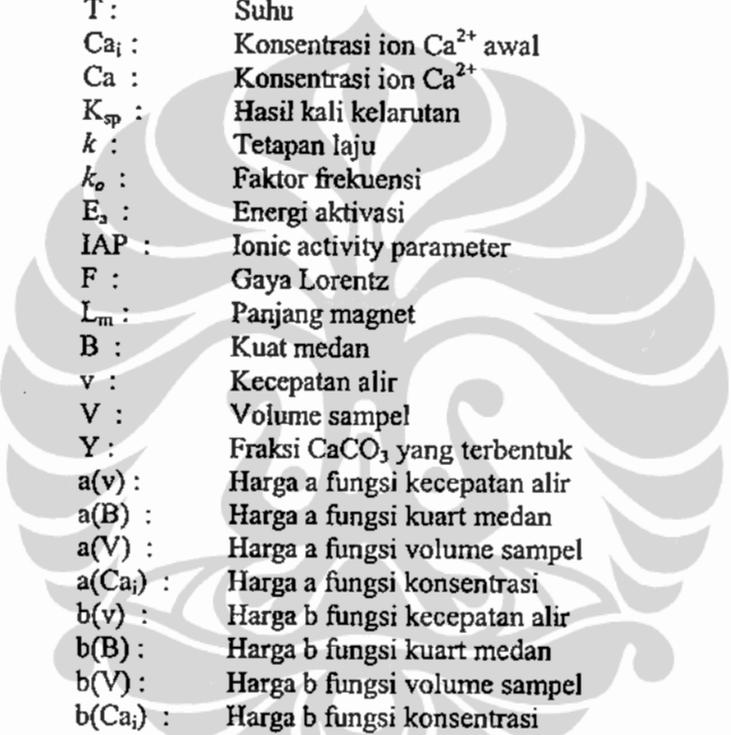
	Halaman
Tabel 2.1. Nilai supersaturasi (δ_s) pada beberapa tingkat kesadahan dan pH pada suhu 25 °C	7
Tabel 2.2. Data Termodinamik Reaksi Pembentukan CaCO ₃	8
Tabel 2.3. Waktu nukleasi (t_n) dan waktu pembentukan kerak (t_s), pada berbagai kecepatan alir	21
Tabel 2.4. Energi interaksi pasangan ion-ion, ion-molekul dan molekul-molekul	29
Tabel 4.1. Radius (r), ketebalan hidrat ion, radius hidrat ion ($r + \Delta r$), Energi Gibbs hidrasi ($\Delta G_{Hydration}$), Entalpi hidrasi ($\Delta H_{Hydration}$), dan Entropi hidrasi ($\Delta S_{Hydration}$) pada beberap jenis ion dan molekul	44
Tabel 4.2. Persen presipitasi CaCO ₃ di fasa cair (larutan) dan deposit. Magnetisasi 30 menit dan kuat medan 5,2 kG T : 28 °C	50
Tabel 4.3. Pengaruh suhu presipitasi terhadap penurunan persen presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. Waktu magnetisasi Na ₂ CO ₃ 30 menit dan B : 5,2 kG.	52
Tabel 4.4. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap penurunan persen presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. Waktu magnetisasi Na ₂ CO ₃ 30 menit pada B : 5,2 kG dan T : 28 °C	54
Tabel 4.5. Presipitasi CaCO ₃ di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO ₃ untuk 120 menit presipitasi pada Waktu magnetisasi 30 menit. B : 5,2 kG dan T : 28 °C	55
Tabel 4.6. Pengaruh suhu presipitasi terhadap penurunan presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. v : 0,554 m/s dan waktu sirkulasi t_s : 10 menit, panjang magnet L_m : 0,35 m, dan B : 5,2 kG	60
Tabel 4.7. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap kenaikan presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na ₂ CO ₃ (v : 0,554 m/s, t_s : 10 menit, L_m : 0,35 m, B : 5,2 kG dan T : 28 °C)	61
Tabel 4.8. Pengaruh kecepatan alir terhadap kenaikan presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na ₂ CO ₃ dengan 5,2 kG dan L_m : 0,35 m. T : 28 °C	62
Tabel 4.9. Pengaruh waktu sirkulasi terhadap kenaikan presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na ₂ CO ₃ dengan v : 0,554 m/s, L_m : 0,35 m B ; 5,2 kG dan T : 28 °C.	63
Tabel 4.10. Pembentukan CaCO ₃ di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO ₃ pada 120 menit presipitasi dengan v : 0,554 m/s, B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m dan T : 28 °C	65
Tabel 4.11. Nilai tetapan laju presipitasi CaCO ₃ (k), faktor frekuensi tumbukan (k_o), dan Energi aktivasi pembentukan CaCO ₃ (E_a) untuk sampel termagnetisasi (MS) dan non-magnetisasi (NMS) pada sistem fluida statik dengan B : 5,2 kG dan T_m : 30 menit.	69
Tabel 4.12. Harga tetapan laju k pada berbagai kuat medan dengan Waktu magnetisasi 30 menit dan T : 28 °C	71
Tabel 4.13. Harga tetapan laju k pada berbagai waktu magnetisasi dengan B : 5,2 kG dan T : 28 °C	71
Tabel 4.14. Harga tetapan laju k pada berbagai konsentrasi sampel larutan dengan B : 5,2 kG, t_m : 30 menit dan T : 28 °C	72

Tabel 4.15.	Nilai tetapan laju presipitasi CaCO_3 (k), faktor frekuensi tumbukan (k_o), dan energi aktivasi pembentukan CaCO_3 (E_a) untuk sampel termagnetisasi (MD) dan non-magnetisasi (NMDS) pada sistem fluida dinamik dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $t_s : 10 \text{ menit}$ dan $v : 0,554 \text{ m/s}$	73
Tabel 4.16.	Harga tetapan laju k pada berbagai kecepatan alir sampel larutan dengan $t_s : 5 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Tabel 4.17.	Harga tetapan laju k pada berbagai waktu sirkulasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Tabel 4.18.	Harga tetapan laju k pada berbagai konsentrasi sampel dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$	76
Tabel 4.19.	Harga supersaturasi (δ_s) larutan CaCO_3 pada berbagai pH	77
Tabel 4.20.	Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 pada 1440 menit magnetisasi dan presipitasi	78
Tabel 4.21.	Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 1440 menit magnetisasi dan presipitasi.	79
Tabel 4.22.	Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 terhadap kenaikan kecepatan alir pada 120 menit sirkulasi. ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	85
Tabel 4.23.	Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 terhadap kenaikan kuat medan pada 120 menit sirkulasi. ($L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	86
Tabel 4.24.	Pengaruh waktu magnetisasi terhadap presipitasi total CaCO_3 ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	87
Tabel 4.25.	Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 pada berbagai konsentrasi sampel CaCO_3 . ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	90
Tabel 4.26.	Jumlah sirkulasi yang dialami sampel selama 120 menit sirkulasi	91
Tabel 4.27.	Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 pada berbagai volume sampel ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	93
Tabel 4.28.	Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 96 jam presipitasi dari larutan CaCO_3 tersirkulasi pada berbagai kuat medan ($t_s : 10 \text{ menit}$, ($L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).	97
Tabel 4.29.	Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 96 jam presipitasi dari larutan CaCO_3 tersirkulasi pada berbagai kecepatan alir ($t_s : 10 \text{ menit}$, ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	98
Tabel 4.30.	Nilai a dan b hasil regresi data presipitasi CaCO_3 pada berbagai variabel proses	101
Tabel 4.31a	Nilai a dan b sebagai fungsi persamaan berbagai variabel proses untuk sampel termagnetisasi	102
Tabel 4.31b	Nilai a dan b sebagai fungsi persamaan berbagai variabel proses untuk sampel non-magnetisasi	102
Tabel 4.32.	Hasil simulasi presipitasi CaCO_3 sebagai Ca/Ca_i untuk kondisi $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,262 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, dan $V : 240 \text{ mL}$.	103
Tabel 4.33.	Hasil simulasi presipitasi CaCO_3 sebagai Ca/Ca_i selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, $\text{Ca}_i : 0,002 \text{ M}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,792 \text{ m/s}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)	106

Tabel 4.34.	Persen rasio dilatasi a dan b pada berbagai variabel proses terhadap harga a dan b acuan untuk sampel termagnetisasi dalam rentang data percobaan	107
Tabel 4.35.	Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan penurunan C_a/C_{ai} efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) pada berbagai kecepatan alir ($B : 5,2 \text{ kG}$, $C_{ai} 0,004 \text{ M}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)	109
Tabel 4.36.	Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) pada berbagai kuat medan ($C_{ai} 0,004 \text{ M}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)	110
Tabel 4.37.	Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) pada berbagai panjang magnet ($C_{ai} 0,004 \text{ M}$, $B: 5,2 \text{ kG}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)	111
Tabel 4.38.	Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) pada berbagai konsentrasi sampel ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)	111
Tabel 4.39.	Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) pada berbagai volume sampel ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $C_{ai} : 0,004 \text{ M}$ dan pH awal 8,5)	113
Tabel 4.40.	Rangkuman hasil percobaan pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.	116
Tabel 4.41.	Klasifikasi kesadahan air berdasarkan konsentrasi ion Ca^{2+} dalam larutan	122



DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN



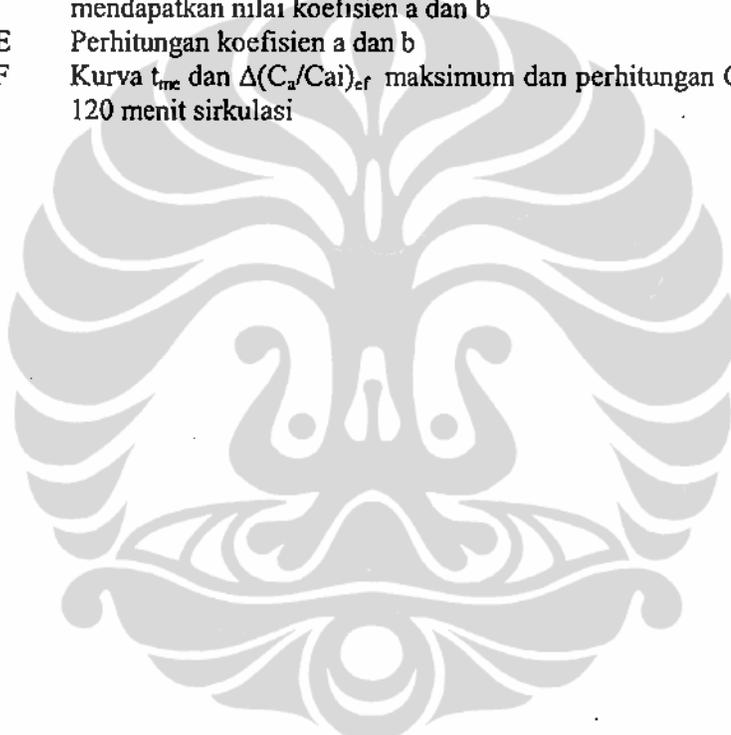
δ_s :	Supersaturasi larutan
t_m :	Waktu sampel termagnetisasi
t_{me} :	Waktu efektif magnetisasi
t_s :	Waktu sirkulasi
t_{se} :	Waktu sirkulasi magnetisasi efektif
T :	Suhu
Ca_i :	Konsentrasi ion Ca^{2+} awal
Ca :	Konsentrasi ion Ca^{2+}
K_{sp} :	Hasil kali kelarutan
k :	Tetapan laju
k_o :	Faktor frekuensi
E_a :	Energi aktivasi
IAP :	Ionic activity parameter
F :	Gaya Lorentz
L_m :	Panjang magnet
B :	Kuat medan
v :	Kecepatan alir
V :	Volume sampel
Y :	Fraksi $CaCO_3$ yang terbentuk
$a(v)$:	Harga a fungsi kecepatan alir
$a(B)$:	Harga a fungsi kuat medan
$a(V)$:	Harga a fungsi volume sampel
$a(Ca_i)$:	Harga a fungsi konsentrasi
$b(v)$:	Harga b fungsi kecepatan alir
$b(B)$:	Harga b fungsi kuat medan
$b(V)$:	Harga b fungsi volume sampel
$b(Ca_i)$:	Harga b fungsi konsentrasi
Y :	Fraksi pembentukan $CaCO_3$
t :	Waktu presipitasi
kG :	kilo Gauss
NM :	Sampel non-magnetisasi
NMS :	Sampel non magnetisasi fluida statik
NMD :	Sampel non magnetisasi fluida dinamik
M :	Sampel termagnetisasi
MS :	Sampel termagnetisasi fluida statik
MD :	Sampel termagnetisasi fluida dinamik

DAFTAR ISTILAH

AMT :	<i>Anti-scale magnetic treatment</i> : Magnetisasi air sadah dengan menggunakan medan magnet untuk pencegahan kerak
Sistem AMT :	rangkaian proses magnetisasi, presipitasi, dan sirkulasi aliran fluida
Air sadah :	Air dengan kandungan ion Ca^{2+} yang tinggi berupa campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 atau larutan CaCO_3
Supersaturasi air sadah :	Rasio hasil kali Konsentrasi ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dengan harga Ksp kesetimbangannya
Supersaturasi kritis :	Harga supersaturasi dimana presipitasi CaCO_3 sudah mulai terjadi
Kejenuhan rendah :	Harga supersaturasi air sadah berada di bawah harga supersaturasi kritisnya
Kejenuhan tinggi :	Harga supersaturasi air sadah berada diatas harga supersaturasi kritisnya
Presipitasi	Proses bertemunya ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} menjadi partikel CaCO_3
Homogenous precipitation:	Presipitasi partikel CaCO_3 pada fasa larutan
Heteogenous precipitation :	Presipitasi pada permukaan/deposit partikel CaCO_3 pada dinding wadah
Sistem fluida statik :	Sampel larutan tidak bergerak/diam saat dimagnetisasi
Sistem fluida dinamik :	Sampel larutan bergerak/mengalir saat dimagnetisasi
Sistem sirkulasi fluida dinamik :	Sampel larutan dialirkan berulang-ulang melewati medan magnet
Ion shift :	Pergeseran ion akibat gaya Lorentz dari medan magnet
Interaksi hidrat ion :	Interaksi elektrostatis antara ion dengan molekul air yang mengelilingi ion dalam larutan
Interaksi ion :	Interaksi elektrostatis antara ion dengan ion, ion dengan partikel bermuatan, dan antar partikel bermuatan dalam larutan
Electric double layer :	suatu lapisan yang terbentuk pada jarak tertentu dari permukaan bermuatan, merupakan fungsi dari muatan permukaan, konsentrasi, dan suhu larutan
Orientasi magnet :	Arah gaya medan magnet terhadap arah aliran air
Paralel flow :	Arah gaya medan magnet searah terhadap arah aliran air
Orthogonal flow :	Arah gaya medan magnet tegak lurus terhadap arah aliran air
Susunan magnet inversi	Susunan magnet dengan pola kutub magnet berselang seling sepanjang aliran fluida
Presipitasi statik :	Presipitasi yang terjadi pada fluida yang diam
Presipitasi dinamik :	Presipitasi yang terjadi pada fluida yang bergerak
Nukleasi CaCO_3 :	Pembentukan inti CaCO_3 dari ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} yang terjadi pada awal presipitasi
Pertumbuhan kristal CaCO_3	Pertambahan ukuran partikel CaCO_3 yang disebabkan penggabungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dalam larutan.
Aglomerasi CaCO_3 :	Konversi partikel-partikel kecil CaCO_3 menjadi partikel besar karena adanya interaksi elektrostatis
Waktu magnetisasi efektif :	Waktu dimana proses magnetisasi sistem fluida dinamik masih berpengaruh terhadap presipitasi CaCO_3
Persen kenaikan presipitasi relatif	Persen kenaikan presipitasi sampel termagnetisasi dibanding sampel non-magnetisasi selama 120 menit proses sirkulasi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Ringkasan hasil-hasil penelitian AMT	132
Lampiran B	Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel	136
Lampiran C	Kurva dan persamaan regresi untuk menghitung parameter k , k_0 , n , dan E_a persamaan kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2	141
Lampiran D	Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volume sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b	145
Lampiran E	Perhitungan koefisien a dan b	150
Lampiran F	Kurva t_{mc} dan $\Delta(C_2/C_{ai})_{cf}$ maksimum dan perhitungan Ca/Ca_i selama 120 menit sirkulasi	151



RINGKASAN

A. Nama : Nelson Saksono

B. Judul : Pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah

Isi Ringkasan :

Pengolahan air menggunakan medan magnet saat ini sudah sangat luas aplikasinya meliputi bidang kesehatan, pertanian, industri proses hingga untuk kebutuhan rumah tangga sehari-hari. Salah satu aplikasi yang cukup potensial adalah magnetisasi air sadah untuk pencegahan pembentukan kerak (anti-scale magnetic treatment (AMT)). Pembentukan deposit kerak CaCO_3 oleh air sadah pada sistem perpipaan di industri maupun rumah tangga menimbulkan banyak permasalahan teknis dan ekonomis. Hal ini disebabkan kerak (scale) dapat menyumbat air yang mengalir dalam pipa dan sekaligus menghambat proses perpindahan panas pada peralatan penukar panas. Air sadah juga menyebabkan berkurangnya efektifitas proses pencucian menggunakan sabun atau deterjen.

AMT merupakan proses fisik yang tidak membutuhkan penambahan bahan kimia sehingga lebih aman untuk kesehatan maupun lingkungan. Namun teknologi ini memiliki sejarah kontroversi yang panjang. Produk yang banyak beredar di pasaran belum jelas efektifitasnya. Hal ini disebabkan dasar-dasar keilmiahannya masih belum terjawab dengan memadai. Oleh sebab itu penelitian ilmiah dibidang AMT yang meliputi aspek-aspek teori maupun aplikasinya, hingga saat ini masih terus dilakukan guna mendapat kejelasan.

Efektivitas AMT dapat diketahui dengan memahami terlebih dahulu pengaruh medan magnet terhadap air sadah dan presipitasi CaCO_3 -nya. Air sadah mengandung ion-ion seperti Ca^{2+} dan CO_3^{2-} yang terhidrasi oleh molekul air membentuk hidrat ion. Presipitasi CaCO_3 sangat ditentukan oleh stabilitas hidrat ion dan interaksi ion-ion dalam larutan. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan pemahaman dan kejelasan tentang efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi guna mendapatkan sistem AMT yang efektif dalam menurunkan kesadahan air.

Pengamatan efek interaksi hidrat ion dilakukan dengan mengukur konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi menggunakan alat konduktometer. Pengamatan presipitasi CaCO_3 dilakukan dengan mencampurkan larutan Na_2CO_3 dengan larutan CaCl_2 dan jumlah presipitasi CaCO_3 diukur dengan metode titrasi EDTA. Efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion terhadap sifat dan morfologi deposit CaCO_3 yang terbentuk juga diamati menggunakan SEM dan XRD.

Hasil penelitian mendapatkan magnetisasi larutan ionik Na_2CO_3 dan CaCl_2 menyebabkan perubahan sifat hidrat ion-ionnya (efek interaksi hidrat ion). Untuk sistem fluida statik, medan magnet memperkuat interaksi hidrat ion yang dibuktikan dengan meningkatnya konduktivitas larutan Na_2CO_3 termagnetisasi. Pencampuran larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dengan larutan CaCl_2 menurunkan presipitasi CaCO_3 . Kuat medan, waktu magnetisasi, konsentrasi, dan suhu larutan mempengaruhi besarnya penurunan presipitasi CaCO_3 yang terjadi. Efek penguatan interaksi hidrat ion dapat bertahan hingga 120 jam setelah proses magnetisasi (efek memori magnetik). Untuk sistem fluida dinamik, medan magnet memperlemah interaksi hidrat ion (dibuktikan dengan menurunnya konduktivitas larutan Na_2CO_3). Efek pelemahan interaksi hidrat ion dapat bertahan hingga 72 jam setelah proses magnetisasi. Waktu magnetisasi, kecepatan alir, panjang magnet, konsentrasi, dan suhu larutan mempengaruhi besarnya kenaikan presipitasi CaCO_3 yang terjadi. Efek penguatan hidrat ion pada sistem fluida statik menaikkan energi aktivasi (E_a) pembentukan

CaCO₃ dari 42,6 kJ/mol menjadi 49,6 kJ/mol sedangkan efek pelemahan interaksi hidrat ion oleh medan magnet pada sistem fluida dinamik menurunkan E_a menjadi 21,1 kJ/mol.

Deposit CaCO₃ hasil presipitasi larutan Na₂CO₃ dan CaCl₂ menunjukkan Kalsit mendominasi kristal yang terbentuk dimana sampel termagnetisasi memiliki ukuran kristal yang lebih besar dan jumlah partikel yang lebih sedikit dibanding sampel non-magnetisasi untuk sistem fluida statik. Hasil uji presipitasi CaCO₃ di deposit menunjukkan magnetisasi tidak mengubah kemampuan deposit untuk menempel di dinding.

Magnetisasi larutan CaCO₃ dengan sistem fluida statik sebelum presipitasi berlangsung memperkuat hidrat ion-ionnya (ditandai dengan naiknya konduktivitas larutan) dan menyebabkan penurunan presipitasi CaCO₃ sesudah proses magnetisasi, sedangkan magnetisasi larutan CaCO₃ saat presipitasi berlangsung menyebabkan peningkatan interaksi ion sehingga mendorong presipitasi CaCO₃ saat magnetisasi. Deposit CaCO₃ yang terbentuk dari larutan CaCO₃ menunjukkan Aragonit dan Kalsit adalah kristal yang paling banyak terbentuk dengan populasi dan ukuran kristal yang hampir berimbang antara sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi. Hasil uji presipitasi CaCO₃ di deposit menunjukkan magnetisasi tidak mengubah kemampuan deposit untuk menempel di dinding.

Magnetisasi larutan CaCO₃ dengan sistem fluida dinamik sebelum presipitasi berlangsung memperlemah hidrat ion-ionnya (ditandai dengan turunnya konduktivitas larutan) dan menyebabkan meningkatnya presipitasi CaCO₃ sesudah proses magnetisasi, sedangkan magnetisasi larutan CaCO₃ saat presipitasi berlangsung menyebabkan peningkatan interaksi ion sehingga mendorong presipitasi CaCO₃ saat magnetisasi. Medan magnet memperkuat interaksi ion pada sistem fluida dinamik dimana variabel kecepatan fluida, waktu magnetisasi, kuat medan, panjang magnet, dan konsentrasi sampel mempengaruhi efek medan magnet terhadap kenaikan presipitasi CaCO₃ saat magnetisasi. Proses sirkulasi yang digunakan pada sistem fluida dinamik mempercepat presipitasi CaCO₃ melalui peningkatan pH akibat makin banyaknya CO₂ di larutan yang lepas ke fasa gas. Efek medan magnet terjadi hanya pada 90 detik pertama proses sirkulasi atau dicapai pada 14,83 detik waktu magnetisasi pada kondisi kuat medan 5,2 kG, kecepatan alir 0,552 m/s, panjang magnet 0,35 m, konsentrasi CaCO₃ awal 0,004 M, dan volume sampel 240 mL, sedangkan efek sirkulasi terjadi terus selama 120 menit proses sirkulasi. Waktu 90 detik disebut waktu efektif sirkulasi magnetisasi (t_{se}) dan 14,83 detik disebut waktu efektif magnetisasi (t_{me}).

Hasil uji deposit menunjukkan magnetisasi larutan CaCO₃ sistem fluida dinamik menunjukkan persen penurunan deposit meningkat. Makin tinggi kuat medan mengakibatkan persen penurunan deposit makin besar. Terjadi kenaikan persen penurunan deposit dari 6,6 % pada 2 kG menjadi 18,4 % pada 5,2 kG. Hal tersebut menunjukkan proses magnetisasi menghasilkan jenis deposit yang lebih mudah lepas dari dinding (soft scale). Hasil uji SEM menunjukkan kristal Aragonit dan Kalsit mendominasi pembentukan deposit CaCO₃.

Model persamaan laju presipitasi CaCO₃ yang dikembangkan dalam laporan ini menggunakan pendekatan reaksi total dan jenis reaktor sirkulasi tertutup dimana fraksi ion Ca²⁺ yang tidak terpresipitasi (C_a/C_{a_i}) merupakan fungsi dari waktu sirkulasi, waktu magnetisasi, diameter pipa, volume sampel, panjang magnet, kuat medan, kecepatan alir, dan konsentrasi sampel. Harga K₂ pada model persamaan ini merupakan fungsi koefisien a dan b yang didapat melalui metode regresi linier (logaritmik) dari data penelitian dengan nilai korelasi data R² berkisar antara 0,96 hingga 0,99. Harga koefisien a dan b merupakan fungsi dari kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi dan volume sampel yang masing-masing berlaku pada kondisi acuan proses yaitu $v : 0,554$ m/s; $B = 5,2$ kG; $L_m = 0,35$ m; $C_{a_i} = 0,004$ M; dan $V = 240$ mL serta dalam rentang data penelitian. Untuk menghitung koefisien a dan b diluar kondisi acuan proses namun masih dalam rentang data, maka dapat dilakukan dengan membuat fungsi baru dengan melakukan penggeseran (dilatasi) pada fungsi acuan yang sudah ada. Hasil pengujian model persamaan mendapatkan hasil yang cukup baik dalam memprediksi presipitasi CaCO₃ yang terjadi.

Peningkatan waktu efektif magnetisasi (t_{me}) dan penurunan C_a/C_{a_i} efektif ($(\Delta(C_a/C_{a_i}))_{ef}$) hasil simulasi menunjukkan parameter efektivitas proses magnetisasi larutan CaCO₃ sistem

sirkulasi fluida dinamik dalam mendorong presipitasi CaCO_3 . Hal ini dibuktikan dengan adanya korelasi yang kuat antara harga $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ hasil simulasi dengan persen peningkatan presipitasi dari data percobaan. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan laju alir dan kuat medan serta penurunan konsentrasi sampel meningkatkan t_{mc} dan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$, sedangkan peningkatan panjang magnet dan penurunan volume sampel menurunkan t_{sc} namun tidak berpengaruh pada t_{mc} dan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$. Pengaruh tertinggi magnetisasi terhadap penurunan ion Ca^{2+} terjadi pada waktu awal magnetisasi dan penurunan ion Ca^{2+} terjadi terus hingga mencapai t_{mc} .

Konsep sistem AMT yang dikembangkan pada penelitian ini adalah sistem AMT yang dapat menekan pembentukan kerak CaCO_3 dengan menurunkan kandungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah dimana magnetisasi dilakukan dengan sistem sirkulasi fluida dinamik yang dilanjutkan dengan proses agitasi mekanik dan pengendapan.

Efek medan magnet pada larutan air sadah saat magnetisasi dapat dibagi dalam dua jenis, pertama adalah efek peningkatan presipitasi CaCO_3 dimana hal ini terjadi pada larutan CaCO_3 dengan harga supersaturasi tinggi (pH 8,5 ; Ca_i : 0,004 M). Untuk larutan CaCO_3 dengan supersaturasi rendah (pH 6,4 ; Ca_i : 0,004 ppm), maka yang terjadi adalah adanya efek penurunan interaksi hidrat ion dan efek peningkatan presipitasi CaCO_3 terjadi setelah proses magnetisasi.

Hasil simulasi menunjukkan efek kenaikan kecepatan alir dan penurunan konsentrasi sampel dalam meningkatkan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ lebih signifikan dibanding efek kenaikan medan magnet.

Pengendapan adalah tahap terakhir dari proses AMT yang memiliki 2 tujuan, pertama adalah untuk memisahkan partikel CaCO_3 yang terbentuk di larutan agar dapat mengendap. Hal ini dilakukan bila presipitasi optimum sudah tercapai pada proses agitasi mekanik. Tujuan kedua adalah agar larutan yang sudah termagnetisasi dan teragitasi secara mekanik (sirkulasi) dapat berpresipitasi lebih lanjut dalam kondisi larutan diam (presipitasi statik). Hal ini dilakukan apabila tahap magnetisasi dan sirkulasi hanya dilakukan dalam waktu singkat pada larutan dengan supersaturasi rendah sehingga belum terjadi presipitasi saat magnetisasi dan sirkulasi. Magnetisasi dan kecepatan alir dapat menurunkan waktu nukleasi (T_n) pada proses pengendapan.

Proses presipitasi dengan agitasi mekanik dapat mencapai waktu presipitasi optimum yang lebih cepat dengan tingkat presipitasi CaCO_3 yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses pengendapan. Sistem AMT yang diajukan dari hasil kajian ini adalah : (1) Sistem AMT untuk mengolah air sadah dengan supersaturasi tinggi melalui tahapan magnetisasi sirkulasi, agitasi mekanik dan pengendapan (AMT 1). (2) Sistem AMT untuk mengolah air sadah dengan supersaturasi rendah melalui tahapan magnetisasi sirkulasi dan pengendapan (AMT 2). AMT 1 memiliki kelebihan waktu proses magnetisasi yang lebih singkat, penurunan kesadahan yang lebih tinggi, dan area pengolahan lebih kecil dibanding AMT 2, namun kebutuhan energi AMT 1 untuk proses agitasi mekanik lebih tinggi dibanding AMT 2.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pembentukan deposit kerak CaCO_3 oleh air sadah pada sistem perpipaan di industri maupun rumahtangga menimbulkan banyak permasalahan teknis dan ekonomis. Hal ini disebabkan kerak (scale) dapat menyumbat air yang mengalir dalam pipa dan sekaligus menghambat proses perpindahan panas pada peralatan penukar panas. Selain itu air sadah juga akan menyebabkan berkurangnya efektifitas proses pencucian menggunakan sabun atau deterjen.

Saat ini pengolahan air sadah dan pencegahan pembentukan kerak umumnya dilakukan secara kimiawi yaitu dengan resin penukar ion dan penambahan inhibitor kerak. Metode secara kimiawi ini dapat mengubah sifat kimia larutan sehingga tidak cukup aman untuk penggunaan rumahtangga maupun industri makanan. Selain itu investasinya yang cukup besar menyebabkan proses-proses kimiawi tersebut hanya cocok untuk industri yang memerlukan air olahan dalam jumlah besar.

Proses pengolahan air sadah untuk pencegahan kerak menggunakan medan magnet (Anti Scale Magnetic Treatment (AMT)) memiliki sejarah kontroversi yang panjang. Aplikasi metode ini justru dimulai oleh para praktisi pengolahan air sadah tanpa didukung oleh penelitian-penelitian ilmiah yang memadai. Hal ini disebabkan harga komponen alat yang relatif murah serta instalasi dan pengoperasiannya yang sangat mudah. Namun hasil pengujian pada beberapa produk komersial yang ada di pasaran oleh para peneliti dan lembaga independen menunjukkan tidak ada perubahan signifikan dalam menurunkan pembentukan kerak. Hal yang masih berbaur kontroversial tersebut mendorong para peneliti untuk mulai melakukan penelitian ilmiah pada tahun 1985 guna menjawab fenomena apa sesungguhnya yang terjadi pada magnetisasi air sadah (Kronenberg, 1985).

Publikasi ilmiah dibidang AMT hingga saat ini masih terus dilaporkan (Fathi *et al*, 2007). Hal ini disebabkan masih banyak aspek-aspek teori maupun aplikasi yang belum terjawab dengan memuaskan. Pengaruh medan magnet terhadap pembentukan CaCO_3 hingga efektifitas proses AMT masih menjadi perdebatan yang hangat para peneliti, dimana hasil-hasil yang dilaporkan masih bersifat kontradiktif (Chibowski *et al*, 2003).

Efektivitas AMT akan dapat diketahui dengan memahami pengaruh medan magnet terhadap air sadah. Ada dua efek penting yang diusulkan oleh beberapa peneliti : pertama adalah *efek interaksi hidrat ion*; dalam air sadah terdapat ion-ion seperti Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dimana ion-ion tersebut akan terhidrasi oleh molekul air membentuk hidrat ion. Semakin tinggi energi hidrasinya ($\Delta G_{\text{Hydration}}$) maka semakin kuat molekul air terikat di sekeliling ion tersebut. Proses pembentukan

kerak (presipitasi CaCO_3) akan sangat ditentukan oleh kestabilan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} dalam larutan air sadah. Higashitani (1993) melakukan magnetisasi larutan Na_2CO_3 dengan sistem fluida statik (sampel larutan dimagnetisasi dalam keadaan diam) dan kemudian dicampur dengan larutan CaCl_2 untuk dilihat pengaruhnya pada presipitasi CaCO_3 yang terbentuk dengan menggunakan spektrofotometer UV. Hasil yang didapat menunjukkan terjadinya penurunan presipitasi CaCO_3 . Higashitani (1998) menduga telah terjadi penguatan hidrat ion CO_3^{2-} akibat magnetisasi larutan Na_2CO_3 sehingga presipitasi CaCO_3 lebih sulit terjadi. Efek interaksi hidrat ion juga memiliki sifat memori, dimana ion CO_3^{2-} yg sudah termagnetisasi akan tetap memiliki sifat kestabilan meskipun sudah tidak dikenai medan magnet. Penelitian tentang efek medan magnet terhadap hidrat ion dan pengaruhnya terhadap presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida statik dan sistem fluida dinamik akan memberikan pemahaman lebih baik mengenai pengaruh medan magnet pada larutan air sadah.

Efek interaksi ion adalah faktor kedua yang berpengaruh terhadap pembentukan CaCO_3 dalam medan magnet. Proses ini terjadi jika medan magnet diberikan saat presipitasi CaCO_3 terjadi. Efek interaksi ion dapat terjadi pada sistem fluida statik dan dinamik. Wang (1994) mendapatkan bahwa medan magnet pada sistem fluida statik dapat meningkatkan interaksi antar ion dan partikel bermuatan pada sistem koloid dari bahan dengan sifat kemagnetan rendah, sehingga dapat mempercepat terjadinya koagulasi. Dalam percobaannya Wang (1997) mencampur larutan Na_2CO_3 dengan CaCl_2 kemudian dimagnetisasi dengan sistem fluida statik dan diamati proses presipitasi CaCO_3 -nya menggunakan Turbiditi-meter. Hasil pengamatan menunjukkan terjadinya peningkatan presipitasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet. Lundager Madsen (2004) mendapatkan bahwa medan magnet mendorong transfer proton dari HCO_3^- menjadi CO_3^{2-} sehingga presipitasi akan meningkat. Pengaruh medan magnet pada interaksi antar ion baru teramati pada kondisi larutan lewat jenuh (supersaturasi). Efek interaksi ion banyak ditemukan pada proses kristalisasi dari senyawa yang sukar larut dalam air seperti CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 dsb.

Magnetisasi pada air sadah yang bergerak (magnetisasi sistem fluida dinamik) akan menyebabkan efek gaya Lorentz pada ion dan partikel bermuatan dalam larutan. Partikel atau ion yang bermuatan q dan bergerak melalui medan magnet B dengan kecepatan V akan mengalami gaya Lorentz F sebesar $q.V \times B$. Gaya Lorentz ini menimbulkan pergeseran ion (local convection movement) yang dapat menyebabkan terjadinya koagulasi ion (presipitasi CaCO_3). Gabrielli (2001) melakukan magnetisasi larutan CaCO_3 menggunakan sistem sirkulasi fluida dinamik dan mendapatkan terjadinya peningkatan presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Fathi (2007) dengan percobaan yang serupa baru mendapatkan peningkatan presipitasi CaCO_3 setelah proses magnetisasi (terjadi efek magnetik memori). Penelitian tentang efek medan magnet saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi pada larutan CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik akan memberikan dasar keilmiah yang kuat dalam memahami dan mengembangkan sistem AMT yang

efektif.

Morfologi kristal kerak CaCO_3 yang terbentuk adalah bagian penting dari efektivitas proses AMT pencegahan kerak. Beberapa hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan jumlah kristal Aragonit di fasa larutan pada air sadah yang termagnetisasi. Kristal Aragonit adalah jenis kristal yang bersifat kerak lunak (soft scale) yang mudah terlepas atau dibersihkan dari dinding pipa. Studi tentang pengaruh medan magnet terhadap sifat dan morfologi deposit CaCO_3 akan melengkapi studi komprehensif tentang pengaruh medan magnet dalam proses presipitasi CaCO_3 dan efektivitas AMT dalam pencegahan kerak.

1.2 Rumusan masalah

Ada dua pengaruh penting yang terjadi pada proses magnetisasi air sadah: pertama adanya peningkatan presipitasi CaCO_3 pada saat magnetisasi yang disebabkan adanya efek peningkatan interaksi ion. Kedua adalah peningkatan presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi yang dapat disebabkan adanya efek interaksi hidrat ion yang memiliki sifat efek memori magnetik.

Di lain pihak efek interaksi hidrat ion lainnya yang juga penting adalah mengubah sifat ion-ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} menjadi lebih sulit terpresipitasi menjadi CaCO_3 sesudah termagnetisasi. Oleh sebab itu pemahaman dan kejelasan tentang efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi merupakan tahap awal yang penting guna mendapatkan sistem AMT yang efektif.

Sistem AMT yang akan dikembangkan dalam penelitian ini adalah yang dapat menekan pembentukan kerak CaCO_3 dengan menurunkan kandungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah (menurunkan kesadahan). Penurunan kesadahan pada proses AMT dilakukan dengan meningkatkan proses presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi. Untuk itu proses AMT akan dibagi dalam tiga tahap: tahap pertama adalah proses presipitasi CaCO_3 saat air sadah dimagnetisasi menggunakan sistem sirkulasi fluida dinamik. Tahap kedua adalah proses presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi melalui proses agitasi mekanik (sistem sirkulasi). Proses AMT diakhiri dengan proses pengendapan untuk memisahkan partikel CaCO_3 yang terbentuk dari air sadah sekaligus memberikan kesempatan bagi air sadah agar dapat berpresipitasi lebih lanjut dalam kondisi larutan diam (presipitasi statik). Untuk itu perlu dilakukan pengujian efektivitas dari setiap tahapan proses tersebut dalam menurunkan kesadahan melalui peningkatan presipitasi CaCO_3 -nya. Jenis dan sifat kristal deposit CaCO_3 yang terbentuk juga penting diketahui guna melengkapi kajian yang lebih komprehensif tentang AMT yang efektif.

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan konseptual :

Pengembangan sistem pengolahan air sadah untuk pencegahan kerak menggunakan medan magnet (AMT).

Tujuan khusus :

1. Mendapatkan pemahaman dan kejelasan tentang pengaruh interaksi hidrat ion dan interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi
2. Mendapatkan konsep sistem AMT yang efektif dalam menurunkan kesadahan air melalui pengujian variabel proses dan kondisi operasi dari setiap tahapan sistem AMT terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi.

1.4 Hipotesis

Pemahaman dan kejelasan tentang pengaruh medan magnet terhadap air sadah dan presipitasi CaCO_3 adalah langkah awal yang penting dalam mengembangkan sistem AMT yang efektif. Dengan mengetahui efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion pada proses presipitasi CaCO_3 beserta variabel proses yang berpengaruh maka diharapkan aplikasi sistem AMT yang efektif dapat tercapai, dengan hipotesis sebagai berikut :

1. Magnetisasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 diduga akan :
 - a. menaikkan interaksi hidrat ion dan menurunkan presipitasi CaCO_3 -nya untuk sistem fluida statik
 - b. menurunkan interaksi hidrat ion dan meningkatkan presipitasi CaCO_3 -nya untuk sistem fluida dinamik
2. Magnetisasi larutan CaCO_3 sebelum terjadi presipitasi diduga akan :
 - a. meningkatkan interaksi hidrat ion sehingga terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi untuk sistem fluida statik.
 - b. menurunkan interaksi hidrat ion sehingga terjadi peningkatan presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi untuk sistem fluida dinamik.

1.4 Batasan Penelitian

1. Sistem AMT dalam penelitian ini merupakan tahapan-tahapan proses presipitasi saat magnetisasi dan presipitasi sesudah magnetisasi baik pada sampel larutan CaCO_3 yang mengalir (presipitasi dinamik/sirkulasi) maupun presipitasi larutan CaCO_3 dalam kondisi diam (presipitasi statik/pengendapan).

2. Pengujian efektivitas hanya dilakukan pada tiap-tiap tahapan proses secara terpisah dan tidak dilakukan pengujian efektivitas sistem AMT secara keseluruhan.
3. Air sadah yang digunakan merupakan air sadah sintetik yang terdiri atas campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 , serta larutan CaCO_3 .
4. Sistem fluida statik pada penelitian ini menggunakan tabung reaksi dan untuk sistem fluida dinamik menggunakan aliran pompa sirkulasi.
5. Sumber medan magnet menggunakan magnet permanen berbasis NdFeB dengan kuat medan 2 – 5,2 kG, dan untuk sistem fluida dinamik orientasi medan magnet adalah tegak lurus terhadap arah aliran fluida dengan susunan magnet inversi.
6. Metode magnetisasi yang digunakan adalah :
 - a. Metode magnetisasi sebelum presipitasi: magnetisasi dilakukan hanya pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 sebelum dilakukan pencampuran/presipitasi.
 - b. Metode magnetisasi saat presipitasi: magnetisasi dilakukan saat presipitasi terjadi pada larutan CaCO_3 .
7. Pengamatan Presipitasi CaCO_3 dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.
8. Uji konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta larutan CaCO_3 dilakukan sesudah magnetisasi pada tabung reaksi menggunakan alat konduktometer.
9. Uji Analisis dan pengamatan Presipitasi CaCO_3 dilakukan pada :
 - a. Larutan sampel (presipitasi total):
 - Uji kandungan ion Ca^{2+} dengan dengan titrasi kompleksometri EDTA.
 - b. Deposit CaCO_3 (presipitasi di dinding tabung):
 - Uji masa deposit CaCO_3 yang terdeposit pada tabung presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA.
 - Analisis Scanning Electron Microscope pada deposit CaCO_3 pada kaca preparat untuk mendapatkan jumlah, jenis, dan ukuran kristal.
 - Uji XRD dari deposit yang terbentuk pada kaca preparat untuk mengetahui komposisi kristal Aragonit, Kalsit dan Vaterit yang terbentuk.

BAB II TINJAUAN TEORI

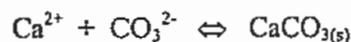
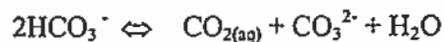
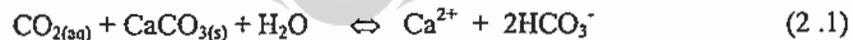
Presipitasi partikel CaCO_3 pada air sadah merupakan proses kesetimbangan kompleks baik pada fasa larutan (homogenous precipitation) maupun pada fasa permukaan (heterogenous precipitation). Dalam bagian ini akan dijelaskan teori-teori tentang mekanisme pembentukan partikel CaCO_3 tanpa medan magnet maupun dengan adanya medan magnet. Pengaruh pH, suhu, kejenuhan, hidrodinamika fluida, dan konduktivitas larutan dalam proses presipitasi CaCO_3 merupakan aspek yang akan dikaji dalam bab ini.

2.1 Mekanisme pembentukan partikel CaCO_3 tanpa medan magnet

Mekanisme presipitasi partikel CaCO_3 pada air sadah merupakan proses kesetimbangan yang dipengaruhi oleh kesadahan air, suhu, pH, dan kejenuhan (supersaturasi). Presipitasi CaCO_3 secara homogen memiliki perbedaan mekanisme yang cukup besar dibanding dengan presipitasi CaCO_3 secara heterogen. Morfologi kristal merupakan parameter yang juga akan dijelaskan dalam proses presipitasi partikel CaCO_3 .

2.1.1 Reaksi kesetimbangan dan aspek termodinamik pembentukan partikel CaCO_3

Air tanah banyak mengandung mineral-mineral terlarut seperti kation Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang menyebabkan kesadahan pada air. Selain itu terdapat juga anion bikarbonat dan gas CO_2 terlarut. Dengan naiknya pH akibat lepasnya CO_2 ke fasa gas, maka akan terjadi suatu reaksi kesetimbangan pembentukan CaCO_3 . Reaksi kesetimbangan presipitasi CaCO_3 dari model larutan CaCO_3 dapat ditulis sebagai berikut (persamaan 2.1):



Harga supersaturasi (δ_s) dari larutan merupakan fungsi dari hasil kali kelarutan (K_{sp}) dan konsentrasi ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} di larutan (persamaan 2.2), adalah:

$$\delta_s = \frac{(\text{Ca}^{2+}) \cdot (\text{CO}_3^{2-})}{K_{sp}} \quad (2.2)$$

Harga K_{sp} CaCO_3 kalsit pada suhu 25°C adalah $8,7 \times 10^{-9}$, sedangkan konsentrasi (CO_3^{2-}) dapat dihitung dengan persamaan 2.3 sebagai berikut (Knez *et al.*, 2005):

$$(\text{CO}_3^{2-}) = 5.6 \cdot 10^{-11} (\text{HCO}_3^-) / 10^{-\text{pH}} \quad (2.3)$$

Pembentukan inti (nuklei) CaCO_3 secara spontan di larutan (homogeneous nucleation) membutuhkan harga supersaturasi $\delta_s = \delta_{\text{kritis}} = 40$ dan di permukaan (deposit) $\delta_s = \delta_{\text{kritis}} = 20$ dimana presipitasi baru mulai terjadi pada pH 8,5 untuk konsentrasi CaCO_3 sebesar 400 ppm (Fathi *et al*, 2006). Harga supersaturasi (δ_s) dari model larutan CaCO_3 merupakan fungsi konsentrasi CaCO_3 terlarut dan pH larutan seperti yang diberikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Nilai supersaturasi (δ_s) pada beberapa tingkat kesadahan dan pH pada suhu 25 °C (Fathi *et al*, 2006).

Kesadahan (ppm CaCO_3)	supersaturasi (δ_s)			
	pH 5,7	pH 6,0	pH 7,0	pH 7,5
300	0,05	0,18	1,32	6,1
400	0,15	0,32	3,2	10,11
500	0,23	0,47	4,72	14,93

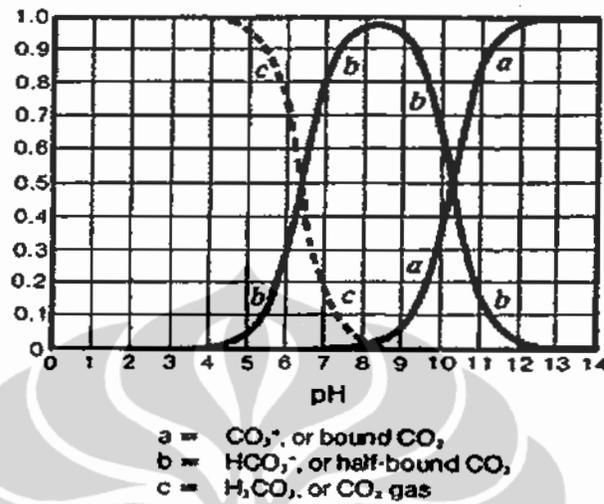
Presipitasi CaCO_3 menggunakan larutan CaCO_3 ini berjalan sangat lambat karena terjadi pada supersaturasi rendah (pH 6 – 8). Para peneliti melakukan beberapa cara untuk mempercepat proses presipitasi CaCO_3 yaitu dengan: menaikkan suhu (^aSaksono *et al*, 2007), menaikkan pH dan degassing gas CO_2 dengan N_2 (Fathi *et al*, 2006), dan memberikan beda potensial pada larutan (Gabrielli *et al*, 2001). Larutan CaCO_3 banyak digunakan oleh para peneliti karena sifat larutannya yang lebih mirip dengan air sadah sesungguhnya (Gabrielli *et al*, 2001; Knez *et al*, 2005; Kobe *et al*, 2003; Fathi *et al*, 2006; ^aSaksono *et al*, 2007). Larutan CaCO_3 didapat dengan melarutkan CaCO_3 bubuk dalam air dan mengalirkan gelembung gas CO_2 . Larutan CaCO_3 yang dihasilkan bersifat asam (pH : 5,5 – 6,5) dan akan meningkat mendekati pH iso-elektrik kalsit yaitu sekitar 8,4 seiring dengan meningkatnya kejenuhan larutan CaCO_3 .

Model larutan lain yang digunakan oleh banyak peneliti dalam mengamati presipitasi CaCO_3 adalah dengan mencampurkan larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan reaksi sebagai berikut (Higashitani *et al*, 1993; Barret *et al* 1996; Wang *et al*, 1997; Abdel-Aal *et al*, 2002; ^cChibowski *et al*, 2003; ^bSaksono *et al*, 2006; Saksono *et al*, 2008):



Proses pembentukan CaCO_3 dengan model larutan ini berjalan cepat karena harga supersaturasi (δ_s) yang jauh lebih tinggi dibanding model larutan CaCO_3 . Campuran larutan yang dihasilkan bersifat Basa (pH 10 – 11) dan akan menurun mendekati pH iso-elektrik kalsit yaitu sekitar 8, 4 seiring dengan meningkatnya jumlah CaCO_3 yang terbentuk.

Di dalam sistem larutan karbonat terdapat kesetimbangan antara CO_2 , ion CO_3^{2-} (karbonat) dan HCO_3^- (bikarbonat). Besarnya fraksi ketiga jenis molekul tersebut dalam larutan merupakan fungsi dari pH larutan seperti yang terlihat pada gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1. Efek perubahan pH terhadap Fraksi CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} dalam larutan (Kemmer, F.N, 1988)

Tabel 2.2 menunjukkan bahwa reaksi pembentukan CaCO_3 bersifat endotermis, dimana kenaikan suhu menyebabkan jumlah CaCO_3 yang terbentuk meningkat. Reaksi pembentukan CaCO_3 yang berasal dari Ca^{2+} dan CO_3^{2-} jauh lebih spontan/cepat ($\Delta G^\circ = -11,38$ kcal/mol) dibanding yang berasal dari Ca^{2+} dan HCO_3^- ($\Delta G^\circ = -5,98$ kcal/mol). Data ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan menggunakan model larutan CaCO_3 dan campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 .

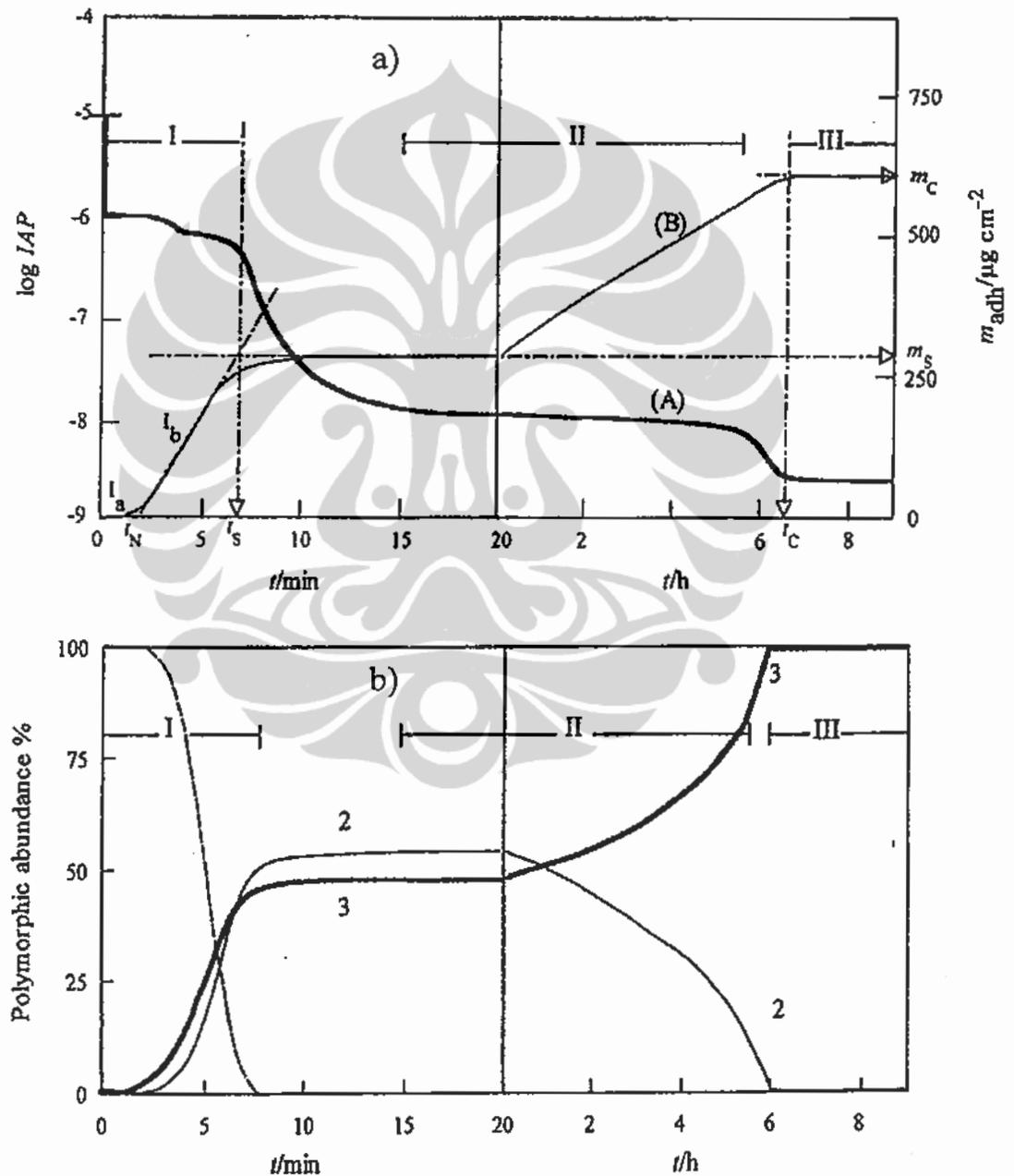
Tabel 2.2. Data termodinamik reaksi pembentukan CaCO_3

Reaksi Kesetimbangan	ΔH° (kcal/mol)	ΔG° (kcal/mol)
$\text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2\text{HCO}_3^-_{(aq)} \rightleftharpoons \text{CO}_{2(aq)} + \text{CaCO}_{3(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$	4,67	-5,98
$2\text{HCO}_3^-_{(aq)} \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}_{(aq)} + \text{CO}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$	1,72	5,4
$\text{Ca}^{2+}_{(aq)} + \text{CO}_3^{2-}_{(aq)} \rightleftharpoons \text{CaCO}_{3(s)}$	2,95	-11,38

2.1.2 Mekanisme presipitasi dan terbentuknya kristal CaCO_3 dalam larutan

Presipitasi CaCO_3 dalam larutan dibagi dalam tiga tahapan yaitu nukleasi, dehidrasi dan pertumbuhan kristal. Prosesnya diawali dengan aglomerasi ion-ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} membentuk *cluster*. Interaksi yang lebih kuat menyebabkan agregat tersebut membentuk koloid nuklei dan akan tumbuh menjadi kristal yang stabil (Ben Amor *et al*, 2004). Koloid nuklei yang terbentuk pada awal presipitasi diidentifikasi sebagai CaCO_3 amorf (ACC) yang bersifat tidak stabil. ACC selanjutnya bertransformasi membentuk kristal Vaterit yang berbentuk bola dan kalsit yang

berbentuk kotak. Kristal Vaterit bersifat meta-stabil dan akan bertransformasi lebih lanjut menjadi Kalsit. Hal ini ditunjukkan oleh Abdel (2002), dengan menggunakan model larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 seperti yang terlihat pada gambar 2.2. Sumbu tegak pada Gambar 2.2.a menunjukkan konsentrasi ion Ca dan CO_3 di larutan ($\log \text{IAP}$) sebagai fungsi waktu presipitasi (t). Gambar 2.2.b menunjukkan persen presipitasi jenis kristal yang terbentuk dan sumbu datar menunjukkan waktu presipitasi (t). Zona I menunjukkan tahap pertama pertumbuhan kristal, dan Zona II adalah tahap kedua pertumbuhan kristal, sementara Zona III tahap kesetimbangan.

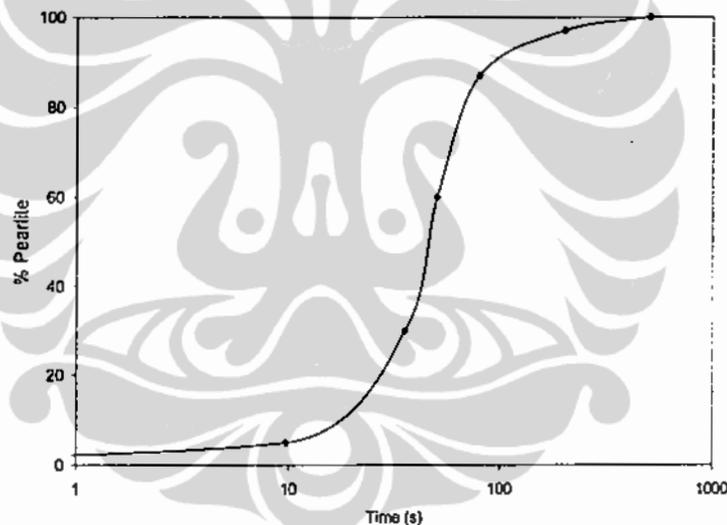


Gambar 2.2.a) Kurva Log IAP ($\log [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$ —) dan deposit CaCO_3 — ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
 b) kurva persen komposisi Kristal (---ACC), (—Vaterit), (— kalsit) dalam larutan sebagai fungsi waktu pada suhu 25 °C (Abdel-Aal et al, 2002)

Kurva pembentukan deposit (I_b) pada 20 menit pertama presipitasi (gambar 2.2.a) menunjukkan bentuk kurva presipitasi yang mirip dengan bentuk kurva sigmoidal yang dikembangkan untuk menggambarkan model kinetika empiris proses transformasi fasa solid seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.7 sebagai berikut (Jena *et al*, 1992):

$$Y = 1 - e^{-Kt^n} \quad (2.7)$$

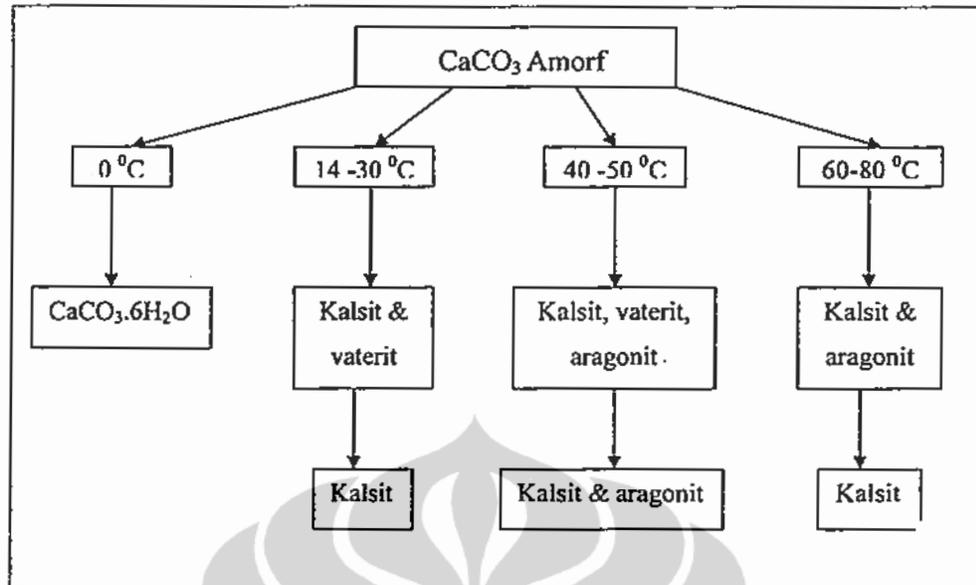
dimana Y adalah fraksi produk, K adalah fungsi tetapan laju dan t adalah waktu reaksi. Nilai n merupakan fungsi dari pembentukan inti (nukleasi) dan pertumbuhan kristal dan harga n akan berkisar pada nilai 1 hingga 4. Laju pada awal transformasi (nukleasi) berjalan sangat lambat kemudian meningkat cepat (nukleasi dan pertumbuhan kristal) dan melambat kembali (kesetimbangan) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.c (Jena *et al*, 1992). Persamaan sigmoidal ini juga cocok untuk menggambarkan pembentukan deposit CaCO_3 pada 20 menit pertama presipitasi seperti yang ditunjukkan pada kurva I_b , gambar 2.2 a.



Gambar 2.2.c Persen pembentukan pearlite pada proses transformasi isothermal (Jena *et al*, 1992).

Transformasi ACC menjadi Kalsit dan Vaterit terjadi pada suhu rendah (14 – 30 °C), sedangkan pada suhu 60 – 80 °C ACC bertransformasi menjadi Kalsit dan Aragonit. Kristal Aragonit juga merupakan kristal yang bersifat kerak lunak karena mudah lepas dari permukaan dengan adanya aliran air. Pada suhu 40 – 50 °C, ACC akan bertansformasi menjadi Kalsit, Aragonit dan Vaterit (Elfil *et al*, 2001).

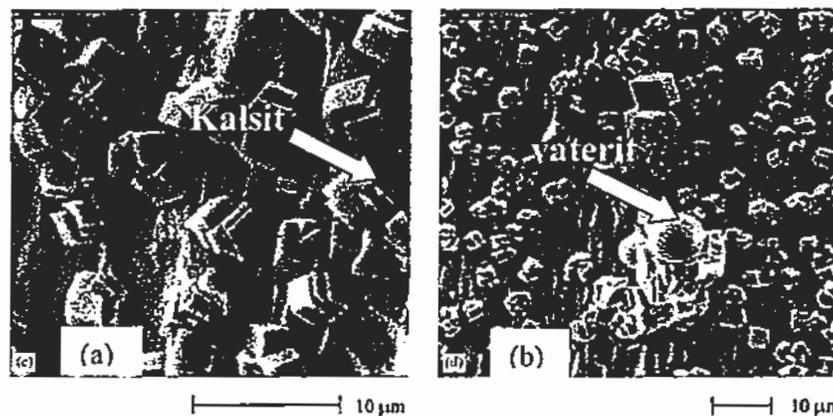
Ground state Aragonit lebih tinggi 28 eV dibanding kalsit. Untuk itu ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} memerlukan energi yang lebih besar untuk dapat membentuk Aragonit (Kobe *et al*, 2002). kristal $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ akan terbentuk pada suhu mendekati 0 °C dan dengan cepat terdekomposisi jika suhu meningkat (gambar 2.3).



Gambar. 2.3. Tahapan pembentukan kristal CaCO_3 dalam larutan pada berbagai suhu (Elfil *et al*, 2001)

2.1.3 Mekanisme presipitasi dan terbentuknya kristal CaCO_3 pada deposit

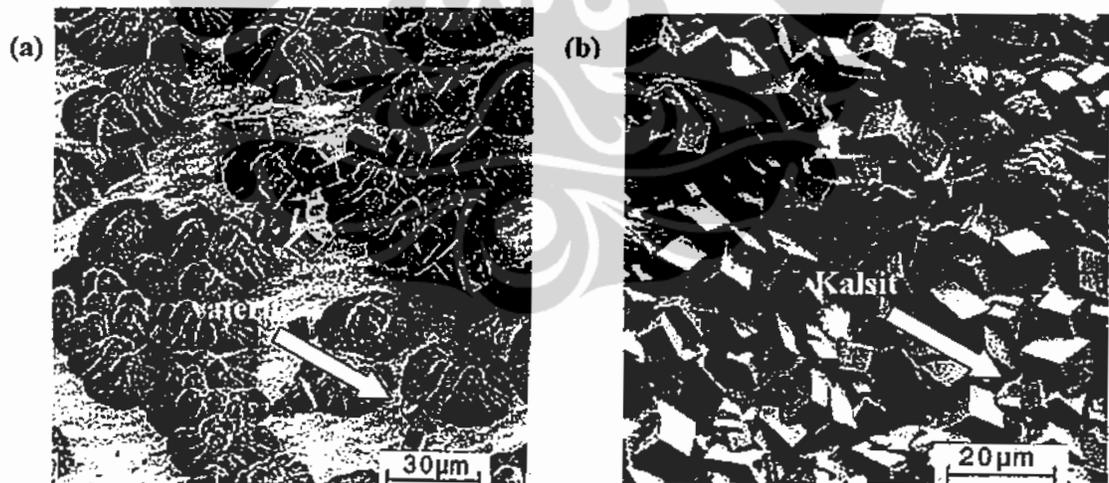
Kerak didefinisikan sebagai partikel CaCO_3 yang terbentuk di dinding pipa (deposit). Abdel (2002) melakukan pengamatan deposit CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 . Hasil analisis SEM (Spectrophotometer Electron Microscope) pada deposit CaCO_3 menunjukkan kristal CaCO_3 yang terbentuk pada 1,5 jam pertama presipitasi hampir semuanya adalah Kalsit. Setelah itu mulai tampak sejumlah kecil kristal Vaterite (kurang dari 3 %) pada permukaan (gambar 2.4). Hal ini menunjukkan perbedaan yang signifikan antara mekanisme pembentukan kristal di larutan dan di deposit dimana presipitasi di deposit akan jauh lebih dominan membentuk kristal Kalsit dibanding presipitasi di larutan.



Gambar 2.4. Gambar SEM pada permukaan logam emas untuk presipitasi CaCO_3 selama : (a) 8 menit dan (b) 1,5 jam (Abdel-Aal *et al*, 2002)

Gabrielli (2001) mengamati pembentukan deposit CaCO_3 menggunakan larutan CaCO_3 . Hasil pengamatan pada gambar 2.5 menunjukkan bahwa Vaterit merupakan jenis kristal yang banyak terbentuk pada deposit untuk presipitasi kurang dari 7 menit, sedangkan untuk waktu yang lebih lama (25 menit) struktur Kalsit merupakan jenis yang paling banyak terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa kristal Vaterit mengalami transformasi di permukaan membentuk kristal kalsit yang lebih stabil. Gambar 2.5 tidak menunjukkan adanya pembentukan kristal Aragonit karena suhu larutan relatif masih rendah (25°C).

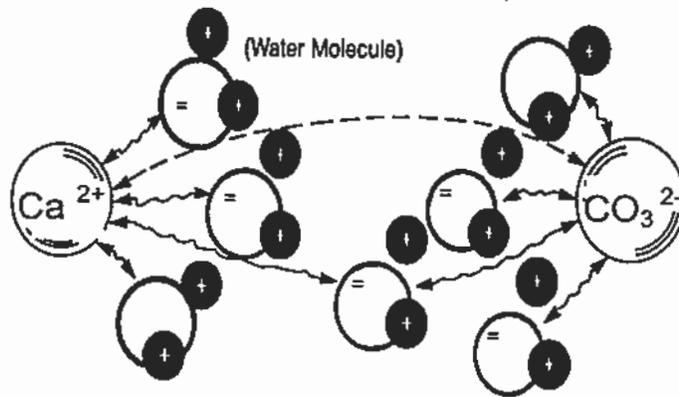
Ben Amor (2004) mempelajari pengaruh kesadahan air, jenis permukaan wadah dan suhu pada proses nukleasi CaCO_3 menggunakan model larutan CaCO_3 . Hasil yang didapat menunjukkan pada kesadahan rendah ($0,2 \text{ g CaCO}_3/\text{L}$) presipitasi CaCO_3 di deposit jauh lebih dominan (98 %) dibanding presipitasi CaCO_3 pada fasa larutan (2 %), sedangkan pada kesadahan tinggi ($0,5 \text{ g CaCO}_3/\text{L}$), presipitasi pada fasa larutan mulai signifikan mencapai hingga (23 %). Uji jenis bahan permukaan wadah menunjukkan bahwa bahan dari jenis metal lebih cepat membentuk nukleasi dibanding bahan plastik terutama pada kesadahan rendah sedangkan pada kesadahan tinggi bahan plastik memiliki kemampuan presipitasi di deposit yang lebih besar dibanding bahan metal, namun pada suhu tinggi (50°C), pengaruh bahan permukaan wadah tidak signifikan terhadap laju nukleasi.



Gambar. 2.5. Analisis SEM dari deposit CaCO_3 pada permukaan logam emas pada kondisi larutan : 120 ppm Ca^{2+} , 25°C dan laju alir 300 mL/min untuk (a) Deposit pada 7 menit presipitasi : kristal Vaterit, (b) Deposit pada 25 menit presipitasi : Vaterit & Kalsit (Gabrielli *et al.*, 1999).

2.1.4 Pengaruh hidrodinamika fluida terhadap proses pembentukan CaCO_3

Ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah akan dikelilingi oleh molekul air membentuk suatu lapisan (hydration shell) yang akan menahan bergabungnya ion-ion tersebut membentuk molekul CaCO_3 seperti yang terlihat pada gambar 2.6

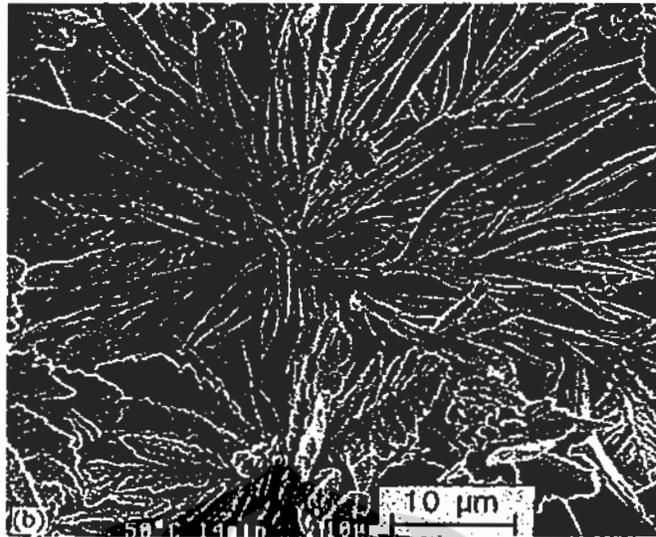


Gambar 2.6. Orientasi molekul air terhadap ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah

Sifat interaksi ion dengan molekul air relatif lebih kuat dibanding ikatan/interaksi hidrogen antar molekul air namun kekuatan interaksi hidrat ion dapat dipengaruhi oleh agitasi mekanik berupa pengadukan dan pemompaan. Proses pengadukan dan pemompaan air sadah menyebabkan terganggunya hidrat ion sehingga meningkatkan interaksi/tumbukan antara ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} yang pada akhirnya akan mempercepat terbentuknya inti CaCO_3 . Abdel (2002) melakukan percobaan pencampuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 menggunakan pengaduk. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar pengaduk mempercepat laju nukleasi CaCO_3 . Saksono (2007) menggunakan larutan CaCO_3 dengan sistem aliran pompa sirkulasi juga mendapatkan adanya peningkatan laju pembentukan deposit CaCO_3 dengan meningkatnya laju alir fluida. Hal ini menjadi penjelasan mengapa kerak lebih cepat terbentuk pada air yang bergerak.

2.1.5 Pengaruh suhu larutan pada pembentukan deposit CaCO_3

Suhu sangat berpengaruh pada pembentukan kristal di larutan maupun di deposit. Percobaan yang dilakukan oleh Gabrielli (1999) menggunakan larutan CaCO_3 menunjukkan adanya peningkatan laju masa deposit pada suhu $50\text{ }^\circ\text{C}$. Hasil analisis SEM (gambar 2.7) menunjukkan bahwa terjadi perubahan struktur kristal sebagai fungsi waktu pada permukaan. Pada menit awal teramati adanya kristal Aragonit, Vaterit, dan Kalsit secara bersamaan di permukaan logam. Dengan bertambahnya waktu, struktur Aragonit menjadi dominan dan kerak menjadi lebih tebal dan berpori.



Gambar 2.7. Foto SEM pada permukaan deposit CaCO_3 pada suhu 50°C dan 14 menit presipitasi di deposit : Kristal Aragonit (Gabrielli *et al*, 1999)

Pada suhu kamar hasil percobaan Gabrielli (1999) menunjukkan Aragonit jarang terbentuk, sedangkan Kalsit terbentuk pada setiap kondisi, hal ini dapat dipahami karena ground state Aragonit lebih tinggi 28 eV dibanding Kalsit. Untuk itu ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} memerlukan energi kinetik yang lebih besar agar dapat membentuk Aragonit dibanding Kalsit (Kobe *et al*, 2002). Hasil ini juga sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Chebowski (2003) yang menunjukkan bahwa jumlah Aragonit yang terbentuk pada larutan meningkat dengan meningkatnya suhu.

2.2 Pembentukan partikel CaCO_3 dalam medan magnet.

Pengaruh medan magnet terhadap Pembentukan Partikel CaCO_3 pada bagian ini akan dijelaskan dalam beberapa aspek, dimulai dengan tinjauan terhadap hasil-hasil penelitian yang sudah ada. Selanjutnya penjelasan tentang pengaruh suhu dan orientasi magnet. Selain itu parameter pH dan konduktivitas akan disinggung untuk lebih memahami mekanisme presipitasi CaCO_3 dalam medan magnet.

Pengaruh medan magnet terhadap pembentukan partikel CaCO_3 telah banyak dilaporkan oleh para peneliti dan praktisi dalam beberapa dekade terakhir. Tabel ringkasan hasil penelitian AMT yang telah dilakukan dapat dilihat pada lampiran A.

Meskipun sudah banyak publikasi ilmiah menunjukkan hasil yang kongkrit tentang pengaruh medan magnet terhadap pembentukan kerak, namun isu tentang fenomena apa sesungguhnya yang terjadi masih tetap belum ada kejelasan (Baker *et al*, 1996; Powell, 1998; Chibowski *et al*, 2003). Beberapa peneliti melaporkan penurunan kerak yang terjadi mencapai hingga 50 % menggunakan aliran sirkulasi (Parson *et al*, 1997), sementara peneliti lainnya

mendapatkan tidak atau sedikit sekali terjadinya pengurangan kerak (Busch *et al.*, 1997), bahkan beberapa peneliti mendapatkan penambahan jumlah kerak yang terbentuk (Wang *et al.*, 1997; Lundager, 2004) dengan adanya medan magnet. Untuk itu penjelasan dalam bagian ini akan diklasifikasikan berdasarkan kondisi operasi dan mekanisme yang terjadi untuk dapat melihat keterkaitan dari hasil-hasil penelitian AMT yang telah dilaporkan.

2.2.1 Sistem fluida statik dan dinamik

Para Ahli di bidang AMT mencoba mengelaborasi dengan mengklasifikasikan riset-riset yg telah dilakukan menjadi dua kelompok besar dengan penjelasan masing-masing sebagai berikut (Baker *et al.*, 1996; Kozic *et al.*, 2003):

- Sistem fluida statik dimana sampel air tidak bergerak saat dimagnetisasi. Sistem ini telah digunakan oleh para peneliti dalam beberapa jurnal ilmiah (Wang *et al.*, 1997; Higashitani *et al.*, 1993; Higashitani *et al.*, 1995; Chibowski *et al.*, 2003; Holysz, *et al.*, 2003; Parson *et al.*, 1997; Kney *et al.*, 2006; Saksono *et al.*, 2008). Penjelasan yang dikembangkan dalam model ini adalah bahwa medan magnet mempengaruhi hidrat ion dan interaksi ion dalam larutan air sadah sehingga dapat menurunkan atau menaikkan presipitasi CaCO_3 .
- Sistem fluida dinamik yaitu sampel air bergerak melewati medan magnet. Sistem fluida dinamik lebih banyak dilaporkan oleh para peneliti dibanding sistem fluida statik karena lebih menyerupai kondisi peralatan AMT yang banyak digunakan di pasaran. (Gabrielli *et al.*, 2001; Baker *et al.* 1996; Hasson *et al.*, 1985; Kronenberg, 1985; Coey *et al.*, 1999; Knez *et al.*, 2005; Kobe *et al.*, 2002; fathi *et al.*, 2006; Saksono *et al.*, 2007). Penjelasan yang dikembangkan dalam model ini adalah bahwa gaya Lorentz yang ditimbulkan medan magnet menyebabkan peningkatan interaksi antar ion dan partikel dalam larutan air sadah sehingga meningkatkan presipitasi CaCO_3 .

2.2.2 Interaksi antar partikel pada sistem koloid.

Larutan air sadah dapat dianggap menyerupai suatu sistem larutan koloid yang bersifat meta-stabil dan mudah membentuk kerak CaCO_3 dengan naiknya suhu. Dalam sistem koloid, energi interaksi antar partikel akan menentukan stabilitas partikel koloid dalam berkoagulasi. Menurut teori klasik Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (teori DLVO) ada dua gaya interaksi yang bekerja pada partikel halus dalam suatu sistem koloid yaitu gaya tolak menolak lapisan ganda (electric double layer repulsion) V_r , dan gaya tarik menarik London-vanderwaals V_{vdw} . Wang (1994) berhasil membuktikan bahwa ada gaya ketiga (V_m) yang menyebabkan gaya tarik menarik antar partikel dengan kemagnetan lemah pada system koloid jika diberikan induksi

medan magnet. Persamaan untuk ketiga energi potensial interaksi tersebut tersebut dapat dilihat pada pers 2.8, 2.9, 2.10 dan 2.11.

$$V_r = (a^2 / (2a + H_o)) / (\pi \epsilon \psi_o^2 \exp(-\kappa H_o)) \quad (2.8)$$

dimana : $\kappa = 8\pi e^2 I^{1/2} / (\epsilon k T)$

$$V_{vdw} = -Aa/H_o ((-2.45/60p_o) + (2.17/180p_o^2) - (-0.5/420p_o^3)) \quad (2.9)$$

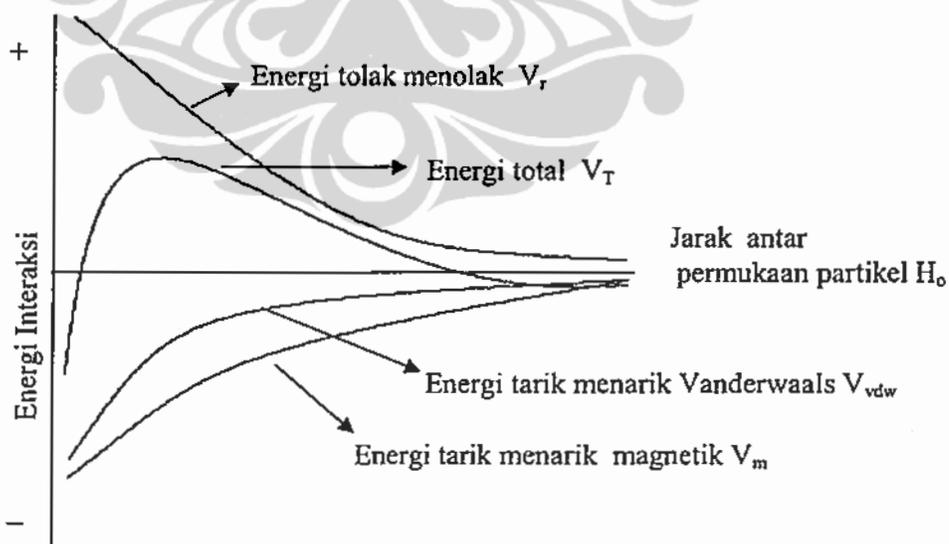
dimana : $p_o = 2\pi H_o / \lambda$

$$V_m = \frac{8\pi a^6 \chi^2 B^2}{9\mu_o (H_o + 2a)^3} \quad (2.10)$$

$$\text{Energi Interaksi total } V_T = V_r + V_{vdw} + V_m \quad (2.11)$$

- dimana :
- | | |
|--|---|
| A = tetapan hamaker | k = tetapan Boltzman |
| ϵ = tetapan dielektrik | ψ_o = potensial permukaan |
| κ = Debye Huckel reciprocal lenght. | I = ionic strenght |
| B = induksi Medan Magnet | e = muatan listrik |
| a = radius partikel | χ = subsebtibility magnetic volume |
| H_o = jarak antar permukaan partikel | μ_o = permeabilitas ruang hampa |

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa medan magnet dapat meningkatkan gaya tarik-menarik antar partikel dalam sistem larutan koloid sehingga dapat mendorong terjadinya koagulasi antar partikel dalam larutan.



Gambar 2.8. Model kurva energi interaksi pada dua partikel dalam sistem larutan koloid meta-stabil (Hiemenz *et al*, 1994).

Gaya interaksi magnetik (V_m) yang ditimbulkan medan magnet pada larutan koloid yang diam (sistem fluida statik) bersifat *long range interaction* dan besarnya sangat dipengaruhi

oleh jarak antar partikel dan ukuran partikel seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.10). Untuk sistem koloid larutan CaCO_3 , maka Jarak antar partikel berhubungan dengan konsentrasi dan kejenuhan larutan, sedangkan ukuran partikel berhubungan dengan waktu pertumbuhan kristal. Wang (1994) mendapatkan untuk ukuran partikel $1 \mu\text{m}$ dengan kuat medan 5000 Gauss dan konsentrasi elektrolit 0,1 M mampu mendorong koagulasi partikel koloid.

Dalam sistem larutan koloid CaCO_3 terdapat beberapa jenis interaksi tarik-menarik dari komponen komponen yang ada sebagai berikut :

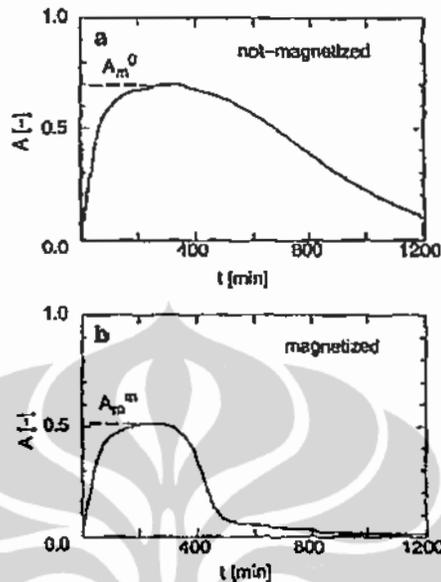
1. Interaksi antar partikel CaCO_3 untuk berkoagulasi dan tumbuh membentuk kristal/agregat.
2. Interaksi antara ion Ca^{2+} dan ion CO_3^{2-} membentuk inti/partikel CaCO_3 .
3. Interaksi ion dengan molekul air yang bersifat polar membentuk hidrat ion
4. Interaksi antar molekul air yang bersifat polar membentuk interaksi hidrogen.

Pada dasarnya medan magnet akan mempengaruhi keempat jenis interaksi tersebut yang akan dijelaskan pada sub bab 2.3.3 sampai 2.3.6.

2.2.3 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik

Efek ini diamati dengan cara memagnetisasi larutan Na_2CO_3 atau CaCl_2 sebelum dilakukan pencampuran. Magnetisasi ion CO_3^{2-} pada larutan Na_2CO_3 dapat memperkuat interaksi antara ion dengan molekul air di sekitarnya (hidrat ion) sehingga dapat menekan pembentukan CaCO_3 . Higashitani (1993) melakukan percobaan dengan sistem fluida statik, dimana larutan Na_2CO_3 dimagnetisasi dalam keadaan diam pada kuat medan 4500 Gauss selama 10 menit. Selanjutnya, larutan Na_2CO_3 dicampur dengan larutan CaCl_2 untuk diamati proses presipitasinya menggunakan spektro-fotometer UV pada panjang gelombang 350 nm. Hasil pengamatan menunjukkan terjadi penurunan laju nukleasi CaCO_3 pada sampel termagnetisasi (gambar 2.9). Hal ini menunjukkan bahwa magnetisasi ion CO_3^{2-} dalam larutan Na_2CO_3 dapat menekan pembentukan CaCO_3 di fasa larutan. Hasil ini juga diperkuat oleh beberapa peneliti lainnya (Barret *et al*, 1998; ^cChibowski *et al*, 2003; ³Saksono *et al*, 2006) meskipun Kney (2006) dalam laporannya mempertanyakan reproduibilitas data tersebut. Efek magnetisasi terhadap larutan Na_2CO_3 ternyata dapat bertahan dalam waktu yang cukup lama hingga 120 jam meskipun medan magnet sudah tidak ada (Higashitani *et al*, 1993). Fenomena tersebut dikenal dengan efek memori magnetik. Hasil analisis lebih lanjut pada deposit yang terbentuk menunjukkan terjadi penurunan jumlah partikel CaCO_3 dan peningkatan ukuran kristal CaCO_3 di permukaan pada sampel termagnetisasi (Higashitani *et al*, 1993). Higashitani memberikan hipotesis bahwa telah terjadi penguatan molekul hidrat ion CO_3^{2-} yang bersifat meta-stabil menjadi lebih stabil dengan adanya pengaruh medan magnet. Pembuktian hipotesis ini akan

melengkapi pemahaman bahwa medan magnet memperkuat hidrat ion dalam larutan air sadah dan menekan presipitasi CaCO_3 .



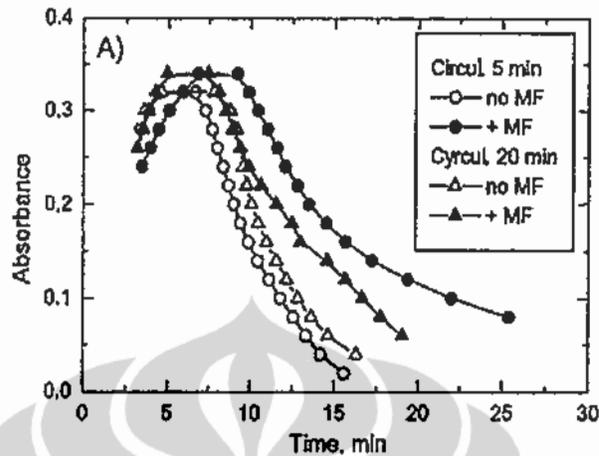
Gambar 2.9. Absorbansi campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 (a) sampel Na_2CO_3 non-magnetisasi, (b) sampel Na_2CO_3 termagnetisasi (Higashitani *et al*, 1993).

Dalam penelitian selanjutnya menggunakan Atomic Force Microscope, Higashitani (1998) mendapatkan bahwa makin tinggi energi Gibbs dari hidrasi ion, maka efek magnetisasi semakin kecil. Oshitami (1999) mendapatkan bahwa efek maksimum magnetisasi dapat dipercepat waktunya dengan menciptakan suatu denyutan magnetik (magnetic pulse) yang dikenai pada larutan yang diam. Hasil pengujian menggunakan larutan KCl menunjukkan terjadinya penurunan waktu magnetisasi efektif sebesar 30 kali untuk frekuensi 30 Hz dibanding tanpa magnetic pulse.

2.2.4 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik.

Efek hidrat ion akibat magnetisasi sistem fluida dinamik menjadi hal penting untuk diamati. Hal ini disebabkan oleh efek gaya Lorentz dan agitasi mekanik yang akan timbul dan dapat mempengaruhi hidrat ion dalam larutan. ^bChibowski (2003) melakukan percobaan magnetisasi dengan sistem fluida dinamik pada larutan Na_2CO_3 yang dialirkan melewati medan magnet dengan kuat medan 1000 Gauss dan kecepatan 0,85 m/s. Selanjutnya larutan Na_2CO_3 dicampur dengan larutan CaCl_2 untuk dilihat presipitasi CaCO_3 -nya. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan puncak absorbansi yang signifikan antara sampel yang dimagnetisasi dengan sampel non-magnetisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Kuat medan dan waktu magnetisasi yang rendah diduga sebagai penyebab tidak adanya efek

signifikan pada sifat hidrat ion maupun presipitasi CaCO_3 nya (^bChibowski *et al*, 2003). Oleh sebab itu, diperlukan suatu metode pengamatan lebih baik untuk dapat melihat efek hidrat ion pada magnetisasi sistem fluida dinamik.



Gambar 2.10. Absorbansi campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan sistem fluida dinamik dengan magnetisasi (MF) dan tanpa magnetisasi (no MF) (^bChibowski *et al*, 2003).

2.2.5 Efek interaksi ion pada sistem fluida statik

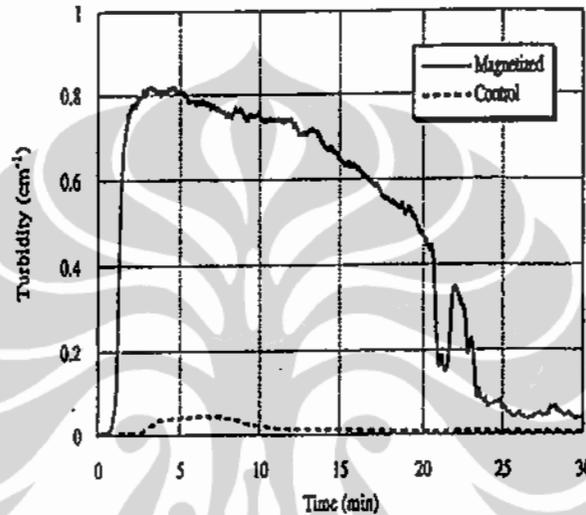
Proses ini terjadi jika medan magnet diberikan saat presipitasi CaCO_3 baik pada kondisi fluida statik maupun dinamik. Keberadaan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada kejenuhan tinggi dalam satu larutan akan menyebabkan terjadinya peningkatan laju nukleasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet. ^bSaksono (2006), Lundager (2004), dan Jens Skytte (2001) dengan menggunakan sistem fluida statik mendapatkan peningkatan presipitasi CaCO_3 dan CaSO_4 dengan adanya medan magnet selama presipitasi. Lundager (2004) menyimpulkan terdapat peningkatan laju transfer proton dari HCO_3^- ke molekul air (pers 2.12). Hal tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan laju nukleasi.



Hasil uji foto permukaan menunjukkan sampel yang dimagnetisasi memiliki jumlah partikel CaCO_3 yang lebih banyak dengan ukuran yang lebih kecil dibanding dengan sampel tanpa magnetisasi (Lundager *et al*, 2004). Hal ini menunjukkan magnetisasi mempercepat proses nukleasi dan presipitasi CaCO_3 .

Wang (1994) berhasil membuktikan adanya gaya tarik menarik antar partikel dengan kemagnetan lemah pada sistem koloid jika diberikan induksi medan magnet dengan sistem fluida statik. Ukuran partikel dan jarak antar partikel akan sangat menentukan interaksi magnetik antar partikel. Dengan makin besar ukuran partikel atau jarak partikel makin kecil maka efek medan magnet terhadap proses koagulasi semakin besar.

Wang (1997) mengamati perilaku nukleasi dan presipitasi CaCO_3 pada pencampuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 . Larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dicampur dalam sebuah kuvet kaca dan diaduk selama 1 menit agar homogen hingga membentuk partikel CaCO_3 . Sampel kemudian dimagnetisasi dengan sistem fluida statik pada kuat medan 2000 Gauss dan diamati proses presipitasi CaCO_3 -nya dengan mengukur turbiditas larutan. Gambar 2.11 menunjukkan bahwa larutan yang dimagnetisasi jauh lebih keruh dibanding dengan tanpa magnetisasi. Hal ini menunjukkan terjadinya fenomena peningkatan laju nukleasi dan presipitasi yang dilanjutkan dengan koagulasi partikel CaCO_3 yang terbentuk.



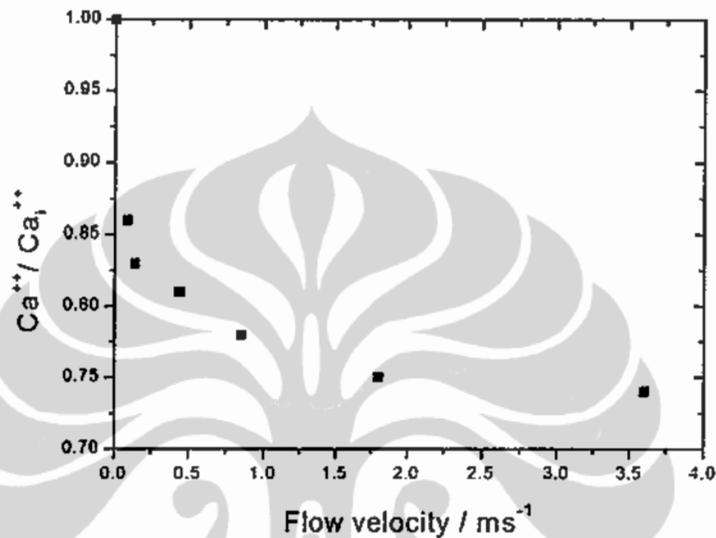
Gambar 2.11. Pengaruh magnetisasi terhadap proses nukleasi dan presipitasi partikel CaCO_3 melalui pengamatan turbiditas sebagai fungsi waktu (Wang *et al* , 1997)

2.2.6 Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik

Jika suatu ion bermuatan seperti ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} bergerak melewati medan magnet maka akan mengalami gaya Lorentz F sebesar : $F = e.V \times B$. Efek gaya Lorentz dapat menyebabkan pergeseran ion/partikel bermuatan. Hasil simulasi yang dilakukan oleh Kozic (2003) menunjukkan terjadi pergeseran 0,2 – 10 nm untuk ion dan 0,2 nm – 2 μm untuk partikel, dimana harga tersebut memadai untuk menembus ketebalan dari electric double layer pada larutan jenuh CaCO_3 sebagai sarat terjadinya presipitasi ion/partikel bermuatan.

Adanya gaya Lorentz pada spesies bermuatan mendorong terjadinya perpindahan lokal (local convection movement) dalam cairan yang dapat berkontribusi pada meningkatnya penggabungan antara ion-ion atau partikel-partikel koloid. Gaya Lorentz ini juga dapat menyebabkan *interfacial effect* berupa gangguan pada lapisan ganda ion-ion dan partikel (Baker *et al*, 1996). Argumentasi ini dapat diterima terutama untuk kasus larutan dengan konsentrasi jauh di atas kondisi lewat jenuh.

Gabrielli (2001) melakukan percobaan magnetisasi larutan CaCO_3 dengan aliran sirkulasi (sistem fluida dinamik) dan mengamati konsentrasi ion Ca^{2+} sebelum (Ca_i^{++}) dan sesudah magnetisasi (Ca^{++}) pada berbagai kecepatan fluida menggunakan alat ukur ion selektif Ca. Gambar 2.12 menunjukkan terjadinya penurunan ion Ca^{2+} dengan meningkatnya kecepatan fluida, bahkan pada kecepatan yang sangat rendah (0.074 m/s) telah terjadi penurunan ion Ca^{2+} sebanyak 25 %. Hasil ini menunjukkan bahwa gaya Lorentz berpengaruh terhadap proses nukleasi CaCO_3 saat proses magnetisasi.



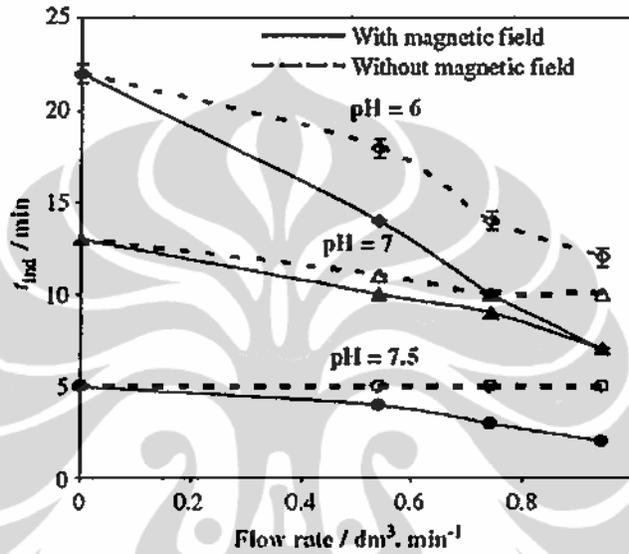
Gambar 2.12. Rasio penurunan ion Ca^{2+} sesudah magnetisasi (Ca^{++}) dan sebelum magnetisasi (Ca_i^{++}) di larutan pada proses magnetisasi larutan CaCO_3 pada berbagai kecepatan alir larutan (Gabrielli *et al*, 2001).

Gabrielli (2001) juga mengamati proses deposit CaCO_3 setelah magnetisasi pada wadah yang diam (statik). Tabel 2.3 menunjukkan terjadinya peningkatan waktu nukleasi (t_n) dari 5 menit tanpa magnetisasi menjadi 30 menit dengan magnetisasi pada laju alir $V = 0,074$ m/s. Waktu pembentukan kerak (t_s) dan total deposit CaCO_3 juga meningkat dari 75 menit dan 1 g/cm^2 tanpa magnetisasi pada sampel tanpa magnetisasi menjadi 180 menit dan 1,75 g/cm^2 dengan magnetisasi. Waktu nukleasi (t_n) adalah waktu yang dibutuhkan saat pertama kalinya deposit CaCO_3 terdeteksi dan waktu pembentukan kerak (t_s) adalah waktu dimana pembentukan deposit CaCO_3 masih terjadi. Terjadi jumlah peningkatan deposit dengan makin bertambahnya kecepatan alir larutan. Untuk mempercepat proses presipitasi larutan CaCO_3 , Gabrielli memberikan beda potensial pada larutan (electrochemical test).

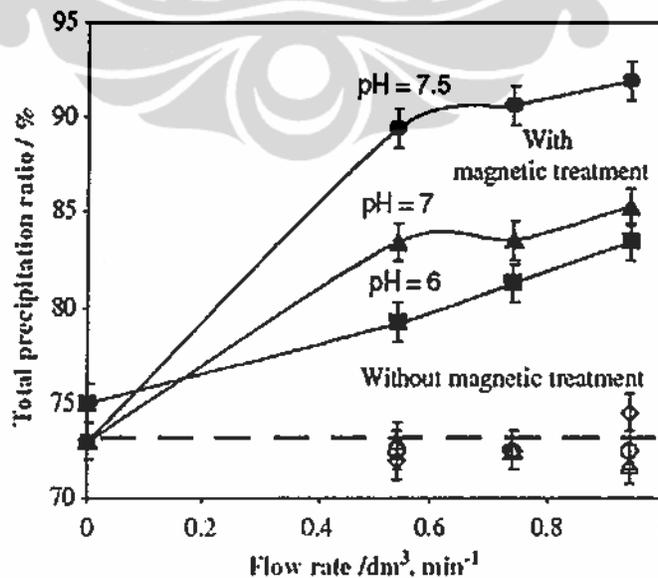
Tabel 2.3. Waktu nukleasi (t_n) dan waktu pembentukan kerak (t_s), pada berbagai kecepatan alir (Gabrielli *et al*, 2001)

	Tanpa magnet	Dengan Magnet	
		$V = 0.074$ m/s	$V = 0.885$ m/s
t_s (min)	75	180	225
t_n (min)	5	30	50

Fathi (2006) dengan model larutan CaCO_3 yang serupa dan titrasi kompleksometri EDTA untuk pengukuran ion Ca^{2+} mendapatkan tidak adanya penurunan ion Ca^{2+} selama 30 menit proses magnetisasi. Efek magnetisasi baru teramati sesudah proses magnetisasi (efek memori magnetik) dengan mengamati waktu induksi/nukleasi. Waktu induksi adalah waktu dimana konsentrasi ion Ca^{2+} di larutan mulai menurun. Proses presipitasi CaCO_3 pada penelitian Fathi dipercepat dengan mengalirkan gas nitrogen pada larutan untuk mempercepat lepasnya CO_2 terlarut ke fasa gas (degassing CO_2).



Gambar 2.13. Waktu induksi t_{ind} vs laju alir pada pH awal yang berbeda (Fathi *et al*, 2006).



Gambar 2.14. Rasio presipitasi total CaCO_3 pada berbagai laju alir dan pH awal larutan untuk waktu presipitasi 90 menit dan konsentrasi ion Ca^{2+} mula-mula 200 ppm (Fathi, A *et al*, 2006).

Gambar 2.13 menunjukkan adanya penurunan waktu induksi dengan bertambahnya laju alir. Magnetisasi mempercepat waktu induksi terutama pada pH rendah dan laju alir tinggi. Penurunan waktu induksi ini menunjukkan magnetisasi larutan dengan sistem fluida dinamik mendorong terjadinya peningkatan laju nukleasi CaCO_3 . Presipitasi total CaCO_3 dapat diukur dengan melihat penurunan jumlah ion Ca^{2+} di larutan. Fathi (2006) mendapatkan bahwa proses magnetisasi meningkatkan presipitasi total CaCO_3 sesudah proses magnetisasi.

Gambar 2.14 menunjukkan semakin tinggi pH awal dan laju alir larutan maka akan semakin tinggi pula presipitasi total CaCO_3 . Kenaikan presipitasi total pada proses magnetisasi (gambar 2.14) lebih disebabkan adanya kenaikan presipitasi di fasa larutan, sedang di permukaan yang terjadi adalah penurunan presipitasi.

Fathi (2006) menduga telah terjadi perubahan sifat dari spesies yang ada di larutan saat proses magnetisasi (reaksi pra-nukleasi) dan baru berdampak pada proses sesudah magnetisasi yang ditandai adanya peningkatan laju nukleasi. Reaksi pra-nukleasi tersebut digambarkan sebagai proses *pendekatan pasangan ion-ion* (ionic pairs micellization) yang akan memfasilitasi terjadinya nukleasi sesudah magnetisasi. Ben Amor (2004) menggambarkan proses presipitasi CaCO_3 dimulai dengan aglomerasi ion-ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} sebagai cluster. Reposisi ion-ion pada agregat tersebut akan membentuk "colloidal nuclei" tak stabil dan akhirnya akan tumbuh menjadi kristal yang stabil. Penjelasan lain yang mungkin adalah pada proses magnetisasi fluida dinamik menyebabkan penurunan kekuatan hidrat ion akibat agitasi mekanik dan gaya Lorentz. Perubahan sifat hidrat ion ini dapat memiliki sifat memori magnetik seperti halnya pada percobaan efek hidrat ion pada sistem fluida statik (Higashitani *et al*, 1993). Untuk itu perlu dilakukan suatu pembuktian tentang hal ini.

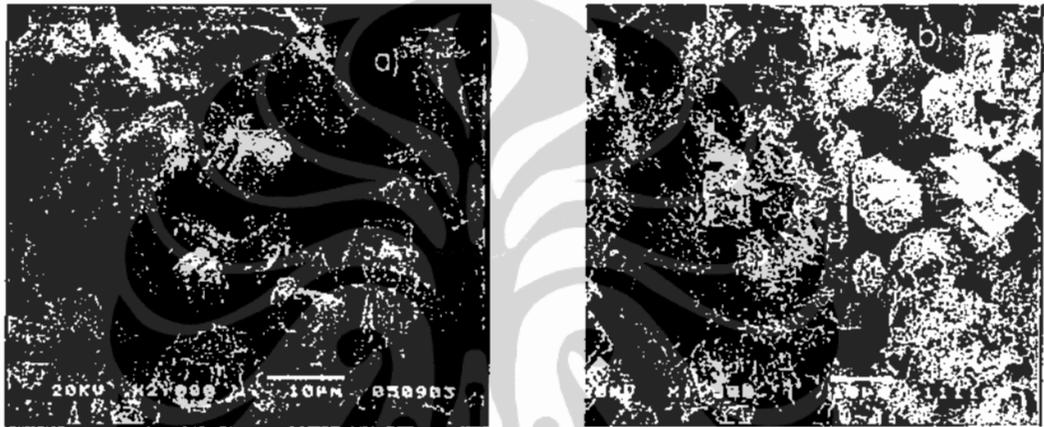
Busch menduga bahwa fenomena magneto-hidrodinamik yang muncul pada larutan konduktif seperti larutan elektrolit CaCO_3 menyebabkan profil aliran bersifat lebih turbulen sehingga menyebabkan peningkatan shear stress pada bagian dinding pipa yang dapat memicu terjadinya agregasi dan presipitasi dibagian dinding pipa (Busch *et al*, 1997).

2.2.7 Pembentukan kristal CaCO_3

Pembuktian bahwa magnetisasi mendorong terbentuknya kerak lunak berupa kristal aragonit merupakan topik penelitian yang hangat di kalangan para peneliti AMT, dan penjelasan tentang fenomena sebenarnya masih belum terjawab. Para Peneliti yang menggunakan sampel larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan metode magnetisasi sebelum presipitasi dan sistem fluida statik menunjukkan adanya kecenderungan pembentukan kristal Aragonit pada fasa larutan, meskipun tidak signifikan (Higashitani *et al*, 1993; Chibowski, *et al*, 2003).

Coey (2000) menggunakan sampel air tanah dan sistem fluida dinamik dengan kuat medan $B \approx 0,1$ T dan gradien $\nabla B \approx 10$ T/m melaporkan terjadinya peningkatan komposisi kristal Aragonit rata rata sebesar 23 % pada permukaan dan efek magnetisasi bertahan hingga

200 jam. Hal serupa juga dilaporkan oleh Knez (2005) dengan menggunakan sistem fluida dinamik pada larutan CaCO_3 pada kuat medan 1,12 T mendapatkan peningkatan Aragonit sebesar 71 % pada larutan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15. Knez mendapatkan bahwa jumlah Aragonit yang terbentuk dipengaruhi oleh kuat medan dan lama magnetisasi. Knez mengusulkan dua penjelasan mengenai fenomena ini : (1) adanya fenomena magnetohidrodinamik yaitu efek gaya Lorentz terhadap spesies bermuatan yang melewati medan magnet dan (2) adanya modifikasi hydration shell ion CO_3^{2-} . Sementara Kobe (Kobe *et al*, 2002) dengan sistem yang sama menjelaskan bahwa peningkatan aragonit terjadi karena adanya pembentukan Aragonit pada tahap awal nukleasi dan adanya pola aliran turbulen.



Gambar 2.15. Analisis SEM pembentukan kristal CaCO_3 dari larutan CaCO_3 : a) sampel non-magnetisasi dan b) sampel termagnetisasi (Knez *et al*, 2005).

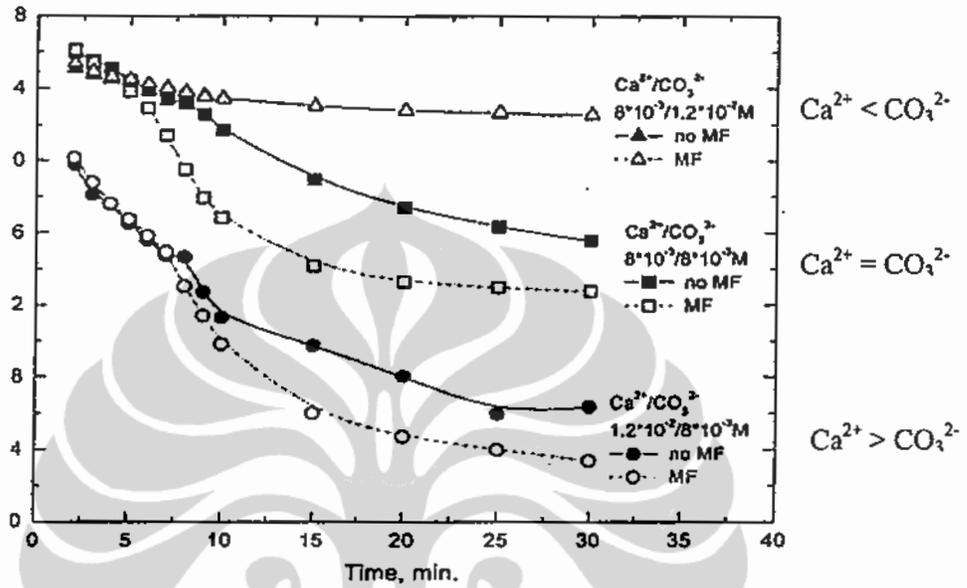
2.2.8 Pengaruh suhu dan parameter pH

Suhu sangat berpengaruh terhadap proses presipitasi dan pembentukan partikel CaCO_3 . Kenaikan suhu menyebabkan kelarutan CaCO_3 menurun dan pada suhu diatas 60°C pembentukan kristal Aragonit akan terjadi. Chebowski (2003) melakukan percobaan magnetisasi sistem fluida statik pada campuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan kuat medan 0,1 T pada suhu larutan saat magnetisasi $20 - 80^\circ\text{C}$. Pada suhu 60 dan 80°C , pengaruh magnetisasi berkurang dan jumlah kerak yang terbentuk menurun dengan naiknya suhu. Hasil uji XRD menunjukkan terjadinya peningkatan jumlah kristal Aragonit pada suhu 60 dan 80°C . Hal ini sesuai dengan mekanisme pembentukan kristal Aragonit yang lebih mudah terbentuk pada suhu diatas 60°C (Kobe *et al*, 2002; Wang *et al*, 1999). Higashitani (1995) dalam percobaannya menggunakan larutan elektrolit dan koloidal silika mendapatkan bahwa kenaikan suhu sesudah proses magnetisasi dapat menyebabkan efek magnetisasi berkurang, atau bahkan menghilang sama sekali.

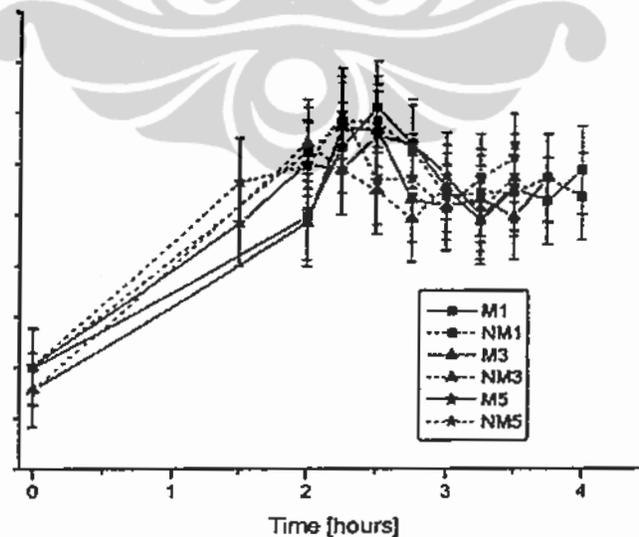
Harga perubahan pH pada proses presipitasi CaCO_3 dipengaruhi oleh suatu kesetimbangan padatan CaCO_3 Kalsit hasil presipitasi dengan larutan ionnya. Dengan

bertambahnya padatan CaCO_3 kalsit yang terbentuk akan menggeser pH larutan ke arah harga pH isoelektrik Kalsit yaitu 8,2 – 8,3 pada suhu 20 – 30 °C (Chibowski *et al*, 2003).

Air sadah sintetik yang berasal dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 yang banyak diamati oleh para peneliti untuk memodelkan proses presipitasi partikel CaCO_3 , memiliki pH basa.



Gambar 2.16. Perubahan pH fungsi waktu pada proses presipitasi CaCO_3 untuk larutan Na_2CO_3 termagnetisasi (MF) dan non-magnetisasi (no MF) pada suhu 20 °C. (Chibowski *et al*, 2003)



Gambar 2.17. Perubahan pH fungsi waktu pada proses presipitasi CaCO_3 untuk larutan termagnetisasi (M1, M3, M5) dan non-magnetisasi (NM1, NM3, NM5) (Knez *et al*, 2005)

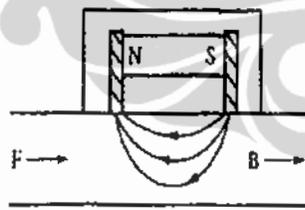
Gambar 2.16 menunjukkan bahwa magnetisasi dapat lebih menurunkan pH larutan untuk jumlah ion $\text{Ca}^{2+} \geq \text{CO}_3^{2-}$. Harga pH yang lebih mendekati pH kesetimbangan Kalsit (pH isoelektrik) akan menekan laju pembentukan kalsit.

Air sadah sintetik berupa larutan CaCO_3 bersifat asam (6 – 6,5) dan setelah proses presipitasi maka pH akan bergeser (naik) mendekati pH isoelektrik kalsit seperti terlihat pada gambar 2.17. Gambar 2.17 menunjukkan tidak ada perbedaan kenaikan pH yang jelas antara larutan yang dimagnetisasi dan yang tidak dimagnetisasi (Knez *et al*, 2005).

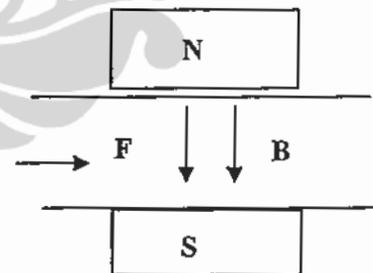
Parson (1997) melakukan percobaan dengan sistem fluida dinamik dan pengontrolan pH disekitar 8 – 8,5 pada larutan CaCl_2 dan NaHCO_3 . Hasilnya menunjukkan bahwa efek AMT justru menghilang dengan adanya pengontrolan tersebut. Magnetisasi mempengaruhi kesetimbangan karbonat dan juga terhadap pembentukan kerak. Hasil penelitian Parson menunjukkan adanya penurunan pH dan jumlah kerak akibat magnetisasi. Namun tidak dilaporkan mengenai jenis kerak yang terbentuk.

2.2.9 Orientasi magnet.

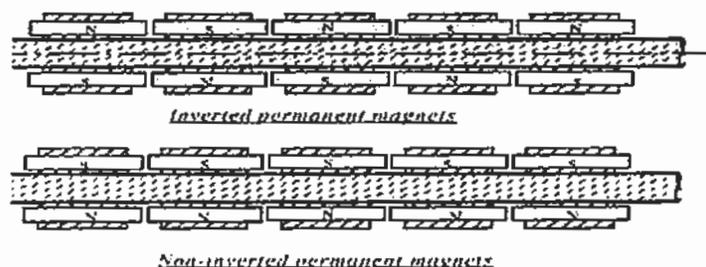
Orientasi magnet adalah arah gaya medan magnet terhadap arah aliran air. Baker (1996) mengklasifikasikan 2 jenis orientasi magnet yang digunakan dalam AMT, yaitu konfigurasi paralel flow dan orthogonal flow (gambar 2.18a dan 2.18b). Sebagian besar peneliti menggunakan sistem orthogonal flow, karena efek gaya Lorentz paling efektif jika arah pergerakan ion/partikel bermuatan tegak lurus dengan arah medan magnet.



Gambar. 2.18 a Paralel Flow



Gambar. 2.18 b Orthogonal flow



Gambar 2.19. Susunan inversi dan non inversi

Gabrielli (2001) menggunakan konfigurasi orthogonal dengan susunan inversi dan non inversi (gambar 2.19). Hasilnya menunjukkan susunan inversi lebih efektif dibanding non inversi, hal ini disebabkan sistem inversi memiliki gradien medan magnet yang lebih besar dibanding sistem non-inversi.

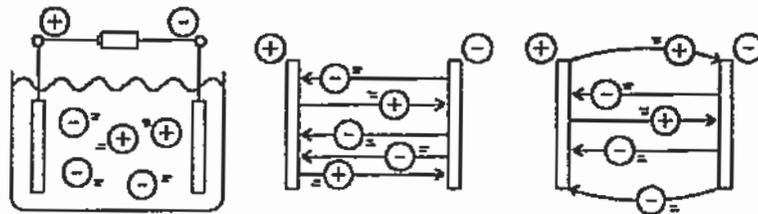
2.3 Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan elektrolit

Konduktivitas larutan elektrolit merupakan parameter penting yang dapat digunakan untuk mengamati sifat-sifat hidrat ion dan cluster air. Untuk itu pada sub-bab ini akan dijelaskan bagaimana harga konduktivitas suatu larutan menggambarkan konsentrasi ion, besaran cluster air dan radius hidrat ion. Selanjutnya akan dijelaskan pengaruh medan magnet pada interaksi hidrat ion melalui pengamatan harga konduktivitas larutannya.

2.3.1 Konduktivitas dan sifat-sifat ion dalam larutan

Konduktivitas adalah kemampuan suatu bahan dalam mengalirkan arus listrik. Larutan yang dapat menghantarkan arus listrik disebut konduktor elektrolitik. Dalam pengaruh medan listrik, aliran arus yang melalui konduktor elektrolitik disebabkan oleh adanya pergerakan ion-ion positif dan negatif.

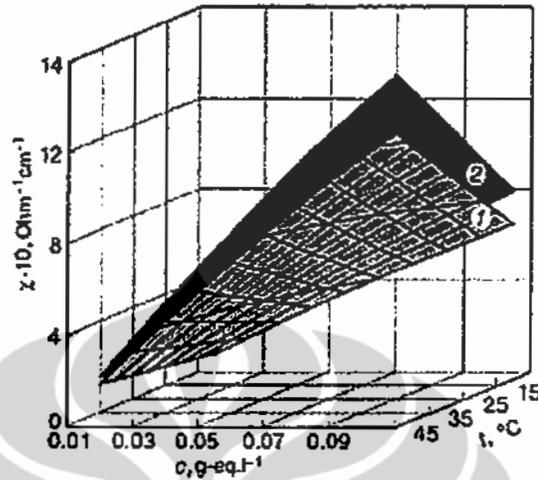
Larutan elektrolit mengandung ion-ion bermuatan positif (kation), dan ion-ion negatif (anion). Gambar 2.20 menggambarkan perilaku ion pada larutan elektrolit jika diberikan tegangan. Akan terjadi pergerakan kation dan anion menuju anoda dan katoda sehingga menimbulkan arus listrik dalam larutan. Ion dalam larutan selalu terhidrasi oleh molekul air membentuk hidrat ion. Oleh sebab itu konduktivitas larutan elektrolit menggambarkan mobilitas hidrat ion dalam larutan. (Wright, 2007).



Gambar 2.20. Pergerakan ion-ion di dalam larutan elektrolit yang diberikan plat elektroda dan tegangan listrik (Wright, 2007).

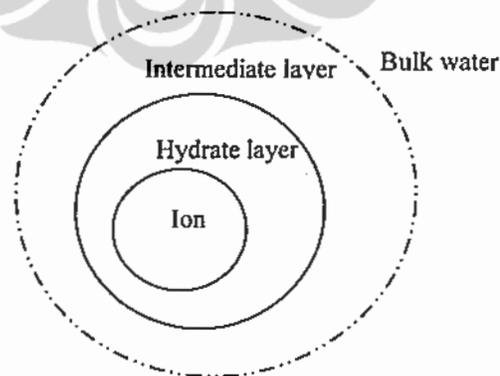
Vlaev (2003) mendapatkan efek kenaikan konduktivitas larutan Na_2SeO_3 dan K_2TeO_3 sebagai fungsi suhu dan konsentrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.21. Kenaikan suhu menyebabkan struktur molekul-molekul air (bulk water cluster) yang besar menjadi tidak stabil dan terputus membentuk struktur yang lebih stabil ditandai dengan menurunnya harga

viskositas. Turunnya harga viskositas air menyebabkan mobilitas hidrat ion meningkat yang ditandai dengan naiknya harga konduktivitas. Kenaikan viskositas air bersifat reversibel dan akan segera turun dengan menurunnya suhu larutan. (Vlaev *et al*, 2004)



Gambar 2.21. Pengaruh suhu dan konsentrasi terhadap konduktivitas Na_2SeO_3 (1) dan K_2TeO_3 (2) (Vlaev , 2003)

Lyaschenko (2001) menggambarkan jenis interaksi molekul air di sekitar ion seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22. Ion akan dikelilingi oleh lapisan hidrat (hydrate layer) dimana interaksi yang terjadi adalah interaksi ion dengan dipol H_2O . Selanjutnya intermediate layer terjadi karena adanya interaksi H_2O dari hidrat ion dengan H_2O dari bulk water. Sementara pada bulk water terjadi interaksi hidrogen (hidrogen bonding) dengan struktur tetrahedral, dimana terjadi interaksi dipol - dipol dari H_2O .



Gambar 2.22. Jenis interaksi molekul air disekitar ion (Lyaschenko, 2001)

Tabel 2.4 menunjukkan jenis interaksi dan energi interaksi pada pasangan ion-ion, ion-molekul polar dan molekul polar – molekul polar. Terlihat bahwa untuk jarak (x) yang sama, maka urutan kekuatan energi interaksi (Φ) adalah : ion-ion > ion-dipole > dipole-dipole. Hal ini

menunjukkan bahwa energi interaksi ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} lebih besar dibanding hidrat Ca^{2+} atau CO_3^{2-} dan energi interaksi $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ bulk water adalah yang terendah untuk jarak antar ion/molekul yang sama.

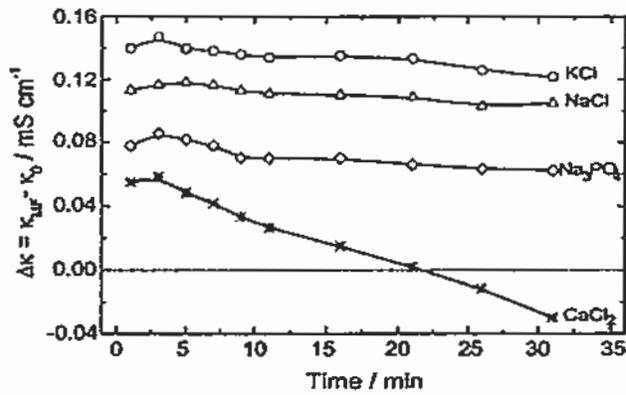
Tabel 2.4. Energi interaksi pasangan ion-ion, ion-dipol dan dipol-dipol (Hiemenz *et al*, 1994).

Jenis ikatan	Energi interaksi (Φ)	Keterangan
Ion ₁ – ion ₂	$\frac{(ze)_1 (ze)_2}{4\pi\epsilon_0 x}$	Z= valensi; e=muatan elektron; ϵ_0 =pemitivitas ruang hampa; x=jarak antar ion
Ion ₁ – dipole ₂	$\frac{(ze)_1 \mu_2 \cos\theta}{4\pi\epsilon_0 x^2}$	μ = momen dipol; θ = sudut antara garis sumbu dan dan aksis dipol; x=jarak antar ion - molekul dipol
Dipole ₁ – dipole ₂	$\frac{\sqrt{2}\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon_0 x^3}$	x=jarak antar molekul dipol

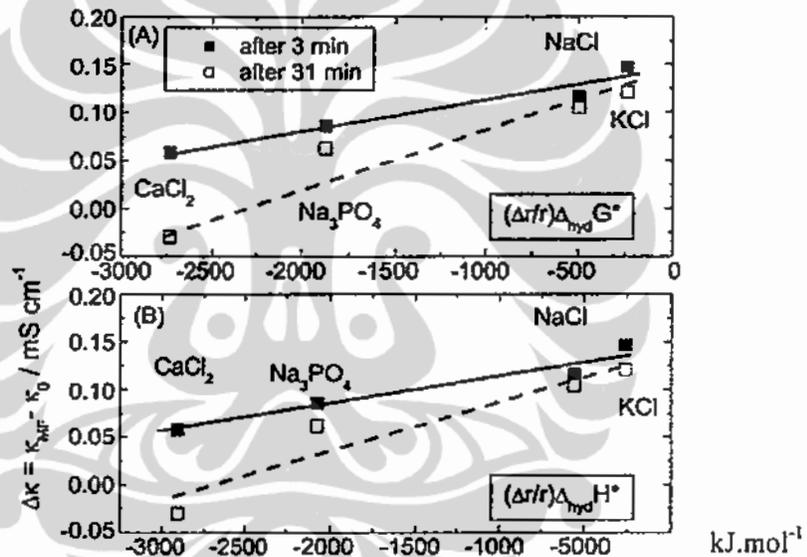
2.3.2 Konduktivitas larutan elektrolit di bawah pengaruh medan magnet

Holysz (2007) telah melakukan pengamatan pengaruh medan magnet terhadap konduktivitas dari berbagai larutan elektrolit menggunakan sistem fluida statik. Gambar 2.22 menunjukkan bahwa medan magnet akan menaikkan konduktivitas larutan. Konduktivitas suatu larutan elektrolit menggambarkan mobilitas dari hidrat ion yang ada dalam larutan tersebut. Kenaikan konduktivitas suatu larutan elektrolit pada konsentrasi, tekanan dan suhu yang konstan menunjukkan adanya penurunan diameter hidrat ion yang disertai dengan penguatan interaksi hidrat ion-nya. Makin tinggi kenaikan konduktivitas ($\Delta\kappa$) menunjukkan makin besar penguatan hidrat ion yang terjadi akibat medan magnet. Kenaikan harga konduktivitas karena medan magnet bersifat relatif stabil meskipun sudah tidak ada medan magnet. Hal ini dikenal sebagai efek memori magnetik.

Holysz (2007) mendapatkan kenaikan konduktivitas pada larutan elektrolit merupakan fungsi energi Gibbs hidrasi ion ($\Delta_{\text{hyd}}G$), entalpi hidrasi ion ($\Delta_{\text{hyd}}H$), ketebalan kulit hidrat (Δr) dan radius ion (r) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23. Makin tinggi harga $(\Delta r/r)\Delta_{\text{hyd}}G$ larutan elektrolit maka kenaikan konduktivitas akibat medan magnet akan semakin besar. Hal ini berarti akan semakin besar pula penguatan hidrat yang terjadi. Efek penguatan hidrat ion karena pengaruh medan magnet akan berpengaruh pada presipitasi dari larutan elektrolit dengan kejenuhan tinggi.



Gambar 2.23. Kurva kenaikan konduktivitas ($\Delta\kappa$) fungsi waktu dari larutan elektrolit KCl, NaCl, Na_3PO_4 dan CaCl_2 sebagai pengaruh medan magnet pada konsentrasi 0.1 M dan suhu 20 °C (Holysz *et al*, 2007).

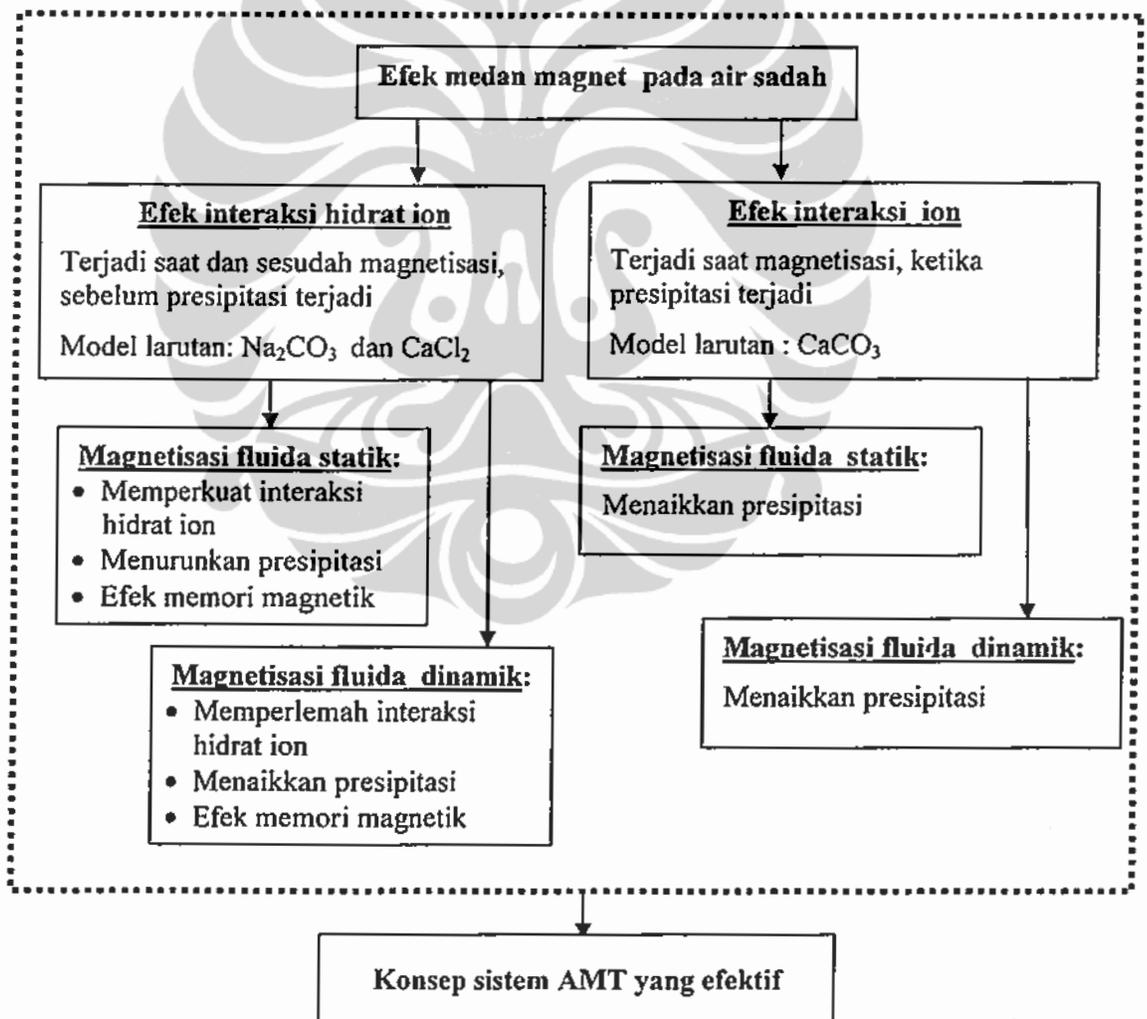


Gambar 2.24. Kurva kenaikan konduktivitas larutan sebagai fungsi ($\Delta r/r$). $\Delta_{\text{hyd}}G$ dan ($\Delta r/r$). $\Delta_{\text{hyd}}H$ pada larutan elektrolit dengan konsentrasi 0.1 M setelah 3 menit dan 31 menit proses magnetisasi (Holysz *et al*, 2007).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka pemikiran

Berdasarkan pembahasan teori dan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan pada bab II, maka efek medan magnet pada air sadah dapat diklasifikasikan menjadi 4 jenis yang disesuaikan dengan kondisi operasi dan efek presipitasi CaCO_3 yang ditimbulkannya. Gambar 3.1 menunjukkan kerangka berfikir pengembangan sistem AMT melalui pemahaman efek interaksi hidrat ion dan interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi.



Gambar 3.1. Kerangka berfikir pengembangan konsep sistem AMT yang efektif melalui pemahaman efek interaksi hidrat ion dan interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi.

Berikut penjelasan masing-masing efek tersebut :

1. Efek penguatan interaksi hidrat ion terjadi pada magnetisasi sistem fluida statik di mana presipitasi belum terjadi. Magnetisasi larutan Na_2CO_3 akan memperkuat interaksi hidrat ionnya yang dapat diamati dengan melihat adanya kenaikan konduktivitas larutan sesudah magnetisasi. Efek ini akan menekan presipitasi CaCO_3 ketika larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dicampur dengan larutan CaCl_2 . Efek penguatan hidrat ion ini tetap terlihat pada ion-ion termagnetisasi meskipun sudah tidak ada medan magnet (efek memori magnetik).
2. Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik; dampak pada hidrat ion maupun presipitasi CaCO_3 belum teramati. Adanya efek gaya Lorentz dan agitasi mekanik yang terjadi pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan larutan CaCl_2 yang dimagnetisasi dengan sistem fluida dinamik diduga akan memperlemah kekuatan hidratnya. Hal tersebut akan mendorong presipitasi CaCO_3 -nya.
3. Efek penguatan interaksi ion pada sistem fluida statik berdampak mendorong terjadinya presipitasi CaCO_3 . Efek ini terjadi saat magnetisasi pada larutan yang sedang berpresipitasi.
4. Efek penguatan interaksi ion pada sistem fluida dinamik melalui efek gaya Lorentz berdampak mendorong presipitasi CaCO_3 . Efek ini terjadi saat magnetisasi pada larutan yang sedang berpresipitasi. Presipitasi CaCO_3 pada sistem sirkulasi fluida dinamik dipengaruhi oleh medan magnet dan proses sirkulasi. Waktu efektif magnetisasi merupakan parameter penting untuk melihat efek optimum magnet terhadap peningkatan presipitasi CaCO_3 .

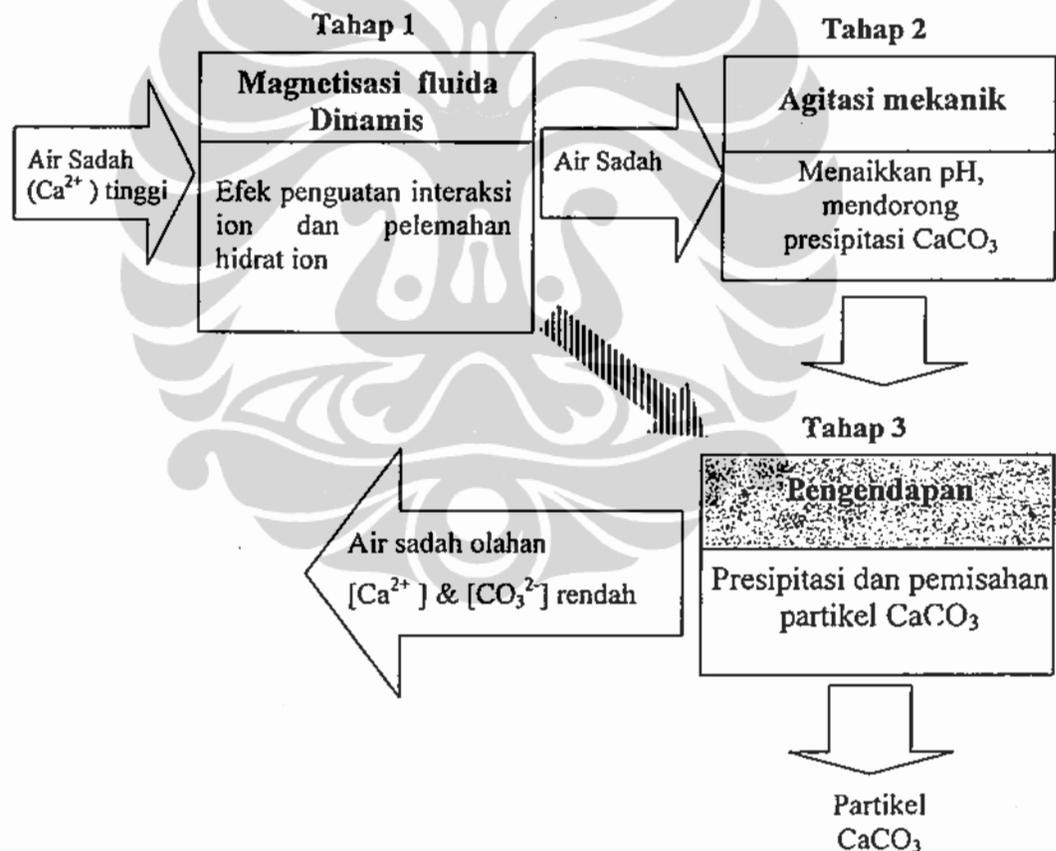
Pengujian ke-empat efek tersebut pada berbagai parameter yang berpengaruh akan menjawab tujuan pertama penelitian ini, yaitu mendapatkan pemahaman dan kejelasan tentang efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi.

Tujuan selanjutnya dari studi ini adalah mendapatkan suatu konsep sistem AMT yang efektif mendorong presipitasi CaCO_3 berdasarkan pemahaman dari hasil pengujian efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion pada air sadah termagnetisasi. Sistem AMT yang akan dikembangkan dalam penelitian ini adalah AMT yang dapat menekan pembentukan kerak CaCO_3 dengan menurunkan kandungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah (menurunkan kesadahan) menggunakan sistem sirkulasi fluida dinamik. Penurunan kesadahan pada proses AMT dilakukan dengan 3 tahap sebagai berikut:

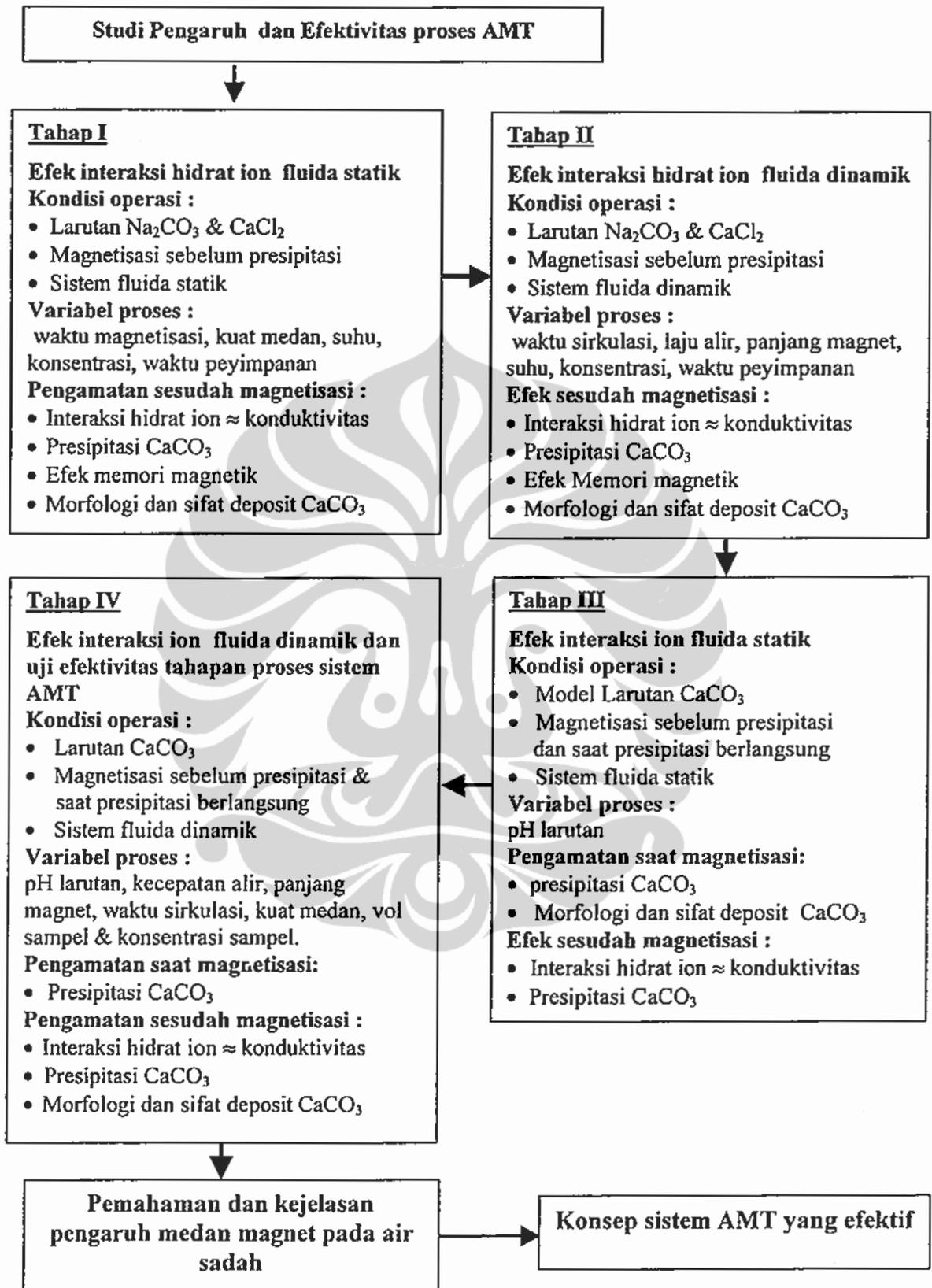
- a. Tahap pertama adalah proses magnetisasi larutan dengan sistem sirkulasi fluida dinamik. Jika presipitasi sudah terjadi saat magnetisasi (harga supersaturasi tinggi) maka akan terjadi peningkatan presipitasi saat magnetisasi, dan untuk mendapatkan efek optimum

proses maka magnetisasi dilakukan pada waktu efektif magnetisasi. Jika presipitasi belum terjadi (harga supersaturasi rendah), maka terjadi penurunan interaksi hidrat ion dan pada kondisi ini peningkatan presipitasi baru terjadi sesudah proses magnetisasi (Tahap 2 dan 3).

- b. Tahap 2 dilakukan proses agitasi mekanik guna menaikkan pH larutan dan menurunkan CO_2 terlarut sehingga presipitasi CaCO_3 dapat lebih cepat terjadi. Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain dengan sirkulasi aliran fluida.
- c. Tahap ke 3 adalah proses pengendapan agar presipitasi masih dapat berlangsung dan partikel CaCO_3 yang sudah terbentuk pada air sadah hasil olahan dapat dipisahkan. Gambar 3.2 menunjukkan skema usulan proses sistem AMT yang efektif menurunkan kesadahan air yang akan dikembangkan dalam penelitian ini.



Gambar 3.2. Skema usulan konsep proses sistem AMT yang efektif untuk menurunkan kesadahan air (Saksono *et al*, 2007).



Gambar 3.3. Diagram alir tahapan penelitian

3.2 Metode dan ruang lingkup penelitian

Berdasarkan pemikiran diatas maka efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion adalah dua efek penting dalam mempelajari perilaku presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi. Untuk itu diperlukan kondisi operasi dan jenis larutan tertentu guna dapat mengamati fenomena kedua efek tersebut pada presipitasi CaCO_3 dan sekaligus melihat efektivitasnya dalam mendorong presipitasi CaCO_3 dalam tiap tahapan proses sistem AMT yang diusulkan. Skema diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3. Berikut tahapan dan penjelasannya.

3.2.1 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik

Efek interaksi hidrat ion akan teramati dengan baik pada larutan ionik dengan kejenuhan rendah. Untuk itu akan digunakan senyawa Na_2CO_3 dan CaCl_2 yang memiliki sifat elektrolit kuat dan harga kelarutan yang tinggi dalam air. Magnetisasi dilakukan pada masing-masing larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dalam keadaan diam (sistem fluida statik) dan untuk melihat pengaruh medan magnet pada sifat hidrat ion-nya akan diuji konduktivitas larutannya sebelum dan sesudah magnetisasi. Efek penguatan interaksi hidrat ion pada proses presipitasi akan teramati dengan menaikkan kejenuhan larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan cara mencampur keduanya yang mengakibatkan terjadinya presipitasi CaCO_3 . Efek interaksi hidrat ion untuk sistem fluida statik adalah menurunkan presipitasi CaCO_3 . Hipotesis untuk proses ini adalah medan magnet akan memperkuat interaksi hidrat ion yang menyebabkan presipitasi ion-ionnya menurun. Pengaruh kondisi operasi (konsentrasi larutan, kuat medan, waktu magnetisasi, suhu presipitasi, waktu presipitasi) dalam menekan presipitasi CaCO_3 perlu dilakukan guna melihat efektivitas proses ini. Morfologi dan sifat deposit yang terbentuk oleh efek interaksi hidrat ion ini juga akan dilakukan untuk mendapatkan informasi dan pemahaman yang lebih lengkap.

3.2.2 Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik

Efek interaksi hidrat ion untuk sistem fluida dinamik diamati dengan mengalirkan larutan ion dengan kejenuhan rendah (larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2) melewati suatu medan magnet. Magnetisasi dilakukan pada masing-masing larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dengan sistem sirkulasi fluida dinamik dan untuk melihat pengaruh medan magnet pada sifat hidrat ion-nya akan diuji konduktivitas larutannya sebelum dan sesudah magnetisasi. Efek penurunan ikatan hidrat ion pada proses presipitasi akan teramati dengan mencampur larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 sehingga terjadi presipitasi CaCO_3 . Efek interaksi hidrat ion untuk sistem fluida dinamik adalah menurunkan presipitasi CaCO_3 . Hipotesis untuk proses ini adalah medan magnet akan memperlemah interaksi hidrat ion yang menyebabkan presipitasi ion-ionnya meningkat.

Pengaruh kondisi operasi (konsentrasi larutan, waktu magnetisasi, suhu presipitasi, waktu presipitasi dan laju alir) dalam menekan presipitasi CaCO_3 perlu dilakukan guna melihat efektivitas proses ini. Morfologi dan sifat deposit yang terbentuk oleh efek interaksi hidrat ion ini juga akan dilakukan untuk mendapatkan informasi dan pemahaman yang lebih lengkap.

3.2.3 Efek Interaksi ion pada sistem fluida statik.

Efek interaksi ion dalam larutan dengan magnetisasi sistem fluida statik akan diamati pada kondisi presipitasi larutan sedang terjadi. Untuk itu magnetisasi dilakukan pada larutan air sadah dengan kondisi supersaturasi yang tinggi menggunakan larutan CaCO_3 . Hipotesis pada bagian ini adalah magnetisasi larutan CaCO_3 sebelum terjadi presipitasi diduga akan menyebabkan peningkatan interaksi hidrat ion sehingga terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi untuk sistem fluida statik. Untuk itu akan digunakan larutan CaCO_3 dengan pH rendah (supersaturasi rendah) dimana presipitasi belum terjadi saat magnetisasi. Pembuktian hipotesis ini dilakukan dengan melakukan pengukuran konduktivitas larutan dan presipitasi CaCO_3 setelah magnetisasi. Morfologi dan sifat deposit yang terbentuk oleh efek interaksi ion ini juga perlu dilakukan guna melengkapi hasil studi ini.

3.2.4 Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik dan uji efektivitas tahapan proses sistem AMT

Efek interaksi ion jenis ini akan diamati dengan cara memagnetisasi larutan CaCO_3 pada kondisi sirkulasi fluida dinamik. Peningkatan energi interaksi ion oleh medan magnet pada sistem fluida dinamik adalah mendorong presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Efek ini akan teramati ketika ion-ion pada larutan sudah berpresipitasi.

Hipotesis pada bagian ini adalah magnetisasi larutan CaCO_3 sebelum terjadi presipitasi diduga akan menyebabkan peningkatan interaksi hidrat ion sehingga terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi untuk sistem fluida dinamik. Untuk itu akan digunakan larutan CaCO_3 dengan pH rendah (supersaturasi rendah) dimana presipitasi belum terjadi saat magnetisasi. Pembuktian hipotesis ini dilakukan dengan melakukan pengukuran konduktivitas larutan dan presipitasi CaCO_3 setelah magnetisasi. Morfologi dan sifat deposit yang terbentuk oleh efek interaksi ion ini juga perlu dilakukan guna melengkapi hasil studi ini.

Uji efektivitas tahapan proses sistem AMT meliputi uji presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi (magnetisasi sirkulasi) dan sesudah magnetisasi (pengendapan) dengan variabel proses meliputi: pH larutan, kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi, dan volume larutan. Pada tahap ini juga akan dilakukan pengujian waktu efektif magnetisasi. Selanjutnya dibuat pemodelan presipitasi CaCO_3 untuk sistem fluida dinamik untuk mendapatkan waktu efektif magnetisasi dan

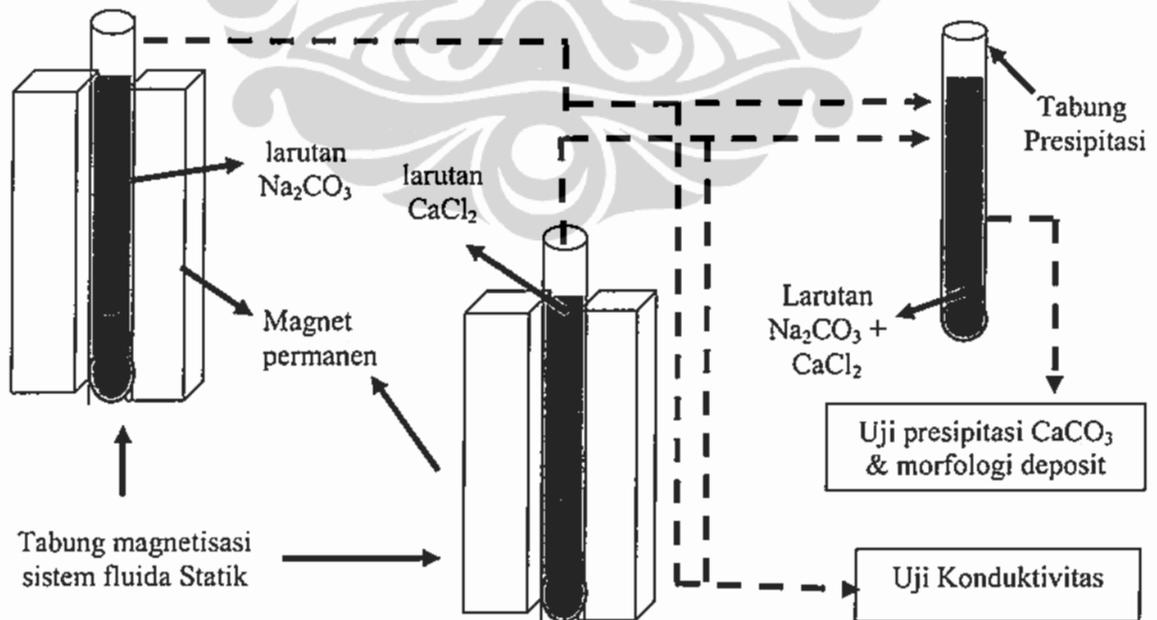
penurunan ion Ca^{2+} dalam larutan pada berbagai kondisi operasi. Terakhir akan diajukan beberapa konfigurasi sistem AMT penurun kesadahan dengan analisis efektivitas sistem proses .

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini bersifat investigasi eksperimental yang dilakukan di Departemen Teknik Kimia FTUI. Untuk analisis SEM dan XRD dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Pelaksanaan penelitian ini akan dilakukan dalam 4 tahapan, tahap pertama pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik, kedua tahap pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik, dan selanjutnya pengujian pengujian efek interaksi ion pada sistem fluida statik. Tahap ke empat adalah pengujian efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik serta pengujian efektivitas tahapan proses sistem AMT yang diusulkan dalam penelitian ini.

3.3.1 Tahap I : Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik

Percobaan ini dilakukan dengan memagnetisasi terlebih dahulu larutan 0.01 M Na_2CO_3 dan 0.01 M CaCl_2 masing-masing sebanyak 10 mL dalam tabung magnetisasi sebelum dilakukan pencampuran. Selanjutnya kedua larutan yang telah dimagnetisasi dipindahkan kedalam tabung presipitasi untuk diamati presipitasi CaCO_3 -nya. Sebagian yang lain dari sampel larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi akan diuji konduktivitasnya. Skema percobaan ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Skema proses pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik.

Variabel bebas proses dan kondisi operasi meliputi:

1. Kuat medan magnet di sumbu tabung presipitasi: 0; 2; 4; dan 5,2 kG dengan mengatur jarak magnet ke dinding tabung. Hal ini bertujuan untuk melihat efek kuat medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 . Kuat medan diukur menggunakan alat Gaussmeter
2. Waktu magnetisasi: 0; 5; 10; 30; dan 60 menit. Hal ini bertujuan untuk melihat efek Waktu magnetisasi terhadap presipitasi CaCO_3 .
3. Suhu larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 : 28; 50; dan 70 °C . Hal ini bertujuan untuk mengamati efek suhu terhadap konduktivitas dan presipitasi CaCO_3 .
4. Konsentrasi sampel Na_2CO_3 dan CaCl_2 : 0,005 M, 0,01 M dan 0,02 M. Hal ini bertujuan untuk melihat efek konsentrasi larutan sampel terhadap presipitasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet.
5. Waktu penyimpanan sampel Na_2CO_3 yang sudah dimagnetisasi yaitu: 24; 48; 96; 120; dan 148 jam. Hal ini bertujuan untuk melihat efek memori magnet pada larutan Na_2CO_3 .

Setelah dimagnetisasi dilakukan pengukuran variabel terikat sbb:

1. Pengukuran konduktivitas larutan untuk melihat efek interaksi hidrat ion pada sampel larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi selama 1 jam.
2. Kandungan ion Ca^{2+} larutan sampel dalam tabung presipitasi dengan dengan titrasi kompleksometri EDTA selama 5, 10, 20, 40, 60 dan 120 menit presipitasi untuk mendapatkan presipitasi total CaCO_3 . Pengamatan juga dilakukan untuk 24 jam presipitasi.
3. Massa deposit CaCO_3 pada tabung presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA selama 120 menit presipitasi.
4. Morfologi deposit CaCO_3 dengan SEM dan XRD untuk mengukur jumlah, jenis, komposisi dan ukuran kristal.

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel dapat dilihat pada lampiran B.

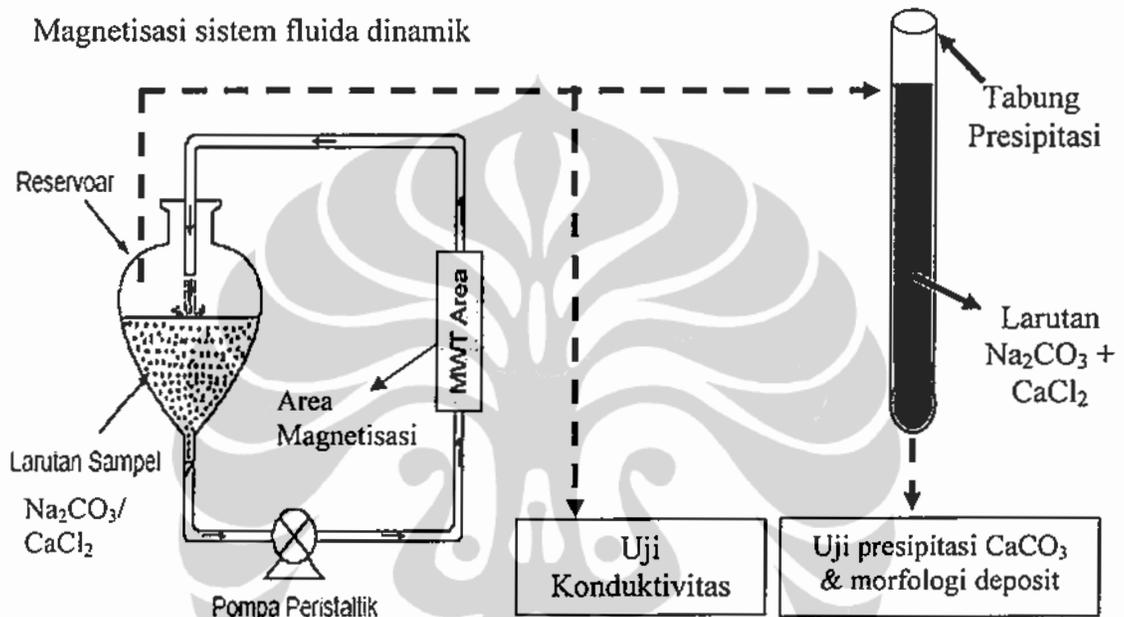
3.3.2 Tahap II : Efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik

Percobaan ini dilakukan dengan melewati larutan 0.01 M Na_2CO_3 sebanyak 120 mL pada medan magnet dengan sistem fluida sirkulasi (fluida dinamik) menggunakan selang silikon (ID: 0.6 cm ; OD : 0.8 cm) dan pompa peristaltik. Kuat medan yang diberikan sebesar 5,2 kG. Prosedur yang sama juga dilakukan untuk larutan CaCl_2 . Selanjutnya kedua larutan yang telah dimagnetisasi dipindahkan kedalam tabung presipitasi untuk diamati presipitasi CaCO_3 -nya. Sebagian yang lain dari sampel larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi akan diuji konduktivitasnya. Skema percobaan ditunjukkan pada gambar 3.5.

Variabel Proses dan kondisi operasi meliputi:

1. Waktu sirkulasi: 0; 5; 10; dan 20. Hal ini bertujuan untuk melihat efek waktu magnetisasi terhadap presipitasi CaCO_3
2. Kecepatan alir: 0,262 m/s; 0,554 m/s, dan 0,792 m/s. Hal ini bertujuan untuk melihat efek laju alir terhadap presipitasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet.
3. Suhu larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 : 28; 50; dan 70 $^\circ\text{C}$. Hal ini bertujuan untuk mengamati efek suhu terhadap presipitasi CaCO_3 .

Magnetisasi sistem fluida dinamik



Gambar 3.5. Skema proses pengujian efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida dinamik.

4. Panjang magnet dengan mengatur jumlah magnet: 1, 3, dan 7 pasang magnet dengan panjang tiap pasang adalah 5 cm Hal ini bertujuan untuk melihat efek panjang magnet terhadap konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan presipitasi CaCO_3
5. Konsentrasi sampel Na_2CO_3 dan CaCl_2 : 0,005 M; 0,01 M; dan 0,02 M. Hal ini bertujuan untuk melihat efek konsentrasi larutan sampel terhadap presipitasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet.
6. Waktu penyimpanan sampel Na_2CO_3 yang sudah dimagnetisasi yaitu: 0; 24; 48; 72; dan 120 jam. Hal ini bertujuan untuk melihat efek memori magnet pada larutan Na_2CO_3 .

Setelah dimagnetisasi dilakukan pengukuran variabel terikat sbb :

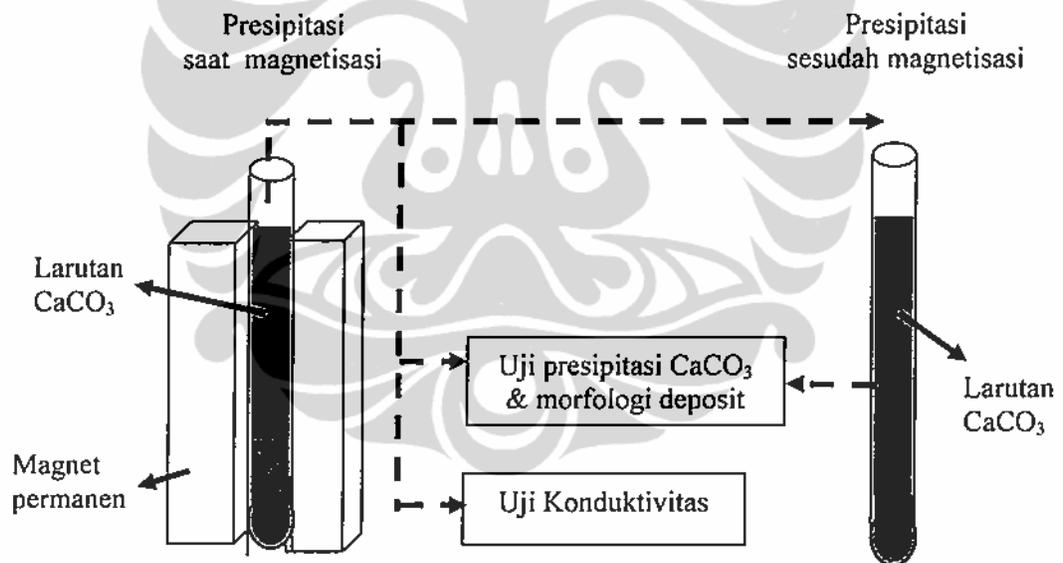
1. Pengukuran konduktivitas larutan untuk melihat efek interaksi hidrat ion pada sampel larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi selama 1 jam pengukuran.

2. Kandungan ion Ca^{2+} larutan sampel dalam tabung presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA untuk 5, 10, 20, 40, 60 dan 120 menit presipitasi untuk mendapatkan presipitasi total CaCO_3 .
3. Massa deposit CaCO_3 pada tabung presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA selama 120 menit presipitasi.
4. Morfologi deposit CaCO_3 dengan SEM untuk mengamati jumlah, jenis, komposisi dan ukuran kristal secara kualitatif.

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel dapat dilihat pada lampiran B.

3.3.3 Tahap III : Efek interaksi ion pada sistem fluida statik

Percobaan ini akan menggunakan larutan CaCO_3 sebagai model air sadah. Kuat medan yang diberikan sebesar 5,2 kG. Presipitasi dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi. Variasi harga supersaturasi dilakukan dengan memvariasikan pH larutan CaCO_3 . Skema alur percobaan ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Skema proses pengujian efek interaksi ion pada sistem fluida statik.

Variabel bebas proses dan kondisi operasi meliputi:

Variasi pH : 6,4; 7,5; 8; dan 8,5. Kenaikan pH larutan akan menaikkan kejenuhan. Hal ini bertujuan untuk melihat efek kejenuhan (supersaturasi) terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi. pH larutan sampel dinaikan dengan cara pengadukan kuat selama beberapa waktu hingga pH yang diinginkan tercapai.

Setelah dimagnetisasi dan presipitasi dilakukan pengukuran variabel berikut:

1. Kandungan ion Ca^{2+} larutan sampel dalam tabung magnetisasi dan presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA hingga 1440 menit presipitasi pada suhu $28\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Pengukuran konduktivitas larutan CaCO_3 untuk sampel yang belum terpresipitasi (supersaturasi rendah) dengan konduktometer dilanjutkan dengan pengukuran kandungan ion Ca^{2+} larutan sampel dengan titrasi kompleksometri EDTA hingga 120 menit presipitasi pada suhu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Massa deposit CaCO_3 pada tabung magnetisasi dan presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA.
4. Morfologi deposit CaCO_3 dengan SEM untuk mengamati jumlah, jenis, komposisi dan ukuran kristal secara kualitatif.

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel dapat dilihat pada lampiran B.

Tahap IV : Efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik dan uji efektivitas AMT

Percobaan ini dilakukan dengan melewatkan larutan CaCO_3 dengan konsentrasi CaCO_3 sekitar 400 ppm sebanyak 240 mL pada medan magnet dengan sistem fluida sirkulasi (fluida dinamik) menggunakan selang silikon (ID: 0.6 cm ; OD : 0.8 cm) dan pompa peristaltik. Setelah dimagnetisasi selanjutnya pada sampel larutan akan dilakukan:

1. Pengujian kandungan ion Ca^{2+} untuk mengamati proses presipitasi saat magnetisasi.
2. Pemindahan sampel ke tabung presipitasi untuk diamati presipitasinya sesudah magnetisasi.

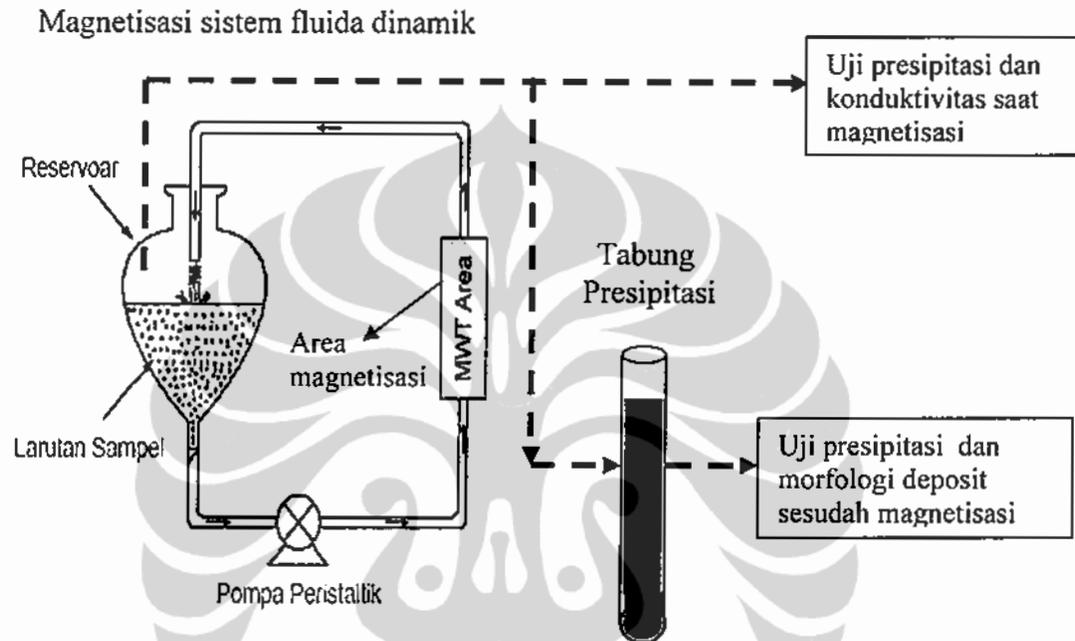
Skema alur percobaan ditunjukkan pada gambar 3.7.

Variabel Proses dan kondisi operasi meliputi:

1. Waktu sirkulasi dan magnetisasi: 0; 2; 5; 10; 20; 40; 60 dan 120 menit. Hal ini bertujuan untuk melihat efek waktu magnetisasi terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.
2. Kuat medan: 0; 2; 4; dan 5,2 kG dengan Hal ini bertujuan untuk melihat efek kuat medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 .
3. Kecepatan alir 0,262 m/s; 0,554 m/s; dan 0,792 m/s. Hal ini bertujuan untuk melihat efek kecepatan alir terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi
4. Panjang magnet dengan mengatur jumlah magnet: 1, 3, 5, dan 7 pasang magnet dengan panjang tiap pasang adalah 5 cm Hal ini bertujuan untuk melihat efek panjang magnet terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.
5. Variasi pH: 6,4; 7,5; 8; dan 8,5. Kenaikan pH larutan akan menaikkan kejenuhan (supersaturasi). Hal ini bertujuan untuk melihat efek supersaturasi terhadap presipitasi

CaCO_3 saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi. pH larutan sampel dinaikan dengan cara pengadukan kuat selama beberapa waktu hingga pH yang diinginkan tercapai.

6. Waktu pengendapan dan presipitasi sampel larutan setelah magnetisasi: 6, 12, 24, 48, 72 dan 96 jam. Untuk melihat efek presipitasi pada tabung pengendapan pada suhu kamar 28 °C.



Gambar 3.7 Skema proses pengujian efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik

pengukuran yang akan dilakukan meliputi:

1. Kandungan ion Ca^{2+} dari wadah sampel (reservoir) saat magnetisasi dengan titrasi kompleksometri EDTA pada 2, 5, 10, 20, 40, 60 dan 120 menit untuk mendapatkan presipitasi total CaCO_3 .
2. Kandungan ion Ca^{2+} pada larutan dalam tabung presipitasi sesudah magnetisasi dengan dengan titrasi kompleksometri EDTA untuk mendapatkan presipitasi total CaCO_3 dan deposit CaCO_3 selama 5 hari presipitasi.
3. Massa deposit CaCO_3 pada tabung magnetisasi dan presipitasi dengan titrasi kompleksometri EDTA selama 5 hari presipitasi.
4. Morfologi deposit CaCO_3 dengan SEM untuk mengamati jumlah, jenis, komposisi dan ukuran kristal secara kualitatif.

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel dapat dilihat pada lampiran B.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Laporan hasil penelitian dalam bab ini meliputi hasil pengujian efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion pada sistem fluida statik dan dinamik. Efek interaksi hidrat ion meliputi pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan air sadah dan juga pada presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi. Efek interaksi ion adalah pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Presipitasi CaCO_3 dapat terjadi di fasa larutan maupun pada dinding tabung yang disebut kerak atau deposit. Presipitasi CaCO_3 keseluruhan baik yang terjadi di larutan maupun pada deposit disebut presipitasi total. Pengamatan presipitasi meliputi jumlah presipitasi pada presipitasi total dan presipitasi di deposit, sedangkan morfologi deposit diamati dengan uji SEM dan XRD. Model persamaan laju presipitasi CaCO_3 dan kajian tentang sistem AMT penurunan kesadahan diberikan pada bagian akhir bab ini.

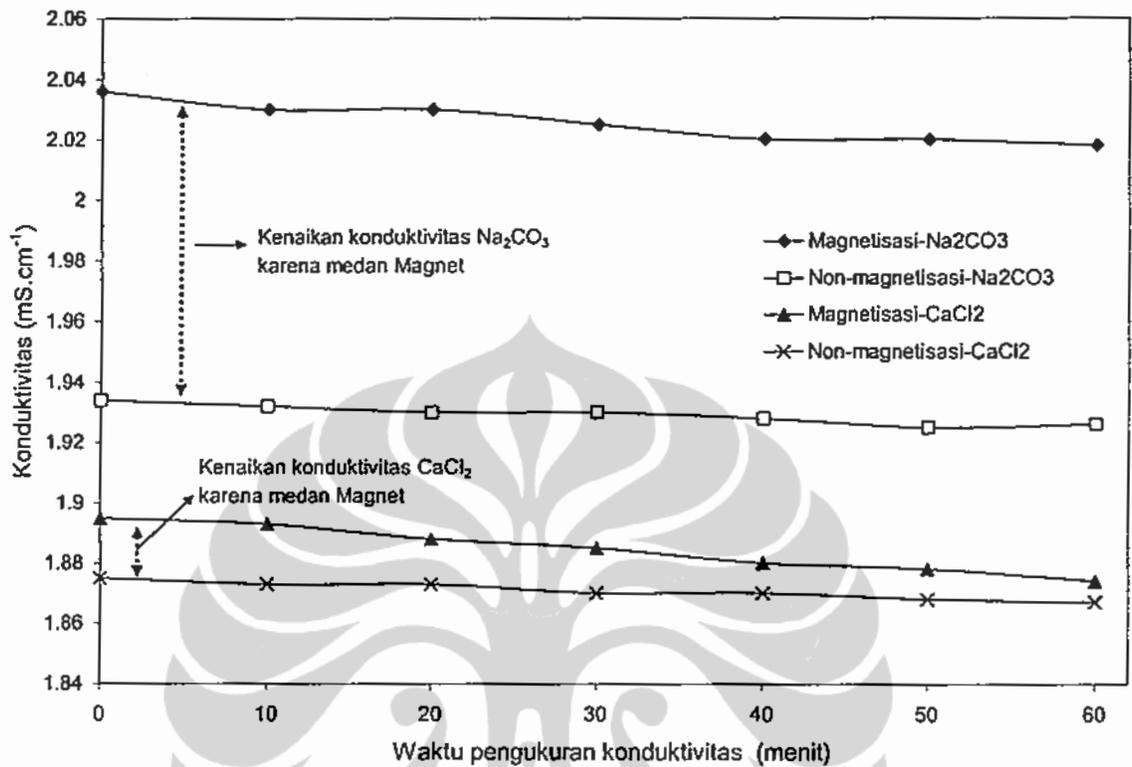
4.1 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida statik.

Proses magnetisasi sistem fluida statik dilakukan pada masing-masing larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 . Pengukuran konduktivitas larutan dilakukan setelah proses magnetisasi yang bertujuan untuk melihat pengaruh medan magnet terhadap sifat hidrat ion. Selanjutnya larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dicampur untuk diamati proses presipitasi CaCO_3 -nya. Magnetisasi sistem fluida statik pada larutan akan meningkatkan interaksi antar ion maupun hidrat ion. Kondisi dimana interaksi ion masih kecil (belum terjadi presipitasi), maka efek medan magnet hanya teramati pada peningkatan interaksi antar ion dan hidratnya. Pengaruh variabel proses yang meliputi waktu magnetisasi, kuat medan, suhu, konsentrasi, dan waktu penyimpanan terhadap presipitasi CaCO_3 akan dibahas pada bagian ini. Morfologi deposit yang terbentuk akan diberikan pada bagian akhir sub-bab ini.

4.1.1 Pengaruh medan magnet terhadap konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dan presipitasi CaCO_3 .

Konduktivitas suatu larutan elektrolit dapat menunjukkan mobilitas dari hidrat ion yang ada dalam larutan tersebut. Pada suhu, tekanan, dan konsentrasi ion yang sama, konduktivitas larutan akan ditentukan oleh diameter hidrat ion. Semakin besar diameter hidrat ion akan semakin rendah konduktivitas larutannya. Gambar 4.1 menunjukkan harga konduktivitas larutan 0,01 M Na_2CO_3 lebih besar dibanding 0,01 M CaCl_2 . Hal tersebut menunjukkan radius hidrat ($r + \Delta r$) ion Na^+ dan

CO_3^{2-} lebih rendah dibanding radius hidrat ion Ca^{2+} dan Cl^- dan hal ini sesuai dengan data penelitian Markus (1994) yang diberikan pada pada tabel 4.1.



Gambar 4.1. Konduktivitas larutan 0.01 M Na_2CO_3 dan 0.01 M CaCl_2 setelah proses magnetisasi. Waktu magnetisasi larutan (t_m) dilakukan selama 30 menit dengan kuat medan (B): 5,2 kG dan T : 28 °C (Saksono *et al*, 2007).

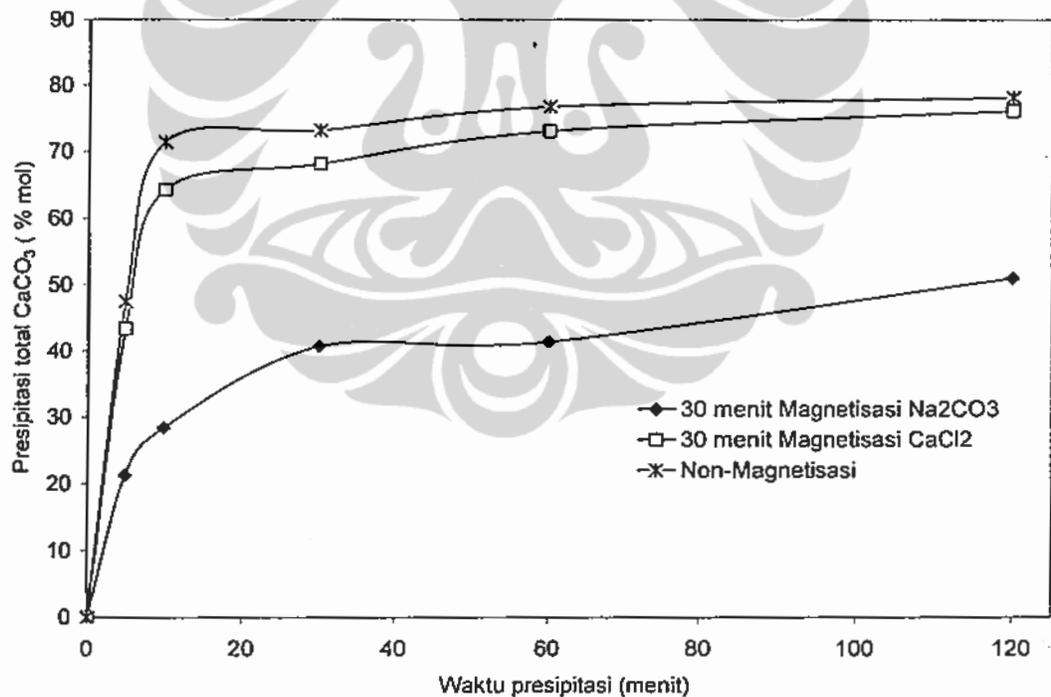
Tabel 4.1. Radius ion (r), ketebalan hidrat ion (Δr , radius hidrat ion ($r + \Delta r$), Energi Gibbs hidrasi ($-\Delta G_{\text{Hidrasi}}$), Entalpi hidrasi ($-\Delta H_{\text{Hidrasi}}$), dan Entropi hidrasi ($-\Delta S_{\text{Hidrasi}}$) pada beberapa jenis ion dan molekul (Marcus, 1994).

Jenis ion /molekul	Jenis interaksi dgn H ₂ O	r (Å)	Δr (Å)	$r + \Delta r$ (Å)	$-\Delta G_{\text{Hidrasi}}$ (kJ,mol ⁻¹)	$-\Delta H_{\text{Hidrasi}}$ (kJ,mol ⁻¹)	$-\Delta S_{\text{Hidrasi}}$ (J,K ⁻¹ ,mol ⁻¹)
H ₂ O	H - bonding				5,7	9,8	37
Ca ²⁺	hidrat ion	1,00	1,71	2,71	1505	1600	271
CO ₃ ²⁻	hidrat ion	1,78	0,76	2,54	1315	1395	264
HCO ₃ ⁻	Hidrat ion	1,85	0,41	2,36	335	380	156
Na ⁺	hidrat ion	1,02	1,16	2,18	365	415	130
Cl ⁻	hidrat ion	1,81	0,43	2,24	340	365	94

Gambar 4.1 menunjukkan terjadi peningkatan harga konduktivitas pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi. Kenaikan konduktivitas suatu larutan elektrolit pada konsentrasi, tekanan, dan suhu yang konstan menunjukkan adanya penurunan diameter hidrat ion yang disertai dengan penguatan interaksi hidrat ionnya (Holysz *et al*, 2007). Higashitani (1993) menduga tertahannya

proses nukleasi CaCO_3 disebabkan adanya penguatan hidrat di sekitar ion yang termagnetisasi. Hasil percobaan ini berhasil membuktikan hipotesis pada laporan ini bahwa magnetisasi sistem fluida statik pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 terbukti meningkatkan interaksi hidrat ionnya. Hasil penelitian pada gambar 4.1 juga telah dipublikasikan oleh penulis (^bSaksono *et al*, 2007).

Holysz (2007) mendapatkan suatu hubungan linier antara kenaikan konduktivitas suatu larutan akibat medan magnet dengan kenaikan hasil kali tebal hidrat ion dan radius ion dengan energi Gibbs hidrasi ($(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$). Tabel 4.1 memberikan data-data ukuran hidrat dan termodinamika hidrat ion. Hasil perhitungan menunjukkan harga $(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$ untuk larutan Na_2CO_3 adalah $-1393,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ dan untuk larutan CaCl_2 sebesar $-736,75 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ yang menunjukkan harga $(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$ untuk larutan Na_2CO_3 lebih besar dibanding larutan CaCl_2 . Hasil ini menjadi penjelasan mengapa kenaikan konduktivitas pada larutan Na_2CO_3 lebih besar dibanding larutan CaCl_2 (gambar 4.2). Semakin tinggi harga $(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$ hidrat ion dalam larutan menunjukkan interaksi hidrat ion semakin lemah. Atau dengan kata lain, semakin tinggi harga $(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$ suatu larutan elektrolit, maka akan semakin besar kenaikan konduktivitas yang terjadi akibat medan magnet.



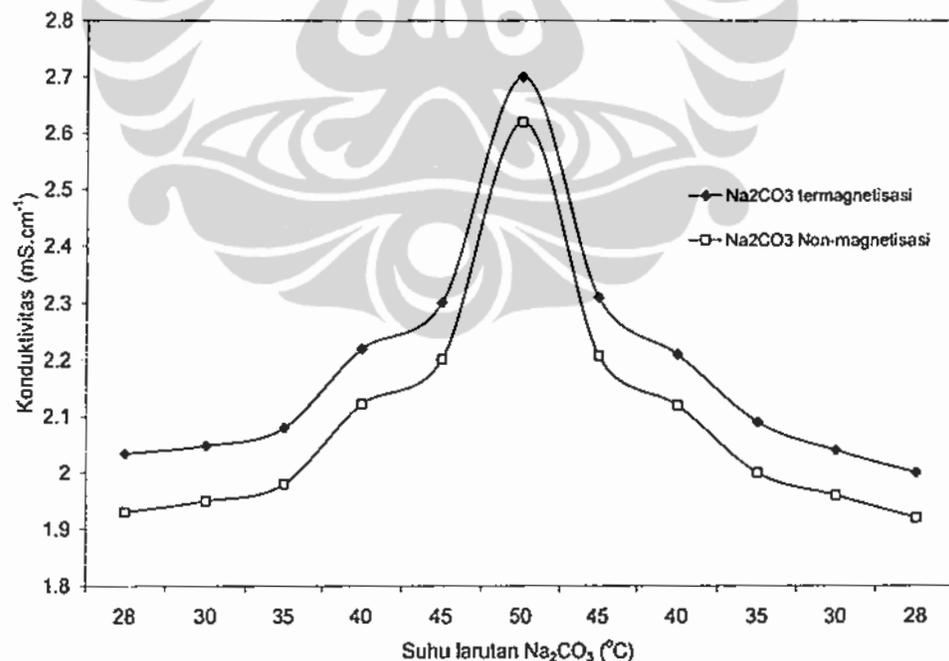
Gambar 4.2. Kurva presipitasi total CaCO_3 untuk : (♦) magnetisasi larutan Na_2CO_3 ; (□) magnetisasi larutan CaCl_2 ; dan (X) tanpa perlakuan magnetisasi. Waktu magnetisasi t_m : 30 menit; kuat medan B : 5,2 kG dan T : 28 °C.

Gambar 4.2 Menunjukkan penurunan presipitasi CaCO_3 yang disebabkan oleh kenaikan konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 . Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa kenaikan harga

konduktivitas menyebabkan penguatan interaksi hidrat ion yang ditunjukkan dengan semakin sulitnya presipitasi CaCO_3 terjadi. Hasil ini menjawab hipotesis pertama disertai ini yang menyatakan magnetisasi sistem fluida statik pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 akan menaikkan interaksi hidrat ion dan menurunkan presipitasi CaCO_3 -nya.

Gambar 4.1 menunjukkan kenaikan konduktivitas pada Na_2CO_3 oleh medan magnet lebih besar dibanding CaCl_2 . Hal ini menjadi penjelasan mengapa efek magnetisasi dalam menekan presipitasi CaCO_3 lebih terlihat pada larutan Na_2CO_3 dibanding CaCl_2 (gambar 4.2). Kenaikan konduktivitas larutan termagnetisasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 relatif konstan selama 60 menit pengukuran yang menunjukkan efek magnet tidak menghilang meskipun sudah tidak diberi medan magnet. Hal ini dikenal dengan sebutan efek memori magnetik.

Gambar 4.3 menunjukkan terjadi kenaikan konduktivitas dengan naiknya suhu larutan Na_2CO_3 . Meningkatnya konduktivitas akibat kenaikan suhu larutan lebih disebabkan lepasnya interaksi hidrogen pada cluster air (bulk water cluster) yang teramati dari menurunnya viskositas fluida (Vlaev *et al.*, 2003). Kenaikan konduktivitas larutan Na_2CO_3 akibat naiknya suhu bersifat spontan dan reversibel dimana harga konduktivitas akan segera turun kembali dengan turunnya suhu larutan (gambar 4.3). Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan Na_2CO_3 tetap terlihat meskipun suhu dinaikkan hingga 50°C .



Gambar 4.3. Kurva konduktivitas larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dan tanpa magnetisasi pada berbagai suhu. t_m : 30 menit dan B : 5,2 kG.

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa ΔS , ΔH , dan ΔG pembentukan interaksi hidrogen pada air (hidrogen bonding) jauh lebih rendah dibanding hidrat ion. Oleh sebab itu kenaikan suhu akan

lebih berpengaruh terhadap lepasnya interaksi hidrogen pada air dan perubahan ini bersifat reversibel seperti yang terlihat pada gambar 4.3. Li (2006) berhasil membuktikan bahwa interaksi hidrogen pada cluster air (bulk water cluster) mempunyai interaksi yang relatif lemah dan mudah dipengaruhi oleh agitasi termal pada rentang suhu 293 hingga 333 K.

Interaksi pada hidrat ion disebabkan adanya interaksi elektrostatis ion dengan molekul air yang bersifat polar (Wright, 2007). Interaksi jenis ini umumnya lebih kuat dan lebih tahan terhadap agitasi termal dibanding interaksi hidrogen pada cluster air. Medan magnet memperkuat interaksi elektrostatis pada hidrat ion yang ditunjukkan dengan naiknya harga konduktivitas larutan Na_2CO_3 termagnetisasi. Efek medan magnet dalam memperkuat interaksi elektrostatis pada hidrat ion bersifat lebih stabil dan dikenal sebagai efek memori magnetik.

4.1.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3

Sub-bab ini akan membahas berbagai pengaruh variabel proses yang meliputi waktu magnetisasi, kuat medan, suhu presipitasi, konsentrasi sampel, dan waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 terhadap presipitasi CaCO_3 . Pengamatan presipitasi CaCO_3 meliputi presipitasi CaCO_3 di deposit, presipitasi CaCO_3 di larutan, dan presipitasi keseluruhan (presipitasi total CaCO_3).

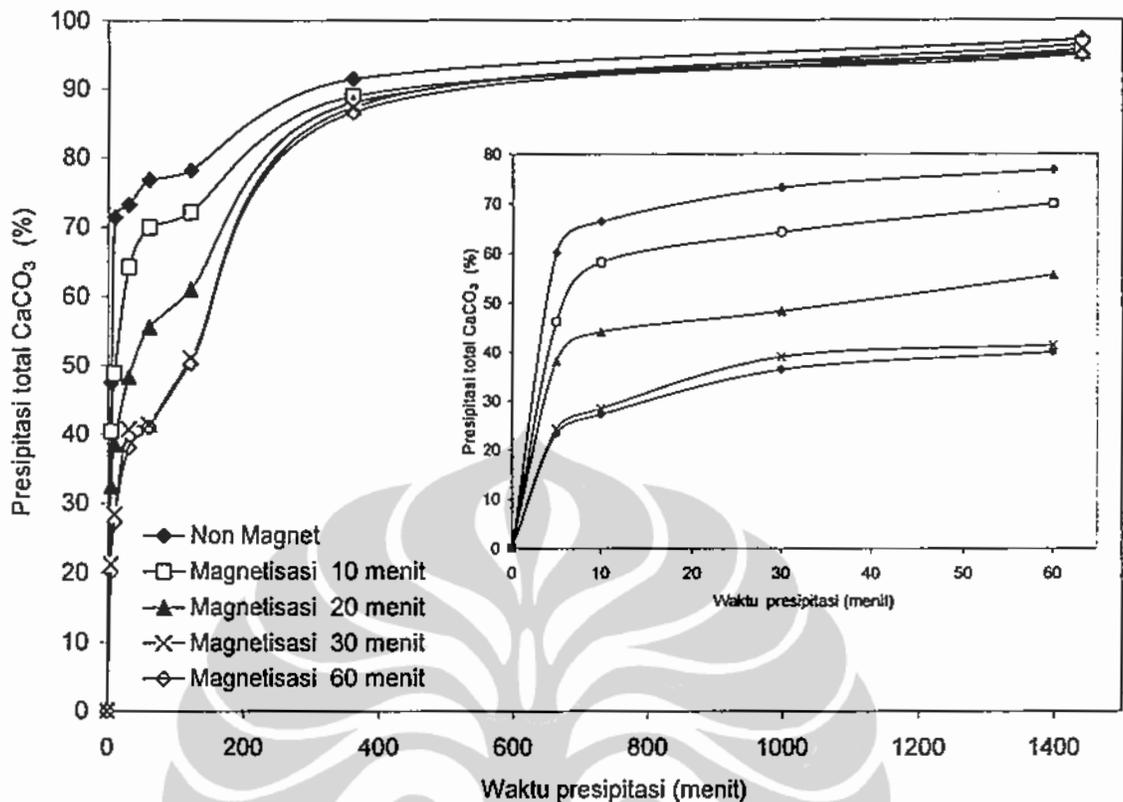
4.1.2.1 Pengaruh waktu magnetisasi pada presipitasi CaCO_3 .

a. Presipitasi total CaCO_3 .

Presipitasi total CaCO_3 pada pencampuran larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 memberikan laju presipitasi yang tinggi di awal presipitasi seperti yang ditunjukkan gambar 4.4. Laju presipitasi CaCO_3 pada air sadah dipengaruhi oleh harga supersaturasi larutan (δ_s) yang merupakan fungsi konsentrasi dan pH larutan. Dengan pH awal campuran sebesar 10,8 dan konsentrasi masing-masing larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 sebesar 0,01 M maka harga δ_s mencapai 1970, yang berarti jauh lebih tinggi dibanding supersaturasi kritis (δ_{kritis}) sebesar 40 sebagai syarat terjadinya presipitasi spontan di larutan. Tingginya harga supersaturasi pada larutan ini menyebabkan presipitasi berjalan sangat cepat terutama di awal presipitasi.

Gambar 4.4 menunjukkan terdapat 2 zona kenaikan presipitasi yaitu pada 10 menit pertama presipitasi dan setelah 120 hingga 360 menit presipitasi. Selanjutnya adalah proses menuju kesetimbangan dimana tahapan ini sesuai dengan pengamatan Abdel-Aal (2002) untuk model larutan yang sama seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.

Gambar 4.4 menunjukkan medan magnet menekan presipitasi CaCO_3 pada 10 menit pertama presipitasi (tahap nukleasi) dan efek ini masih terlihat hingga 360 menit presipitasi. Selanjutnya presipitasi menuju satu harga kesetimbangan (^bSaksono *et al*, 2007). Hal ini menunjukkan medan magnet tidak mengubah kesetimbangan reaksi. Presipitasi CaCO_3 pada tahap awal merupakan proses pembentukan inti (nukleasi) yang kurang stabil dan selanjutnya akan membentuk kristal yang lebih stabil (crystal growth).

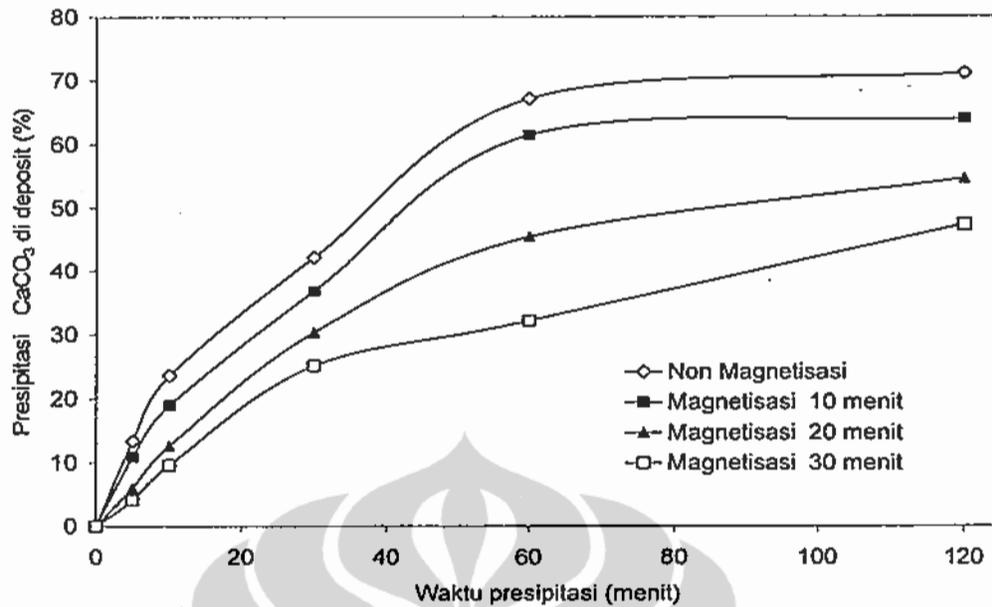


Gambar 4.4. Persen presipitasi total CaCO_3 pada berbagai waktu magnetisasi Na_2CO_3 pada kuat medan 5,2 kG dan $T : 28^\circ\text{C}$. (Saksono *et al*, 2007).

Gambar 4.4 menjelaskan bahwa medan magnet menekan nukleasi CaCO_3 dan selanjutnya akan mempengaruhi pembentukan kristal CaCO_3 . Terjadi penurunan presipitasi dengan bertambahnya waktu magnetisasi seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 dan waktu optimum dicapai pada 30 menit magnetisasi. Waktu optimum ini menunjukkan kemampuan maksimum hidrat ion dalam menyerap energi medan magnet dan nilainya dipengaruhi oleh kuat medan dan konsentrasi larutan. Higashitani (1993) mendapatkan waktu optimum magnetisasi 10 menit dengan kuat medan 4500 Gauss dan konsentrasi larutan Na_2CO_3 sebesar 0,008 M.

b. Presipitasi CaCO_3 di deposit.

Presipitasi CaCO_3 di deposit adalah presipitasi CaCO_3 yang terbentuk pada dinding tabung presipitasi. Laju presipitasi di deposit relatif konstan selama 60 menit pertama dengan harga yang lebih rendah dibanding laju presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit pertama presipitasi. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa jumlah deposit yang terbentuk pada 120 menit pertama presipitasi berkurang dengan bertambahnya waktu magnetisasi. Kecenderungan ini sesuai dengan presipitasi totalnya pada gambar 4.4.

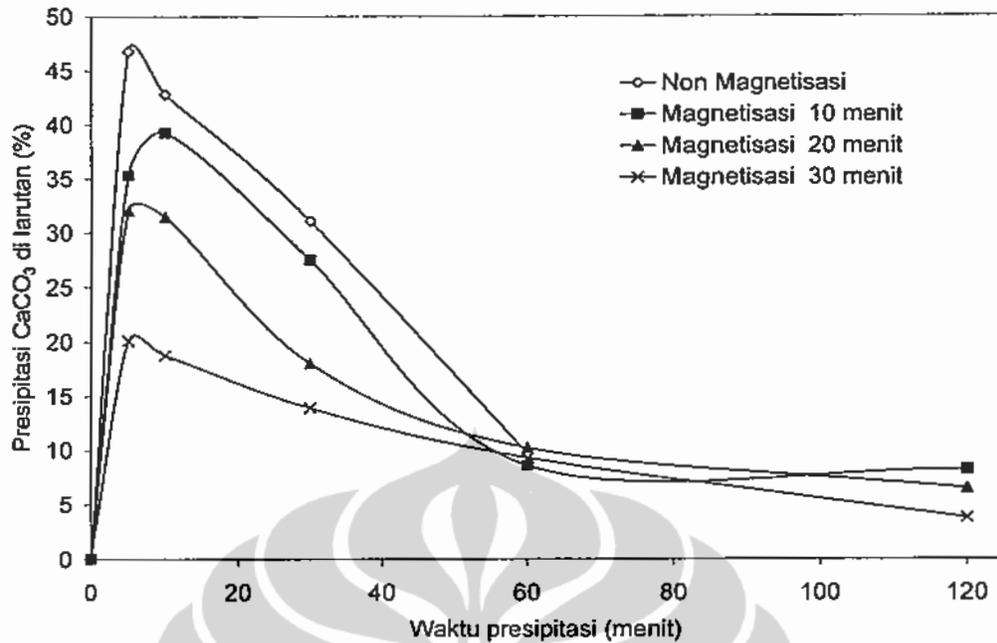


Gambar 4.5 Persen deposit CaCO_3 pada berbagai waktu magnetisasi Na_2CO_3 untuk kuat medan 5,2 kG dan $T : 28^\circ\text{C}$ (Saksono *et al*, 2007).

c. Presipitasi CaCO_3 di larutan.

Presipitasi CaCO_3 di larutan adalah presipitasi CaCO_3 yang terbentuk di fasa larutan dalam tabung presipitasi. Harga presipitasi CaCO_3 di larutan didapat dari perhitungan selisih presipitasi total CaCO_3 dan presipitasi CaCO_3 di deposit. Gambar 4.6 menunjukkan terjadi kenaikan presipitasi yang cepat pada 10 menit pertama (proses nukleasi) dan selanjutnya terjadi penurunan jumlah partikel di larutan hingga 120 menit presipitasi karena mengendap dan bergabung dengan kristal CaCO_3 di deposit. Turunnya presipitasi CaCO_3 di larutan setelah 10 menit untuk sampel non-magnetisasi disebabkan CaCO_3 yang terpresipitasi pada 10 menit pertama presipitasi telah mencapai 71,4 % (gambar 4.4). Hal ini menurunkan harga supersaturasi larutan yang terlihat dari menurunnya presipitasi CaCO_3 setelah 10 menit presipitasi. Hal serupa juga terjadi untuk sampel termagnetisasi.

Gambar 4.6 menunjukkan medan magnet menurunkan presipitasi CaCO_3 di larutan dimana penurunannya bertambah dengan bertambahnya waktu magnetisasi. Kecenderungan ini sesuai dengan presipitasi total maupun presipitasi di deposit (gambar 4.4 dan 4.5)



Gambar 4.6. Persen presipitasi CaCO₃ di larutan pada berbagai waktu magnetisasi Na₂CO₃ untuk B : 5,2 kG dan T : 28 °C (^bSaksono et al, 2007).

Tabel 4.2 menunjukkan presipitasi total CaCO₃ pada 10 menit pertama didominasi oleh fasa larutan dan seiring dengan menurunnya konsentrasi ion Ca²⁺ di larutan maka presipitasi di fasa larutan terus menurun. Sementara presipitasi pada dinding (deposit) menjadi dominan setelah 30 menit presipitasi. Hal ini menunjukkan pada supersaturasi tinggi, presipitasi akan didominasi di larutan sementara pada supersaturasi rendah, presipitasi didominasi pada permukaan (deposit). Hal ini terjadi baik pada sampel termagnetisasi maupun non-magnetisasi. Hasil ini sesuai dengan pengamatan Ben Amor (2004) yang menyatakan pada kesadahan tinggi presipitasi di larutan akan signifikan, dan pada kesadahan rendah presipitasi akan didominasi di deposit. Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa medan magnet menekan presipitasi baik di larutan maupun di deposit.

Tabel 4.2. Persen presipitasi CaCO₃ di fasa cair (larutan) dan deposit. Magnetisasi 30 menit dan kuat medan 5,2 kG T : 28 °C.

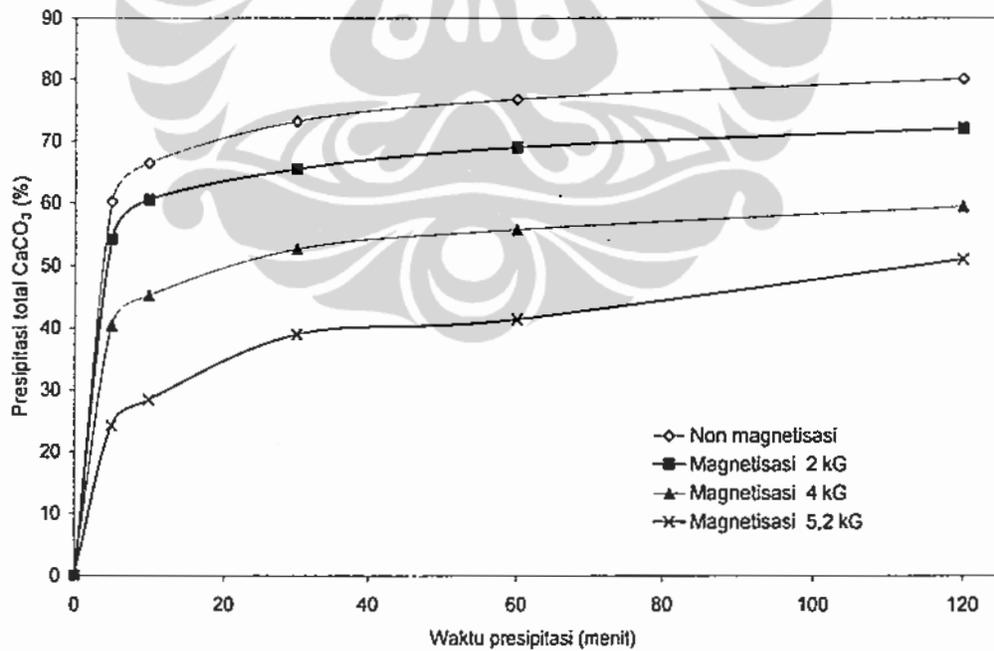
Waktu presipitasi (menit)	Presipitasi CaCO ₃ sampel non-magnetisasi (%)			Presipitasi CaCO ₃ sampel termagnetisasi (%)		
	Di larutan	Di deposit	Total	Di larutan	Di deposit	Total
0	0	0	0	0	0	0
5	46,8	13,4	60,2	20,1	4,1	24,2
10	42,8	23,6	66,4	18,8	9,6	28,4
30	31,1	42,1	73,2	13,9	25,1	39,0
60	9,6	67,1	76,8	9,3	32,1	41,4
120	9,1	71,1	80,2	3,8	47,3	51,1

4.1.2.2 Pengaruh kuat medan magnet dan suhu pada presipitasi CaCO_3

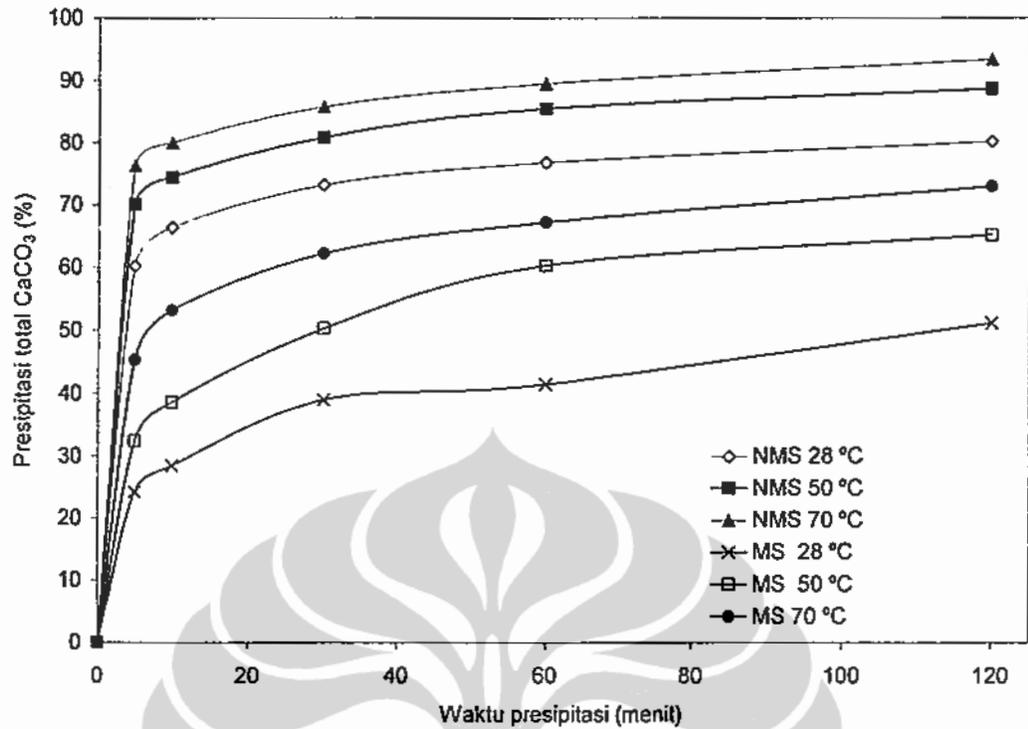
Gambar 4.7 menunjukkan penurunan persen presipitasi total CaCO_3 dengan meningkatnya kuat medan untuk waktu magnetisasi 30 menit. Hal ini menunjukkan terjadi peningkatan interaksi hidrat ion dengan bertambahnya kuat medan. Peningkatan interaksi antara dua partikel (hidrat dan ionnya) pada sistem fluida statik merupakan fungsi kuat medan B seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.9). Bertambahnya harga B akan menaikkan energi interaksi hidrat ionnya yang terlihat dari makin menurunnya presipitasi total CaCO_3 yang terjadi. Percobaan ini belum mendapatkan harga kuat medan magnet yang optimum dalam menurunkan presipitasi CaCO_3 .

Pengaruh suhu presipitasi terhadap presipitasi total CaCO_3 dapat dilihat pada gambar 4.8. Terlihat bahwa kenaikan suhu mendorong presipitasi dan efek magnet tetap terlihat meskipun suhu presipitasi dinaikkan hingga 70°C . Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh hidrat ion yang termagnetisasi tetap terlihat meskipun suhu larutan dinaikkan hingga 70°C . Kesimpulan ini diperkuat gambar 4.3 yang menunjukkan kenaikan konduktivitas larutan Na_2CO_3 termagnetisasi tetap teramati meskipun suhu larutan dinaikkan.

Gambar 4.8 dan tabel 4.3 menunjukkan penurunan efek magnet dalam menekan presipitasi dengan naiknya suhu. Untuk presipitasi 10 menit pertama terjadi persen penurunan presipitasi relatif sebesar 57,2 % pada suhu 28°C menjadi 33,5 % pada suhu 70°C (tabel 4.3).



Gambar 4.7. Persen presipitasi total CaCO_3 fungsi kuat medan pada waktu magnetisasi larutan Na_2CO_3 30 menit. dan $T : 28^\circ\text{C}$.



Gambar 4.8. Pengaruh suhu pada presipitasi total CaCO₃ untuk sampel non-magnetisasi (NMS) dan sampel termagnetisasi (MS) dengan waktu magnetisasi Na₂CO₃ 30 menit dan kuat medan 5,2 kG.

Tabel 4.3. Pengaruh suhu presipitasi terhadap penurunan persen presipitasi total CaCO₃ pada 10 menit presipitasi. Waktu magnetisasi Na₂CO₃ 30 menit dan B : 5,2 kG.

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO ₃ pada 10 menit presipitasi (%)		
	Suhu 28 °C	Suhu 50 °C	Suhu 70 °C
Sampel non-magnetisasi (NM)	66,4	74,5	80,0
Sampel termagnetisasi (M)	28,4	38,6	53,2
Persen penurunan presipitasi relatif : 100 x (NM-M)/NM	57,2	48,2	33,5

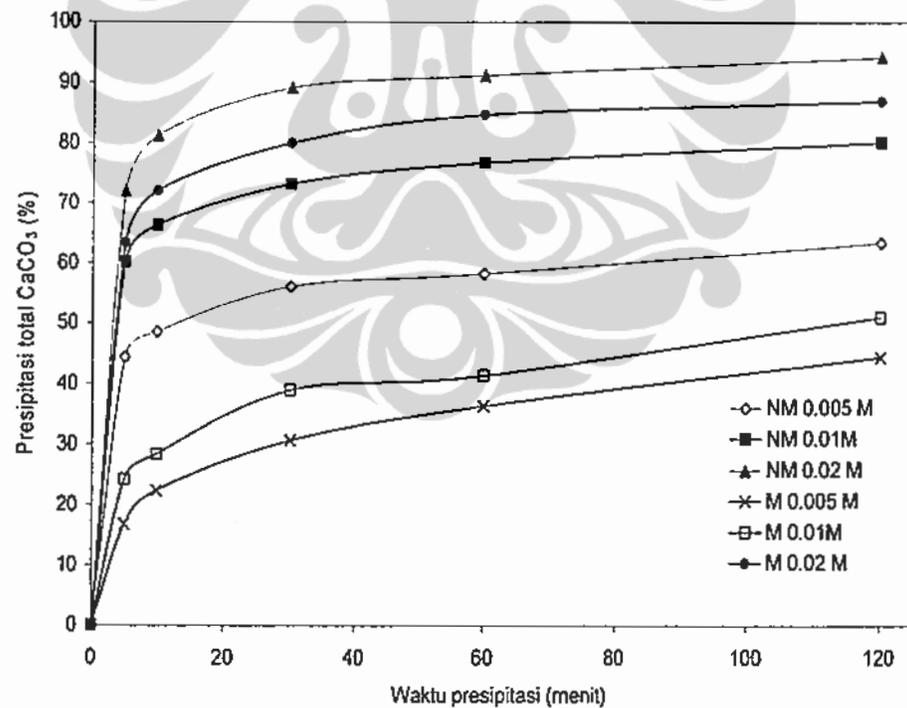
Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan naiknya suhu menyebabkan energi kinetik ion maupun partikel makin meningkat sehingga dapat memperlemah interaksi dengan molekul hidratnya. Sementara kenaikan suhu juga berdampak pada terputusnya cluster air (Li *et al.*, 2006) sehingga mobilitas dan interaksi antar ion dan partikel meningkat (dominan). Hal ini menyebabkan pengaruh dan kontribusi penguatan hidrat ion terhadap presipitasi CaCO₃ berkurang.

4.1.2.3 Pengaruh konsentrasi dan waktu penyimpanan larutan Na₂CO₃ pada presipitasi CaCO₃

Kenaikan konsentrasi larutan Na₂CO₃ dan CaCl₂ mengakibatkan peningkatan laju presipitasi CaCO₃ terutama di awal presipitasi dan tingginya presipitasi (interaksi ion)

menyebabkan menurunnya efek interaksi hidrat ion dalam menekan presipitasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Untuk presipitasi 10 menit pertama terjadi persen penurunan presipitasi relatif sebesar 57,2 % pada konsentrasi sampel 0,01 M menjadi hanya 11,3 % pada konsentrasi sampel 0,02 M (tabel 4.4).

Proses presipitasi CaCO_3 dalam larutan dipengaruhi oleh kekuatan hidrat ion dan konsentrasi ion. Konsentrasi ion yang tinggi menunjukkan jarak antar ion yang semakin dekat. Pada supersaturasi tinggi maka konsentrasi ion CO_3^{2-} juga tinggi yang menyebabkan jarak antar ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} menjadi cukup dekat, sehingga energi interaksinya menjadi signifikan. Tabel 2.4 menunjukkan untuk jarak antar partikel yang sama maka energi interaksi antar ion jauh lebih besar dibanding energi interaksi antara ion dan hidratnya (Hiemenz *et al*, 1994). Akibat dari harga konsentrasi ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} yang tinggi, maka interaksi antar ion akan lebih dominan dibanding interaksi hidrat ion. Hal ini menyebabkan efek penguatan hidrat ion akibat medan magnet akan semakin berkurang dengan semakin tingginya supersaturasi pada larutan. Beberapa jurnal tentang AMT melaporkan efek maksimum medan magnet didapat pada konsentrasi sampel di sekitar 0,008 hingga 0,01 M (Higashitani *et al*, 1995; Chibowski *et al*, 2003; Parson *et al*, 1997; Kney *et al*, 2006).

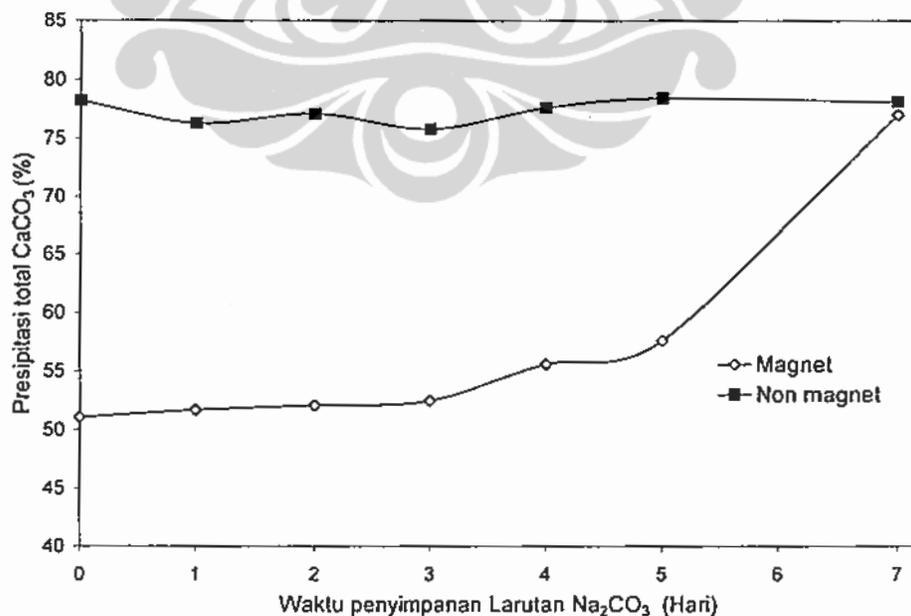


Gambar 4.9 Pengaruh konsentrasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada persen presipitasi total CaCO_3 . Waktu magnetisasi Na_2CO_3 30 menit pada $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabel 4.4. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap penurunan persen presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi. Waktu magnetisasi Na_2CO_3 30 menit pada B : 5,2 kG dan T : 28 °C

Sampel larutan	presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi (%)		
	Konsentrasi sampel 0,005 M	Konsentrasi sampel 0,01 M	Konsentrasi sampel 0,02 M
Sampel non-magnetisasi (NM)	48,6	66,4	81,3
Sampel magnetisasi (M)	22,4	28,4	72,1
Persen penurunan resipitasi relatif : $100 \times (\text{NM}-\text{M})/\text{NM}$	53,9	57,2	11,3

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 yang sudah dimagnetisasi sebelum dicampur dengan larutan CaCl_2 . Pengaruh medan magnet pada larutan Na_2CO_3 dalam menekan presipitasi CaCO_3 dapat bertahan hingga 5 hari waktu penyimpanan sebelum akhirnya menurun dan menghilang pada hari ke-7 (persen presipitasi total CaCO_3 sampel termagnetisasi mendekati persen presipitasi total CaCO_3 sampel non-magnetisasi). Pengaruh medan magnet pada larutan Na_2CO_3 yang muncul meskipun sudah tidak ada medan magnet dikenal sebagai efek memori magnetik. Higashitani (1993) mendapatkan efek memori ini melalui pengukuran absorbansi larutan dimana efek medan magnet pada larutan Na_2CO_3 dapat bertahan hingga 120 jam. Hingga saat ini belum ada penjelasan maupun pembuktian yang memuaskan tentang fenomena efek memori ini. Efek mekanik, thermal, dan kimia dapat mempengaruhi efek memori dari penguatan hidrat ion ini (Higashitani *et al*, 1998).



Gambar 4.10. Kurva presipitasi total CaCO_3 untuk waktu presipitasi 120 menit sebagai fungsi waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 termagnetisasi. Waktu magnetisasi 30 menit dengan B : 5,2 kG dan T : 28 °C.

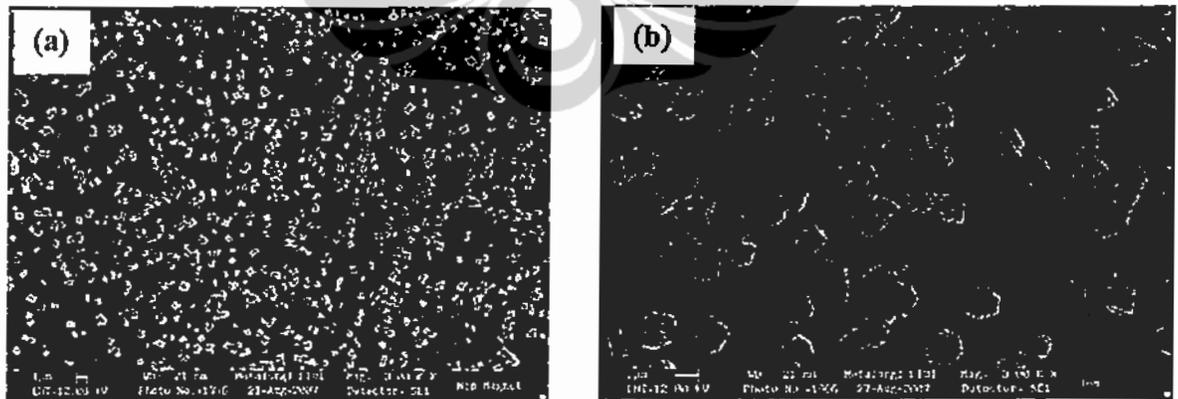
4.1.3 Sifat dan morfologi deposit CaCO_3

Persentase deposit seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.5 adalah rasio presipitasi di deposit dengan presipitasi total yang menggambarkan kemampuan deposit CaCO_3 menempel di dinding tabung. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada persentase deposit dari sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan sifat deposit yang terbentuk tidak menunjukkan perbedaan berarti dalam hal kemampuannya menempel pada dinding tabung.

Tabel 4.5. Presipitasi CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 120 menit presipitasi. Waktu magnetisasi 30 menit. B : 5,2 kG dan T : 28 °C

Presipitasi CaCO_3	Presipitasi CaCO_3 (%)			
	Non-magnetisasi	Magnetisasi 10 menit	Magnetisasi 20 menit	Magnetisasi 30 menit
Di deposit [D]	71,1	63,9	54,6	47,3
Total [T]	80,2	72,1	61,1	51,1
Persentase deposit: $100 \times (D / T)$	88,6	88,6	89,4	92,6

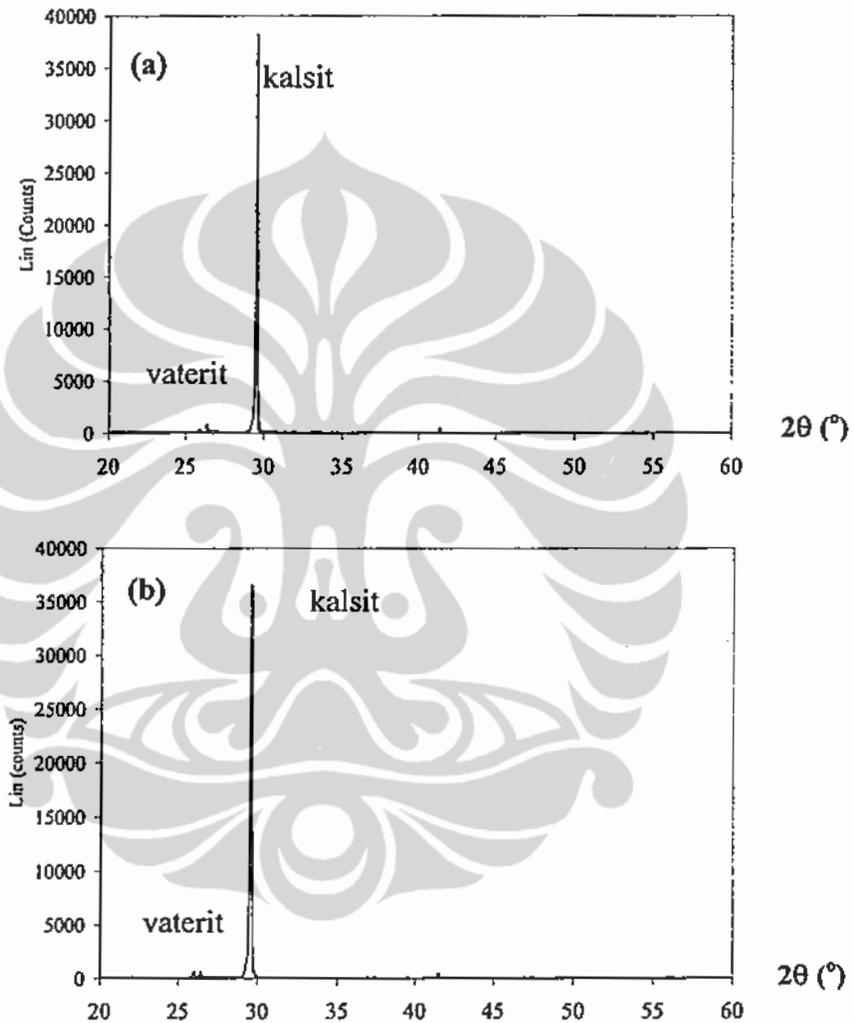
Hasil uji foto SEM pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa kristal yang terbentuk adalah Kalsit dan jumlah partikel CaCO_3 yang terbentuk pada sampel non-magnetisasi lebih banyak dibanding sampel termagnetisasi sedangkan ukuran partikel CaCO_3 pada sampel termagnetisasi menjadi lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi (^dSaksono *et al*, 2007). Hal ini disebabkan adanya penurunan laju nukleasi pada sampel termagnetisasi yang berdampak pada pembentukan kristal selanjutnya.



Gambar 4.11. Hasil uji SEM deposit CaCO_3 selama 120 menit presipitasi: (a) Sampel non-magnetisasi perbesaran 3000 X; (b) sampel termagnetisasi perbesaran 3000 X (^bSaksono *et al*, 2007).

Gambar 4.12 menunjukkan hanya ada satu puncak dominan yang muncul pada sudut $2\theta = 29.53^\circ$ yang merupakan sudut pembentukan kristal Kalsit. Selain itu teramati sejumlah kecil kristal

vaterit pada sudut $2\theta = 26,41^\circ$ (Saksono *et al*, 2008). Ukuran kristal yang terbentuk dari hasil perhitungan data XRD menunjukkan kristal Kalsit untuk sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi masing-masing sebesar 839,8 nm dan 719,8 nm. Hasil ini memperkuat hasil analisis menggunakan SEM yang menunjukkan kalsit adalah jenis kristal yang dominan pada pembentukan deposit, baik pada sampel termagnetisasi maupun non-magnetisasi dimana ukuran partikel deposit CaCO_3 dari sampel termagnetisasi lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi.



Gambar 4.12. Analisis XRD deposit kristal CaCO_3 pada 120 Menit Presipitasi dan $T : 28^\circ\text{C}$: (a) non-magnetisasi ; (b) termagnetisasi dengan $t_m : 30$ menit dan $B : 5,2$ kG. (Saksono *et al*, 2008).

Gambar 4.12 menunjukkan Kalsit adalah kristal dominan yang muncul, dimana tidak terdapat perbedaan komposisi kristal yang signifikan antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi. Hasil ini menjadi penjelasan mengapa tidak terjadi perbedaan signifikan pada persentase deposit sampel termagnetisasi dibanding sampel non magnetisasi. Proses magnetisasi

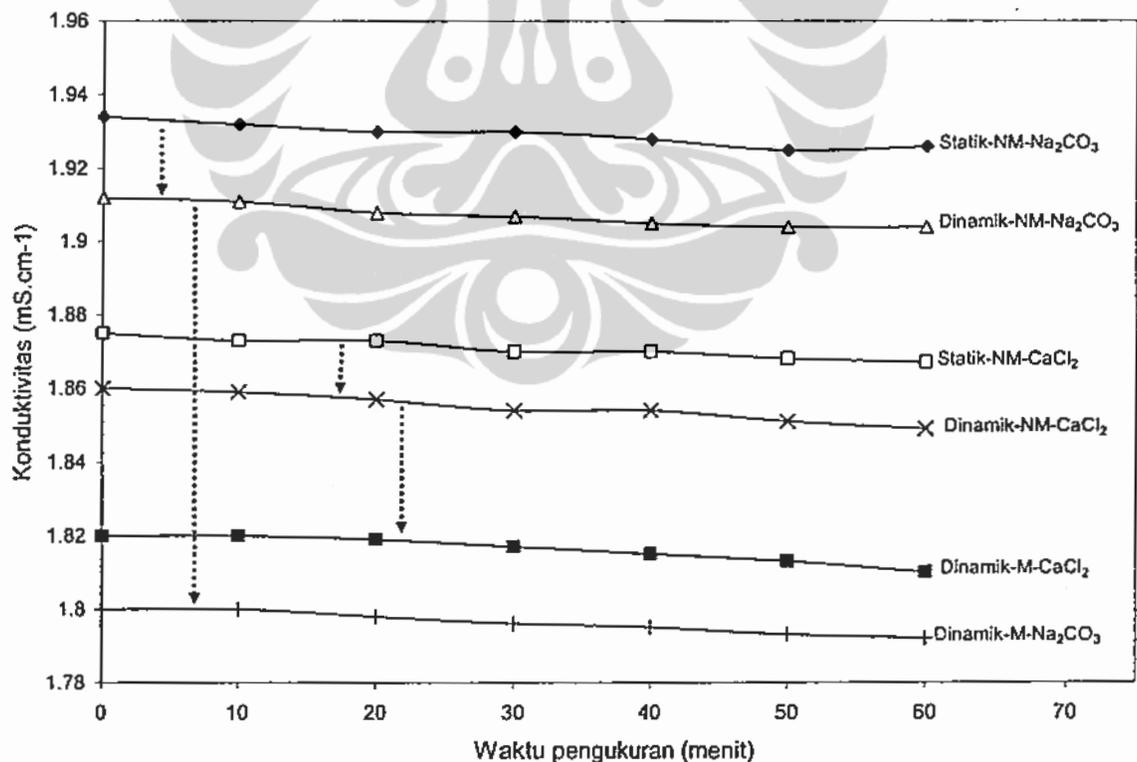
hanya menekan jumlah deposit, namun tidak mengubah jenis kristalnya sehingga tidak terdapat perbedaan pada sifat-sifat depositnya.

4.2 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik.

Proses magnetisasi sistem fluida dinamik menggunakan sistem sirkulasi yaitu dengan melewati masing-masing larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada medan magnet. Pengukuran konduktivitas larutan dilakukan setelah proses magnetisasi yang bertujuan untuk melihat pengaruh medan magnet terhadap sifat hidrat ionnya. Selanjutnya, larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dicampur dalam tabung presipitasi untuk diamati proses presipitasi CaCO_3 -nya. Pengaruh variabel proses terhadap presipitasi CaCO_3 serta aspek kinetika dan morfologi deposit CaCO_3 juga akan dilaporkan pada bagian ini.

4.2.1 Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3

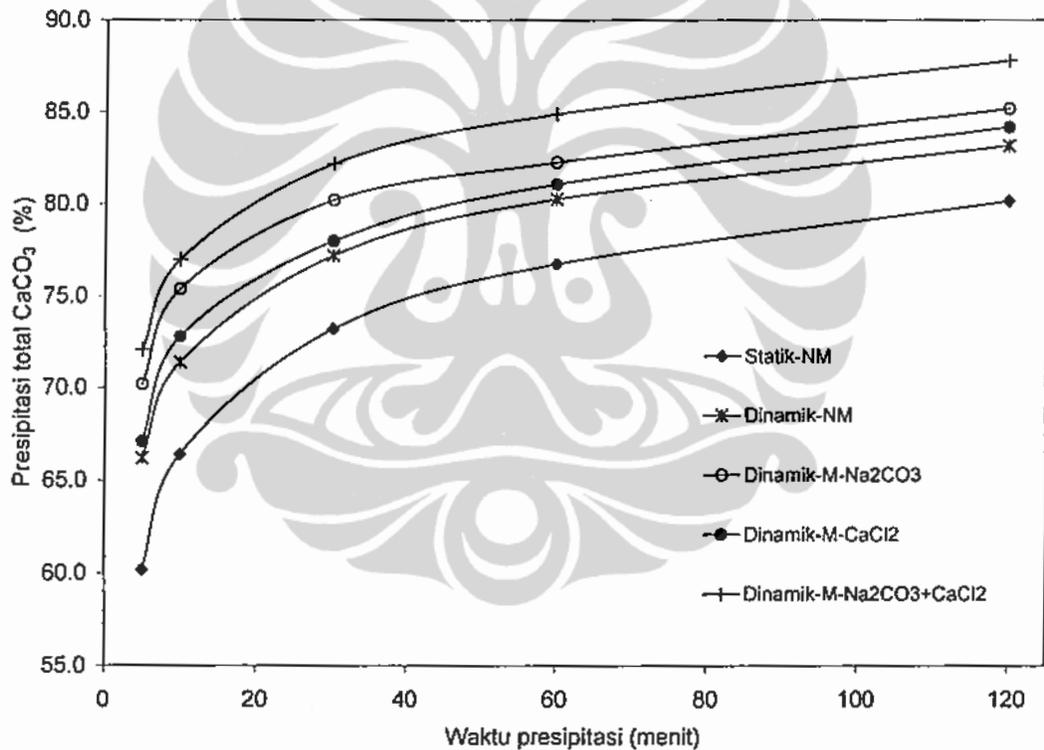
Gambar 4.13 menunjukkan hasil pengukuran konduktivitas pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi dan non-magnetisasi pada sistem fluida statik dan fluida dinamik.



Gambar 4.13. Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 untuk sampel termagnetisasi (M) dan non-magnetisasi (NM) pada sistem fluida statik dan fluida dinamik.

Gambar 4.13 menunjukkan proses sirkulasi tanpa magnetisasi menurunkan harga konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 dibanding kondisi statik pada sampel non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan agitasi mekanik dapat menurunkan kekuatan interaksi hidrat ion. Kesimpulan ini diperkuat dengan turunnya presipitasi CaCO_3 pada larutan Na_2CO_3 yang disirkulasi (dinamik) dibanding dengan tanpa sirkulasi (statik) untuk sampel non-magnetisasi.

Magnetisasi menurunkan harga konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada sistem fluida dinamik. Penurunan konduktivitas larutan Na_2CO_3 akibat medan magnet lebih besar dibanding larutan CaCl_2 . Hal ini disebabkan harga $(\Delta r/r) \cdot \Delta_{\text{hyd}}G$ untuk larutan Na_2CO_3 lebih besar dibanding larutan CaCl_2 . Hal ini menunjukkan interaksi hidrat ion pada larutan Na_2CO_3 lebih lemah dibanding larutan CaCl_2 sehingga lebih mudah dipengaruhi oleh medan magnet. Penurunan harga konduktivitas ini bersifat relatif stabil untuk waktu 60 menit pengukuran. Turunnya konduktivitas pada kondisi ini menunjukkan mobilitas hidrat ion menurun akibat meningkatnya diameter hidrat.



Gambar 4.14. Kurva presipitasi total CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada sistem fluida statik dan fluida dinamik untuk sampel termagnetisasi (M) dan non-magnetisasi (NM). Fluida dinamik dilakukan pada $v : 0,554 \text{ m/s}$ dan $t_s : 10 \text{ menit}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hasil uji presipitasi CaCO_3 menunjukkan bahwa penurunan harga konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 berakibat pada meningkatnya presipitasi CaCO_3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Penurunan konduktivitas larutan menunjukkan terjadinya peningkatan diameter hidrat ion yang disertai melemahnya (destabilisasi) interaksi hidrat ion. Penurunan interaksi hidrat

ion oleh medan magnet dibuktikan dengan meningkatnya presipitasi CaCO_3 pada larutan termagnetisasi. Hasil pengamatan ini telah berhasil membuktikan hipotesis kedua pada laporan disertasi ini yang menyatakan magnetisasi sistem fluida dinamik pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 diduga akan menurunkan interaksi hidrat ion dan meningkatkan presipitasi CaCO_3 -nya.

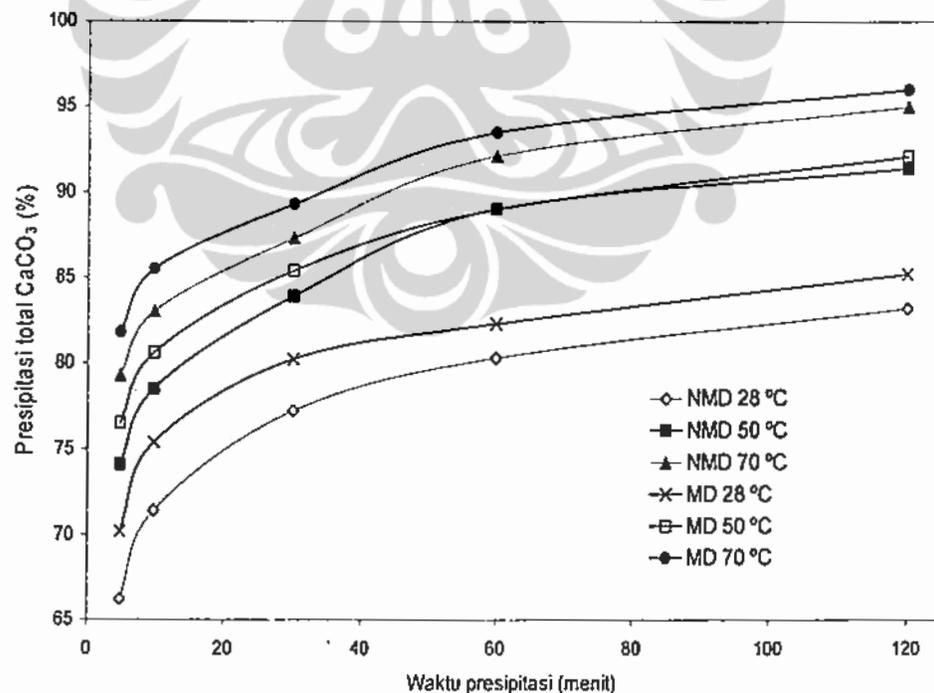
Penjelasan yang paling mungkin tentang melemahnya interaksi hidrat ion ini adalah bahwa efek gaya Lorentz pada ion yang bergerak melewati medan magnet menyebabkan terjadinya pergeseran ion (*local convection movement*) yang menimbulkan efek agitasi sesaat pada ion yang terkena gaya Lorentz dengan hidratnya. Hal ini menyebabkan pelemahan interaksi hidrat ionnya. Efek pelemahan hidrat ion ini bertambah dengan bertambahnya kecepatan alir.

4.2.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3

Sub-bab ini akan membahas pengaruh variabel proses yang meliputi suhu dan konsentrasi larutan, kecepatan alir, panjang magnet, dan waktu sirkulasi terhadap presipitasi CaCO_3 .

4.2.2.1 Pengaruh Suhu dan konsentrasi larutan pada presipitasi CaCO_3 .

Gambar 4.15 dan tabel 4.6 menunjukkan efek medan magnet dalam meningkatkan presipitasi tetap terlihat meskipun suhu presipitasi dinaikkan hingga 70°C . Untuk presipitasi 10 menit pertama, terjadi penurunan persen kenaikan presipitasi relatif dari 5,6 % pada suhu 28°C menjadi 3 % pada suhu 70°C .



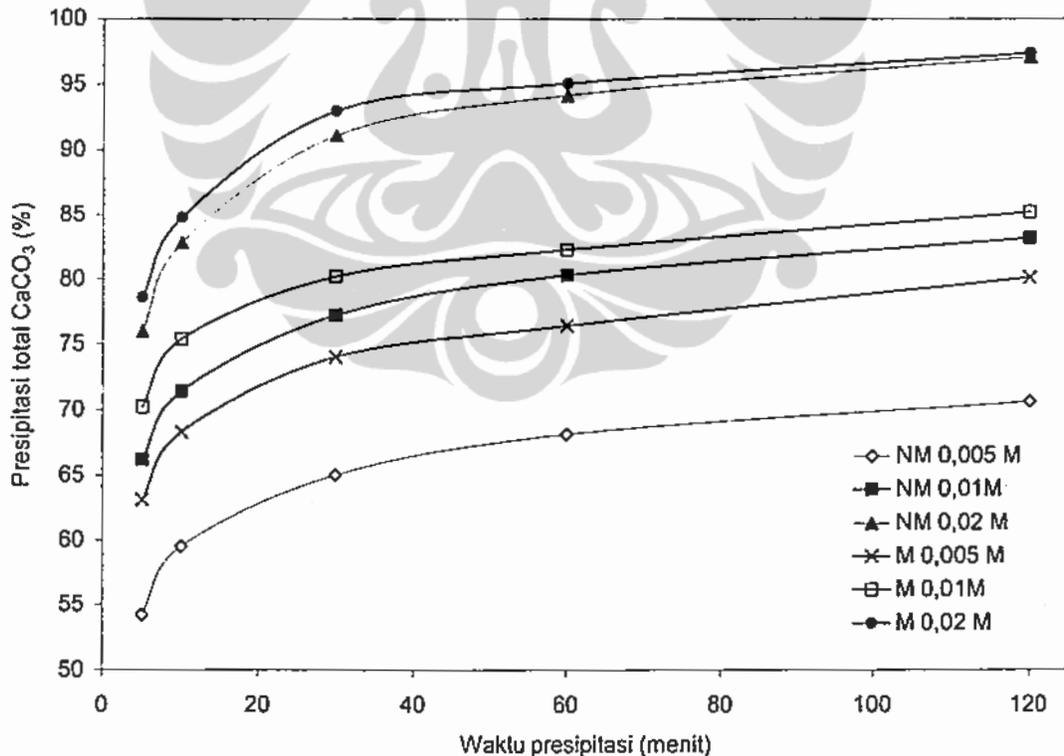
Gambar 4.15. Efek suhu pada presipitasi total CaCO_3 untuk sampel Na_2CO_3 termagnetisasi (MD) dan non-magnetisasi (NMD) pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, waktu sirkulasi $t_s : 10$ menit, panjang magnet $L_m : 0,35 \text{ m}$, dan $B : 5,2 \text{ kG}$.

Tabel 4.6. Pengaruh suhu presipitasi terhadap penurunan presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi. $v : 0,554 \text{ m/s}$ dan waktu sirkulasi $t_s : 10$ menit, panjang magnet $L_m : 0,35 \text{ m}$, dan $B : 5,2 \text{ kG}$

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi (%)		
	Suhu 28 °C	Suhu 50 °C	Suhu 70 °C
Sampel termagnetisasi (M)	75,4	80,8	85,5
Sampel non-magnetisasi (NM)	71,4	78,0	83,0
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM)/NM$	5,6	3,6	3,0

Kenaikan suhu menyebabkan efek magnet dalam meningkatkan presipitasi CaCO_3 menurun. Hal ini disebabkan pada suhu yang tinggi harga supersaturasi larutan meningkat sehingga efek interaksi ion menjadi lebih dominan dibanding efek pelemahan interaksi hidrat ion pada presipitasi CaCO_3 .

Gambar 4.16 dan tabel 4.7 menunjukkan terjadi penurunan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 dengan naiknya konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 . Untuk presipitasi 10 menit pertama terjadi penurunan persen kenaikan presipitasi relatif dari 14,2 % pada konsentrasi sampel 0,005 M menjadi 2,4 % pada konsentrasi sampel 0,02 M.



Gambar 4.16. Efek konsentrasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 pada presipitasi total CaCO_3 untuk larutan Na_2CO_3 non-magnetisasi (NM) dan termagnetisasi (M) pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10$ menit, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabel 4.7. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap kenaikan presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan v : 0,554 m/s, t_s : 10 menit, L_m : 0,35 m, B : 5,2 kG dan T : 28 °C.

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi (%)		
	Konsentrasi sampel 0.005 M	Konsentrasi sampel 0.01 M	Konsentrasi sampel 0.02 M
Sampel termagnetisasi (M)	68,3	75,4	83,8
Sampel non-magnetisasi (NM)	59,5	71,4	82,8
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM) / NM$	14,8	5,6	2,4

Naiknya konsentrasi larutan CaCl_2 dan Na_2CO_3 akan meningkatkan supersaturasi dan interaksi ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} , sehingga interaksi ion menjadi lebih dominan dibanding efek pelemahan interaksi hidrat ion akibat medan magnet. Hal ini ditunjukkan dengan makin berkurangnya persen kenaikan presipitasi relatif dengan makin tingginya konsentrasi larutan.

4.2.2.2 Pengaruh kecepatan alir, panjang magnet, dan waktu sirkulasi pada presipitasi CaCO_3 .

Waktu sirkulasi berhubungan langsung dengan waktu magnetisasi. Waktu magnetisasi (t_m) adalah lamanya sampel terpapar medan magnet dan merupakan fungsi dari waktu sirkulasi (t_s), luas penampang dalam pipa (A), volume sampel (V), dan panjang magnet (L_m) yang dapat dirumuskan pada persamaan (4.1) (Fathi *et al*, 2006):

$$t_m = \frac{A L_m t_s}{V} \quad (4.1)$$

Meningkatnya waktu sirkulasi akan meningkatkan waktu magnetisasi secara proposional. sedangkan peningkatan kecepatan alir tidak mempengaruhi waktu magnetisasi. Sub-bab ini akan menjelaskan pengaruh kecepatan alir, panjang magnet, dan waktu sirkulasi terhadap presipitasi CaCO_3 .

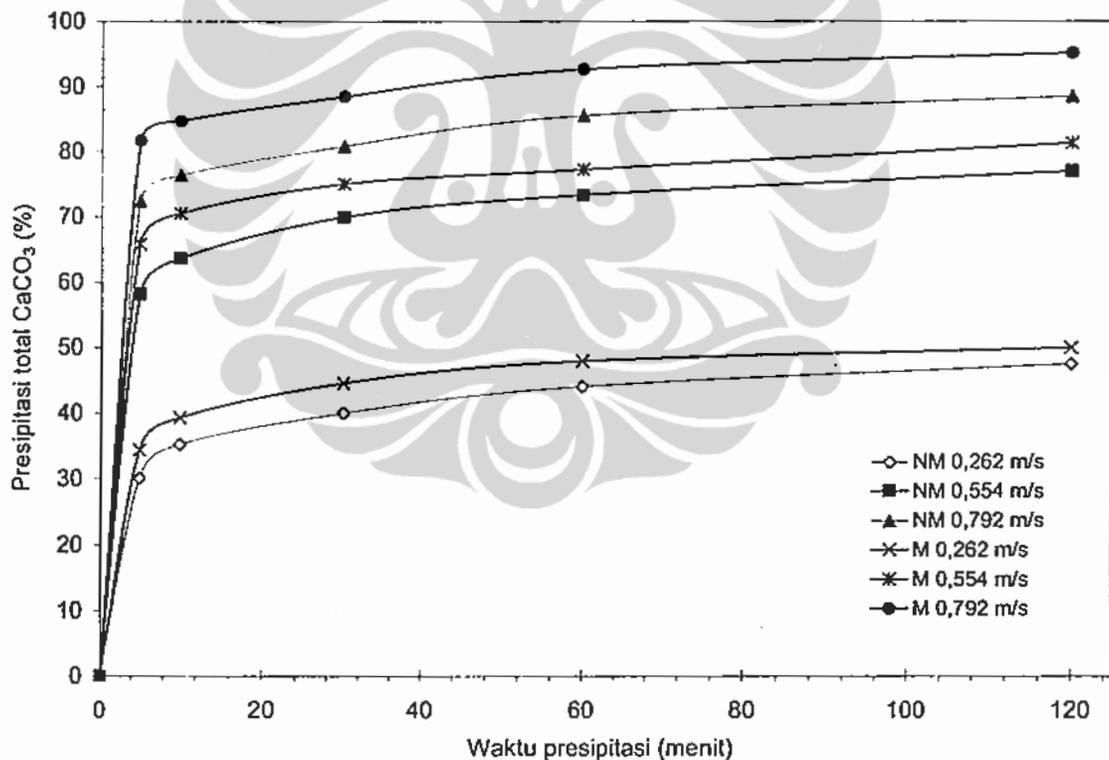
Gambar 4.17 dan tabel 4.8 menunjukkan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 meningkat dengan bertambahnya kecepatan alir. Gaya Lorentz merupakan faktor utama yang menyebabkan terjadinya efek pelemahan interaksi hidrat ion pada magnetisasi sistem fluida dinamik. Untuk presipitasi 10 menit pertama, terjadi kenaikan persen presipitasi relatif dari 10,4 % pada kecepatan alir 0,262 m/s menjadi 11 % pada kecepatan alir 0,792 m/s.

Besarnya Gaya Lorentz merupakan fungsi langsung dari harga kecepatan gerak translasi ion (v). Bertambahnya kecepatan alir berarti meningkatkan kecepatan translasi dari ion melintasi medan magnet. Efek penurunan interaksi hidrat ion akibat gaya Lorentz terlihat dari meningkatnya

presipitasi CaCO_3 . Pola aliran turbulen yang muncul pada kecepatan alir 0,792 m/s juga dapat berpengaruh terhadap menurunnya interaksi hidrat ion.

Tabel 4.8. Pengaruh kecepatan alir terhadap kenaikan presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan B: 5,2 kG, L_m : 0,35 m, dan T : 28 °C.

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi (%)		
	Kecepatan alir ($v = 0,262$ m/s) Re : 1816	Laju alir ($v = 0,554$ m/s) Re : 3840	Laju alir ($v = 0,792$ m/s) Re : 5490
Sampel termagnetisasi (M)	39,3	70,5	84,7
Sampel non-magnetisasi (NM)	35,2	63,6	76,3
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM)/NM$	10,4	10,8	11,0



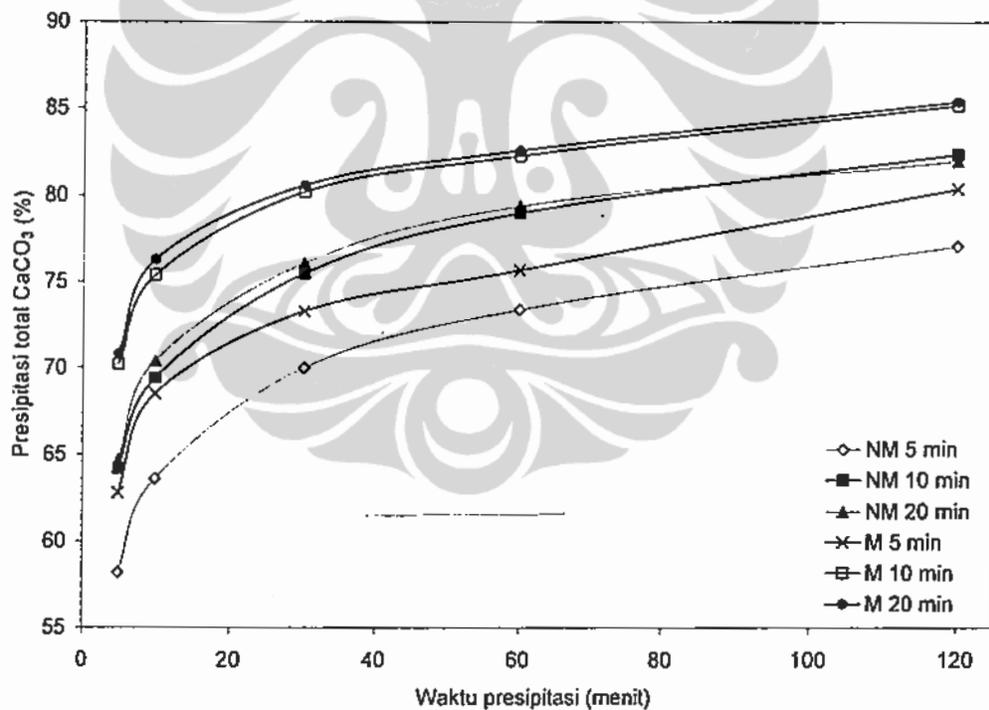
Gambar 4.17. Efek kecepatan alir pada presipitasi total CaCO_3 untuk sampel non-magnetisasi (NM) dan sampel termagnetisasi (M) pada waktu sirkulasi 5 menit. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan L_m : 0,35 m, B : 5,2 kG dan T : 28 °C.

Gambar 4.18 menunjukkan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 , meningkat dengan bertambahnya waktu sirkulasi. Penambahan waktu sirkulasi (t_s) berarti

menambah waktu magnetisasi (t_m) dan menyebabkan efek pelemahan hidrat ion juga meningkat. Tabel 4.9 menunjukkan peningkatan laju presipitasi optimum dicapai pada 10 menit sirkulasi dimana terjadi persen kenaikan relatif hingga 8,6 % sedangkan untuk waktu sirkulasi 20 menit. persen kenaikan relatif turun menjadi 8,4 %. Hal ini menunjukkan kondisi optimum ion-ion termagnetisasi untuk kecepatan alir 0,554 m/s tercapai pada waktu sirkulasi 10 menit.

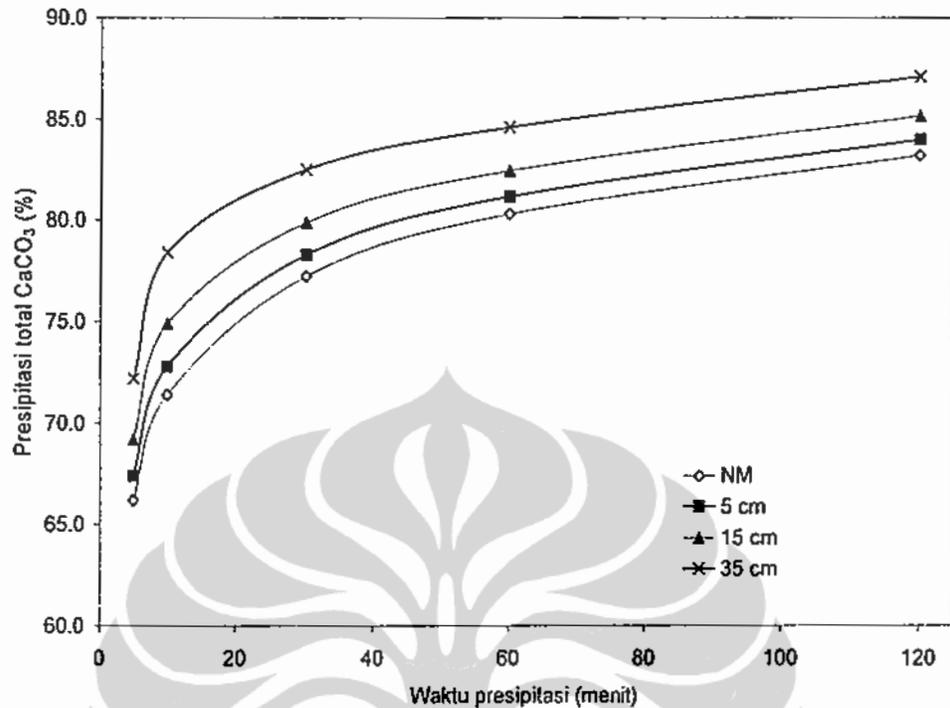
Tabel 4.9 Pengaruh waktu sirkulasi terhadap kenaikan presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi. Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 10 menit presipitasi (%)		
	Sirkulasi 5 menit	Sirkulasi 10 menit	Sirkulasi 20 menit
Sampel magnetisasi (M)	68,5	75,4	76,3
Sampel non-magnetisasi (NM)	63,6	69,4	70,4
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - \text{NM})/\text{NM}$	7,2	8,6	8,4



Gambar 4.18. Efek waktu sirkulasi pada presipitasi total CaCO_3 ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B ; 5,2 \text{ kG}$, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).

Fathi (2006) menggunakan larutan CaCO_3 mendapatkan waktu optimum sirkulasi pada 15 menit dengan laju alir 0.94 L/menit dan panjang magnet 20 cm serta kuat medan 1600 Gauss. Hal ini menunjukkan bahwa magnetisasi pada air sadah akan mengalami kejenuhan pada harga laju alir, panjang magnet, dan kuat medan tertentu.



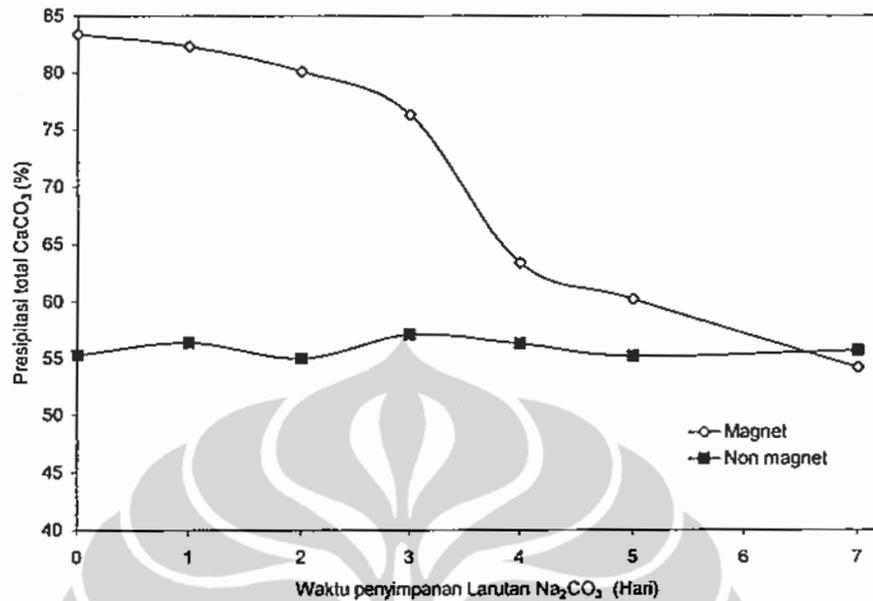
Gambar 4.19. Efek panjang magnet pada presipitasi total CaCO_3 . Magnetisasi dilakukan pada larutan Na_2CO_3 dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gambar 4.19 menunjukkan penambahan panjang magnet akan menambah presipitasi CaCO_3 . Penambahan jumlah magnet secara seri berarti menambah panjang magnet (L_m) sehingga menambah waktu magnetisasi (t_m) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4.1).

4.2.2.3 Pengaruh waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 .

Gambar 4.20 menunjukkan pengaruh waktu penyimpanan larutan Na_2CO_3 yang sudah dimagnetisasi sebelum dicampur dengan larutan CaCl_2 . Pengaruh medan magnet pada larutan Na_2CO_3 dapat bertahan hingga 3 hari waktu penyimpanan sebelum akhirnya menurun dan menghilang pada hari ke-7 (persen presipitasi total sampel termagnetisasi mendekati persen presipitasi total sampel non-magnetisasi). Hidrat ion CO_3^{2-} yang telah termagnetisasi akan terus memiliki sifat mudah terpresipitasi meskipun sudah tidak ada medan magnet (efek memori magnetik). Hal ini menjadi penjelasan mengapa pada sistem AMT yang diusulkan pada penelitian ini (Gambar 3.2) perlu dilakukan presipitasi lanjut setelah proses magnetisasi melalui proses pengendapan guna mengoptimalkan proses presipitasi CaCO_3 , sehingga air sadah hasil olahan memiliki kandungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} yang lebih rendah lagi. Efek memori magnetik yang

mencapai lebih dari 3 hari dapat menjadi acuan untuk mendapatkan waktu optimal pengendapan setelah proses magnetisasi.



Gambar 4.20. Efek Waktu penyimpanan pada larutan Na₂CO₃ termagnetisasi terhadap presipitasi total CaCO₃. Sistem fluida dinamik dilakukan pada $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$; $L_m : 0,35 \text{ m}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

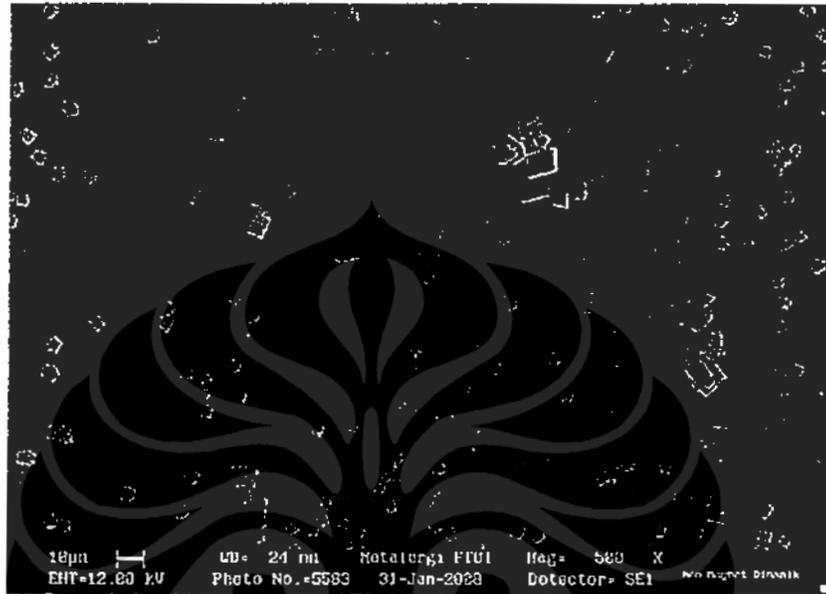
4.2.3 Morfologi dan Sifat deposit CaCO₃.

Tabel 4.10 menunjukkan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO₃ terjadi baik di deposit maupun di fasa larutan. Persentase deposit menggambarkan kemampuan deposit CaCO₃ menempel di dinding tabung. Tabel 4.10 menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan pada persentase deposit antara larutan termagnetisasi dan non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan tidak terdapat perbedaan sifat deposit yang terbentuk pada sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi dalam kemampuannya menempel di dinding.

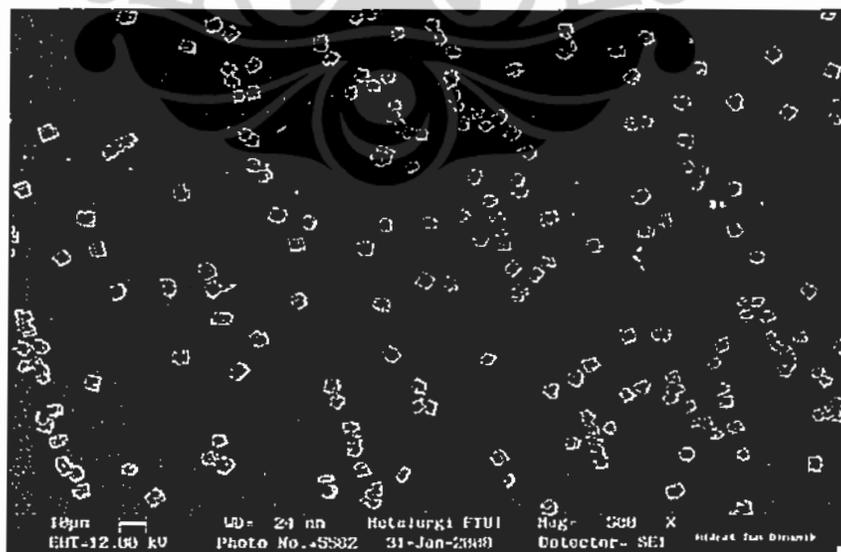
Tabel 4.10. Pembentukan CaCO₃ di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO₃ pada 120 menit presipitasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Presipitasi CaCO ₃	Presipitasi CaCO ₃ (%)			
	Waktu sirkulasi 5 menit		Waktu sirkulasi 10 menit	
	Non-magnetisasi	Termagnetisasi	Non-magnetisasi	Termagnetisasi
Di deposit [D]	65,8	67,9	71,3	74,4
Di larutan [L]	11,3	12,5	11,1	11,0
Total [T]	77,1	80,4	82,4	85,4
Persentase deposit: 100 x (D / T)	85,3	84,4	86,5	87,1

Gambar 4.21.a dan 4.21.b adalah hasil uji SEM yang menunjukkan jenis kristal yang terbentuk pada kedua jenis larutan tersebut didominasi oleh Kalsit yang bersifat stabil. Hasil uji SEM ini menunjukkan proses magnetisasi tidak signifikan mempengaruhi jenis kristal yang terbentuk.



Gambar 4.21.a. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 selama 120 menit presipitasi suhu 28°C Pembesaran 500 X, Larutan Na_2CO_3 non-magnetisasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, dan $t_s : 10$ menit.



Gambar 4.21.b. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 selama 120 menit suhu 28°C . Pembesaran 500 X, Larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10$ menit, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $L_m : 0,35 \text{ m}$.

4.2.4 Kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi sistem fluida statik dan dinamik

Aspek kinetika presipitasi CaCO_3 merupakan kajian yang perlu dilakukan guna mendapatkan pemahaman tentang pengaruh medan magnet terhadap parameter kinetika yang meliputi tetapan laju dan energi aktivasi. Model kinetika yang dipakai menggunakan model persamaan kinetika empiris dengan pendekatan kinetika global.

4.2.4.1 Model persamaan kinetika Empiris.

Gambar 4.8 merupakan data kinetika presipitasi CaCO_3 untuk sistem fluida statik. Persamaan kinetika presipitasi pembentukan CaCO_3 ini menggunakan model persamaan kinetika empiris dengan bentuk kurva sigmoidal seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.2 dimana harga K merupakan fungsi tetapan laju k (persamaan 4.3).

$$Y = 1 - e^{-Kt^n} \quad (4.2)$$

$$k = K^{1/n} \quad (4.3)$$

Dengan :

- Y : fraksi mol CaCO_3 yang terbentuk
- t : waktu presipitasi (menit)
- k : tetapan laju reaksi (menit^{-1})
- k_o : faktor frekuensi tumbukan (menit^{-1})
- R : tetapan Gas (8.314 J/K.mol)
- E_a : energi aktivasi (J/mol)
- T : suhu presipitasi (Kelvin)
- n & K : tetapan

Nilai n merupakan fungsi dari pembentukan inti (nukleasi) dan pertumbuhan kristal CaCO_3 . Harga n berkisar antara 1 hingga 4 dimana laju konstan pada awal transformasi kemudian meningkat cepat dan akhirnya kembali konstan pada harga maksimum seperti yang ditunjukkan gambar 2.2.c (Jena *et al*, 1992). Harga n dan K pada persamaan 4.1 dapat dihitung dengan penurunan rumus seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.4 sebagai berikut:

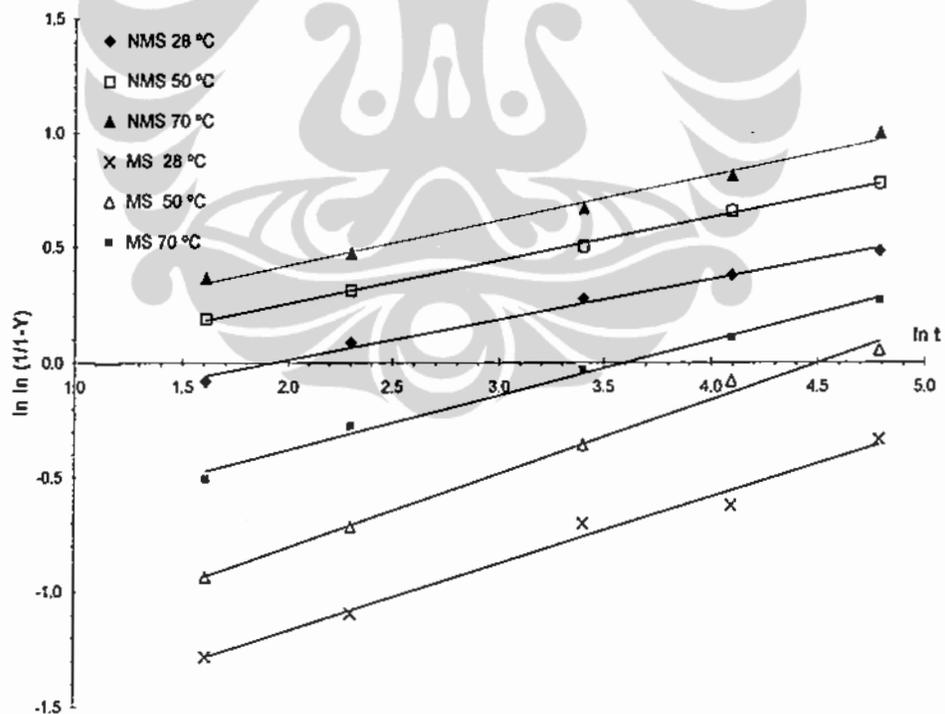
$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) = \ln K + n \ln t \quad (4.4)$$

Nilai $\ln K$ merupakan intersep persamaan garis linier $\ln (1/1-Y)$ terhadap nilai $\ln (t)$, sedangkan nilai n merupakan kelandaian persamaan garis linier tersebut. Selanjutnya nilai tetapan laju k didapat dari nilai K dan n.

4.2.4.2 Persamaan kinetika Sistem fluida statik

Gambar 4.22 dan tabel 4.11 merupakan kurva hasil perhitungan persamaan 4.4 untuk sampel non-magnetisasi fluida statik (NMS) dan sampel termagnetisasi fluida statik (MS). Tabel 4.10 menunjukkan nilai R^2 yang menggambarkan linierisasi dari persamaan laju ini berkisar antara 0,98 hingga 0,99 yang menunjukkan data kinetika pada gambar 4.8 dapat digunakan untuk menghitung parameter kinetika presipitasi CaCO_3 memakai model kurva sigmoidal (persamaan 4.1).

Gambar 4.22 menunjukkan harga n berada pada nilai 0,17 hingga 0,32. Wang (2004) dengan menggunakan model persamaan kinetika kurva sigmoidal mendapatkan harga n sebesar 0,24 untuk proses transformasi melanterite menjadi hematite. Nilai n yang lebih rendah dari 1 ini, menurut Wang disebabkan laju nukleasi yang tinggi di awal reaksi. Penjelasan ini juga berlaku pada proses presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 , dimana reaksi presipitasi CaCO_3 terjadi sangat cepat di awal presipitasi (tahap nukleasi) yang disebabkan tingginya nukleasi CaCO_3 di fasa larutan (tabel 4.2) sehingga harga n yang didapat lebih rendah dari 1.



Gambar 4.22. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln(t)$ pada sistem fluida statik dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T_m : 30 \text{ menit}$.

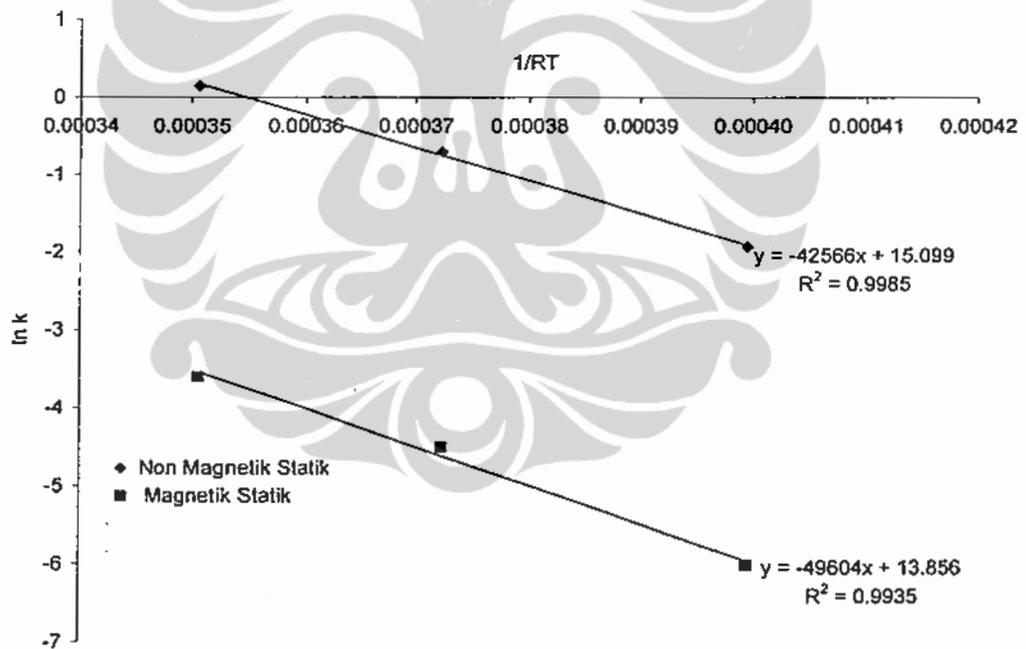
Tabel 4.11 Nilai tetapan laju presipitasi CaCO_3 (k), faktor frekuensi tumbukan (k_0), dan energi aktivasi pembentukan CaCO_3 (E_a) (B : 5,2 kG dan T_m : 30 menit).

Kode sampel	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Persamaan Regresi	Koefisien Korelasi (R^2)	Nilai k (min^{-1})	$\ln k_0$ (min^{-1})	E_a (kJ/mol)
NMS	28	$y = 0,1746x - 0,3372$	0,99	0,145	15,1	42,57
NMS	50	$y = 0,1872x - 0,118$	0,99	0,494		
NMS	70	$y = 0,1962x + 0,0287$	0,99	1,158		
MS	28	$y = 0,2913x - 1,7525$	0,98	0,002	13,86	49,6
MS	50	$y = 0,3227x - 1,4529$	0,99	0,011		
MS	70	$y = 0,2373x - 0,8547$	0,99	0,027		

Untuk perhitungan harga k_0 dan E_a diturunkan dari persamaan Arrhenius 4.5 sebagai berikut:

$$\ln k = \ln k_0 + (-E_a) 1/RT \quad (4.5)$$

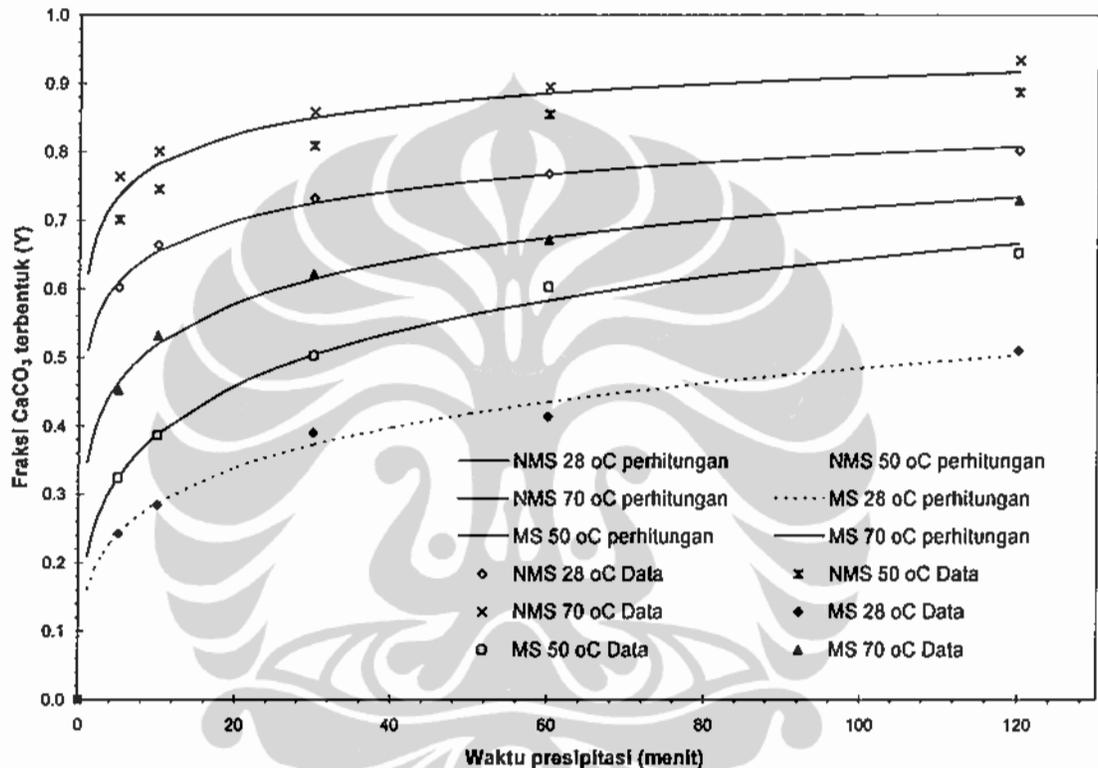
Harga k_0 didapat dari tetapan persamaan garis linier $\ln k$ terhadap $1/RT$. sedangkan E_a didapat dari kelandaian persamaan garis linier $\ln k$ terhadap $1/RT$ seperti yang ditunjukkan gambar 4.23.



Gambar 4.23. Kurva persamaan linier $\ln k$ terhadap $1/RT$ pada sampel non-magnetisasi dan sampel termagnetisasi dengan B : 5,2 kG dan T_m : 30 menit.

Tabel 4.11 yang berisikan beberapa parameter kinetika presipitasi CaCO_3 memperlihatkan pengaruh suhu larutan meningkatkan k dengan naiknya suhu. Kenaikan suhu larutan sebesar 42 K (15,3 %) meningkatkan nilai k hingga 10 kali lipat. Larutan termagnetisasi memiliki harga k yang jauh lebih rendah dibanding larutan non-magnetisasi dimana hal ini menunjukkan bahwa medan magnet menekan laju presipitasi CaCO_3 .

Tabel 4.11 menunjukkan harga E_a pada sampel non-magnetisasi sebesar 42,57 kJ/mol yang berarti lebih kecil dibanding sampel termagnetisasi sebesar 49,6 kJ/mol. Harga E_a yang lebih tinggi pada sampel termagnetisasi memperkuat kesimpulan bahwa magnetisasi menekan proses presipitasi CaCO_3 . Sebagai perbandingan, harga E_a presipitasi CaCO_3 tanpa medan magnet yang telah dilaporkan oleh peneliti lain mendapatkan nilai sebesar 46,9 kJ/mol pada rentang suhu 25 – 70 °C dengan pH 7 – 9 (Dawe *et al*, 1997). Harga E_a tanpa magnetisasi yang lebih rendah dalam percobaan ini dapat disebabkan pH larutan yang digunakan dalam percobaan ini berkisar 9 – 10.



Gambar 4.24 Kurva fraksi CaCO_3 terbentuk (Y) hasil perhitungan dan data percobaan untuk sampel non-magnetisasi statik (NMS) dan sampel termagnetisasi statik (MS) pada B: 5,2 kG dan t_m : 30 menit.

Berdasarkan data kinetika pada tabel 4.11, maka dapat ditulis persamaan fraksi mol CaCO_3 yang terbentuk (Y), fungsi suhu larutan (T) dan waktu presipitasi (t) untuk sampel termagnetisasi (persamaan 4.6) dan sampel non-magnetisasi (persamaan 4.7) sistem fluida statik sebagai berikut:

$$Y = 1 - \exp(-Kt^n) = 1 - \exp\left[-\left(k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} t\right)^n\right] = 1 - \exp\left[-\left(3609212. e^{\frac{-42566}{8.314 T}} t\right)^n\right] \quad (4.6)$$

dengan harga $n = 0,1746$; $0,1872$; dan $0,1962$ untuk suhu $T = 301 \text{ K}$; 323 K ; dan 343 K .

$$Y = 1 - \exp(-Kt^n) = 1 - \exp \left[- \left(1041320 e^{\frac{-49604}{8.314 T}} t \right)^n \right] \quad (4.7)$$

dengan harga $n = 0,2913$; $0,3227$; dan $0,2373$ untuk suhu $T = 301 \text{ K}$; 323 K ; dan 343 K .

Gambar 4.24 menunjukkan perbandingan data hasil percobaan dan perhitungan menggunakan persamaan 4.6 dan persamaan 4.7 dengan hasil perhitungan yang didapat cukup baik dalam memprediksi presipitasi CaCO_3 yang terjadi untuk rentang 120 menit waktu presipitasi dan suhu dari 301 hingga 343 K. Hasil yang cukup baik ini juga ditunjukkan dari harga koefisien korelasi R^2 pada data percobaan dengan nilai yang berkisar $0,98 - 0,99$ (tabel 4.11).

Berdasarkan parameter kinetika pada tabel 4.10 dan gambar 4.24 menjelaskan bahwa laju presipitasi CaCO_3 dipengaruhi oleh suhu presipitasi dan kuat medan dimana medan magnet menekan laju presipitasi CaCO_3 . Selanjutnya akan dibahas pengaruh kuat medan, waktu magnetisasi, dan konsentrasi larutan terhadap tetapan laju presipitasi k sebagai berikut:

Tabel 4.12 Harga tetapan laju k pada berbagai kuat medan dengan Waktu magnetisasi 30 menit dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Parameter kinetika	NM	2 kG	4 kG	5,2 kG
$\ln K$	-0,337	-0,453	-0,92	-1,753
n	0,1746	0,149	0,175	0,291
$k (\text{min}^{-1})$	0,145	0,049	0,005	0,002

Tabel 4.12 menunjukkan harga tetapan laju k pada berbagai kuat medan dengan mengambil data kinetika dari gambar 4.7. Terjadi penurunan harga k dengan meningkatnya kuat medan dari $0,0475 \text{ min}^{-1}$ pada 2 kG menjadi $0,0024 \text{ min}^{-1}$ pada 5,2 kG. Hal ini menunjukkan bahwa makin besar kuat medan magnet yang diberikan pada sampel maka akan semakin menurunkan laju presipitasi CaCO_3 -nya.

Tabel 4.13. Harga tetapan laju k pada berbagai waktu magnetisasi dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Parameter Kinetika	Waktu magnetisasi				
	NM	10 menit	20 menit	30 menit	60 menit
$\ln K$	-0,337	-0,84	-1,363	-1,753	-1,956
n	0,175	0,236	0,277	0,291	0,331
$k (\text{min}^{-1})$	0,145	0,029	0,007	0,002	0,003

Tabel 4.13 menunjukkan harga tetapan laju k pada berbagai waktu magnetisasi dengan mengambil data kinetika dari gambar 4.4. Terjadi penurunan harga k dengan bertambahnya waktu magnetisasi dari $0,0286 \text{ min}^{-1}$ pada 10 menit magnetisasi menjadi $0,0027 \text{ min}^{-1}$ pada 60 menit

magnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa makin besar waktu magnetisasi maka akan semakin rendah laju presipitasi CaCO_3 . Tidak terjadi penurunan yang signifikan pada harga k untuk magnetisasi di atas 30 menit. Kenaikan kuat medan dan waktu magnetisasi berdampak langsung pada penguatan interaksi hidrat ion sehingga presipitasi ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} semakin sulit terjadi. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya nilai tetapan laju presipitasi k .

Tabel 4.14. Harga tetapan laju k pada berbagai konsentrasi sampel larutan dengan $B : 5,2 \text{ kG}$, $t_m : 30 \text{ menit}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Tetapan laju	Konsentrasi sampel		
	0.005M	0.001 M	0.02 M
$k_{\text{non-magnet}} [k_{nm}] (\text{min}^{-1})$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,145	0,685
$k_{\text{magnet}} [k_m] (\text{min}^{-1})$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,002	0,253
% penurunan k : $100 * (k_{nm} - k_m) / k_{nm}$	99,98	98,32	63,02

Tabel 4.14 menunjukkan harga tetapan laju k pada berbagai konsentrasi larutan dengan mengambil data kinetika dari gambar 4.9. Terjadi peningkatan harga k hingga ratusan kali dengan bertambahnya konsentrasi dari 0,005 M menjadi 0,02 M, baik pada sampel non magnetisasi maupun pada sampel termagnetisasi. Bertambahnya konsentrasi ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} dalam larutan akan menyebabkan peningkatan interaksi ion-ion menjadi lebih dominan dibanding efek penguatan hidrat ion dari medan magnet. Hal ini ditunjukkan dengan semakin rendahnya persen penurunan harga k dengan bertambahnya konsentrasi sampel. Oleh sebab itu efek medan magnet dalam menekan laju presipitasi CaCO_3 semakin berkurang dengan meningkatnya konsentrasi sampel.

Kurva regresi untuk perhitungan parameter kinetika tabel 4.12, 4.13 dan 4.14 dapat dilihat pada lampiran C.

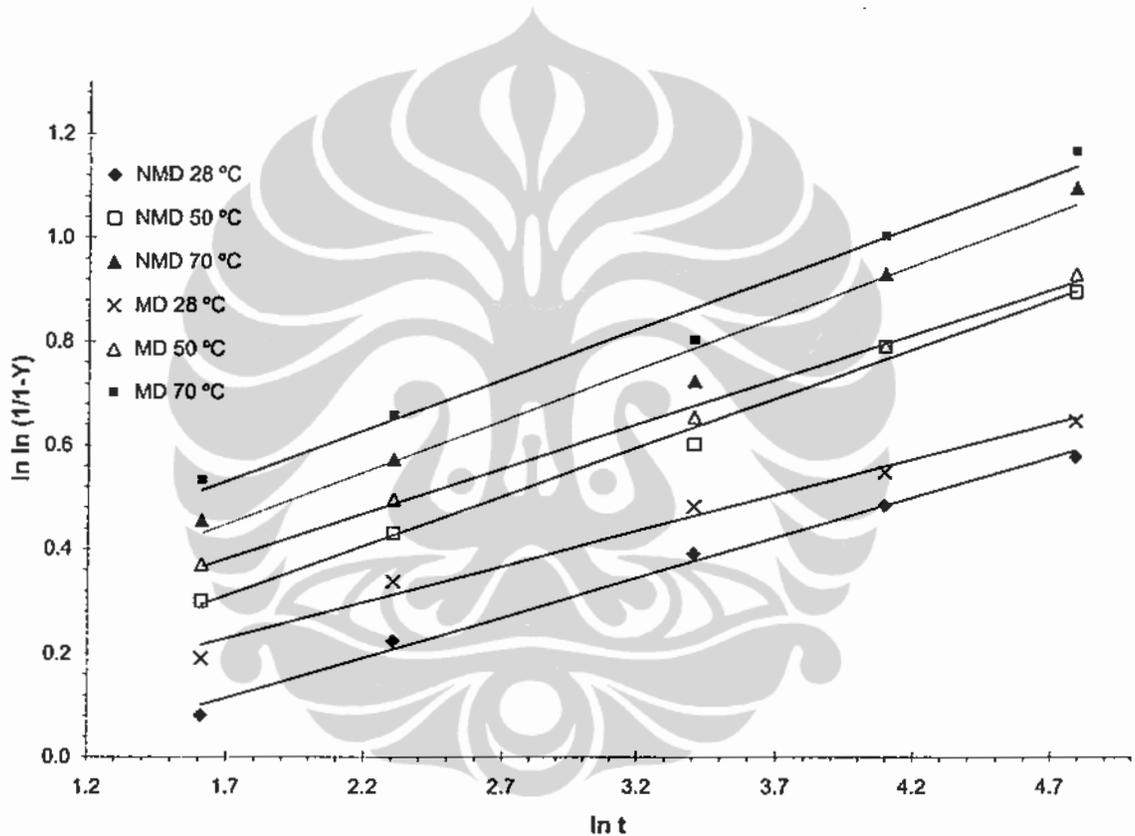
4.2.4.3 Persamaan kinetika Sistem fluida dinamik

Tabel 4.15 dan gambar 4.25 merupakan kurva hasil perhitungan persamaan 4.4 untuk sampel non-magnetisasi (NMD) dan sampel termagnetisasi (MD). Harga R^2 yang menunjukkan linierisasi dari persamaan laju ini berkisar antara 0,98 hingga 0,99 yang menunjukkan data kinetika pada gambar 4.15 dapat digunakan untuk menghitung parameter kinetika presipitasi CaCO_3 memakai model persamaan kurva sigmoidal (Persamaan 4.2).

Tabel 4.15 menunjukkan kenaikan suhu larutan sebesar 42 K (15,3 %) meningkatkan nilai k hingga 3 kali lipat. Untuk sampel larutan termagnetisasi memiliki harga k yang lebih tinggi dibanding larutan non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet sistem fluida dinamik mendorong laju presipitasi CaCO_3 .

Tabel 4.15 Nilai tetapan laju presipitasi CaCO_3 (k), faktor frekuensi tumbukan (k_o), dan Energi aktivasi pembentukan CaCO_3 (E_a) untuk sampel termagnetisasi (MD) dan non-magnetisasi (NMD) pada sistem fluida dinamik ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $t_s : 10$ menit dan $v : 0,554 \text{ m/s}$).

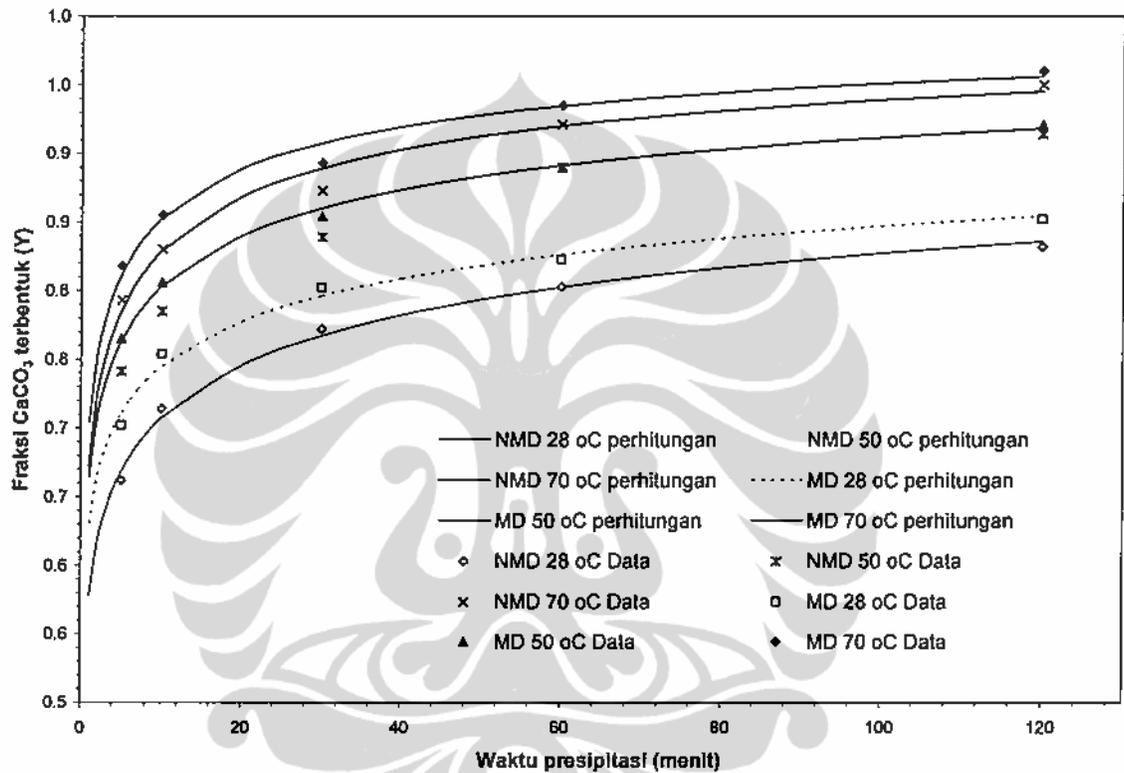
Kode sampel	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Persamaan Regresi	Koefisien Korelasi (R^2)	Nilai k (min^{-1})	$\text{Ln } k_o$ (min^{-1})	E_a (kJ/mol)
NMD	28	$y = 0,1542x - 0,1474$	0,99	0,384	11,33	30,70
NMD	50	$y = 0,1902x - 0,0115$	0,99	0,941		
NMD	70	$y = 0,1999x + 0,1083$	0,98	1,179		
MD	28	$y = 0,1378x - 0,0048$	0,98	0,966	8,37	21,06
MD	50	$y = 0,1733x + 0,0872$	0,99	1,654		
MD	70	$y = 0,1968x + 0,1965$	0,98	2,714		



Gambar 4.25. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ untuk sampel non-magnetisasi (NMD) dan Sampel termagnetisasi (MD) pada berbagai suhu presipitasi ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10$ menit, $B : 5,2 \text{ kG}$, dan $L_m : 0,35 \text{ m}$).

Tabel 4.15 menunjukkan harga E_a pada sampel non magnetisasi sebesar $30,7 \text{ kJ/mol}$ yang berarti lebih tinggi dibanding pada sampel termagnetisasi yang sebesar $21,06 \text{ kJ/mol}$. Harga E_a yang lebih rendah pada sampel termagnetisasi menunjukkan bahwa magnetisasi fluida dinamik mendorong proses presipitasi CaCO_3 . Hasil uji konduktivitas pada larutan Na_2CO_3 termagnetisasi dengan sistem fluida dinamik (gambar 4.14) menunjukkan telah terjadi pelemahan interaksi hidrasi ion dan dibuktikan dengan meningkatnya laju presipitasi CaCO_3 serta menurunnya harga E_a .

Harga E_a pada sampel disirkulasi (sistem fluida dinamis) menunjukkan nilai yang lebih rendah dibanding sampel tanpa sirkulasi (sistem fluida statik) untuk sampel non-magnetisasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.11 dan tabel 4.15. Hal ini menunjukkan agitasi mekanik (sirkulasi fluida) dapat menurunkan harga energi aktivasi presipitasi CaCO_3 . Gambar 4.13 menunjukkan terjadi penurunan konduktivitas larutan Na_2CO_3 non-magnetisasi statik dengan disirkulasi. Hal ini menunjukkan proses sirkulasi tanpa medan magnet memperlemah interaksi hidrat ion sehingga meningkatkan presipitasi CaCO_3 .



Gambar 4.26 Kurva fraksi CaCO_3 terbentuk (Y) hasil perhitungan dan data percobaan untuk sampel non-magnetisasi dinamik (NMD) dan sampel termagnetisasi dinamik (MD) ($v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$).

Berdasarkan data kinetika pada gambar 4.25 dan tabel 4.15, maka dapat ditulis persamaan fraksi mol CaCO_3 yang terbentuk (Y), fungsi suhu larutan (T) dan waktu presipitasi (t) untuk sampel termagnetisasi (persamaan 4.8) dan sampel non-magnetisasi (persamaan 4.9) sistem fluida dinamik sebagai berikut:

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(83283. e^{\frac{-30700}{8.314 T}} t \right)^n \right] \quad (4.8)$$

dengan harga $n = 0,1542$; $0,1902$; dan $0,1999$ untuk suhu $T = 301 \text{ K}$; 323 K ; dan 343 K .

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(4316 e^{\frac{-21060}{8.314 T}} t \right)^n \right] \quad (4.9)$$

dengan harga $n = 0,1378$; $0,1733$; dan $0,1968$ untuk suhu $T = 301$ K; 323 K; dan 343 K.

Gambar 4.26 menunjukkan perbandingan data hasil percobaan dan perhitungan menggunakan persamaan 4.8 dan 4.9 dengan hasil perhitungan yang didapat cukup baik dalam memprediksi presipitasi CaCO_3 yang terjadi untuk rentang 120 menit waktu presipitasi dan suhu dari 301 hingga 343 K. Hasil yang cukup baik ini juga ditunjukkan dari harga koefisien korelasi R^2 data percobaan dengan nilai yang berkisar $0,97 - 0,99$ (tabel 4.14).

Berdasarkan parameter kinetika pada tabel 4.15 dan gambar 4.26 menjelaskan bahwa laju presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida dinamik dipengaruhi oleh suhu presipitasi dan kuat medan dimana medan magnet mendorong laju presipitasi CaCO_3 . Selanjutnya akan dibahas pengaruh kecepatan alir, waktu magnetisasi dan konsentrasi larutan terhadap tetapan laju presipitasi k pada paragraf-paragraf di bawah ini.

Tabel 4.16 menunjukkan harga k pada sampel non-magnetisasi lebih tinggi dibanding harga k pada sampel termagnetisasi untuk kecepatan alir yang sama (tabel 4.16). Persen peningkatan k bertambah dari 24 % pada kecepatan alir $0,262$ m/s menjadi 291,7 % pada kecepatan alir $0,554$ m/s. Bertambahnya kecepatan alir akan menyebabkan efek medan magnet melalui gaya Lorentz menjadi lebih besar dalam menurunkan kekuatan hidrat ion CO_3^{2-} , sehingga akan meningkatkan laju presipitasi CaCO_3 . Selanjutnya persen peningkatan k menurun kembali menjadi 257,6 % pada kecepatan alir $0,792$ m/s. Hal ini disebabkan pada kecepatan tinggi, kontribusi agitasi mekanik menjadi lebih besar dalam menurunkan interaksi hidrat ion.

Tabel 4.16. Harga tetapan laju k pada berbagai kecepatan alir sampel larutan dengan $t_s : 5$ menit, $B : 5,2$ kG, $L_m : 0,35$ m, dan $T : 28$ °C

Tetapan laju	Kecepatan alir sampel (m/s)		
	0,262 m/s	0,554 m/s	0,792 m/s
k non-magnet [k_{nm}](min^{-1})	0,0008	0,0963	0,9036
k magnet [k_m](min^{-1})	0,0010	0,3774	3,2317
% peningkatan k : $100 * (k_{nm} - k_m) / k_{nm}$	24,0	291,7	257,6

Tabel 4.17. Harga tetapan laju k pada berbagai waktu sirkulasi dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Tetapan laju	Waktu sirkulasi t_s		
	5 menit	10 menit	20 menit
k magnet [k_{nm}](min^{-1})	0,214	0,966	1,199
k non-magnet [k_m](min^{-1})	0,096	0,258	0,307
% peningkatan k : $100 * (k_{nm} - k_m)/k_m$	55,1	274,1	290,2

Tabel 4.17 menunjukkan bahwa medan magnet menaikkan laju presipitasi CaCO_3 yang ditunjukkan dengan harga k sampel termagnetisasi yang lebih besar dibanding harga k sampel non-magnetisasi. Persen peningkatan harga k bertambah dari 55,1 % pada waktu sirkulasi 5 menit menjadi 274,1 % pada waktu sirkulasi 10 menit. Penambahan persen peningkatan k pada waktu sirkulasi 20 menit dibanding waktu sirkulasi 10 menit relatif kecil. Hal ini dapat disebabkan kejenuhan sampel dalam menerima energi medan magnet.

Terjadi peningkatan harga k dengan bertambahnya konsentrasi sampel seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.18. Harga k pada sampel termagnetisasi lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi, yang menunjukkan laju presipitasi CaCO_3 meningkat dengan adanya medan magnet. Harga persen peningkatan k maksimum dicapai pada konsentrasi sampel 0,01 M. Hal ini menunjukkan bahwa efek medan magnet akan sangat terlihat pada konsentrasi sampel 0,01 M. Efek medan magnet pada konsentrasi tinggi, akan berkurang. Hal ini terlihat dari menurunnya persen peningkatan harga k pada konsentrasi sampel 0,02 M menjadi hanya 35,1 % (tabel 4.18). Pada konsentrasi tinggi efek interaksi ion menjadi jauh lebih dominan dibanding efek interaksi hidrat ion sehingga efek penurunan kekuatan hidrat ion oleh medan magnet tidak signifikan dalam meningkatkan laju presipitasi. Kurva regresi untuk perhitungan parameter kinetika tabel 4.16, 4.17 dan 4.18 dapat dilihat pada lampiran C.

Tabel 4.18. Harga tetapan laju k pada berbagai konsentrasi sampel dengan $v : 0,554 \text{ m/s}$, $t_s : 10 \text{ menit}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Tetapan laju	Konsentrasi sampel Na_2CO_3 dan CaCl_2 ,		
	0,005 M	0,01 M	0,02 M
k magnet [k_{nm}](min^{-1})	0,225	0,966	1,047
k non-magnet [k_m](min^{-1})	0,041	0,384	0,775
% peningkatan k : $100 * (k_{nm} - k_m)/k_m$	81,6	151,2	35,1

4.3 Pengaruh medan magnet terhadap interaksi ion dan presipitasi CaCO_3 pada larutan CaCO_3 dengan sistem fluida statik

Pada tahap ini, magnetisasi dilakukan saat presipitasi CaCO_3 berlangsung menggunakan sistem fluida statik. Larutan yang digunakan sebagai model air sadah adalah larutan CaCO_3 . Efek interaksi ion yang muncul saat magnetisasi akan diamati melalui presipitasi CaCO_3 -nya. Pengamatan presipitasi meliputi jumlah presipitasi, sifat deposit, dan morfologi deposit. Pengujian konduktivitas larutan juga akan dilakukan untuk memperkuat penjelasan adanya efek interaksi hidrat ion pada tahapan ini.

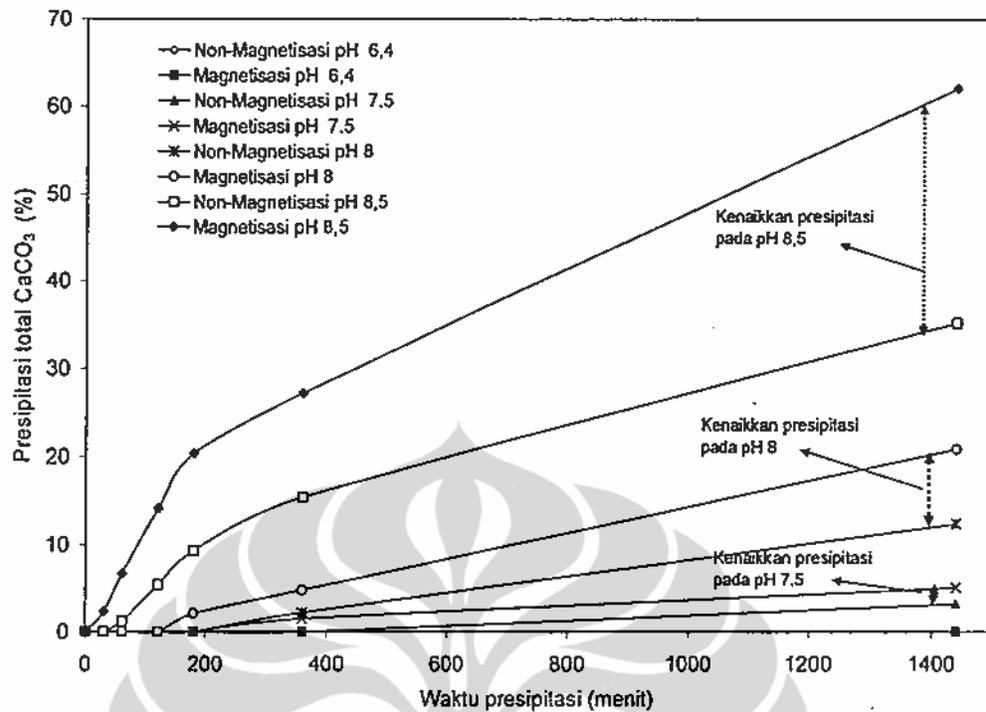
Air sadah menggunakan larutan CaCO_3 akan berada pada pH rendah (6 - 8,5) sehingga presipitasi berjalan lambat. Model ini banyak digunakan karena lebih mendekati kondisi air sadah di alam. Supersaturasi larutan CaCO_3 merupakan aspek penting yang mempengaruhi interaksi ion pada magnetisasi sistem fluida statik. Pada bagian ini akan dibahas pengaruh kejenuhan (supersaturasi) larutan CaCO_3 terhadap presipitasi CaCO_3 di bawah pengaruh medan magnet. Supersaturasi pada larutan akan diukur dari harga pH larutan dan konsentrasi CaCO_3 terlarut. Pengamatan presipitasi CaCO_3 akan dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.

4.3.1 Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi.

Pada bagian ini larutan CaCO_3 dengan konsentrasi 0,004 M divariasikan pH larutannya di awal magnetisasi pada harga 6,4; 7,5; 8 dan 8,5. Magnetisasi dilakukan bersamaan dengan proses presipitasinya yaitu selama 1440 menit (24 jam). Hasil perhitungan nilai supersaturasi δ_s diberikan pada tabel 4.19. Gambar 4.27 menunjukkan tidak terjadi presipitasi untuk larutan dengan pH 6,4 selama 1440 menit presipitasi. Hal ini disebabkan harga supersaturasi yang rendah (0,1). Untuk pH larutan 7,5, presipitasi mulai terjadi sejak menit ke-180 sedangkan untuk larutan pH 8,5, presipitasi sudah teramati sejak menit ke-30.

Tabel 4.19. Harga supersaturasi (δ_s) larutan CaCO_3 pada berbagai pH

pH larutan CaCO_3	Konsentrasi (CO_3^{2-}) (M)	Konsentrasi (Ca^{2+}) (M)	$\delta_s = (\text{CO}_3^{2-})(\text{Ca}^{2+}) / K_{sp}$
6,4	$4,48 \times 10^{-6,8}$	0,004	0,51
7,5	$4,48 \times 10^{-5,3}$	0,004	10,02
8	$4,48 \times 10^{-4,8}$	0,004	32,64
8,5	$4,48 \times 10^{-4,3}$	0,004	130



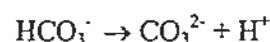
Gambar 4.27. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 di bawah pengaruh medan magnet dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gambar 4.27 dan tabel 4.20 menunjukkan efek magnetisasi dalam mendorong presipitasi CaCO_3 meningkat dengan meningkatnya pH larutan. Terjadi peningkatan persen kenaikan absolut dan relatif dari masing-masing 1,9 % dan 59,4 % pada pH 7,5 menjadi 26,9 % dan 76,4 % pada pH 8,5. Supersaturasi yang tinggi akan menyebabkan peningkatan interaksi ion oleh medan magnet menjadi efektif untuk terjadinya presipitasi.

Tabel 4.20. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 pada 1440 menit magnetisasi dan presipitasi. $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 1440 menit magnetisasi & presipitasi (%)		
	pH 7,5	pH 8,0	pH 8,5
Sampel magnetisasi (M)	5,1	20,9	62,1
Sampel non-magnetisasi (NM)	3,2	12,4	35,2
Persen kenaikan presipitasi absolut : M - NM	1,9	8,5	26,9
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM)/NM$	59,4	68,5	76,4

Menurut Lundager Madsen (2004), medan magnet menyebabkan terjadinya transfer proton dari HCO_3^- ke air sebagai akibat adanya inversi dari spin proton dengan reaksi sebagai berikut:



Hal ini dapat menjadi penjelasan mengapa pada sampel termagnetisasi lebih mudah membentuk CaCO_3 dibanding sampel non-magnetisasi saat presipitasi.

Rendahnya kenaikan presipitasi larutan pH 7,5 pada 1440 menit presipitasi selain karena rendahnya supersaturasi juga dapat disebabkan adanya efek penguatan hidrat ion pada 180 menit pertama magnetisasi, dimana pada saat itu belum ada presipitasi yang terjadi sehingga yang terjadi adalah magnetisasi akan memperkuat hidrat ion.

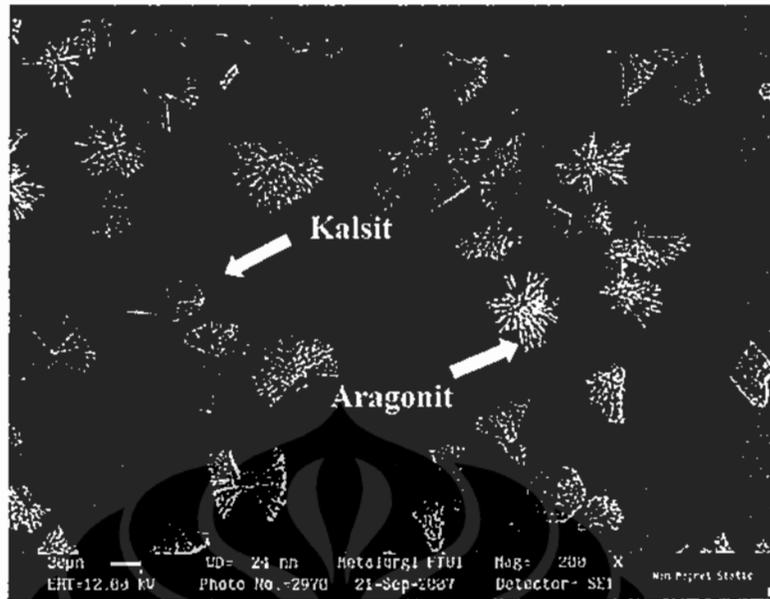
4.3.2 Morfologi dan sifat deposit larutan CaCO_3

Tabel 4.21 menunjukkan bahwa pada waktu presipitasi 1440 menit dan pH 7,5, presipitasi didominasi oleh pembentukan deposit. Hal ini disebabkan pada supersaturasi rendah (pH 7,5 dan $\delta_s = 10,02$), presipitasi akan didominasi pada permukaan dinding (deposit). Sedangkan untuk supersaturasi tinggi (pH 8,5 dan $\delta_s = 130$) maka kontribusi presipitasi di larutan menjadi lebih signifikan (Ben Amor *et al*, 2004). Tabel 4.21 menunjukkan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 terjadi baik di deposit maupun di fasa larutan. Persentase deposit menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan pada persen deposit sampel termagnetisasi dibanding sampel non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan sifat deposit CaCO_3 yang terbentuk pada sampel termagnetisasi relatif tidak berbeda dengan sampel non-magnetisasi dalam hal kemampuannya menempel di dinding.

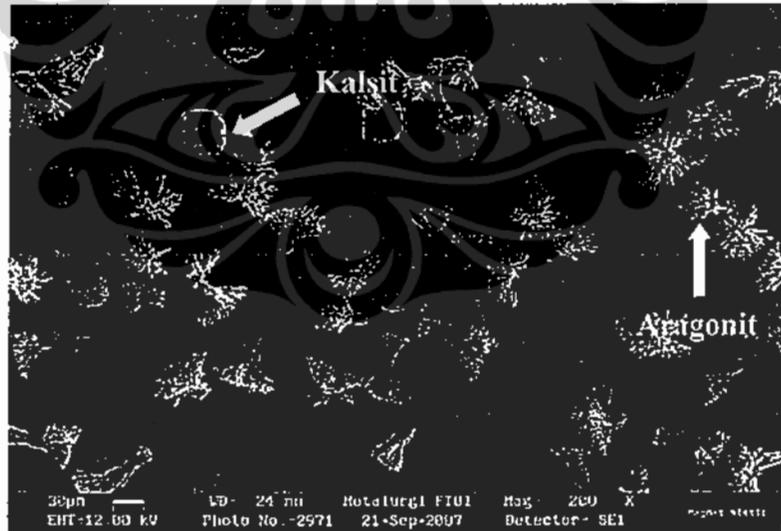
Tabel 4.21. Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 1440 menit magnetisasi dan presipitasi. B : 5,2 kG dan T : 28 °C.

Presipitasi CaCO_3	Presipitasi CaCO_3 pada 1440 menit magnetisasi & presipitasi (%)					
	pH 7,5		pH 8		pH 8,5	
	Non-magnet	Magnet	Non-magnet	Magnet	Non-magnet	Magnet
Di deposit [D]	3,0	4,5	10,4	16,7	28,4	50,2
Di larutan [L]	0,2	0,2	2,0	3,4	6,8	11,9
Total [T]	3,2	4,7	12,4	20,1	35,2	62,1
Persentase deposit: 100 x (D / T)	93,8	95,0	83,9	83,1	80,6	80,9

Gambar 4.28 dan 4.29 menunjukkan terbentuknya kristal Kalsit yang bersifat *hard scale* dan Aragonit yang bersifat *soft scale* dengan populasi yang hampir berimbang pada larutan dengan magnetisasi maupun tanpa magnetisasi. Hasil foto SEM ini mendukung hasil uji presipitasi CaCO_3 (tabel 4.21) yang menyimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan dalam hal kemampuan deposit menempel pada dinding tabung antara sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi.



Gambar 4.28. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 selama 24 jam presipitasi tanpa magnetisasi pada pH awal larutan CaCO_3 sebesar 8,5 dan $T : 28^\circ\text{C}$ dengan pembesaran 200X.

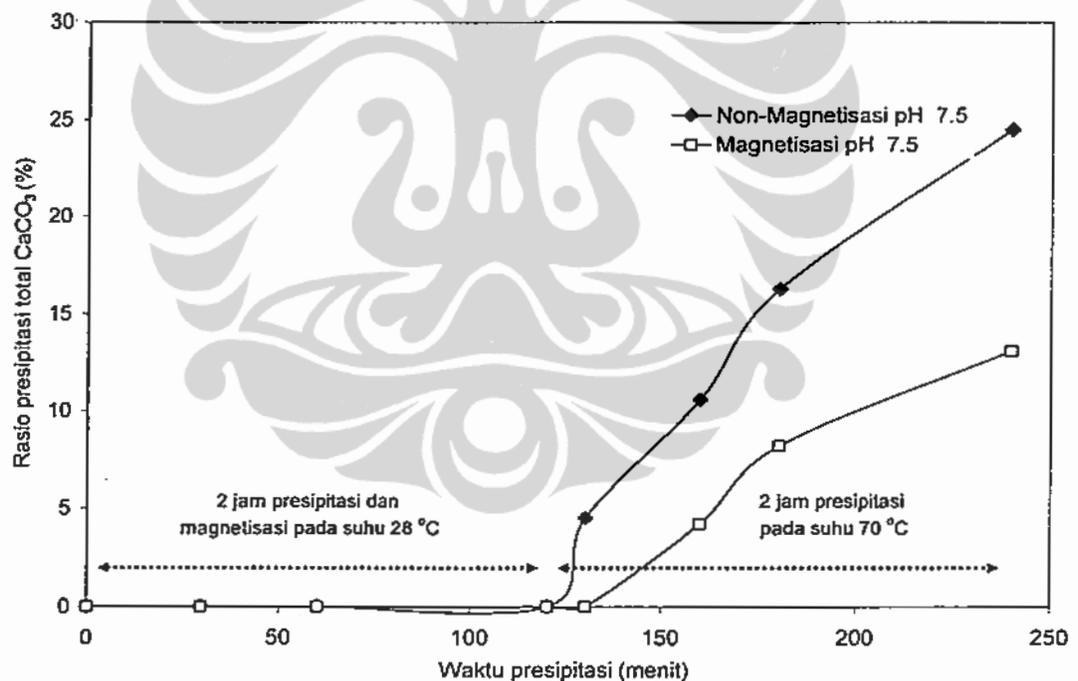


Gambar 4.29. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 selama 24 jam presipitasi dengan magnetisasi pada pH awal larutan CaCO_3 sebesar 8,5 dan $T : 28^\circ\text{C}$ dengan pembesaran 200X.

4.3.3 Pengaruh medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.

Bagian ini akan membahas pengaruh medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 setelah proses magnetisasi. Larutan CaCO_3 dengan konsentrasi 0,004 M dan pH 7,5 dimagnetisasi selama 2 jam kemudian dilihat presipitasinya selama dua jam lagi tanpa medan magnet. Presipitasi tanpa medan magnet dilakukan dengan menaikkan suhu larutan hingga 70°C guna mempercepat proses presipitasi.

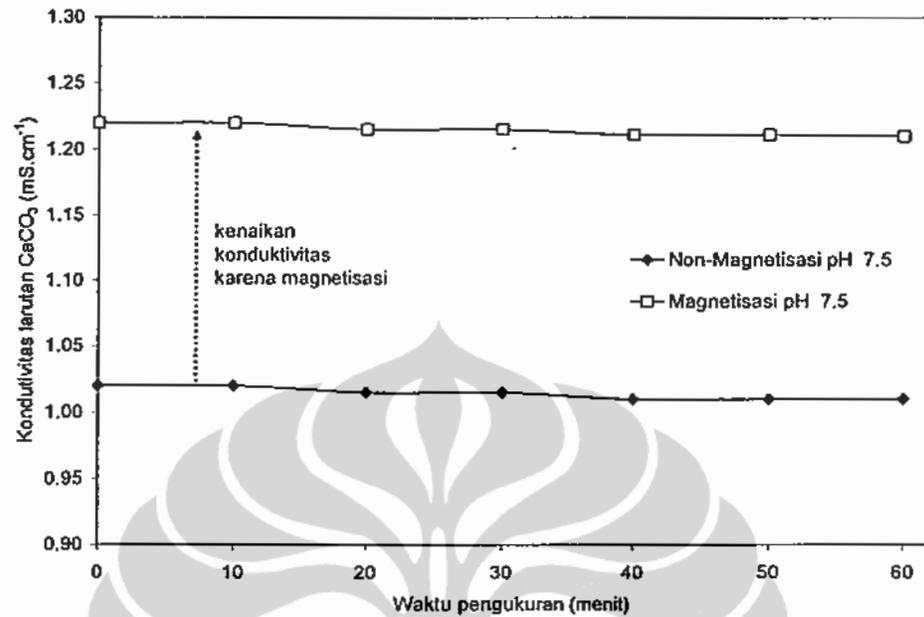
Gambar 4.30 menunjukkan tidak terjadi presipitasi selama 2 jam magnetisasi. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran pada gambar 4.27 dimana tidak terjadi presipitasi hingga 3 jam presipitasi untuk pH 7,5. Setelah magnetisasi 2 jam mulai terjadi presipitasi CaCO_3 akibat dinaikannya suhu larutan. Gambar 4.30 menunjukkan terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 pada sampel termagnetisasi setelah proses magnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi penguatan efek interaksi hidrat ion selama proses magnetisasi statik yang telah dilakukan sebelumnya. Saksono (2007) mendapatkan terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 setelah proses magnetisasi untuk pH larutan CaCO_3 6,4 – 8.



Gambar 4.30. Pengaruh medan magnet pada presipitasi total CaCO_3 selama 2 jam magnetisasi dan dilanjutkan 2 jam presipitasi pada pH larutan CaCO_3 7,5 dan $B : 5,2$ kG dan $T : 28^\circ\text{C}$.

Larutan CaCO_3 pada pH 7,5 memiliki harga supersaturasi sebesar 10,02 (tabel 4.19) dimana pada harga tersebut belum terjadi presipitasi CaCO_3 . Oleh sebab itu spesies yang ada dalam larutan CaCO_3 masih berupa ion-ion Ca^{2+} , HCO_3^- dan CO_3^{2-} dan jika diberi medan magnet maka yang terjadi adalah efek penguatan hidrat ion. Hal ini terbukti dengan pengamatan presipitasi

sesudah magnetisasi yang menunjukkan larutan termagnetisasi memiliki presipitasi yang lebih rendah dibanding larutan tanpa magnetisasi (gambar 4.30).



Gambar 4.31. Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan CaCO_3 setelah 2 jam dimagnetisasi untuk pH larutan CaCO_3 sebesar 7,5 dan B : 5,2 kG dan T : 28 °C

Kesimpulan bahwa telah terjadi efek penguatan hidrat ion pada magnetisasi larutan CaCO_3 ini diperkuat dengan pengukuran konduktivitas larutan CaCO_3 setelah 2 jam dimagnetisasi yang menunjukkan kenaikan harga konduktivitas dibanding larutan tanpa magnetisasi (gambar 4.31). Hasil ini menjadi pembuktian hipotesis ketiga laporan ini yang menyatakan bahwa magnetisasi larutan CaCO_3 dengan sistem fluida statik sebelum terjadi presipitasi akan menaikkan interaksi hidrat ion dan menyebabkan penurunan presipitasi CaCO_3 .

4.4 Pengaruh medan magnet pada interaksi ion dan presipitasi CaCO_3 dalam larutan CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik.

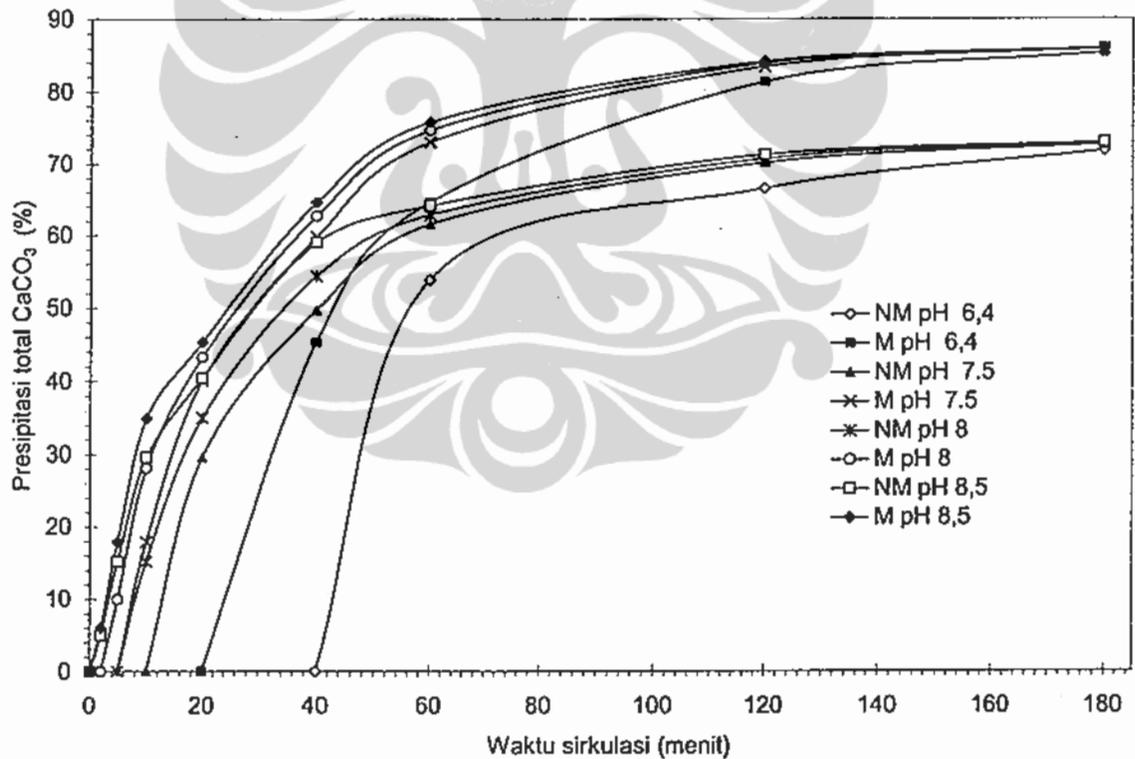
Pada tahap ini magnetisasi dilakukan saat presipitasi CaCO_3 berlangsung menggunakan sistem fluida dinamik dan sebagai model air sadah adalah larutan CaCO_3 . Efek interaksi ion dan partikel yang muncul saat magnetisasi akan diamati melalui presipitasi CaCO_3 -nya. Pengamatan presipitasi dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi yang meliputi jumlah presipitasi, sifat deposit, dan morfologi deposit.

4.4.1 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi.

Sub-bab ini akan membahas berbagai pengaruh variabel proses yang meliputi pH awal larutan, konsentrasi larutan, kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, waktu sirkulasi, waktu magnetisasi dan volume sampel.

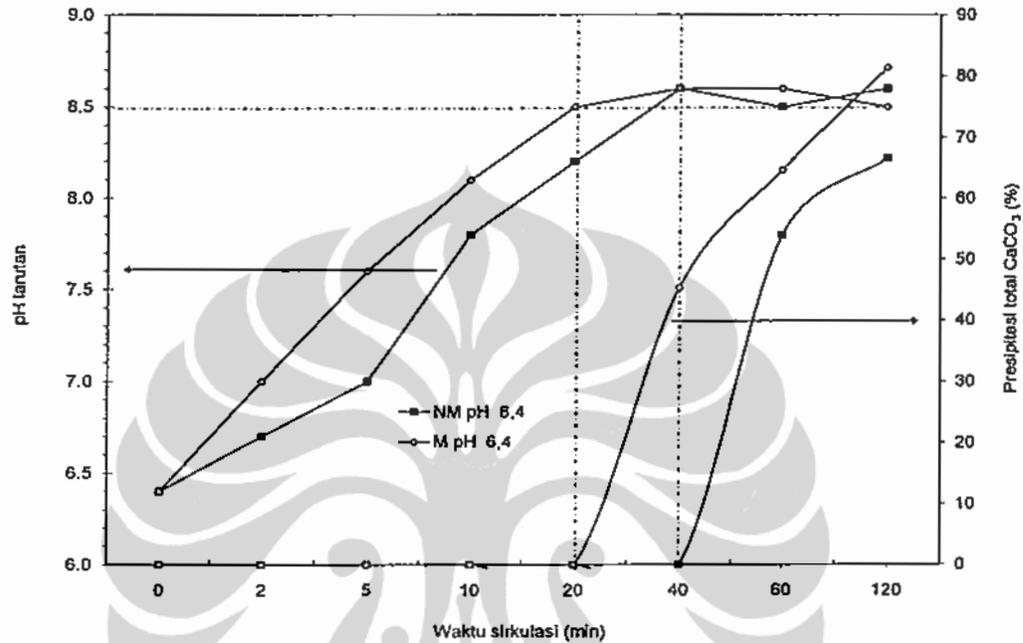
4.4.1.1 Pengaruh pH larutan

Pada bagian ini larutan CaCO_3 dengan konsentrasi 0,004 M divariasikan pH larutannya di awal magnetisasi pada harga 6,4; 7,5; 8 dan 8,5. Magnetisasi dilakukan bersamaan dengan proses sirkulasi selama 120 menit. Gambar 4.32 menunjukkan tidak terjadi presipitasi selama 40 menit pertama sirkulasi untuk larutan non-magnetisasi dengan pH 6,4 (NM pH 6,4) sedangkan untuk larutan termagnetisasi presipitasi baru teramati setelah 20 menit presipitasi (M pH 6,4). Hal ini disebabkan harga supersaturasi yang rendah pada pH 6,4 yaitu 0,51 (tabel 4.19). Untuk pH larutan 7,5, presipitasi mulai terjadi setelah menit ke-10 untuk sampel non-magnetisasi (NM pH 7,5) dan setelah menit ke-5 untuk sampel termagnetisasi (N pH 7,5), sedangkan untuk larutan pH 8,5 presipitasi sudah teramati sejak awal sirkulasi (gambar 4.32).



Gambar 4.32. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 pada sampel non-magnetisasi (NM) dan sampel termagnetisasi (M) (B : 5,2 kG, panjang magnet (L_m) 0,35 m, Kecepatan alir (v) : 0,554 m/s, konsentrasi awal CaCO_3 (Ca_i) 0,004 M, volume sampel (V) 240 mL dan T : 28 °C).

Waktu yang dibutuhkan untuk mulai berpresipitasi disebut waktu nukleasi (T_n). Magnetisasi mempercepat waktu nukleasi (T_n) dan pada 180 menit sirkulasi terlihat bahwa jumlah presipitasi CaCO_3 pada sampel termagnetisasi untuk semua pH larutan berkisar pada 85 % – 86 %, sedangkan untuk sampel non-magnetisasi berkisar pada 72 % - 73 %.



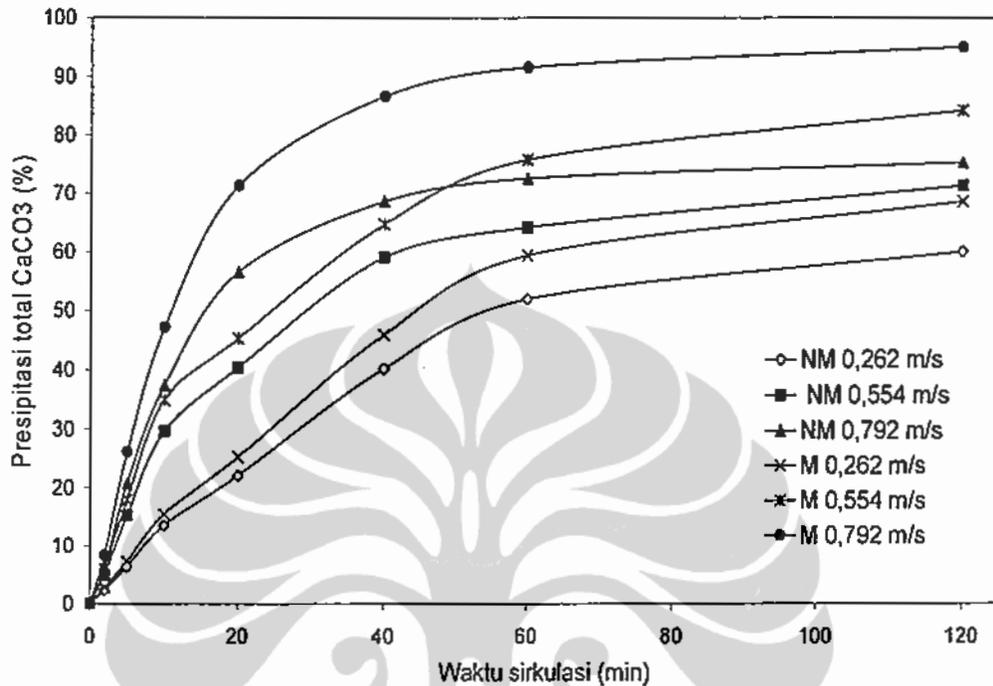
Gambar 4.33. Presipitasi total CaCO_3 dan pH larutan (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Proses sirkulasi pada larutan CaCO_3 mempercepat lepasnya CO_2 terlarut ke fasa gas sehingga pH larutan akan meningkat. Naiknya pH akan menyebabkan terkonversinya ion HCO_3^- menjadi ion CO_3^{2-} dan dengan cepat membentuk CaCO_3 (persamaan 2.1). Sebagai perbandingan, proses sirkulasi larutan non-magnetisasi pada pH 7,5 membutuhkan waktu 10 menit untuk mulai terjadi presipitasi, sedangkan pada proses statik membutuhkan waktu hingga 200 menit (gambar 4.32). Hal ini menunjukkan proses sirkulasi mempercepat perpindahan CO_2 dari air sadah ke udara. Gambar 4.33 menunjukkan presipitasi CaCO_3 untuk konsentrasi 0,004 M CaCO_3 dalam penelitian ini baru terjadi pada pH 8,5 – 8,6. Fathi (2006) dengan menggunakan larutan yang sama mendapatkan presipitasi CaCO_3 mulai terjadi pada pH 8,5.

4.4.1.2 Pengaruh Kecepatan alir larutan.

Kecepatan alir tidak mempengaruhi waktu sirkulasi maupun waktu magnetisasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.1. Gambar 4.40 menunjukkan Kenaikan kecepatan alir larutan akan meningkatkan persen presipitasi total CaCO_3 . Naiknya kecepatan aliran sirkulasi menyebabkan meningkatnya agitasi mekanik sehingga laju transfer massa CO_2 dari fasa cair ke

fasa gas akan meningkat yang disertai naiknya pH larutan. Naiknya pH larutan akan menaikkan supersaturasi larutan (δ_s) yang mengakibatkan meningkatnya jumlah ion CO_3^{2-} sehingga presipitasi CaCO_3 yang terjadi juga meningkat.



Gambar 4.34. Pengaruh kecepatan alir terhadap presipitasi total CaCO_3 (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Tabel 4.22. Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 terhadap kenaikan kecepatan alir pada 120 menit sirkulasi. (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

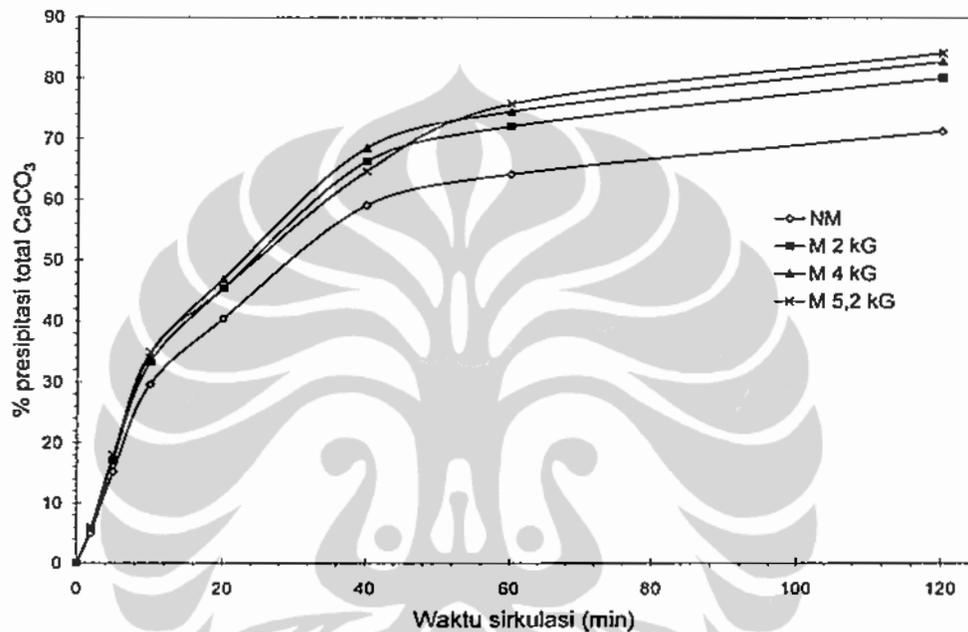
Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 120 menit sirkulasi (%)		
	Kecepatan alir 0,262 m/s	Kecepatan alir 0,554 m/s	Kecepatan alir 0,792 m/s
Sampel termagnetisasi (M)	68,6	84,2	95,0
Sampel non-magnetisasi (NM)	60	71,3	75,3
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM)/NM$	14,3	18,1	26,2

Gambar 4.34 dan tabel 4.22 menunjukkan presipitasi total CaCO_3 sampel termagnetisasi lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi. Semakin tinggi kecepatan alir, maka akan semakin tinggi persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.22. Gaya Lorentz menyebabkan efek pergeseran ion (ion shift) yang dapat meningkatkan interaksi antar ion seperti yang diusulkan oleh Kozic (2003). Besarnya gaya Lorentz (F) yang dialami oleh suatu partikel bermuatan q yang bergerak tegak lurus melintasi medan magnet dengan kuat medan B dan kecepatan v dirumuskan sebagai $F = q \cdot v \cdot B$.

Kenaikan kecepatan alir v akan meningkatkan efek gaya Lorentz yang ditunjukkan dengan meningkatnya presipitasi CaCO_3 .

4.4.1.3 Pengaruh kuat medan, waktu magnetisasi, dan panjang magnet.

Efek gaya Lorentz terhadap peningkatan presipitasi CaCO_3 merupakan fungsi langsung dari kuat medan B yang diberikan. Gambar 4.35 menunjukkan terjadi peningkatan persen presipitasi total CaCO_3 dengan meningkatnya kuat medan.



Gambar 4.35. Pengaruh kuat medan terhadap presipitasi total CaCO_3 (L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Tabel 4.23. Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 terhadap kenaikan kuat medan pada 120 menit sirkulasi. (L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 120 menit sirkulasi (%)		
	2 kG	4 kG	5,2 kG
Sampel termagnetisasi (M)	80,1	82,8	84,2
Sampel non-magnetisasi (NM)	71,3	71,3	71,3
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - \text{NM})/\text{NM}$	12,3	16,1	18,1

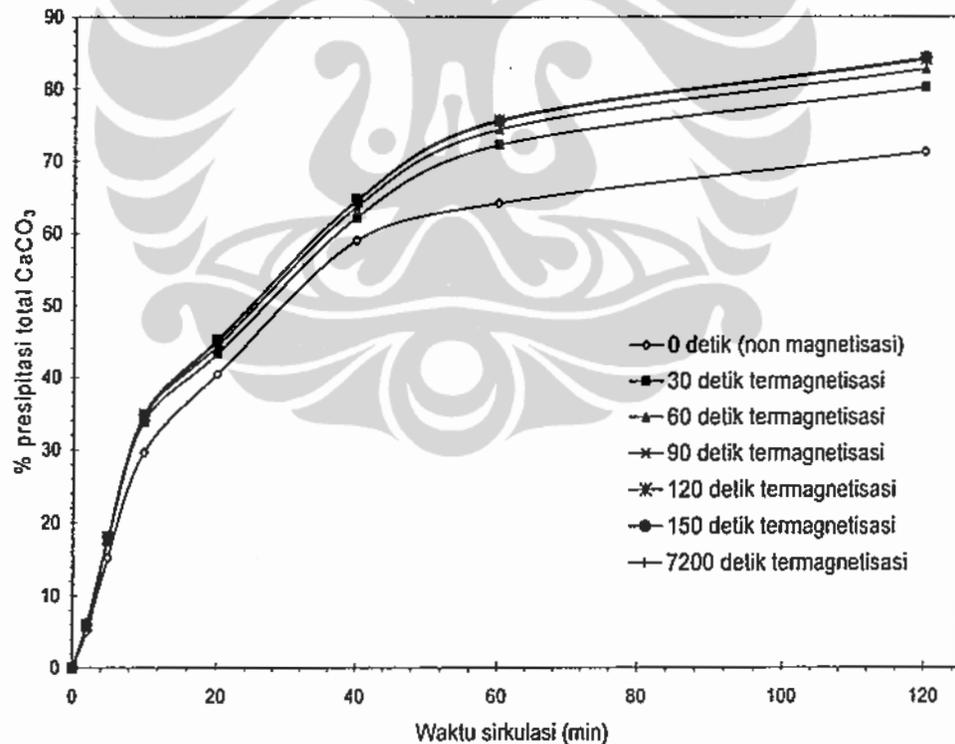
Tabel 4.23 menunjukkan terjadi peningkatan persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi (M) dengan sampel non-magnetisasi (NM) dengan meningkatnya kuat medan. Tabel 4.22 dan tabel 4.23 membuktikan bahwa kenaikan kecepatan v dan kuat medan B berdampak pada kenaikan presipitasi CaCO_3 , dan hal ini memperkuat Hipotesis Kozic (2003),

bahwa gaya Lorentz yang bertanggung jawab terhadap peningkatan presipitasi CaCO_3 dalam larutan CaCO_3 termagnetisasi pada fluida dinamik.

Waktu magnetisasi berhubungan langsung dengan waktu sirkulasi. Waktu magnetisasi (t_m) adalah lamanya sampel terpapar medan magnet dan merupakan fungsi dari waktu sirkulasi (t_s), luas penampang dalam pipa (A), volume sampel (V), dan panjang magnet (L_m), yang dirumuskan sebagai berikut :

$$t_m = \frac{A L_m t_s}{V}$$

Meningkatnya waktu sirkulasi akan meningkatkan waktu magnetisasi secara proposional. Dalam percobaan ini proses magnetisasi dilakukan pada awal sirkulasi dengan variasi waktu 30, 60, 90, 120, 150 dan 7200 detik. Sirkulasinya sendiri tetap dilakukan selama 120 menit pada setiap variasi waktu magnetisasi. Hal ini bertujuan mengamati waktu efektif magnetisasi.



Gambar 4.36. Pengaruh waktu magnetisasi terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan 6,4, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabel 4.24. Pengaruh waktu magnetisasi terhadap presipitasi total CaCO₃ (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

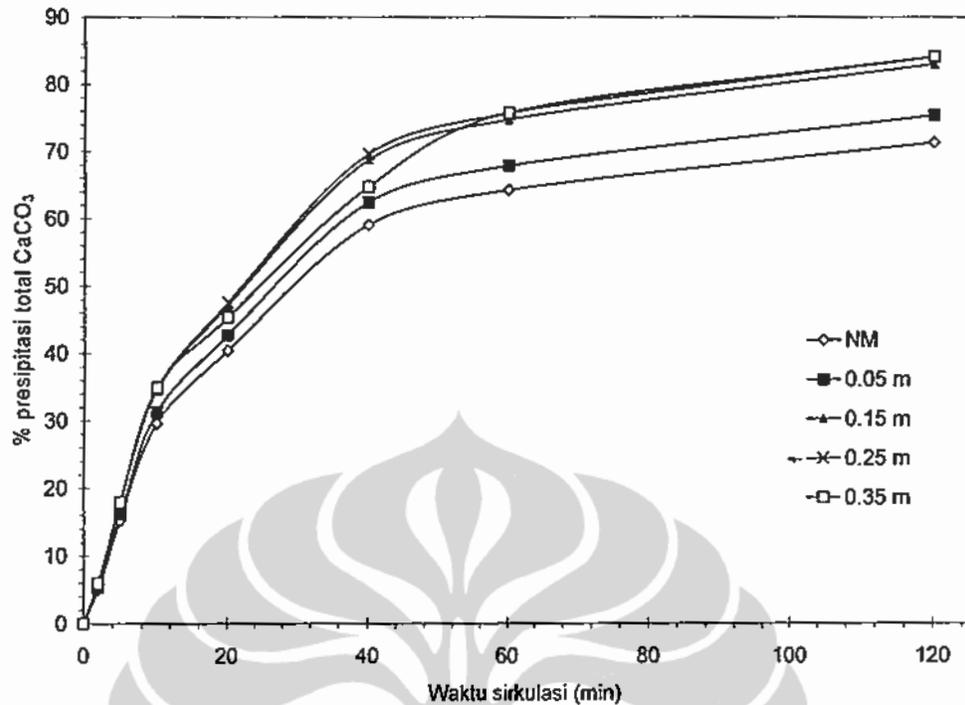
Waktu Sirkulasi	Persen presipitasi total CaCO ₃ (%)						
	Waktu sirkulasi dengan medan magnet						
	NM	30 detik M	60 detik M	90 detik M	120 detik M	150 detik M	7200 detik M
0	0	0	0	0	0	0	0
2 menit	5,0	5,6	5,8	5,9	6,0	6,1	6,0
5 menit	15,2	17,4	17,6	17,8	17,9	18,0	17,9
10 menit	29,6	33,8	34,4	34,7	34,8	34,8	34,9
20 menit	40,4	43,2	44,4	45,0	45,1	45,2	45,3
40 menit	59,1	62,2	63,7	64,5	64,6	64,7	64,7
60 menit	64,2	72,3	74,4	75,5	75,6	75,6	75,8
120 menit	71,3	80,2	82,7	84,0	84,2	84,3	84,2

Gambar 4.36 dan tabel 4.24 menunjukkan waktu sirkulasi dengan magnetisasi mencapai harga optimum pada 1,5 menit (90 detik). Dengan menggunakan persamaan (4.7) maka waktu sampel terpapar medan magnet (t_m) untuk 90 detik waktu sirkulasi (t_s), 0,35 m panjang magnet (L_m), 240 mL volume sampel (V), dan 0,000113 m² luas penampang dalam pipa (A), adalah sebagai berikut:

$$t_m = \frac{A L_m t_s}{V} = \frac{1,13 \cdot 10^{-4} \times 0,35 \times 90}{2,4 \cdot 10^{-4}} = 14,83 \text{ detik}$$

Tabel 4.24 menunjukkan waktu sirkulasi dengan magnetisasi di atas 90 detik tidak berpengaruh lagi terhadap presipitasi CaCO₃. Hal ini menunjukkan bahwa proses magnetisasi efektif dilakukan hanya 1,5 menit pertama sirkulasi.

Gambar 4.37 menunjukkan efek panjang magnet terhadap presipitasi CaCO₃ tidak signifikan pada 120 menit sirkulasi kecuali untuk panjang magnet 0,005 M. Panjang magnet berhubungan dengan waktu magnetisasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4.7). Berdasarkan gambar 4.36 dan tabel 4.24 menunjukkan waktu efektif magnetisasi hanya selama 1,5 menit pertama sirkulasi atau 14,83 detik magnetisasi untuk panjang magnet 0,35 m dan kuat medan 5,2 kG. Oleh sebab itu, sirkulasi selama 120 menit akan menyebabkan efek magnet menjadi tidak signifikan terhadap presipitasi CaCO₃ karena waktu magnetisasi efektifnya sudah terlampaui untuk semua panjang magnet.

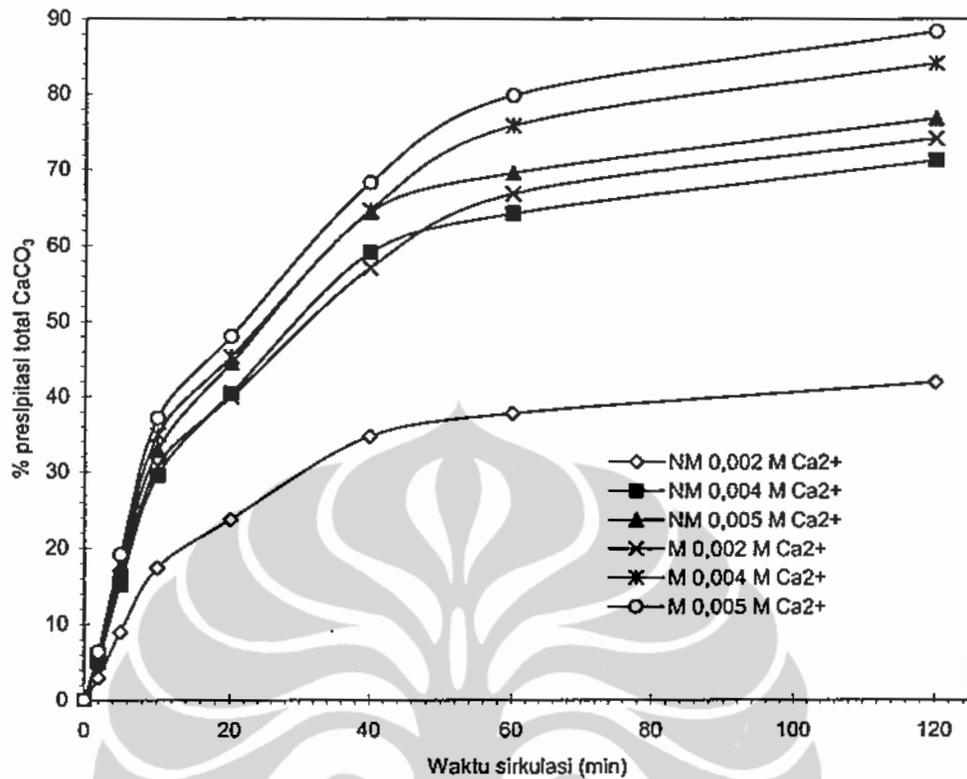


Gambar 4.37. Pengaruh panjang magnet terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi ($B : 5,2 \text{ kG}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $\text{Ca}_i : 0,004 \text{ M}$, pH awal larutan $6,4$, $V : 240 \text{ mL}$ dan $T : 28 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.4.1.4 Pengaruh konsentrasi sampel.

Gambar 4.38 menunjukkan terjadi kenaikan presipitasi CaCO_3 dengan naiknya konsentrasi sampel. Naiknya konsentrasi sampel CaCO_3 akan menaikkan harga supersaturasi larutan (δ_s) sehingga presipitasi CaCO_3 lebih mudah terjadi.

Gambar 4.38 dan tabel 4.25 menunjukkan presipitasi total CaCO_3 sampel termagnetisasi lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi. Semakin rendah konsentrasi sampel maka akan semakin tinggi persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi. Terjadinya interaksi ion dan partikel akan semakin meningkat dengan meningkatnya konsentrasi sampel. Kontribusi medan magnet dalam mendorong terjadinya interaksi ion dan partikel semakin berkurang pada konsentrasi tinggi. Hal ini menyebabkan menurunnya efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 dengan meningkatnya konsentrasi sampel.



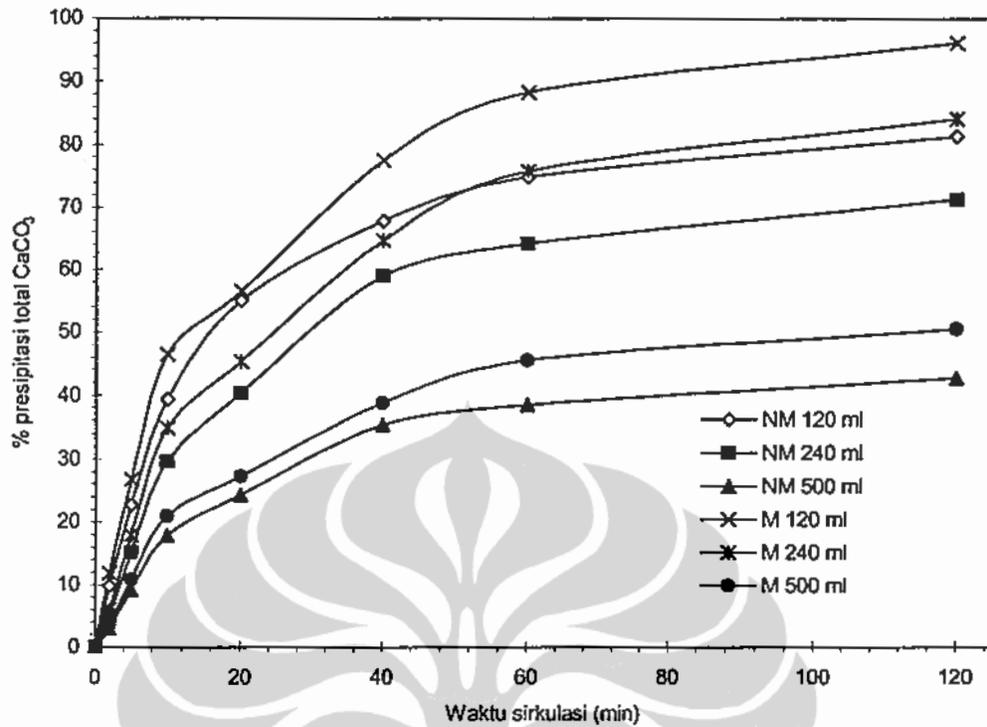
Gambar 4.38. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap presipitasi total CaCO₃ (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/ s, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Tabel 4.25 Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO₃ pada berbagai konsentrasi sampel CaCO₃. (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/ s, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Sampel larutan	Presipitasi total CaCO ₃ pada 120 menit sirkulasi (%)		
	0,002 M CaCO ₃	0,004 M CaCO ₃	0,005 M CaCO ₃
Sampel magnetisasi (M)	74,2	84,2	88,4
Sampel non-magnetisasi (NM)	41,9	71,3	76,8
Persen kenaikan presipitasi relatif : 100 x (M- NM)/NM	79,7	18,1	15,1

4.4.1.5 Pengaruh volume sampel.

Naiknya volume sampel akan menurunkan jumlah presipitasi CaCO₃ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.39. Meningkatnya volume sampel mengakibatkan waktu yang dibutuhkan sampel larutan untuk satu kali bersirkulasi meningkat.



Gambar 4.39. Pengaruh volume sampel terhadap presipitasi total CaCO_3 selama 120 menit sirkulasi (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, dan T : 28 °C).

Tabel 4.26 menunjukkan jumlah sirkulasi yang terjadi akan bertambah dengan berkurangnya volume sampel. Jumlah sirkulasi yang tinggi akan mempercepat lepasnya gas CO_2 di larutan dan menyebabkan peningkatan presipitasi CaCO_3 .

Tabel 4.26. Jumlah sirkulasi yang dialami sampel selama 120 menit sirkulasi.

Sampel larutan	Kecepatan alir volumetrik : 930 mL/menit	
	Waktu 1 kali Sirkulasi (menit)	Jumlah sirkulasi selama 120 menit
Vol : 120 mL	0,13	647
Vol : 240 mL	0,26	461
Vol : 500 mL	0,54	222

Makin tinggi volume sampel maka jumlah sirkulasi yang dialami sampel selama 120 menit menurun sehingga presipitasi CaCO_3 yang terjadi juga akan berkurang. Volume sampel juga berhubungan dengan waktu magnetisasi (t_m). Makin besar volume sampel, maka akan semakin rendah t_m untuk waktu sirkulasi yang sama.

Tabel 4.27 menunjukkan jumlah presipitasi CaCO_3 pada sampel termagnetisasi lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi, namun perbedaan volume sampel tidak signifikan mempengaruhi persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi dengan sampel non-magnetisasi. Hal ini disebabkan waktu efektif magnetisasi sudah terlampaui pada 120 menit sirkulasi untuk semua volume sampel.

Hasil pengamatan dan pembahasan pengaruh variabel proses terhadap presipitasi CaCO_3 menunjukkan ada dua faktor penting yang mempengaruhi presipitasi CaCO_3 , yaitu efek sirkulasi dan efek magnetisasi. Variabel proses yang mempengaruhi efek sirkulasi adalah kecepatan alir, volume dan konsentrasi sampel serta waktu sirkulasi, sedangkan efek magnetisasi dipengaruhi oleh kuat medan, kecepatan alir, konsentrasi sampel, dan waktu magnetisasi.

Tabel 4.27. Persen kenaikan presipitasi relatif CaCO_3 pada berbagai volume sampel (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, dan T : 28 °C).

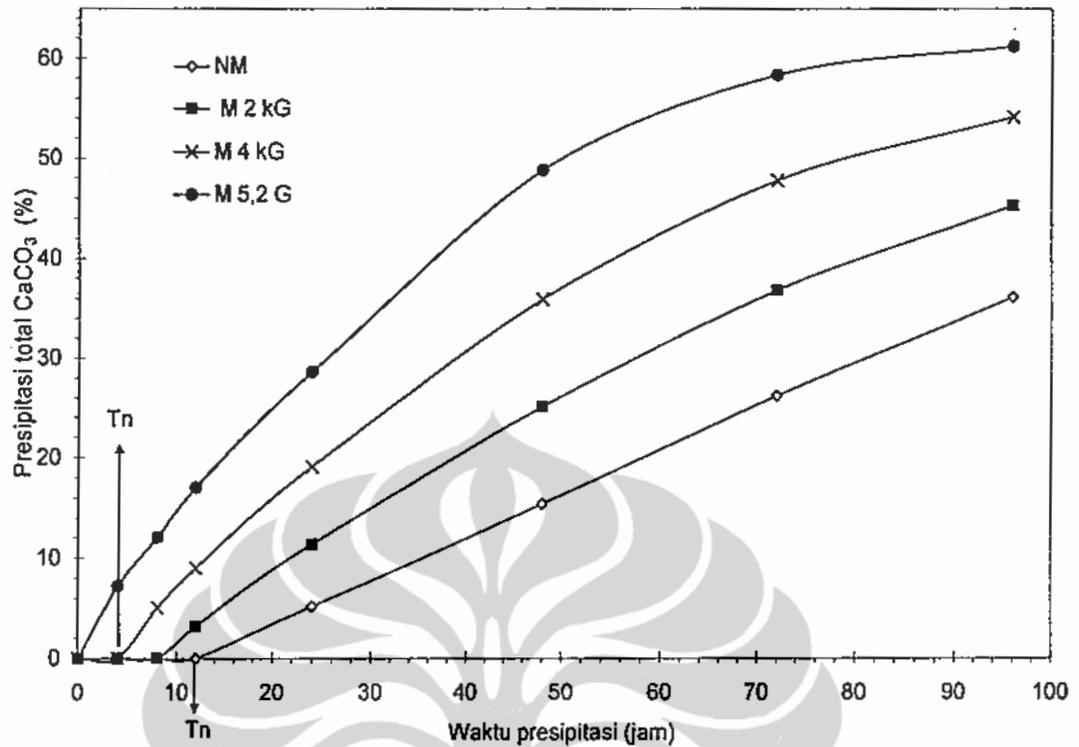
Sampel larutan	Presipitasi total CaCO_3 pada 120 menit sirkulasi (%)		
	Volume sampel 120 mL	Volume sampel 240 mL	Volume sampel 500 mL
Sampel termagnetisasi (M)	96,1	84,2	50,6
Sampel non-magnetisasi (NM)	81,4	71,3	42,8
Persen kenaikan presipitasi relatif : $100 \times (M - NM)/NM$	18,0	18,1	18,2

4.4.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.

Sub-bab ini akan membahas pengaruh kuat medan dan kecepatan alir terhadap presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi. Pengamatan presipitasi CaCO_3 dilakukan di dalam tabung presipitasi (presipitasi statik) setelah sebelumnya dilakukan magnetisasi dan sirkulasi. Waktu 10 menit sirkulasi magnetisasi diambil berdasarkan efek maksimum penurunan interaksi hidrat ion oleh medan magnet sistem fluida dinamik (tabel 4.9). Pengamatan juga akan dilakukan terhadap sampel non-magnetisasi baik yang disirkulasi maupun yang tidak disirkulasi untuk membandingkan pengaruh magnetisasi dan sirkulasi terhadap presipitasi CaCO_3 . Pengamatan morfologi dan sifat deposit juga akan dilakukan pada bagian ini.

4.4.2.1 Pengaruh kuat medan magnet

Gambar 4.40 menunjukkan terjadi kenaikan jumlah presipitasi CaCO_3 pada 96 jam presipitasi dengan meningkatnya kuat medan. Magnetisasi menekan terbentuknya inti yang terlihat dari waktu mulai terjadinya presipitasi yang semakin panjang.

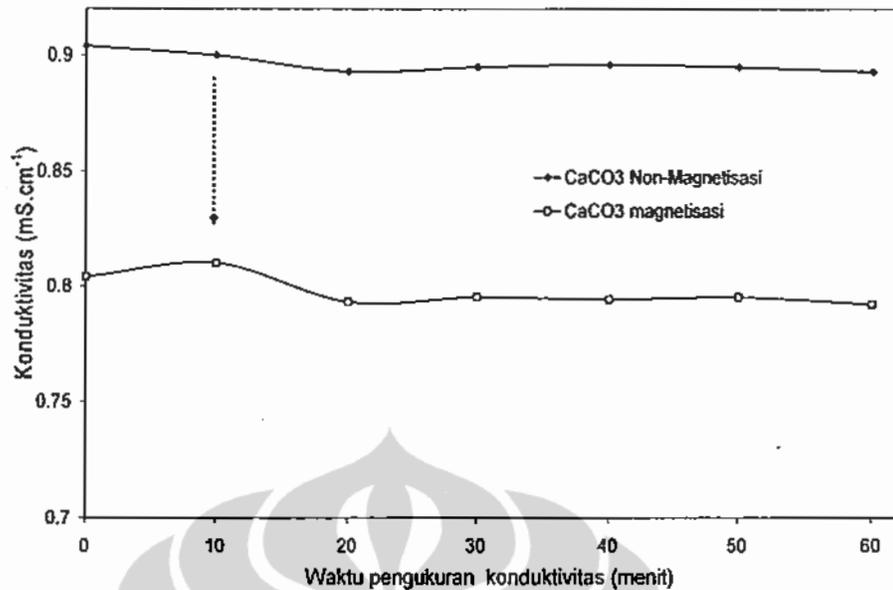


Gambar 4.40. Pengaruh kuat medan magnet terhadap presipitasi total CaCO_3 (t_s : 10 menit, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Waktu dimana presipitasi mulai terjadi disebut waktu nukleasi (T_n). Sampel non-magnetisasi memiliki T_n yang lebih lama yaitu di atas 12 jam, sedangkan untuk sampel termagnetisasi dengan kuat medan 2 kG, 4 kG, dan 5,2 kG masing-masing memiliki T_n sebesar 12 jam, 8 jam, dan 4 jam seperti yang ditunjukkan gambar 4.45. Hasil ini menunjukkan sampel larutan yang telah termagnetisasi memiliki sifat ion yang lebih mudah membentuk inti (nukleat) CaCO_3 .

Efek magnetisasi terhadap presipitasi CaCO_3 dari sampel larutan pada pH 6,4 (gambar 4.40) baru teramati sesudah proses magnetisasi selesai. Efek medan magnet yang muncul sesudah proses magnetisasi dikenal dengan efek memori magnetik. Fathi (2006) menduga medan magnet menyebabkan terjadinya proses pendekatan ion-ion membentuk cluster (tahap pra-nukleasi) sebagai akibat adanya gaya elektrostatis ion-ion yang terkena medan magnet. Seiring dengan lepasnya CO_2 terlarut dan naiknya pH larutan maka supesaturasi larutan juga meningkat maka cluster-cluster yang sudah terbentuk akan mendapatkan energi yang cukup untuk berpresipitasi.

Gambar 4.41 menunjukkan terjadi penurunan harga konduktivitas antara sampel termagnetisasi terhadap sampel non-magnetisasi. Hal ini menunjukkan magnetisasi larutan CaCO_3 sebelum terjadi presipitasi menyebabkan terjadinya penurunan interaksi hidrat ion dan hal ini sekaligus membuktikan hipotesis ke empat dari laporan disertasi ini.



Gambar 4.41. Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan CaCO₃ setelah 10 menit sirkulasi (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

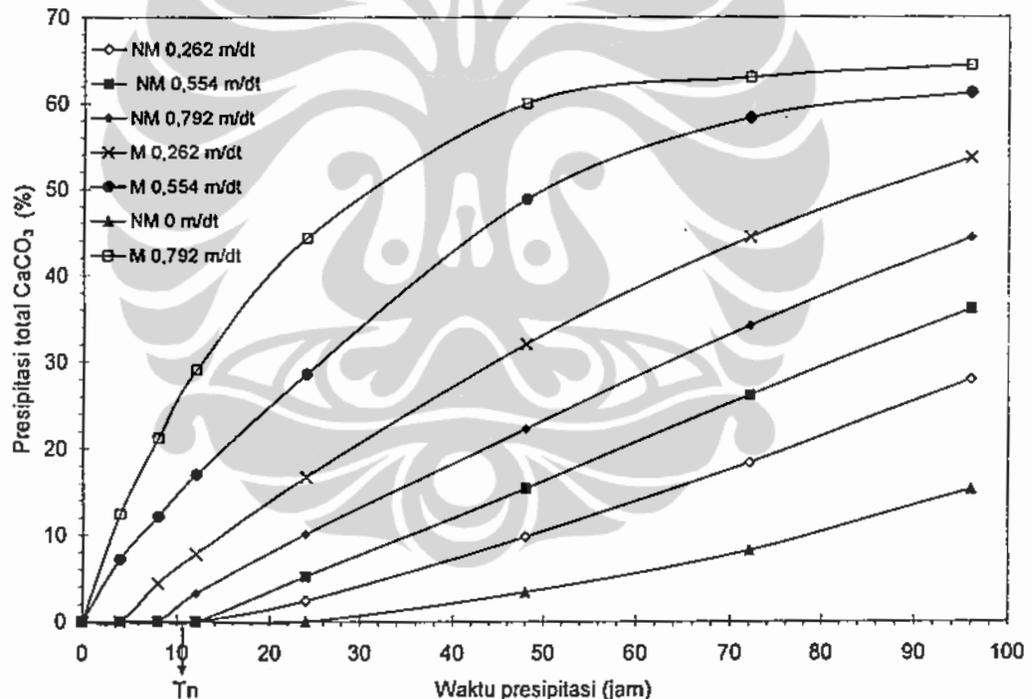
Efek gaya Lorentz diduga berperan dalam menurunkan interaksi hidrat ion saat magnetisasi. Gambar 4.40 dan 4.42 menunjukkan kuat medan B dan kecepatan alir v yang merupakan parameter gaya Lorentz, adalah variabel yang mempengaruhi penurunan konduktivitas dan peningkatan presipitasi larutan. Gaya Lorentz dapat menimbulkan agitasi sesaat pada ion akibat adanya pergeseran lokal ion dimana hal ini dapat berpengaruh terhadap kekuatan interaksi molekul hidratnya. Efek memori magnetik pada ion-ion termagnetisasi dengan sistem fluida dinamik ini dapat bertahan hingga 72 - 96 jam (gambar 4.20).

Ditinjau dari teori pembentukan kristal, proses pembentukan inti merupakan tahap awal presipitasi. Waktu nukleasi yang cepat menunjukkan jumlah inti yang terbentuk lebih banyak. Hal ini ditunjukkan dengan kelandaian (slope) kurva presipitasi CaCO₃ yang tinggi pada 12 jam pertama presipitasi untuk sampel termagnetisasi dengan kuat medan 5,2 kG (gambar 4.40). Namun ini menyebabkan proses pertumbuhan kristal menjadi singkat akibat banyaknya inti yang terbentuk. Hal ini terlihat pada kelandaian kurva 5,2 kG yang menurun tajam setelah 72 jam presipitasi.

Waktu nukleasi yang lambat menunjukkan jumlah inti yang terbentuk lebih sedikit. Hal ini ditunjukkan dengan slope kurva presipitasi CaCO₃ yang rendah pada 24 jam pertama presipitasi untuk sampel non-magnetisasi (NM). Namun ini menyebabkan proses pertumbuhan kristal menjadi panjang akibat sedikitnya inti yang terbentuk. Hal ini terlihat pada kelandaian kurva NM yang relatif konstan hingga 96 jam presipitasi (gambar 4.40).

4.4.2.2 Pengaruh kecepatan alir

Gambar 4.42 menunjukkan makin tinggi kecepatan alir sampel maka semakin banyak CaCO_3 yang terbentuk selama 96 jam presipitasi. Sampel termagnetisasi (M) memiliki presipitasi CaCO_3 yang lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi (NM). Gambar 4.42 menunjukkan kecepatan alir sirkulasi dan proses magnetisasi mempercepat tercapainya harga kesetimbangan CaCO_3 yang terbentuk pada larutan. Hal ini terlihat dari slope kurva sampel larutan termagnetisasi dengan kecepatan alir 0,792 m/s (M 0,792 m/s) yang cukup tinggi pada 12 jam pertama presipitasi, dan kemudian kelandaian menurun menuju suatu harga kesetimbangan. Untuk sampel larutan tanpa sirkulasi dan magnetisasi (kurva NM 0 m/s) menunjukkan hanya 15,3 persen CaCO_3 yang terpresipitasi selama 96 jam presipitasi sedangkan untuk sampel termagnetisasi dengan kecepatan alir 0,554 m/s (kurva M 0,554 m/s) mencapai 61,2 % (gambar 4.42). Proses magnetisasi dan sirkulasi juga mempercepat waktu nukleasi larutan (T_n).

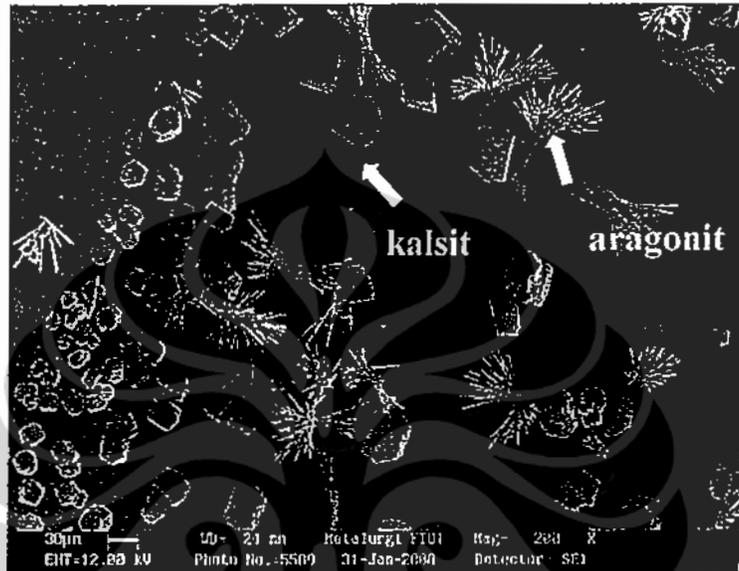


Gambar 4.42. Pengaruh kecepatan alir larutan terhadap presipitasi total (t_s : 10 menit; B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

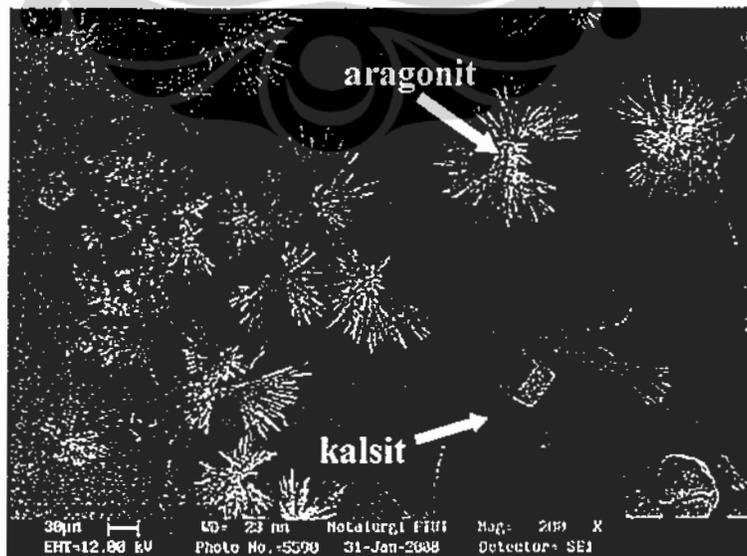
4.4.2.3 Morfologi dan sifat deposit

Gambar 4.43 menunjukkan partikel CaCO_3 yang terbentuk dari sampel non-magnetisasi memiliki ukuran yang relatif lebih besar dibanding sampel termagnetisasi. Hal ini memperkuat analisis data presipitasi CaCO_3 pada Gambar 4.40 yang menyatakan bahwa magnetisasi akan

mendorong terjadinya nuklasi (waktu nukleasi lebih cepat) yang ditunjukkan dengan lebih banyaknya inti yang terbentuk dengan ukuran kristal yang lebih kecil dibanding sampel tanpa magnetisasi. Ukuran kristal deposit yang lebih kecil dapat berpengaruh terhadap kekuatan/stabilitas deposit menempel di dinding. Hasil foto SEM pada gambar 4.43 juga menunjukkan Jenis kristal yang terbentuk umumnya berupa Kalsit dan Aragonit.



Gambar 4.43.a. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 termagnetisasi selama 24 jam presipitasi (t_s : 10 menit. v : 0,554 m/s, pH awal larutan CaCO_3 sebesar 6,4, Ca_i : 0,004 M, dan T : 28 °C, B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m).



Gambar 4.43.b. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 non-magnetisasi selama 24 jam presipitasi dengan t_s : 10 menit. (v : 0,554 m/s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Tabel 4.28. Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 96 jam presipitasi dari larutan CaCO_3 tersirkulasi pada berbagai kuat medan (t_s : 10 menit, (L_m 0,35 m. v : 0,554 m/ s, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Presipitasi CaCO_3	Presipitasi CaCO_3 pada 96 jam presipitasi (%)			
	Non-magnetisasi	2 kG	4 kG	5,2 kG
Di deposit [D]	5,1	9,0	13,5	18,3
Di larutan [L]	31,0	36,3	40,6	42,9
Total [T]	36,1	45,3	54,1	61,2
Persentase deposit: $100 \times (D / T)$	85,9	80,2	75,0	70,1
Persentase Penurunan deposit		6,6	12,7	18,4

Tabel 4.28 menunjukkan efek medan magnet dalam mendorong presipitasi CaCO_3 terjadi baik di deposit maupun di fasa larutan. Persentase deposit menggambarkan kemampuan deposit CaCO_3 menempel di dinding tabung. Tabel 4.28 menunjukkan terjadi penurunan persentase deposit antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi. Persentase penurunan deposit meningkat dengan bertambahnya kuat medan magnet. Hal ini menunjukkan sifat deposit pada sampel termagnetisasi tidak stabil dan mudah lepas. Struktur dan ukuran kristal dapat berpengaruh terhadap stabilitas deposit.

Knez (2005) menggunakan larutan CaCO_3 dan sistem sirkulasi dinamik mendapatkan peningkatan fraksi Aragonit hingga 72 % pada kristal CaCO_3 yang terbentuk di fasa larutan dengan kuat medan 1,12 T, waktu magnetisasi 8,4 menit dan konsentrasi sampel CaCO_3 sebesar 1200 ppm. Aragonit bersifat kerak lunak yang mudah lepas oleh aliran air dalam pipa.

Penjelasan bagaimana medan magnet dapat mempengaruhi pembentukan kristal dapat dijelaskan sebagai berikut : adanya aliran elektrolit seperti larutan CaCO_3 melewati medan magnet akan menimbulkan gaya Lorentz pada ion-ion di larutan maupun pada daerah electric double layer (EDL). Gaya lorentz diduga dapat mempengaruhi pembentukan kristal dengan mempengaruhi ion-ion yang berada di sekitar permukaan inti (daerah EDL). Faktor lain yang dapat mempengaruhi pembentukan kristal CaCO_3 adalah adanya efek hidrat ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} oleh medan magnet seperti yang telah dibuktikan pada bagian awal bab ini. Penurunan interaksi hidrat ion ini akan dapat mempengaruhi pembentukan kristal CaCO_3 .

Tabel 4.29 menunjukkan efek medan magnet dan kecepatan alir sampel mendorong terjadinya presipitasi CaCO_3 baik di deposit maupun di fasa larutan. Tidak terjadi perbedaan signifikan terhadap persentase penurunan deposit antara sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi dengan kenaikan kecepatan aliran. Knez (2005) mendapatkan faktor utama yang dapat mempengaruhi pembentukan fraksi Aragonit adalah kuat medan dan waktu magnetisasi, sedangkan kecepatan aliran tidak mempengaruhi waktu magnetisasi.

Tabel 4.29 Pembentukan CaCO_3 di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO_3 untuk 96 jam presipitasi dari larutan CaCO_3 tersirkulasi pada berbagai kecepatan alir (t_s : 10 menit, B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, Ca_i : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).

Presipitasi CaCO_3	Presipitasi CaCO_3 pada 96 jam presipitasi (%)					
	$v = 0,262$ m/s		$v = 0,554$ m/s		$v = 0,792$ m/s	
	Non-magnet	Magnet	Non-magnet	Magnet	Non-magnet	Magnet
Di deposit [D]	22,0	34,5	31,0	42,9	39,9	47,3
Di larutan [L]	6,0	19,1	5,1	18,3	4,4	17,1
Total [T]	28	53,6	36,1	61,2	44,3	64,4
Persentase deposit: $100 \times (D/T)$	78,6	64,3	85,9	70,1	90	73,5
Persentase Penurunan deposit	18,2		18,4		18,3	

4.4.3 Model laju presipitasi CaCO_3 .

Bagian ini akan menjelaskan bagaimana suatu model persamaan laju presipitasi CaCO_3 dikembangkan dari suatu reaksi total presipitasi CaCO_3 dan dihubungkan dengan variabel proses yang meliputi kuat medan, panjang magnet, kecepatan aliran, waktu magnetisasi, dan sirkulasi serta konsentrasi dan volume sampel dengan melakukan pendekatan regresi (curve fitting) sehingga didapatkan suatu model persamaan sebagai fungsi variabel-variabel proses tersebut. Selanjutnya dilakukan uji korelasi sampel menggunakan koefisien korelasi untuk melihat seberapa jauh suatu data saling berhubungan.

4.4.3.1 Persamaan laju presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida sirkulasi.

Presipitasi CaCO_3 dari larutan CaCO_3 dilakukan pada tabung reaksi yang dilengkapi sistem sirkulasi tertutup seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7. Larutan CaCO_3 merupakan larutan ion Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , dan gas CO_2 terlarut yang bercampur sempurna (perfect mixing). Untuk itu digunakan model reaktor batch berpengaduk untuk disain persamaan presipitasinya. Persamaan laju pembentukan CaCO_3 pada reaktor batch berpengaduk dapat dirumuskan pada persamaan 4.10 berikut:

$$\frac{dN_{\text{CaCO}_3}}{dt} = - \frac{d[\text{Ca}^{2+}]}{dt} = r V \quad (4.10)$$

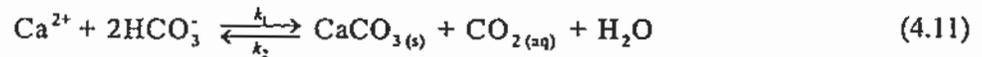
Untuk kondisi volume sampel tetap ($V = V_0$) maka dapat dirumuskan:

$$\frac{1}{V_0} \frac{dN_{\text{CaCO}_3}}{dt} = \frac{d\left(\frac{N_{\text{CaCO}_3}}{V_0}\right)}{dt} = \frac{d[\text{CaCO}_3]}{dt} = - \frac{d[\text{Ca}^{2+}]}{dt} = r_{\text{CaCO}_3}$$

Dengan N_{CaCO_3} : jumlah $CaCO_3$ (mol)

r_{CaCO_3} : Laju presipitasi $CaCO_3$ (mol/min)

Reaksi kesetimbangan presipitasi partikel $CaCO_3$ dari larutan $CaCO_3$ ditinjau dari sudut pandang makroskopik dapat ditulis mengikuti suatu reaksi global sebagai berikut:



Selanjutnya laju presipitasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\left[\frac{d[CaCO_3]}{dt} \right] = r_{CaCO_3} = k_1[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2 - k_2[CaCO_3][CO_2] \quad (4.12)$$

Dengan k_1 merupakan tetapan laju presipitasi $CaCO_3$ dan k_2 adalah laju pelarutan $CaCO_3$ seperti yang ditunjukkan persamaan 4.12. Total Ca dalam larutan dapat berupa ion Ca^{2+} dan sebagai partikel $CaCO_3$ yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$[Ca^{2+}]_i = [Ca^{2+}] + [CaCO_3] \quad (4.13)$$

Dengan $[Ca^{2+}]_i$ adalah konsentrasi ion Ca^{2+} mula-mula dan $[Ca^{2+}]$ adalah konsentrasi ion Ca^{2+} pada saat tertentu. Dengan demikian persamaan 4.13 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\left[\frac{d[Ca^{2+}]}{dt} \right] = - \left[\frac{d[CaCO_3]}{dt} \right] = -k_1[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2 + k_2[CO_2]([Ca^{2+}] - [Ca^{2+}]_i) \quad (4.14)$$

Jika $K_1 = k_1[HCO_3^-]^2$ dan $K_2 = k_2[CO_2]$ maka persamaan 4.15 dapat ditulis:

$$\left[\frac{d[Ca^{2+}]}{dt} \right] = - (K_1 + K_2)[Ca^{2+}] + K_2[Ca^{2+}]_i \quad (4.15)$$

Persamaan diferensial 4.17 dapat diintegrasikan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$[Ca^{2+}] = \frac{K_1}{K_1 + K_2} [Ca^{2+}]_i + \frac{K_2}{(K_1 + K_2)} \exp(-(K_1 + K_2)t)$$

Jika $t = t_m$ = waktu sampel terpapar medan magnet (detik) maka fraksi ion Ca^{2+} yang tidak terpresipitasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{[Ca^{2+}]}{[Ca^{2+}]_i} = \frac{K_1}{K_1 + K_2} + \frac{K_2}{(K_1 + K_2)[Ca^{2+}]_i} \exp(-(K_1 + K_2)t_m) \quad (4.16)$$

Waktu magnetisasi (t_m) adalah lamanya sampel terpapar medan magnet dan merupakan fungsi dari waktu sirkulasi (t_s), luas penampang dalam pipa (A), volume sampel (V), dan panjang magnet (L_m), yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$t_m = \frac{A L_m t_s}{V}$$

Satuan yang digunakan adalah t_m dan t_s (detik), A (m^2), L_m (m), V (m^3), dan $[Ca^{2+}]_i$ (mol/m^3). Jika dianggap K_1 merupakan fungsi dari gaya Lorentz yang dialami partikel yang bergerak dengan kecepatan v melintasi medan magnet dengan kuat medan B maka K_1 dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K_1 = (k_0 B^m \cdot v^p) \quad (4.17)$$

Gabrielli (2001) mendapatkan harga p adalah 0,2 pada magnetisasi sistem fluida dinamik sirkulasi dan harga $k_0 B^m$ berkisar antara 0.01 hingga 0.03. Harga $k_0 B^m$ dapat dituliskan merupakan fungsi kuat medan seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.20 berikut:

$$k_0 B^m = y = 0.0083 B^2 + 0.0026B + 0.0166 \quad (4.18)$$

dengan B : kuat medan dalam satuan Tesla (T)

untuk $B = 0$ ditetapkan $k_0 B^m = 0.0225$

Nilai K_2 merupakan fungsi konsentrasi CO_2 terlarut. Kelarutan CO_2 dalam alir sangat rendah (1.2×10^{-5} M pada tekanan atmosferik) sehingga proses sirkulasi pada larutan akan menyebabkan lepasnya CO_2 ke fasa gas disertai naiknya pH larutan (persamaan 4.19):



Hal ini menyebabkan reaksi pembentukan $CaCO_3$ semakin besar dan jumlah ion Ca^{2+} di larutan semakin berkurang sehingga fraksi ion Ca^{2+} dalam larutan ($[Ca^{2+}]/[Ca^{2+}]_i$) akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu sirkulasi (t_s). Bertambahnya kecepatan aliran juga akan mempercepat lepasnya CO_2 terlarut ke fasa gas. Untuk itu harga K_2 dimodelkan sebagai fungsi dari waktu sirkulasi (t_s), kecepatan alir (v), Konsentrasi awal Ca^{2+} (Ca_i), kuat medan (B), panjang magnet (L_m), dan Volume sampel (V) dengan model persamaan sebagai berikut :

$$\ln K_2 f(t_s, v, Ca_i, B, L_m, V) = a \ln t_s + b \quad (4.20)$$

Dengan harga a dan b merupakan fungsi dari v (m/s), Ca_i (mol/m^3), B (T), L_m (m) dan V (m^3). Dalam pembuatan model persamaan presipitasi $CaCO_3$ ini, hanya difokuskan pada presipitasi saat magnetisasi dan sirkulasi dengan menggunakan data gambar 4.34 untuk fungsi kecepatan alir, gambar 4.35 untuk fungsi kuat medan, gambar 4.37 untuk fungsi panjang magnet, gambar 4.38 untuk fungsi konsentrasi larutan, dan gambar 4.39 untuk fungsi volume larutan sampel sebagai data

yang akan digunakan untuk mendapatkan harga koefisien a dan b pada persamaan 4.20 dengan metode regresi logaritmik.

4.4.3.2 Regresi data variabel proses sebagai fungsi $\ln(K_2)$ untuk mendapatkan nilai a dan b

Kurva regresi $\ln(K_2)$ terhadap waktu sirkulasi (t_s) sebagai fungsi variabel kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi dan volume sampel beserta nilai koefisien korelasinya (R^2) diberikan pada lampiran D.

Hasil regresi menunjukkan nilai rata-rata koefisien korelasi (R^2) berkisar antar 0,98 hingga 0,99 dan harga R^2 terendah sebesar 0,96. Hasil ini menunjukkan adanya korelasi yang cukup kuat dari data-data presipitasi CaCO_3 sehingga persamaan hasil regresi dapat digunakan untuk memodelkan persamaan laju presipitasi CaCO_3 pada kondisi yang berbeda dari penelitian yang telah dilakukan, namun masih dalam rentang daerah operasi percobaan.

Tabel 4.30. Nilai a dan b hasil regresi data presipitasi CaCO_3 pada berbagai variabel proses.

Variabel proses	Sampel termagnetisasi		Sampel non-magnetisasi	
	a	b	a	b
Kecepatan alir (v)				
0,262 m/s	-1,0868	4,5264	-1,1987	5,1306
0,544 m/s	-1,0682	3,6652	-1,404	5,1393
0,793 m/s	-1,2443	4,298	-1,8299	7,6555
Kuat medan (B)				
2 kG	-1,0302	3,3319		
4 kG	-1,0629	3,5736		
5,2 kG	-1,0682	3,6652		
Panjang magnet (L_m)				
0,05 m	-1,026	3,4222		
0,15 m	-1,0682	3,6652		
0,25 m	-1,0682	3,6652		
0,35 m				
Konsentrasi sampel (Ca_i)				
0,002 M	-0,9554	3,1731	-1,0828	
0,004 M	-1,0682	3,6652	-1,404	3,8439
0,005 M	-1,1302	3,9389	-1,3615	5,1393
0,005 M				5,2275
Volume sampel (V)				
120 mL	-1,2246	4,0082	-1,5595	
240 mL	-1,0682	3,6652	-1,404	5,7909
500 mL	-0,806	2,8044	-0,8499	5,1393
500 mL	-1,0868	4,5264	-1,1987	3,0119

Nilai a dan b hasil regresi pada berbagai variabel proses seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.30 selanjutnya diregresi kembali untuk setiap variabel proses yang akan membentuk persamaan a dan b sebagai fungsi variabel proses. Kurva regresi koefisien a dan b dapat dilihat

pada lampiran E. Hasil regresi polinomial untuk nilai a dan b mendapatkan persamaan seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.31.

Tabel 4.31.a. Nilai a dan b sebagai fungsi persamaan berbagai variabel proses untuk sampel termagnetisasi

Variabel proses dan rentang data	Sampel termagnetisasi	
	a =	b =
Kecepatan alir (v) (0,262 - 0,793 m/s)	$-1,4561v^2 + 1,2396v - 1,3116$	$10,537v^2 - 11,547v + 6,8284$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 5,2 kG; $L_m = 0,35$ m; $Ca_i = 0,004$ M; V= 240 mL	
Kuat medan (B) (2 - 5,2 kG)	$0,3729B^2 - 0,3872B - 0,9677$	$-1,3911B^2 + 2,0432B + 2,9789$
Kondisi acuan proses	Untuk : v = 0,554 m/s; $L_m = 0,35$ m; $Ca_i = 0,004$ M; V= 240 mL	
Panjang magnet (L_m) (0,05 - 0,35 m)	$1,755L_m^2 - 1,0814L_m - 0,9054$	$-9,735L_m^2 + 6,0342L_m + 2,7506$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 5,2 kG; v = 0,554 m/s ; $Ca_i = 0,004$ M; V= 240 mL	
Konsentrasi (Ca_i) (0,002 - 0,005 M)	$-0,0019Ca_i^2 - 0,0452Ca_i - 0,8575$	$0,0092Ca_i^2 + 0,1907Ca_i + 2,7547$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 5,2 kG; v = 0,554 m/s; $L_m = 0,35$ m; V= 240 mL	
Volume sampel (V) (120 mL - 500 mL)	$-775978V^2 + 1582,7V - 1,4033$	$-10^6V^2 - 2429,7V + 4,3169$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 5,2 kG; v = 0,554 m/s $L_m = 0,35$ m; $Ca_i = 0,004$ M	

Tabel 4.31.b. Nilai a dan b sebagai fungsi persamaan berbagai variabel proses untuk sampel non-magnetisasi

Variabel proses dan rentang data	Sampel non-magnetisasi	
	a =	b =
Kecepatan alir (v) (0,262 - 0,793 m/s)	$-2,8513v^2 + 1,8194v - 1,4797$	$19,051v^2 - 15,344v + 7,8429$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 0; $Ca_i = 0,004$ M; V= 240 mL	
Konsentrasi (Ca_i) (0,002 - 0,005 M)	$0,0329Ca_i^2 - 0,3232xCa_i - 0,568$	$-0,1865Ca_i^2 + 1,7667Ca_i + 1,0565$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 0; v = 0,554 m/s; V= 240 mL	
Volume sampel (V) (120 - 500 mL)	$-32557V^2 + 1887,6V - 1,7855$	$-7,10^6V^2 - 2822,6V + 6,2339$
Kondisi acuan proses	Untuk : B = 0 ; v = 0,554 m/s ; $Ca_i = 0,004$ M	

Untuk mendapatkan nilai a dan b di luar persamaan yang tersedia pada tabel 4.31 maka dapat dilakukan dengan membuat persamaan a dan b yang baru, hasil dilatasi dari persamaan a dan b pada tabel 4.31 dengan mengacu pada kondisi acuan proses yaitu : kuat medan B : 5,2 kG. v :

0,554 m/s, panjang magnet L_m : 0,35 m, konsentrasi sampel Ca_i : 0,004 M, dan volume sampel V : 240 mL.

4.4.3.3 Kurva hasil simulasi menggunakan model persamaan laju presipitasi $CaCO_3$.

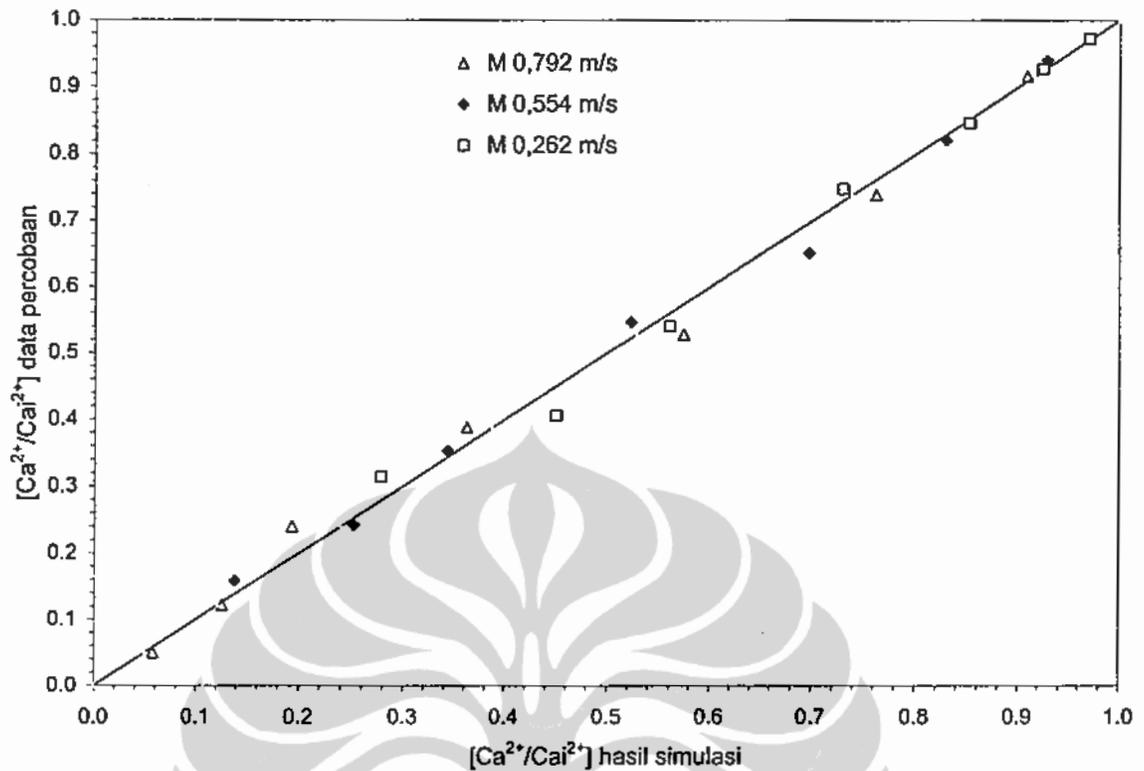
Ada 2 jenis pengujian yang akan dilakukan pada model persamaan laju presipitasi $CaCO_3$ yang telah dibuat pada tahap sebelumnya. Pertama akan dilakukan perhitungan presipitasi $CaCO_3$ menggunakan persamaan a dan b yang tersedia pada tabel 4.31 dan hasilnya akan dibandingkan dengan data percobaan. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan presipitasi $CaCO_3$ menggunakan persamaan a dan b hasil dilatasi.

a. Perhitungan presipitasi $CaCO_3$ menggunakan persamaan a dan b dari tabel 4.31

Tabel 4.32 menunjukkan hasil simulasi kurva presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{a_i} pada kondisi sampel termagnetisasi. Gambar 4.44 menunjukkan $[Ca^{2+}/Ca^{2+}]_i$ hasil simulasi dan $[Ca^{2+}/Ca^{2+}]_i$ data percobaan mendekati garis $[Ca^{2+}/Ca^{2+}]_i \text{ data} = [Ca^{2+}/Ca^{2+}]_i \text{ simulasi}$. Hal ini menunjukkan hasil simulasi model persamaan laju presipitasi yang digunakan cukup baik dalam memprediksi presipitasi $CaCO_3$. Hasil ini didukung oleh hasil analisis harga koefisien korelasi (R^2) yang didapat dari regresi data kurva $\ln(K_2)$ fungsi kecepatan alir untuk sampel termagnetisasi yang bernilai 0,99 (lampiran E, gambar E1).

Tabel 4.32. hasil simulasi presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{a_i} untuk kondisi B: 5,2 kG, L_m : 0,35 m, v : 0,262 m/s, Ca_i : 0,004 M, dan V : 240 mL.

Ca^{2+}/Ca_i^{2+}		K_1	K_2	a	b	t_m (detik)	t_s (detik)
Data	simulasi						
0,972	0,971	0,015376	0,5084	-1,08678	4,526388	19,8	120
0,927	0,924	0,015376	0,1878	-1,08678	4,526388	49,4	300
0,846	0,852	0,015376	0,0884	-1,08678	4,526388	98,9	600
0,747	0,730	0,015376	0,0416	-1,08678	4,526388	197,8	1200
0,541	0,560	0,015376	0,0196	-1,08678	4,526388	395,5	2400
0,406	0,451	0,015376	0,0126	-1,08678	4,526388	593,3	3600
0,314	0,279	0,015376	0,0059	-1,08678	4,526388	1186,5	7200



Gambar 4.44. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ hasil simulasi dan data percobaan pada berbagai kecepatan alir larutan untuk kondisi B: 5,2 kG, L_m 0,35 m, Ca_i : 0,004 M. dan V : 240 mL.

b. Perhitungan presipitasi $CaCO_3$ menggunakan persamaan a dan b hasil dilatasi.

Perhitungan presipitasi $CaCO_3$ menggunakan persamaan a dan b hasil dilatasi dilakukan apabila kondisi proses di luar dari persamaan a dan b yang ada pada tabel 4.31 (di luar kondisi proses acuan). Sebagai contoh, perhitungan presipitasi $CaCO_3$ pada kondisi kecepatan alir 0,792 m/s, konsentrasi awal larutan (Ca_i) 0,002 M, kuat medan B : 5,2 kG, panjang magnet L_m : 0,35 m, dan volume sampel V : 240 mL, adalah sebagai berikut:

Pertama mendapatkan harga a dan b pada 0,792 m/s dan 0,554 m/s dari persamaan a(v) dan b(v) pada tabel 4.31.a dengan persamaan sebagai berikut:

$$a(v) = -1,4561v^2 + 1,2396v - 1,3116; a(v = 0,792 \text{ m/s}) = -1,2443; a(v = 0,554 \text{ m/s}) = -1,0682$$

$$b(v) = 10,537v^2 - 11,547v + 6,8284; b(B = 0,792 \text{ m/s}) = 4,2983; b(v = 0,554 \text{ m/s}) = 3,6652$$

Persamaan a(Ca_i) dan b(Ca_i) pada Tabel 4.31.a diberikan sebagai berikut :

$$a(Ca_i) = -0,0019 Ca_i^2 - 0,0452 Ca_i - 0,8575$$

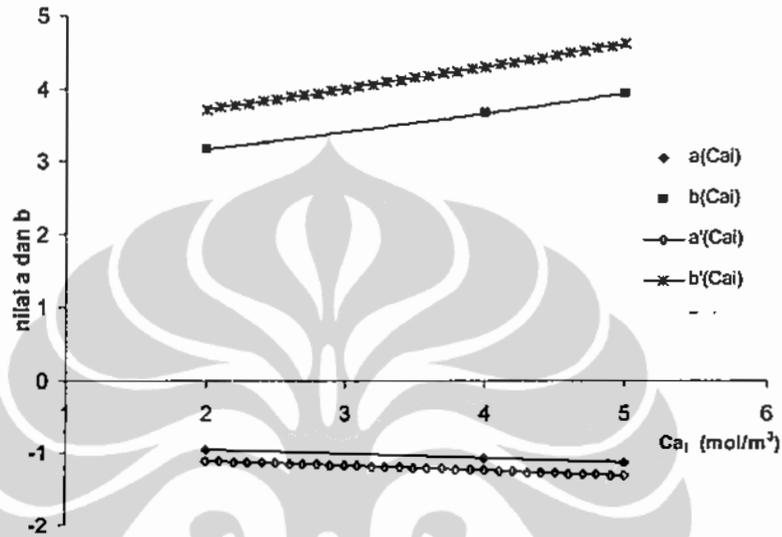
$$b(Ca_i) = 0,0092 Ca_i^2 + 0,1907 Ca_i + 2,7547$$

Selanjutnya dibuat persamaan a'(Ca_i) dan b'(Ca_i) dengan metode dilatasi dari persamaan a(Ca_i) dan b(Ca_i). Kurva hasil dilatasi dapat dilihat pada Gambar 4.45.

$$a'(Ca_i) = a(v = 0,792 \text{ m/s})/a(v = 0,554 \text{ m/s}) a(Ca_i) = 1,165 (-0,0019 Ca_i^2 - 0,0452 Ca_i - 0,8575)$$

$b'(Ca_i) = b(v = 0,792 \text{ m/s})/b(v = 0,554 \text{ m/s})$ $b'(Ca_i) = 1.173 (0.0092 Ca_i^2 + 0.1907 Ca_i + 2.7547)$
 dan selanjutnya dihitung harga a dan b dari $a'(Ca_i)$ dan $b'(Ca_i)$ pada harga $Ca_i = 0,002 \text{ M}$ sebagai berikut :

$$a'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = -1,108 \text{ dan } b'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = 3,716$$

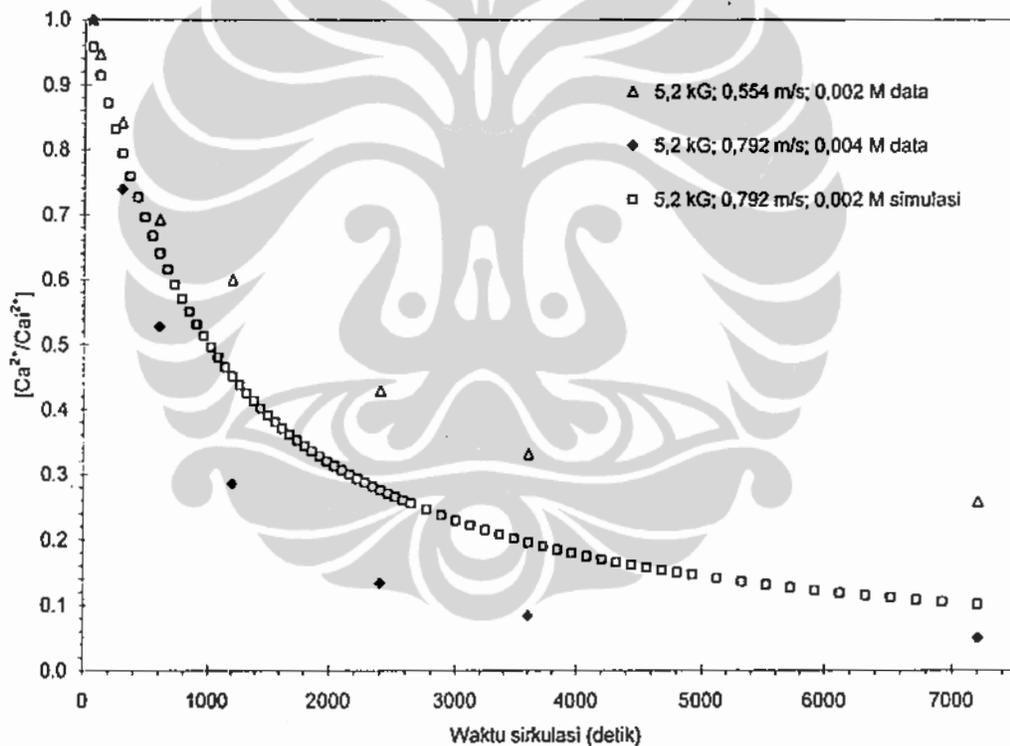


Gambar 4.45. Kurva $a'(Ca_i)$ dan $b'(Ca_i)$ hasil dilatasi dari kurva $a(Ca_i)$ dan $b(Ca_i)$

Contoh perhitungan dilatasi yang ditunjukkan pada gambar 4.45 di atas memiliki harga persen rasio dilatasi pada $a(Ca_i)$ sebesar 16,5 % dan $b(Ca_i)$ sebesar 17,3 %. Tabel 4.33 menunjukkan hasil simulasi harga Ca/Ca_i selama 120 menit sirkulasi dengan menggunakan harga a dan b hasil persamaan dilatasi $a'(Ca_i)$ dan $b'(Ca_i)$. Validasi hasil simulasi tidak dapat dilakukan karena tidak tersedianya data penelitian pada kondisi tersebut. Namun dalam hal ini akan dilakukan perbandingan dengan data penelitian pada kondisi terdekat dengan kondisi yang disimulasikan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.46. Efektifitas metode dilatasi yang digunakan dalam persamaan ini bergantung pada persen rasio dilatasi dari persamaan a dan b acuan. Semakin besar persen rasio dilatasi yang terjadi maka tingkat kesalahan akan semakin tinggi.

Tabel 4.33. Hasil simulasi presipitasi CaCO_3 sebagai Ca/Ca_i selama 120 menit sirkulasi (B : 5,2 kG, Ca_i 0,002 M , L_m 0,35 m, v : 0,792 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)

$\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}$	K_1	K_2	a	b	T_m (detik)	T_s (detik)
0,958	0,0193	0,4396	-1,108	3,716	9,9	60
0,914	0,0193	0,2039	-1,108	3,716	19,8	120
0,794	0,0193	0,0738	-1,108	3,716	49,4	300
0,641	0,0193	0,0343	-1,108	3,716	98,9	600
0,452	0,0193	0,0159	-1,108	3,716	197,8	1200
0,276	0,0193	0,0074	-1,108	3,716	395,5	2400
0,196	0,0193	0,0047	-1,108	3,716	593,3	3600
0,102	0,0193	0,0022	-1,108	3,716	1186,5	7200



Gambar 4.46. Kurva $[\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}_i^{2+}]$ pada $v = 0,792 \text{ m/s}$; $\text{Ca}_i = 0,002 \text{ M}$ hasil simulasi dibandingkan dengan Kurva data percobaan (B: 5,2 kG, L_m : 0,35 m, V: 240 mL)

Gambar 4.46 menunjukkan hasil simulasi dilatasi masih berada dalam rentang kurva data terdekat sehingga metode dilatasi ini masih cukup memadai dalam mengestimasi harga Ca/Ca_i di luar kondisi acuan. Namun demikian untuk validasi yang akurat maka tetap dibutuhkan data percobaan pada kondisi tersebut guna mendapatkan faktor kesalahan hasil simulasi.

Tabel 4.34. Persen rasio dilatasi a dan b pada berbagai variabel proses terhadap harga a dan b acuan untuk sampel termagnetisasi dalam rentang data percobaan.

Arah dilatasi	Persen rasio dilatasi maksimum terhadap harga a dan b acuan (%)									
	Kuat medan Acuan : 5,2 kG Rentang data (2 – 5,2 kG)		Kecepatan alir Acuan: 0,554 m/s Rentang data (0,262 - 0,792 m/s)		Panjang magnet Acuan: 0,35 m Rentang data (0,05 – 0,35 m)		Konsentrasi Acuan: 0,004 M Rentang data (0,002 – 0,005 M)		Volume Acuan: 240 mL Rentang data 120 – 500 mL	
	a(B)	b(B)	a(v)	b(v)	a(l _m)	b(l _m)	a(Ca _i)	b(Ca _i)	a(V)	b(V)
Turun	3,6	9,1	1,7	23,5	10,5	17,3	10,6	13,4	14,6	9,4
Naik	-	-	16,5	17,3	-	-	5,8	7,5	24,5	23,5

Tabel 4.34 menunjukkan hasil simulasi persen rasio dilatasi maksimum berdasarkan rentang data kondisi operasi, dengan harga tertinggi dicapai pada variabel volume sampel, yaitu sebesar 24,5 % untuk harga a dan 23,5 % untuk harga b.

4.4.3.4 Perhitungan waktu efektif magnetisasi dan penurunan Ca/Ca_i.

Waktu efektif magnetisasi (t_{me}) adalah waktu dimana proses magnetisasi masih berpengaruh pada penurunan Ca/Ca_i (presipitasi CaCO₃). Nilai penurunan Ca/Ca_i yang dicapai saat waktu efektif magnetisasi disebut penurunan Ca/Ca_i efektif ($(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$). Nilai t_{me} dan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ merupakan parameter efektivitas magnetisasi larutan CaCO₃ untuk sistem sirkulasi fluida dinamik. Peningkatan nilai $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ akan menyebabkan meningkatnya presipitasi CaCO₃ yang ditunjukkan dengan bertambahnya persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi. Model persamaan laju presipitasi CaCO₃ dapat digunakan untuk memprediksi nilai t_{me} dan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ yaitu dengan membuat tetap variabel K_2 untuk menghilangkan efek sirkulasi pada presipitasi CaCO₃.

Gambar 4.47 dan tabel 4.35 menunjukkan harga t_{me} dan $(\Delta(C_s/C_{ai}))_{ef}$ pada kecepatan alir larutan 0,262 m/s, 0,554 m/s, dan 0,792 m/s. Data hasil percobaan pada kecepatan alir 0,554m/s menunjukkan waktu efektif magnetisasi (t_{me}) adalah 14,83 detik (tabel 4.24), sedangkan hasil simulasi mendapatkan 11,9 detik. Hal ini dapat disebabkan interval data waktu magnetisasi pada percobaan hanya dilakukan tiap 30 detik waktu sirkulasi (4,9 detik waktu magnetisasi). sedangkan interval waktu magnetisasi dari perhitungan simulasi dilakukan tiap 0.3 detik waktu magnetisasi (2 detik waktu sirkulasi).

Persen kenaikan presipitasi relatif menggambarkan rasio kenaikan presipitasi sampel termagnetisasi dibanding sampel non-magnetisasi setelah 120 menit proses sirkulasi yang dirumuskan sebagai berikut :

$$PKPR = 100 * \frac{(M - NM)}{NM} \quad (4.21)$$

dengan : PKPR = persen kenaikan presipitasi relatif

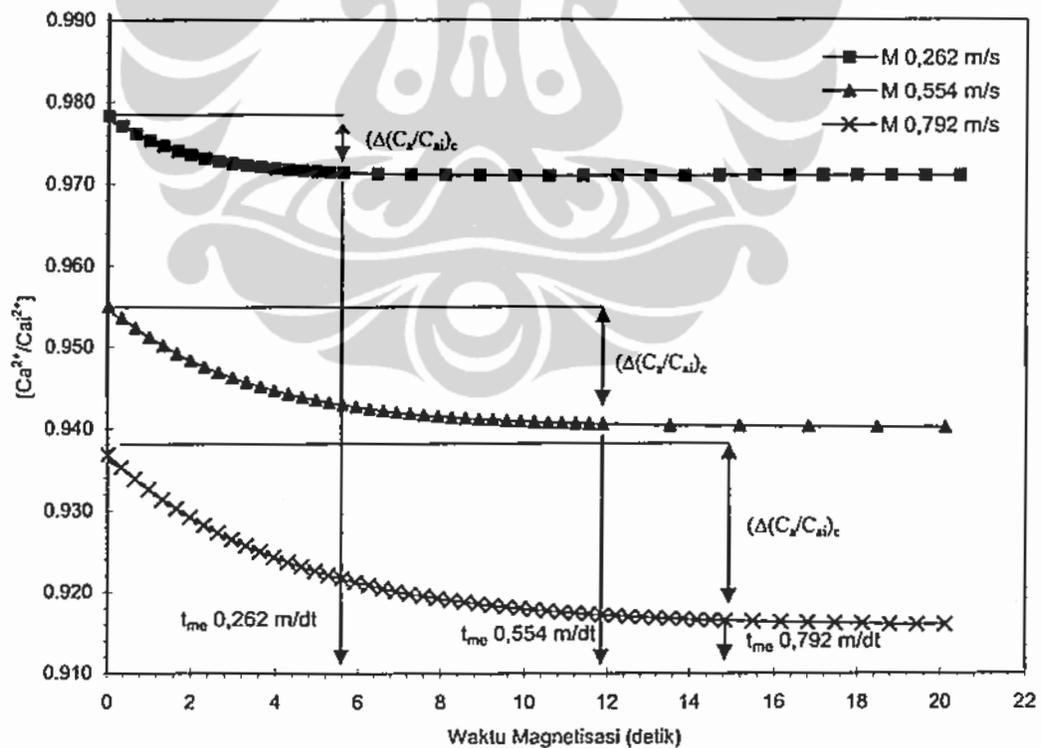
M = Persen presipitasi sampel termagnetisasi selama 120 menit sirkulasi

NM = Persen presipitasi sampel non-magnetisasi selama 120 menit sirkulasi

Data percobaan persen kenaikan presipitasi relatif sebagai pengaruh kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi, dan volume sampel masing-masing diberikan pada tabel 4.22, tabel 4.23, gambar 4.36, tabel 4.25, dan tabel 4.27. Hasil perhitungan simulasi persen kenaikan presipitasi relatif sebagai fungsi kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi, dan volume sampel diberikan pada tabel F2, lampiran F.

Nilai $(\Delta(C_p/C_{ai}))_{ef}$ menunjukkan kenaikan presipitasi akibat magnetisasi di awal presipitasi, sedangkan PKPR menunjukkan kenaikan presipitasi sampel termagnetisasi setelah 120 menit proses sirkulasi. Tabel 4.35 menunjukkan terjadi peningkatan $(\Delta(C_p/C_{ai}))_{ef}$ dengan bertambahnya kecepatan alir dan kenaikan $(\Delta(C_p/C_{ai}))_{ef}$ menyebabkan meningkatnya PKPR. Hal ini menunjukkan kenaikan presipitasi di awal presipitasi akibat magnetisasi, akan berpengaruh pada kenaikan presipitasi yang terjadi selanjutnya.

Tabel 4.35 menunjukkan nilai PKPR hasil simulasi jika dibandingkan dengan data percobaan relatif cukup memadai dengan penyimpangan berkisar 1,9 hingga 7,2 persen.

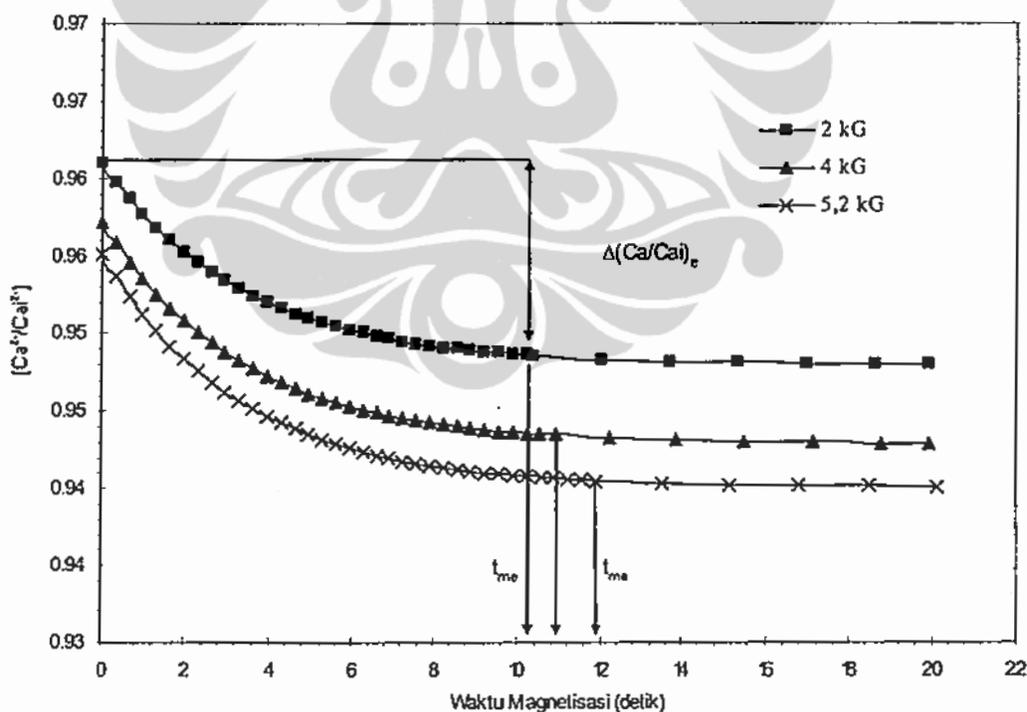


Gambar 4.47. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ terhadap Waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai kecepatan alir larutan ($B : 5,2 \text{ kG}$, $Ca_i 0,002 \text{ M}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)

Tabel 4.35. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$), dan persen kenaikan presipitasi relatif pada berbagai kecepatan alir ($B : 5,2 \text{ kG}$, $Ca_i 0,004 \text{ M}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)

Kecepatan alir (m/s)	t_{me} (detik)	$\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$	Persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR)	
			Data percobaan	Simulasi
0,262	5,3	0,007	14,3	15,1
0,554	11,9	0,015	18,1	19,5
0,792	14,8	0,020	26,2	26,7

Gambar 4.48 dan tabel 4.36 menunjukkan harga t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ pada kuat medan 2 kG, 4 kG, dan 5,2 kG. Terjadi peningkatan nilai t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ dengan bertambahnya kuat medan. Peningkatan PKPR yang rendah disebabkan rendahnya peningkatan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ (tabel 4.36). Hal ini menunjukkan hubungan kuantitatif antara nilai $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ dengan PKPR yang terjadi. Perbedaan nilai PKPR hasil simulasi dan data percobaan pada kuat medan 0,2 dan 0,4 kG yang cukup signifikan (8,9 dan 9 persen) disebabkan harga R^2 untuk menghitung data regresi a dan b bernilai 0,98 (gambar D2, lampiran D)

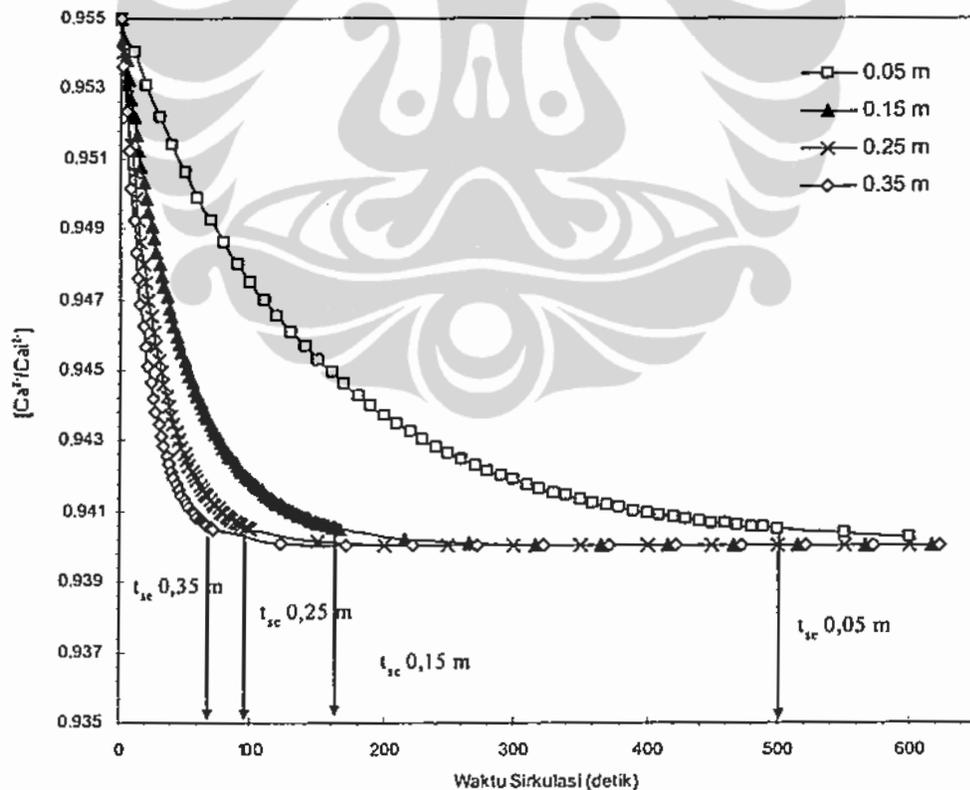


Gambar 4.48. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai kuat medan ($Ca_i 0,004 \text{ M}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $V : 240 \text{ mL}$ dan pH awal 8,5)

Tabel 4.36. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$), dan persen kenaikan presipitasi relatif pada berbagai kuat medan (Ca_i : 0,004 M, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)

Kuat medan B (kG)	t_{me} (detik)	$\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$	Persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR)	
			Data percobaan	Simulasi
2	10,4	0,012	12,3	13,5
4	10,9	0,014	16,1	17,7
5,2	11,9	0,015	18,1	19,5

Gambar 4.49 dan tabel 4.37 menunjukkan hasil simulasi harga t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ pada berbagai panjang magnet adalah sama, yaitu 11,9 detik dan 0,015. Untuk harga t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang sama maka panjang magnet (L_m) hanya mempengaruhi waktu sirkulasi yang dibutuhkan (t_{sc}), seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.49. Harga t_{sc} untuk panjang magnet 0,05 m, 0,15 m, 0,25 m, dan 0,35 m masing-masing sebesar 500 detik, 166 detik, 100 detik, dan 72 detik. Harga t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang sama menunjukkan panjang magnet tidak mempengaruhi jumlah presipitasi setelah 500 detik waktu sirkulasi (gambar 4.49). Tabel 4.37 menunjukkan panjang magnet tidak berpengaruh signifikan pada PKPR.



Gambar 4.49. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ terhadap waktu sirkulasi hasil simulasi pada berbagai panjang magnet (B : 5,2 kG, Ca_i 0,004 M, v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)

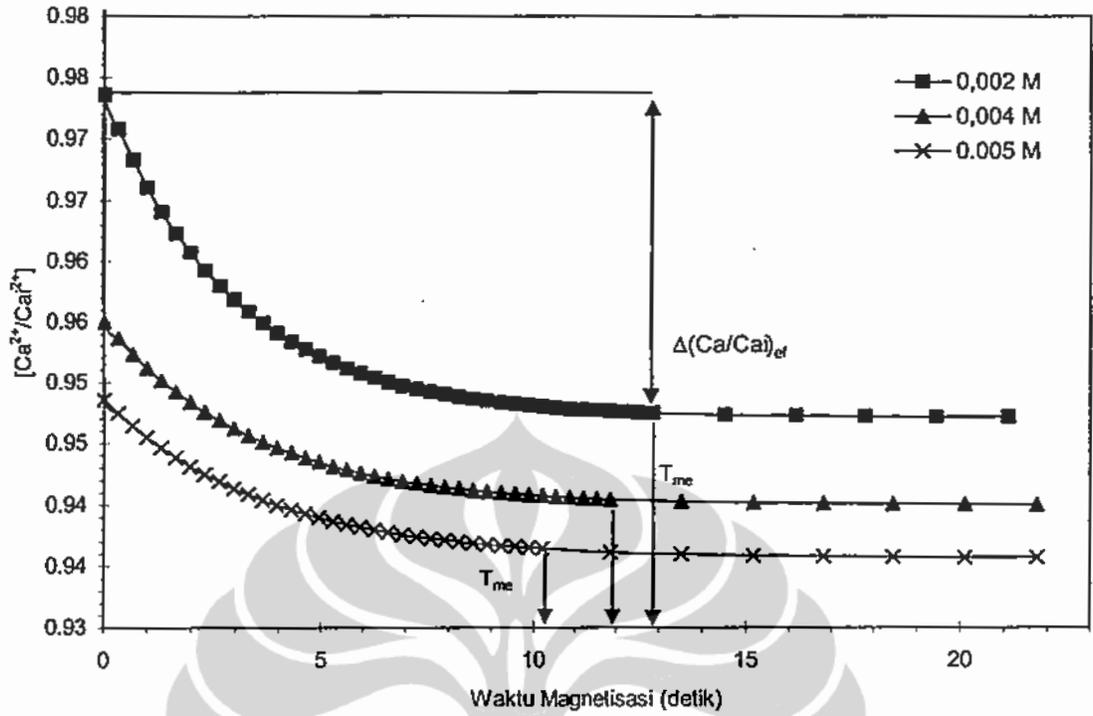
Tabel 4.37. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$), dan persen kenaikan presipitasi relatif pada berbagai panjang magnet ((Ca_i ; 0,004 M, B: 5,2 kG, v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)

Panjang Magnet L_m (m)	t_{me} (detik)	$\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$	Persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR)	
			Data percobaan	Simulasi
0,15	11,9	0,015	16,4	17,1
0,25	11,9	0,015	17,9	19,5
0,35	11,9	0,015	18,0	19,5

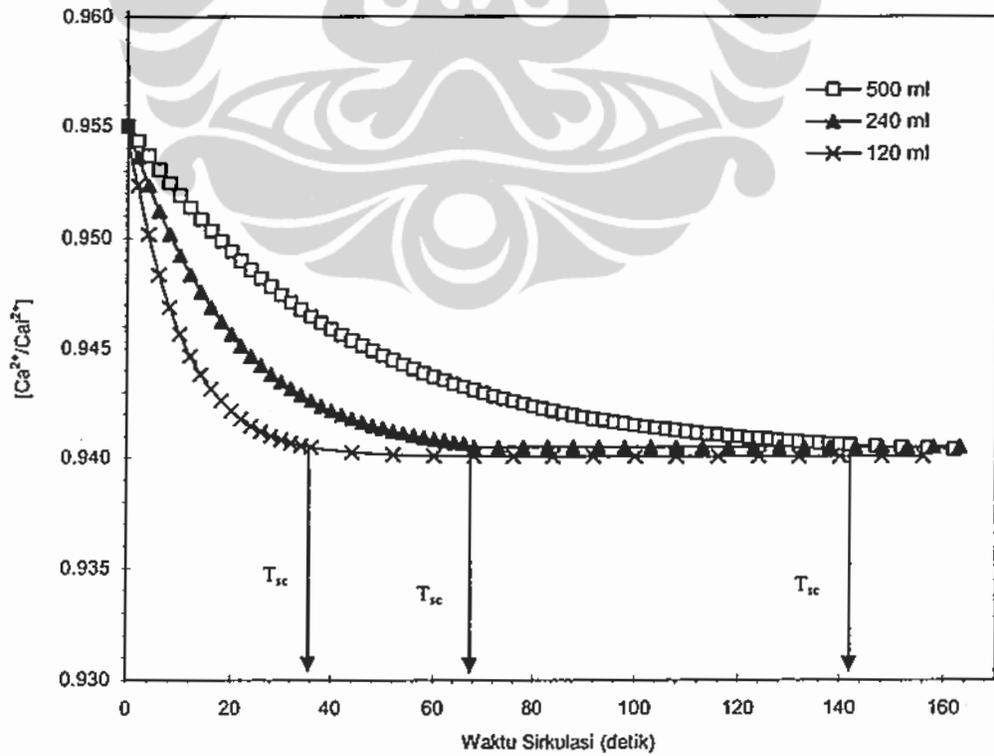
Gambar 4.50 dan tabel 4.38 menunjukkan harga t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ pada konsentrasi Ca^{2+} 0,002 M, 0,004 M, dan 0,005 M. Terjadi penurunan nilai t_{me} dan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ dengan bertambahnya konsentrasi sampel. Penurunan PKPR yang cukup besar disebabkan tingginya penurunan $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang terjadi akibat kenaikan konsentrasi sampel (tabel 4.38). Data percobaan menunjukkan pada konsentrasi Ca_i 0,002 M menyebabkan peningkatan PKPR hingga 79,7 persen (tabel 4.25 dan 4.38). Menurunnya efek medan magnet dengan bertambahnya konsentrasi sampel disebabkan oleh meningkatkan harga supersaturasi larutan dengan naiknya konsentrasi sampel, dimana interaksi antar ion akan semakin tinggi. Hal ini menyebabkan kontribusi medan magnet dalam mendorong terjadinya interaksi ion dan partikel semakin berkurang. Perbedaan data percobaan dan hasil simulasi untuk nilai PKPR pada tabel 4.38 berkisar 2 hingga 11 persen (tabel F2 lampiran F).

Tabel 4.38. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$), dan persen kenaikan presipitasi relatif pada berbagai konsentrasi sampel (B : 5,2 kG, L_m 0,35 m, v : 0,554 m/s, V : 240 mL dan pH awal 8,5)

Konsentrasi sampel Ca_i (M)	t_{me} (detik)	$\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$	Persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR)	
			Data percobaan	Simulasi
0,002	12,9	0,026	79,7	81,3
0,004	11,9	0,015	18,1	19,5
0,005	10,2	0,012	15,1	17



Gambar 4.50. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai konsentrasi Ca_i ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, dan $V : 240 \text{ mL}$).



Gambar 4.51. Kurva $[Ca^{2+}/Ca_i^{2+}]$ terhadap waktu magnetisasi hasil simulasi pada berbagai volume sampel ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, dan $Ca_i : 0,004 \text{ M}$).

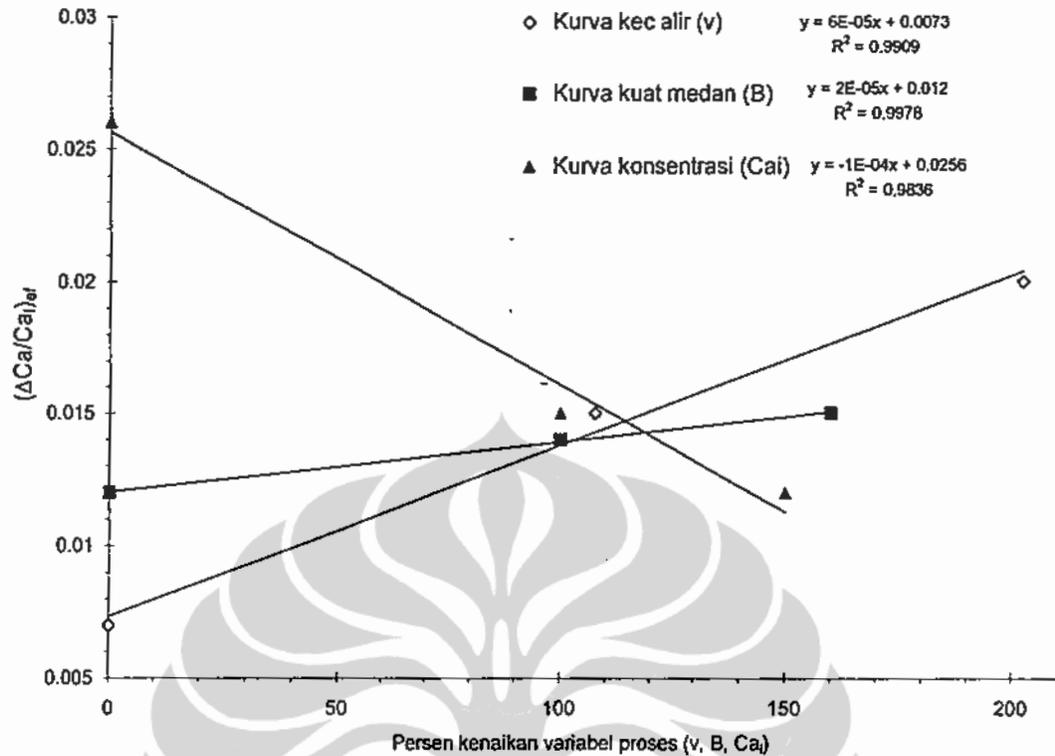
Tabel 4.39. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$), dan persen kenaikan presipitasi relatif pada berbagai volume sampel ($B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m 0,35 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$, $Ca_i : 0,004 \text{ M}$ dan pH awal 8,5)

Volume sampel (mL)	t_{me} (detik)	$\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$	Persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR)	
			Data percobaan	Simulasi
120	11,9	0,015	18,0	19,9
240	11,9	0,015	18,1	19,5
500	11,9	0,015	18,2	19,5

Harga t_{sc} untuk volume sampel 120 mL, 240 mL, dan 500 mL masing masing sebesar 36 detik, 72 detik, dan 152 detik (gambar 4.51). Harga t_{me} , $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ dan persen kenaikan presipitasi relatif hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.39. Data hasil percobaan PKPR untuk variasi volume sampel pada tabel 4.27 dan tabel 4.39 menunjukkan kenaikan volume larutan tidak berpengaruh signifikan terhadap PKPR. Perbedaan data percobaan dan hasil simulasi untuk nilai PKPR pada tabel 4.39 relatif cukup memadai yaitu berkisar 6,7 hingga 9,2 persen (tabel F2, lampiran F).

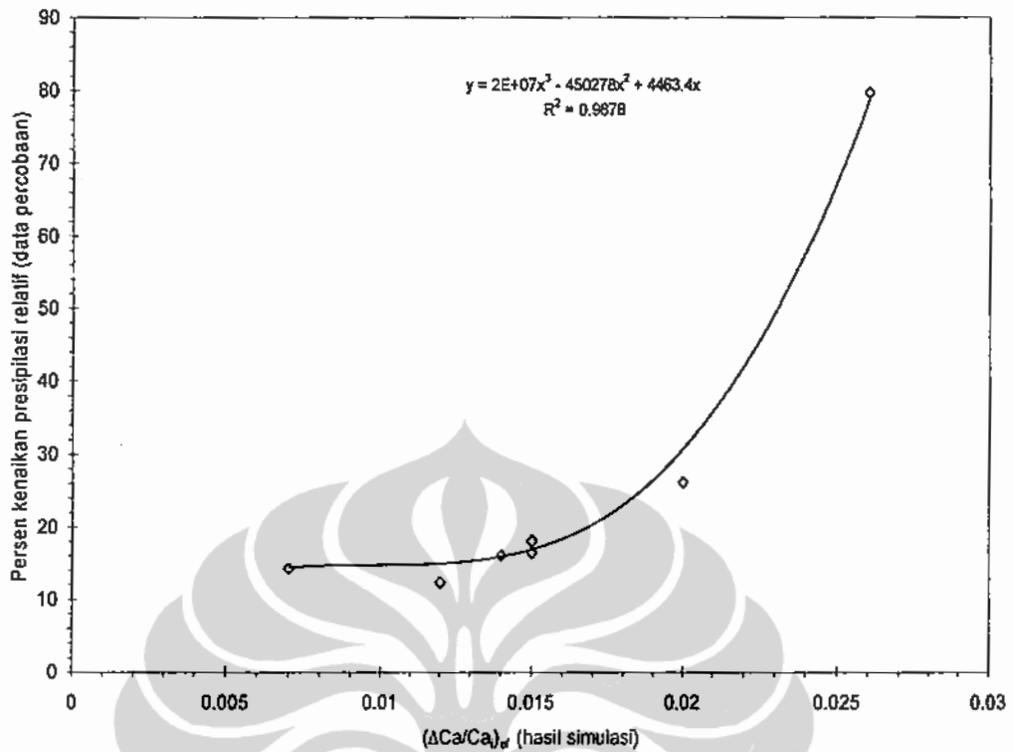
Efek medan magnet terhadap penurunan ion Ca^{2+} yang ditunjukkan pada gambar 4.47 hingga 4.51 menunjukkan penurunan ion Ca^{2+} yang paling tinggi adalah pada beberapa detik pertama proses magnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa efek tertinggi medan magnet pada proses sirkulasi terjadi pada lintasan pertama sampel melewati medan magnet.

Gambar 4.52 menunjukkan kenaikan kecepatan alir dan penurunan konsentrasi sampel sangat sensitif mempengaruhi harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang ditunjukkan dengan nilai kemiringan kurva (slope). Slope kurva kecepatan alir 3 kali lebih besar dibanding slope kurva kuat medan, sedangkan slope kurva konsentrasi memiliki harga absolut tertinggi. Hal ini menunjukkan kenaikan kuat medan tidak terlalu besar pengaruhnya dalam menaikkan harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ pada rentang 2 - 5,2 kG.



Gambar 4.52. Kurva regresi linier $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ terhadap persen kenaikan kecepatan alir (v), kuat medan (B), dan konsentrasi sampel (C_{ai}).

Harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ menggambarkan secara kualitatif jumlah inti yang terbentuk pada larutan di awal presipitasi sebagai pengaruh medan magnet. Jumlah inti yang terbentuk akan sangat mempengaruhi presipitasi dan pertumbuhan kristal selanjutnya. Harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang tinggi menunjukkan jumlah inti yang terbentuk pada awal presipitasi besar sehingga presipitasi selanjutnya pada proses sirkulasi akan semakin bertambah. Oleh sebab itu, harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ berhubungan dengan peningkatan presipitasi $CaCO_3$ setelah sirkulasi 120 menit. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan presipitasi $CaCO_3$ dengan bertambahnya harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$. Gambar 4.53 menunjukkan adanya hubungan kuantitatif yang kuat antara persen kenaikan presipitasi relatif yang berasal data percobaan dengan nilai $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang merupakan hasil simulasi. Hal tersebut diperlihatkan dengan persamaan persen kenaikan presipitasi relatif (sumbu y) fungsi $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ (sumbu x) hasil regresi dengan harga koefisien R^2 adalah 0,99. Gambar 4.53 menunjukkan peningkatan kenaikan presipitasi relatif pada harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ di atas 0,015 bersifat eksponensial.



Gambar 4.53. Kurva persen kenaikan presipitasi relatif (sumbu y) terhadap harga $\Delta(C_a/C_{a_i})_{ef}$ (sumbu x) hasil regresi

Hasil simulasi menunjukkan harga $\Delta(C_a/C_{a_i})_{ef}$ dan t_{mc} tertinggi dicapai pada 0,41 dan 18,1 detik pada kondisi C_{a_i} : 0,002 M, v : 0,792 m/s, B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m, dan V : 240 mL (gambar kurva pada lampiran F). Ini berarti penurunan maksimum ion Ca^{2+} pada sampel larutan $CaCO_3$ oleh medan magnet sebesar 4.1 % dan membutuhkan waktu magnetisasi selama 18.1 detik atau 110 detik waktu sirkulasi. Hasil simulasi presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{a_i} selama 120 menit sirkulasi pada kondisi $\Delta(C_a/C_{a_i})_{ef}$ dan t_{mc} tertinggi ini diberikan pada tabel 4.34.

Untuk mendapatkan gambaran besarnya kenaikan presipitasi $CaCO_3$ oleh medan magnet pada kondisi maksimum tersebut dibandingkan dengan proses tanpa magnetisasi setelah 120 menit disirkulasi (nilai PKPR), maka perlu dilakukan perhitungan presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{a_i} selama 120 menit sirkulasi pada kondisi tanpa medan magnet ($B = 0$). Perhitungan simulasi nilai Ca/C_{a_i} selama 120 menit sirkulasi tanpa medan magnet diberikan pada lampiran F.

Hasil simulasi menunjukkan nilai Ca/C_{a_i} untuk sampel non-magnetisasi setelah 120 menit disirkulasi didapat 0,513, sedangkan Ca/C_{a_i} untuk sampel termagnetisasi sebesar 0,102 (tabel 4.34). Persen peningkatan presipitasi yang terjadi antara sampel termagnetisasi dengan sampel non-magnetisasi pada kondisi C_{a_i} : 0,002 M, v : 0,792 m/s, dan V : 240 mL adalah sebesar :

$$100 * (0,513 - 0,102) / 0,102 = 403 \%$$

Hasil simulasi dan data percobaan yang diberikan pada sub-bab ini menunjukkan bahwa proses magnetisasi sistem sirkulasi fluida dinamik efektif mendorong presipitasi CaCO_3 sehingga berpeluang besar untuk diaplikasikan pada proses pengolahan air sadah untuk pencegahan kerak.

4.5 Rangkuman hasil percobaan pengaruh magnetisasi pada presipitasi CaCO_3 dalam larutan air sadah

Ringkasan pengaruh medan magnet pada larutan $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-CaCl}_2$ dan larutan CaCO_3 baik pada sistem dinamik maupun statik diberikan berupa tabel guna mempermudah pemahaman terhadap hasil keseluruhan penelitian. Tabel 4.40 menunjukkan ringkasan hasil pengamatan pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.

Persen penurunan deposit CaCO_3 menunjukkan rasio jumlah deposit sampel termagnetisasi dibanding sampel non-magnetisasi yang juga menggambarkan sifat deposit sampel termagnetisasi yang lebih mudah lepas dari dinding tabung dibanding deposit sampel non-magnetisasi.

Tabel 4.40 Rangkuman hasil percobaan pengaruh medan magnet pada presipitasi CaCO_3 dalam air sadah.

Metode magnetisasi	Larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2		Larutan CaCO_3			
	Sistem fluida statik	Sistem fluida dinamik	Sistem fluida statik		Sistem fluida dinamik	
	Magnetisasi larutan Na_2CO_3	Magnetisasi larutan Na_2CO_3	Magnetisasi larutan sebelum presipitasi (pH rendah)	Magnetisasi larutan saat presipitasi (pH tinggi)	Magnetisasi larutan sebelum presipitasi (pH rendah)	Magnetisasi larutan saat presipitasi (pH tinggi)
Efek terhadap interaksi ion & hidrat ion	Terjadi penguatan/peningkatan interaksi hidrat ion	Terjadi pelemahan/penurunan interaksi hidrat ion	Terjadi penguatan/peningkatan interaksi hidrat ion	Terjadi peningkatan interaksi ion	Terjadi pelemahan/penurunan interaksi hidrat ion	Terjadi penguatan/peningkatan interaksi ion
Efek presipitasi CaCO_3	Terjadi penurunan presipitasi CaCO_3	Terjadi peningkatan presipitasi CaCO_3	Terjadi penurunan presipitasi CaCO_3	Terjadi peningkatan presipitasi CaCO_3	Terjadi peningkatan presipitasi CaCO_3	Terjadi peningkatan presipitasi CaCO_3
Persen penurunan deposit CaCO_3	Tidak terjadi penurunan persen deposit CaCO_3	Tidak terjadi penurunan persen deposit CaCO_3		Tidak terjadi penurunan persen deposit CaCO_3	Terjadi penurunan persen deposit CaCO_3 hingga 18,4 %	
Morfologi kristal deposit	Kalsit mendominasi jenis kristal yg terbentuk	Kalsit mendominasi jenis kristal yg terbentuk		Kalsit & Aragonit	Kalsit & Aragonit	

4.6 Konsep sistem AMT penurun kesadahan air dan pencegahan kerak

Konsep sistem AMT yang akan dikembangkan pada penelitian ini adalah sistem AMT yang dapat menekan pembentukan kerak CaCO_3 dengan menurunkan kandungan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada air sadah dimana kerak yang terbentuk (deposit) lebih mudah terlepas dari dinding. Magnetisasi dilakukan dengan sistem sirkulasi fluida dinamik yang dilanjutkan dengan proses agitasi mekanik dan pengendapan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Tahapan proses tersebut akan dikaji efektivitasnya dalam mendorong presipitasi CaCO_3 dan juga sifat depositnya berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

4.6.1 Proses magnetisasi larutan air sadah dengan sistem sirkulasi fluida dinamik

Efek medan magnet pada larutan air sadah saat magnetisasi dapat dibagi dalam dua jenis, pertama adalah efek peningkatan presipitasi CaCO_3 dimana hal ini terjadi pada larutan CaCO_3 dengan harga supersaturasi tinggi (pH : 8,5 dan Ca_i : 0,004 M). Untuk larutan CaCO_3 dengan supersaturasi rendah (pH : 6,4 dan Ca_i : 0,004 M), maka yang terjadi adalah efek penurunan interaksi hidrat ion dan efek peningkatan presipitasi CaCO_3 terjadi setelah proses magnetisasi. Hasil uji deposit/kerak pada kondisi presipitasi statik setelah proses magnetisasi menunjukkan adanya penurunan persen deposit CaCO_3 hingga 18,4 % (tabel 4.28). Hal ini menunjukkan bahwa sifat kerak yang terbentuk dari air sadah termagnetisasi memiliki sifat mudah lepas (soft scale) dari dinding.

Magnetisasi pada sampel dengan harga supersaturasi tinggi akan menyebabkan terjadinya peningkatan presipitasi saat magnetisasi (gambar 4.32). Kenaikan kecepatan alir v dan kuat medan B akan meningkatkan efek gaya Lorentz yang ditunjukkan dengan meningkatnya presipitasi CaCO_3 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.35 dan 4.34 serta tabel 4.22 dan 4.23.

Waktu efektif sirkulasi (t_{se}) hasil percobaan dicapai pada 90 detik atau 14,83 detik waktu magnetisasi efektif (t_{me}) pada kondisi kuat medan B : 5,2 kG, kecepatan alir v : 0,552 m/s, panjang magnet L_m : 0,35 m, konsentrasi Ca^{2+} awal Ca_i : 0,004 M, dan volume sampel V : 240 mL, Waktu efektif magnetisasi t_{me} hasil simulasi simulasi adalah sebesar 11,9 detik.

Hasil simulasi menunjukkan efek kenaikan kecepatan alir dan penurunan konsentrasi sampel dalam meningkatkan waktu magnetisasi efektif (t_{me}) dan $(\Delta(C_s/C_{ai})_{ef})$ lebih signifikan dibanding efek kenaikan medan magnet seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.52. Penurunan konsentrasi sampel hingga 0,002 M akan meningkatkan efektivitas magnetisasi yang ditunjukkan dengan nilai $\Delta(C_s/C_{aier})$ sebesar 0,026 dan yang persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR) hingga 79,7 % (tabel 4.38). Panjang magnet dan volume sampel hanya mempengaruhi waktu sirkulasi efektif (t_{se}) dan tidak mempengaruhi harga t_{me} dan $\Delta(C_s/C_{aier})$ (gambar 4.64 dan gambar 4.66). Harga $\Delta(C_s/C_{ai})_{ef}$ tertinggi dari hasil simulasi dicapai pada 0.041 dengan waktu efektif magnetisasi

t_{me} sebesar 18.1 detik yang dicapai pada konsentrasi sampel (Ca_i) 0,002 M dan kecepatan alir (v) 0,792 m/s.

4.6.2 Proses Agitasi mekanik dengan aliran sirkulasi pada larutan air sadah.

Agitasi mekanik berupa aliran sirkulasi pada sampel larutan $CaCO_3$ akan mempercepat lepasnya CO_2 terlarut sehingga pH larutan meningkat. Naiknya pH larutan akan menyebabkan harga supersaturasi δ_s meningkat sehingga mendorong terjadinya presipitasi $CaCO_3$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.32 dan gambar 4.33. Efek langsung medan magnet terhadap penurunan ion Ca^{2+} dalam larutan hanya terjadi pada 1 - 2 menit pertama sirkulasi dan selanjutnya presipitasi $CaCO_3$ terjadi akibat efek sirkulasi (tabel 2.24). Efek medan magnet yang terjadi pada awal presipitasi mendorong pembentukan inti (nuklei) yang akan sangat menentukan pada proses pertumbuhan kristal selanjutnya. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.34 untuk sampel larutan dengan pH awal 8,5, dengan selisih presipitasi total larutan $CaCO_3$ termagnetisasi dan non-magnetisasi hanya 1 % pada 2 menit pertama sirkulasi dan menjadi 13 % setelah 180 menit sirkulasi. Tabel 4.38 menunjukkan bahwa efek medan magnet dalam meningkatkan presipitasi $CaCO_3$ pada 2 menit pertama sirkulasi hanya sebesar 2,6 % dan dengan proses agitasi mekanik (sistem sirkulasi) selama 120 menit menyebabkan peningkatan presipitasi $CaCO_3$ menjadi 79,7 % lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi.

Efek agitasi mekanik pada aliran sirkulasi untuk sampel larutan non-magnetisasi pH 6,4 mampu mencapai presipitasi $CaCO_3$ hingga 71,9 % pada 3 jam sirkulasi (gambar 4.32) sedangkan pada kondisi non-sirkulasi (statik) menunjukkan hingga 96 jam waktu presipitasi, $CaCO_3$ yang terpresipitasi hanya 15,3 % (gambar 4.42).

4.6.3 Proses pengendapan.

Pengendapan adalah tahap terakhir dari proses AMT yang diusulkan pada laporan ini. Ada 2 tujuan proses pengendapan larutan setelah proses magnetisasi dan agitasi mekanik, pertama adalah untuk memisahkan partikel $CaCO_3$ yang terbentuk di larutan agar dapat mengendap dan selanjutnya partikel yang belum mengendap dipisahkan dengan filtrasi. Hal ini dilakukan bila presipitasi optimum sudah tercapai pada proses agitasi mekanik. Tujuan kedua dari proses pengendapan adalah agar sampel larutan yang sudah termagnetisasi dan teragitasi secara mekanik (sirkulasi) dapat berpresipitasi lebih lanjut dalam kondisi larutan diam (presipitasi statik). Hal ini dilakukan apabila tahap magnetisasi dan sirkulasi hanya dilakukan dilakukan dalam waktu singkat (kurang dari 10 menit) pada larutan dengan saturasi rendah (pH rendah) dimana belum terjadi presipitasi saat magnetisasi dan sirkulasi. Gambar 4.42 menunjukkan efek magnetisasi dan kecepatan alir dapat menurunkan waktu nukleasi (T_n) pada proses pengendapan. Hal ini

menunjukkan magnetisasi dan sirkulasi mempercepat naiknya pH sehingga proses presipitasi lebih cepat terjadi saat pengendapan.

Magnetisasi dan sirkulasi selama 10 menit dengan dengan kuat medan 5,2 kG konsentrasi Ca ; 0,004 M, panjang magnet 0,35 m, kecepatan alir 0,792 m/s, volume sampel 240 mL. dan pH awal 6,4, mampu mempercepat waktu nukleasi menjadi kurang dari 4 jam dibanding waktu nukleasi larutan non-magnetisasi dan non-sirkulasi yang mencapai lebih dari 24 jam (gambar 4.40). Selanjutnya presipitasi sampel termagnetisasi dan sirkulasi mampu mencapai hingga 64,4 % (gambar 4.40) dibanding sampel non-magnetisasi dan non-sirkulasi yang hanya 15,3 % pada 96 jam pengendapan (gambar 4.42). Hasil ini menunjukkan bahwa proses pengendapan sebagai tahapan presipitasi lanjut, merupakan langkah efektif dalam menurunkan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} apabila tahap agitasi mekanik hanya dapat dilakukan beberapa menit saja, sementara larutan air sadah masih dalam kondisi supersaturasi rendah.

Penggunaan medan magnet dan agitasi mekanik dengan sistem aliran sirkulasi pada sampel larutan termagnetisasi dengan pH awal 6,4 dapat mencapai tingkat presipitasi CaCO_3 optimum sebesar 85,4 % dengan waktu sirkulasi selama 3 jam (gambar 4.32), sedangkan jika waktu sirkulasi hanya dilakukan selama 10 menit, maka untuk mencapai tingkat presipitasi optimum 64,4 % membutuhkan waktu pengendapan hingga 96 jam.

Proses presipitasi dengan agitasi mekanik dapat mencapai waktu presipitasi optimum yang lebih cepat dengan tingkat presipitasi CaCO_3 yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses pengendapan, namun demikian agitasi mekanik membutuhkan energi yang besar. Oleh sebab itu kombinasi dari agitasi mekanik dan pengendapan dapat digunakan pada sistem AMT guna mendapatkan tingkat presipitasi dan kebutuhan energi yang optimum.

4.6.4 Konfigurasi sistem AMT

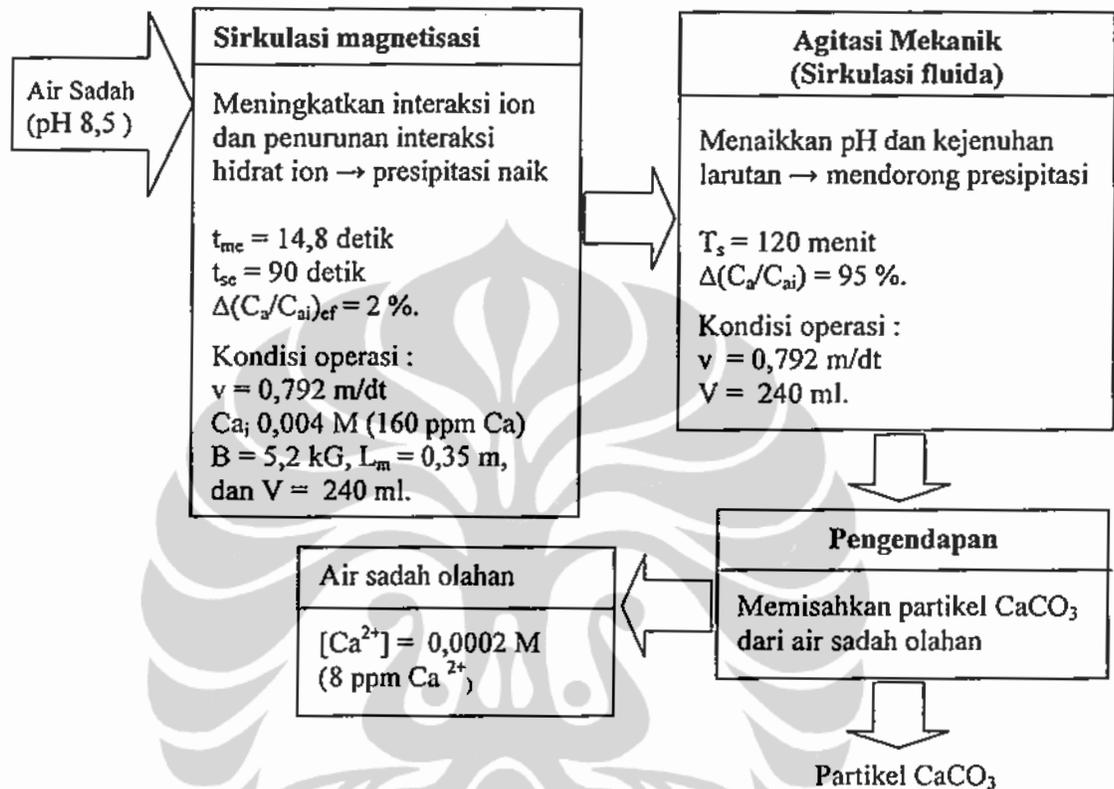
Ada 2 konfigurasi proses sistem AMT yang akan diajukan pada laporan ini dimana masing-masing alternatif akan dibahas efektivitasnya dalam menekan jumlah ion Ca^{2+} pada air sadah, berikut pembahasannya.

4.6.4.1 Sistem AMT 1.

Gambar 4.54 adalah Sistem AMT 1 untuk umpan dengan Supersaturasi tinggi (pH 8,5, Ca ; 0,004 M) dimana presipitasi sudah terjadi saat sirkulasi magnetisasi berlangsung. Untuk kondisi $B = 5,2$ kG, $L_m = 0,35$ m, dan $V = 240$ mL, waktu efektif magnetisasi (t_{me}) saat magnetisasi adalah 14,8 detik ($t_{sc} : 90$ detik) dan penurunan ion Ca ($(\Delta(C_s/C_{si}))_{ef}$) adalah 2 % (tabel 4.35).

Penurunan ion Ca^{2+} setelah 120 menit agitasi mekanik dengan aliran sirkulasi mencapai 95 % (tabel 4.22). Sebagai perbandingan, jika pengolahan air sadah hanya menggunakan agitasi mekanik

(sirkulasi tanpa medan magnet) maka penurunan ion Ca^{2+} yang dicapai adalah 75,3 % (tabel 4.22) dan jika tanpa magnetisasi dan tanpa agitasi mekanik, maka penurunan ion Ca^{2+} hanya mencapai 5,4 % (gambar 4.27).



Gambar 4.54. Skema proses Konsep sistem AMT 1 untuk umpan dengan supersaturasi tinggi.

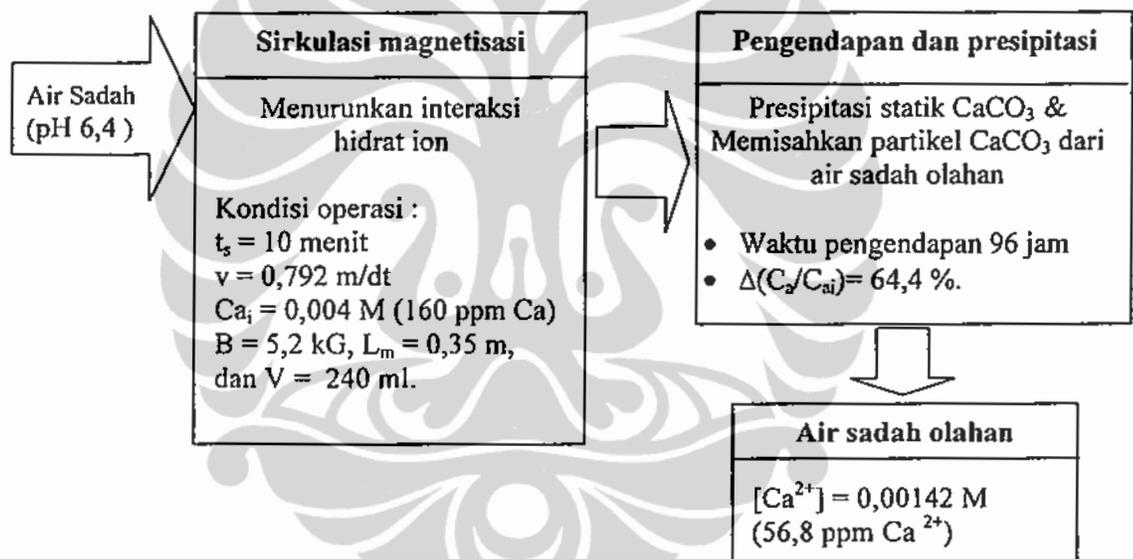
Belum ada data percobaan yang menunjukkan secara langsung tentang sifat deposit yang terbentuk dari air sadah yang termagnetisasi pada kondisi AMT 1 ini. Hal ini disebabkan konsentrasi ion Ca^{2+} yang keluar dari proses ini sudah rendah sehingga sulit untuk dilakukan uji deposit pada sampel hasil olahan. Berdasarkan literatur (Coey *et al*, 1999, Knez, *et al*, 2005) diperkirakan sifat deposit yang terbentuk akan lebih bersifat kerak lunak. Proses pengendapan pada AMT 1 hanya berfungsi untuk memisahkan partikel CaCO_3 yang terbentuk pada air sadah karena presipitasi optimum sudah tercapai saat agitasi mekanik. Oleh sebab itu waktu yang dibutuhkan untuk proses pengendapan ini relatif singkat dan tidak membutuhkan wadah/tempat yang besar. Namun demikian, proses agitasi mekanik selama 120 menit akan membutuhkan energi yang cukup besar.

Air sadah alam umumnya berada pada pH rendah (6,0 – 7,5), oleh sebab itu agar dapat mengolah umpan air sadah dengan pH di bawah 8,5, maka sistem AMT 1 membutuhkan alat

pretreatment berupa agitasi mekanik yang berfungsi menaikkan terlebih dahulu pH umpan hingga mencapai 8,5. Sebagai gambaran proses agitasi mekanik dengan sirkulasi tanpa medan magnet membutuhkan waktu 40 menit untuk menaikkan pH air sadah dari 6,4 menjadi 8,5 untuk kondisi Ca_i 0,004 M, kecepatan alir 0,554 m/s, dan volume sampel 240 mL (gambar 4.32)

4.6.4.2 Sistem AMT 2.

Gambar 4.55 adalah Sistem AMT 2 untuk umpan dengan supersaturasi rendah (pH 6,4; Ca_i 0,004 M) dimana proses magnetisasi sirkulasi belum menyebabkan presipitasi saat magnetisasi. Magnetisasi pada kondisi ini akan menurunkan interaksi hidrat ion dimana efeknya pada peningkatan presipitasi $CaCO_3$ baru teramati sesudah proses magnetisasi. Waktu magnetisasi sirkulasi (t_s) ditentukan 10 menit berdasarkan kondisi optimum penurunan hidrat ion pada sistem fluida dinamik (tabel 4.9).



Gambar 4.55 Skema proses Konsep sistem AMT 2 untuk umpan dengan supersaturasi rendah.

Presipitasi $CaCO_3$ dilakukan pada proses pengendapan (presipitasi statik) sehingga akan membutuhkan waktu presipitasi hingga 96 jam dan tingkat presipitasi optimum yang dicapai pada presipitasi statik ini mencapai 64,4 % (gambar 4.42). Sebagai perbandingan, jika pengolahan air sadah hanya menggunakan agitasi mekanik (sirkulasi tanpa magnetisasi) maka penurunan ion Ca^{2+} yang dicapai adalah 44,3 %, dan jika tanpa magnetisasi dan tanpa agitasi mekanik, maka penurunan ion Ca^{2+} hanya mencapai 15,3 % (gambar 4.42).

Hasil uji deposit yang terbentuk pada kondisi ini menunjukkan terjadi penurunan deposit dibanding sampel non-magnetisasi hingga 18,4 %. AMT 2 memiliki kelebihan tidak membutuhkan peralatan untuk agitasi mekanik (pompa/pengaduk) dan efektif untuk mengolah sampel dengan

supersaturasi rendah. Kelemahan sistem AMT 2 adalah waktu sirkulasi magnetisasi cukup besar ($t_s = 10$ menit dan $t_m = 98,9$ detik), demikian juga dengan waktu pengendapan (96 jam) sehingga untuk kapasitas olah yang sama dengan AMT 1 akan membutuhkan wadah pengendapan yang lebih besar. Selain itu, tingkat penurunan ion Ca ($\Delta(C_a/C_{ai})$) optimum hanya mencapai 64,4 %, jauh lebih rendah dibanding AMT 1 yang mencapai 95 %. Oleh sebab itu, AMT 2 hanya mampu menurunkan kesadahan hingga 58 ppm ion Ca^{2+} untuk umpan air sadah dengan kandungan ion Ca^{2+} sebesar 160 ppm dan pH 6,4. Untuk kondisi umpan yang sama dengan AMT 2 (160 ppm Ca^{2+} dan pH 6,4) maka AMT 1 membutuhkan pretreatment berupa agitasi mekanik selama 40 menit dengan kondisi kecepatan alir 0,554 m/s, dan volume sampel 240 mL untuk menaikkan pH umpan dari 6,4 menjadi 8,5.

Proses AMT 1 dapat menurunkan kesadahan hingga 8 ppm ion Ca^{2+} (gambar 4.54) yang berarti efektif mencapai tingkat kesadahan yang rendah (di bawah 20 ppm) dan memenuhi syarat untuk digunakan sebagai air pendingin (cooling water) sebagaimana yang ditunjukkan pada tabel 4.41. Untuk penggunaan dengan persyaratan yang lebih ketat seperti untuk air umpan boiler, maka proses AMT ini dapat dikombinasikan dengan proses lain seperti penukar ion (ion exchange), dimana proses AMT berperan sebagai pretreatment dari air sadah.

Tabel 4.41 Klasifikasi kesadahan air (Hardness) berdasarkan konsentrasi ion Ca^{2+} dalam larutan (kemmer, 1988)

Hardness	[Ca^{2+}] (ppm)
Soft	0 - 20
Slightly hard	20 - 30
Moderately hard	30 - 60
hard	60 - 120
Very hard	> 120
Cooling water < 16 ppm Ca^{2+}	
Boiler feed water < 0,12 ppm Ca^{2+}	

4.7 Presipitasi $CaCO_3$ pada air sadah alam.

Keberadaan ion-ion lain pada larutan $CaCO_3$ pada dasarnya akan berpengaruh pada kelarutan ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} serta presipitasi $CaCO_3$ -nya. Air sadah yang berasal dari alam (natural hardwater) mengandung mineral terlarut terutama kation-kation logam Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Keberadaan ion Mg^{2+} pada air sadah menekan presipitasi $CaCO_3$ baik di deposit maupun di larutan dan persentase kristal Kalsit meningkat dengan bertambahnya ion Mg^{2+} di larutan (Chen *et al*, 2004). Kehadiran ion logam lain seperti Fe^{2+} dapat menekan presipitasi $CaCO_3$ dan meningkatkan persentase kristal Aragonit yang terbentuk (Herzog *et al*, 1989).

Beberapa peneliti telah melaporkan secara kualitatif bahwa medan magnet meningkatkan presipitasi dari larutan elektrolit pada kondisi lewat jenuh. Jens Skytte (2000) mendapatkan adanya peningkatan presipitasi $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dengan adanya medan magnet. Holysz (2003) mendapatkan adanya peningkatan laju nukleasi CaCO_3 akibat medan magnet pada larutan air sadah yang mengandung ion-ion, Mg^{2+} , Fe^{2+} , dan SO_4^{2-} , meskipun peningkatan presipitasi CaCO_3 yang terjadi lebih rendah jika dibandingkan dengan air sadah yang hanya mengandung ion Ca^{2+} dan CO_3^{2-} . Untuk pengembangan aspek keilmuan, diperlukan penelitian lebih lanjut secara kuantitatif tentang seberapa besar pengaruh ion-ion yang terkandung pada air sadah alam (Mg^{2+} , Fe^{2+} , dan SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) terhadap presipitasi CaCO_3 pada air sadah termagnetisasi. Untuk aspek aplikasi, penggunaan air sadah alam pada Sistem AMT yang diusulkan pada penelitian ini perlu dilakukan guna mendapatkan seberapa jauh efektivitas sistem AMT ini dalam menurunkan kesadahan.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Magnetisasi air sadah mempengaruhi interaksi hidrat ion dan interaksi ion serta presipitasi CaCO_3 baik pada sistem fluida statik maupun dinamik. Magnetisasi larutan CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik meningkatkan presipitasi CaCO_3 dengan sifat deposit yang lebih mudah lepas dari dinding. Hal tersebut memberikan peluang besar bagi pengembangan suatu sistem AMT yang efektif dalam menurunkan kesadahan dan pencegahan kerak pada air sadah.

Magnetisasi larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 sistem fluida statik menimbulkan efek penguatan interaksi hidrat ion dan menurunkan presipitasi CaCO_3 . Efek penguatan hidrat ion ini dapat bertahan hingga 120 jam setelah magnetisasi. Untuk sistem fluida dinamik terjadi efek pelemahan interaksi ion dan menaikkan presipitasi CaCO_3 . Efek pelemahan hidrat ion ini dapat bertahan hingga 72 jam setelah magnetisasi. Waktu magnetisasi, kuat medan, konsentrasi, dan suhu larutan mempengaruhi besarnya penurunan presipitasi CaCO_3 pada fluida statik. Untuk fluida dinamik, waktu magnetisasi, kuat medan, konsentrasi, kecepatan aliran, dan suhu larutan akan mempengaruhi besarnya kenaikan presipitasi CaCO_3 . Kalsit mendominasi kristal deposit yang terbentuk dan magnetisasi tidak mengubah kekuatan deposit menempel di dinding. Sampel termagnetisasi memiliki ukuran kristal yang lebih besar dan jumlah partikel yang lebih sedikit dibanding sampel tanpa magnetisasi untuk fluida statik.

Efek penguatan hidrat ion pada sistem fluida statik menaikkan energi aktivasi (E_a) pembentukan CaCO_3 dari 42,6 kJ/mol menjadi 49,6 kJ/mol sedangkan efek pelemahan interaksi hidrat ion oleh medan magnet pada sistem fluida dinamik menurunkan E_a menjadi 21,1 kJ/mol.

Magnetisasi larutan CaCO_3 sistem fluida statik sebelum presipitasi berlangsung memperkuat hidrat ion-ion dan menyebabkan penurunan terhadap presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi. Magnetisasi larutan CaCO_3 saat presipitasi berlangsung menyebabkan peningkatan interaksi ion sehingga mendorong presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Kristal deposit yang terbentuk dari larutan CaCO_3 didominasi oleh Aragonit dan Kalsit. Magnetisasi tidak mengubah kekuatan deposit menempel di dinding.

Magnetisasi larutan CaCO_3 sistem fluida dinamik sebelum presipitasi berlangsung memperlambat hidrat ion-ion dan menyebabkan meningkatnya presipitasi CaCO_3 sesudah proses magnetisasi. Magnetisasi larutan CaCO_3 saat presipitasi berlangsung menyebabkan peningkatan interaksi ion sehingga mendorong presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Kecepatan fluida, waktu magnetisasi, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi, dan volume sampel mempengaruhi efek medan magnet terhadap kenaikan presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi. Efek medan magnet terjadi hanya pada 90 detik pertama proses sirkulasi untuk kuat medan 5,2 kG, kecepatan alir 0,552 m/s,

panjang magnet 0,35 m, konsentrasi Ca^{2+} awal 0,004 M, dan volume sampel 240 mL, sedangkan efek sirkulasi terjadi terus selama 120 menit proses sirkulasi.

Magnetisasi larutan CaCO_3 sistem fluida dinamik menunjukkan terjadi kenaikan persen penurunan deposit. Makin tinggi kuat medan mengakibatkan persen penurunan deposit makin besar. Terjadi kenaikan persen penurunan deposit dari 6,6 % pada 2 kG menjadi 18,4 % pada 5,2 kG. Hal tersebut menunjukkan proses magnetisasi akan menghasilkan jenis deposit yang lebih mudah lepas dari dinding (soft scale).

Pengembangan model persamaan fraksi ion Ca^{2+} yang tidak terpresipitasi sebagai fungsi waktu presipitasi untuk sistem sirkulasi fluida dinamik adalah :

$$\frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{Ca}^{2+}]_i} = \frac{K_1}{K_1 + K_2} + \frac{K_2}{(K_1 + K_2)[\text{Ca}^{2+}]_i} \exp(-(K_1 + K_2)t_m)$$

Dimana : $t_m = \frac{A L_m t_s}{V}$; $K_1 = (k_0 B^m \cdot v^n)$; dan $\ln K_2 = a \ln t_s + b$

Koefisien a dan b merupakan fungsi kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi larutan, dan volume sampel yang nilainya didapat melalui metode regresi linier dari data percobaan dengan nilai korelasi data R^2 berkisar antara 0,96 hingga 0,99. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan alir, kuat medan, dan konsentrasi sampel mempengaruhi waktu efektif magnetisasi (t_{me}) dan penurunan ion Ca^{2+} ($\Delta(C_s/C_{ai})_{ef}$). Efek kenaikan kecepatan alir dan penurunan konsentrasi sampel dalam meningkatkan ($\Delta(C_s/C_{ai})_{ef}$) lebih signifikan dibanding efek kenaikan medan magnet. Panjang magnet dan volume sampel hanya mempengaruhi waktu sirkulasi efektif (t_{se}) dan tidak mempengaruhi harga t_{me} dan $\Delta(C_s/C_{ai})_{ef}$.

Ada 2 konfigurasi Sistem AMT yang diajukan dari penelitian ini, pertama adalah sistem AMT untuk mengolah air sadah dengan supersaturasi tinggi melalui tahapan magnetisasi sirkulasi, agitasi mekanik dan pengendapan (AMT 1), kedua adalah sistem AMT untuk mengolah air sadah dengan supersaturasi rendah melalui tahapan magnetisasi sirkulasi dan pengendapan (AMT 2). AMT 1 memiliki kelebihan waktu proses magnetisasi yang lebih singkat, penurunan kesadahan yang lebih tinggi, dan area pengolahan lebih kecil dibanding AMT 2 sehingga efektif menurunkan kesadahan. AMT 2 tidak memerlukan proses agitasi mekanik dan mampu menurunkan kesadahan pada air sadah dengan supersaturasi rendah.

5.2 SARAN

Pengujian menggunakan air sadah alam pada sistem AMT yang diusulkan pada penelitian ini perlu dilakukan guna mengetahui efektifitas proses dalam menurunkan kesadahan. Hal ini dilakukan mengingat keberadaan ion-ion lain seperti Mg^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , dsb, dalam air sadah alam dapat mempengaruhi presipitasi CaCO_3 .

DAFTAR ACUAN

- Al-Qahtani, H. 1996. Effect of magnetic treatment on Gulf seawater. *Desalination*, (107) : 75-80.
- Abdel-Aal, N., K, Satoh., K, Sawada. 2002. Study of the adhesion mechanism of CaCO₃ using a combined bulk chemistry/QCM technique. *Journal of Crystal Growth*, (245) : 87-100.
- Azuma, N., Kunihiro, T., K, Ishizu. 2000. Detection and a possible mechanism of magnetic field effect on the crystal growth of sedimentary calcium carbonate. *Pathophysiology*, (7) : 83-89.
- Baker, J. S., Simon, J. J., 1996. Review paper : Magnetic Amelioration of Scale Formation. *Water Research*, (30) : 247-260.
- Baker, J.S., Simon, J.J., Simon, A.P. 1997. Antiscale magnetic pretreatment of reverse osmosis feedwater. *Desalination*, (110) : 151-166.
- Ben Amor, M., Zgolli, D., M, Tlili., Manzola, A S. 2004. Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation. *Desalination*, (166) : 79-84.
- Busch, K., Busch, M.A. 1997. Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. *Desalination*, (109) : 131-148.
- Botello-Zubiate, M.E., Alvarez, A., Mart'inez-Villafañe A. 2004. Influence of magnetic water treatment on the calcium carbonate phase formation and the electrochemical corrosion behavior of carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds*, (369) : 256-259.
- Barret, R.A., Simon, A, P. 1998. The influence of Magnetic Fields on Calcium Carbonate Precipitation. *Water Research*, (32) : 609-612.
- Coey, J.M.D., Cass, S. 1999. Magnetic water treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (209) : 374-379.
- ^aChibowski, E., Lucyna Holysz., A, Szczes. 2003. Time dependent changes in zeta potential of freshly precipitated calcium carbonate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, (222) : 41-54.
- ^bChibowski, E., Lucyna Holysz., Szczes A, Chibowski, M. 2003. Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, (225) : 63 -73
- ^cChibowski, E., Lucyna Holysz., Szcze, A. 2003. Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. *Water Research*, (37) : 4685-4692.
- Chen, T., Nevillea, A.T., Mingdong Yuan. 2005. Calcium carbonate scale formation assessing the initialstages of precipitation and deposition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (46) : 185-194.
- Cho, Y.I., Lee S.H., 2005. Reduction in the Surface Tension of Water Due to physical water treatment for fouling control in heat Exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (32) : 1-9.
- Dawe, R.A., Zhang, Y. 1997. Kinetics of calcium carbonate scaling using observations fromglass micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (18) : 179-187.
- Elfil, H., Roques, H., 2001. Role of hydrate phases of calcium carbonate on the scaling phenomenon. *Desalination*, (137) : 177-186.

- Fathi, A., Tlili, M., Gabrelli, C., Maurin, G., Ben Amor, M. 2006. Effect of magnetic water treatment on homogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research* (40) : 1941-1950.
- Fathi, A, Tlili, M., Gabrelli, C., Maurin, G., Ben Amor, M. 2007. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination*, (206) : 163-168.
- Gulkov, A.N., Minaev. 1996. Magnetic Field Sea Water Treatment in Ocean Engineering Systems. *IEEE Soviet Publication*, 1376-1377.
- Gabrielli, C., R, Jaouhari., G, Maurin, M, Keddad. 2001. Magnetic Water Treatment for Scale Prevention. *Water Research*, (35) : 3249-4359.
- Gabrielli, C., G, Maurin., G, Poindessous., R, Rosset. 1999. Nucleation and growth of CaCO₃ by an electrochemical scaling process. *Journal of Crystal Growth*, (200):236-250.
- Gehr, R., Z.A, Zhai., J.A, Finch., , S.R, Rao. 1995. Reduction of soluble mineral concentration in CaSO₄ Saturated Water Using Magnetic Field. *Water Research*, (29) : 933 - 940.
- Higashitani, K., A, Kage., S, Katamura., K, Imai., S, Hatade. 1993. Effects of Magnetic Field on the Formation CaCO₃ Particles. *Journal of Colloid and interface science*, (156) : 90-95.
- Higashitani, K., H, Iseri., K, Okuhara., A, Kage., S, Hatade. 1995. Magnetic Effect on Zeta Potential and Diffusivity on Nonmagnetic Colloidal Particles. *Journal of Colloid and interface science*, (172) : 383-388.
- Higashitani, K., J, Oshitani. 1998. Magnetic Effects on Thickness of Adsorbed Layer in Aqueous Solutions Evaluated Directly by Atomic Force Microscope. *Journal of Colloid and interface science*, (204) : 363-368.
- Herzog, R.E., Qihong, Shi., J.N, Patil., Joseph, L, Katz. 1989. Magnetic Water Treatment: The Effect of Iron on Calcium Carbonate Nucleation and Growth. *Langmuir*, (5) : 861-867.
- Hiemenz, P.C., Raj Rajagopalan. 1997. *Principles of Colloid and Surface Chemistry*. Third Ed, Marcel Dekker Inc, New York, 528
- Holysz, L., E, Chibowski., Aleksandra, S. 2003. Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. *Water Research*, (37) : 3351-3360.
- Holysz, L., E, Chibowski., Aleksandra S. 2007. Effects of A Static Magnetic Field on Water and Electrolyte Solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, (316) : 2065-2070.
- Jena, A. K., Chaturvedi, M.C., 1992. *Phase Transformations in Materials*. First Ed, Prentice-Hall Inc, New Jersey, p : 107.
- Jens Skytte, S., H.L, Madsen. 2000. The influence of magnetism on precipitation of calcium phosphate. *Journal of Crystal Growth*, (216) : 399-406
- Knez, S., Ciri Pohar. 2005. The magnetic field influence on the polymorph composition of CaCO₃ precipitated from carbonized aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, (281) : 377-388.
- Koutsoukos, P.G., E, Dalas. 1989. The Effect of Magnetic Fields on Calcium Carbonate Scale Formation. *Journal of Crystal Growth*, (96) : 802-806.
- Kozic, V., L.C, Lipus. 2003. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale. *Journal of Chemical. Inf. Computer Science*, (43) : 1815-1819.
- Kemmer, F. N. *The NALCO Water Handbook*. 1988. 2nd Ed, New York : McGraw-Hill Book Co.
- Kobe, S., G, Draz'ic., P.J, McGuinness., T.E, Medena. 2003. Control over nano crystallization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Materials Science and Engineering*, (C 23) : 811- 815.

- Kobe, S., G, Drazic, A.C, Sarantopoulou. 2002. Nucleation and crystallization of CaCO_3 in applied magnetic fields. *Crystal Engineering*, (5) : 5243-253.
- Kobe, S., G, Drazic, P.J, McGuinness, J, Strazisar. 2001. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (236) : 71- 77.
- Kney, A.D., S.A, Parsons. 2006. Spectrophotometer-based study of magnetic water treatment : Assessment of ionic vs surface mechanisms. *Water Research*, (40) : 517-524.
- Kronenberg, K.J. 1985. Experimental Evidence for Effects of Magnetic Field in Moving Water. *IEEE Transactions on Magnetics* vol. MAG-21, NO. 5, 2059-2061.
- Lipus, L. C., J, Krope., L, Crepinsek. (2001). Dispersion Destabilization in Magnetic Water Treatment. *Journal of Colloid and Interface Science* 236, 60 – 66.
- Li, R., Zhanpeng Jiang., Hongwei Yang., Yuntao Guan. 2006. Effects of Ions in Natural Water on the ^{17}O NMR Chemical Shift of Water and Their Relationship to Water Cluster. *Journal of Molecular Liquids*, (126) : 14-18.
- Lundager, Madsen, H.E. 1995. Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *Journal of Crystal Growth*, (152) : 94-100.
- Lundager, Madsen, H.E. 2004. Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water. *Journal of Crystal Growth*, (267) : 251-255.
- Lyashchenko, A.K. 2001. Concentration transition from water-electrolyte to electrolyte-water solvents and ionic clusters in solutions. *Journal of Molecular Liquids*, (91) : 21-31.
- Oshitani J, R,Uehra., K, Highashitani. 1999. Magnetic Effects on Electrolyte Solutions in Pulse and Alternating Fields. *Journal of Colloid and Interface Science*, (209) : 374-378.
- Parsons, S.A., Wang, B., Judd, S.J., Stephenson, T. 1997. Magnetic treatment of Calcium Carbonate scale effect of pH control. *Water Research*, (31) : 339-344.
- ^aSaksono, N., Setijo, B., Elsa, K., Roekmijati, W. 2006. Pengaruh Medan Magnet pada Presipitasi CaCO_3 Untuk Pencegahan Pembentukan kerak. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia* vol 5 No.2
- ^bSaksono, N., Setijo, B., Elsa, K., Azwar, M., Roekmijati, W. 2006. Pengaruh Medan Magnet terhadap Proses Presipitasi CaCO_3 dalam Air Sadah. *Makara Seri Teknologi* vol 10.
- ^cSaksono, N., A, Fauzi., Setijo, B., Azwar, M., Roekmijati, W.S. 2007. Effect of magnetic field on Calcium Carbonate precipitation in static and dynamic fluid systems. *14th Regional Symposium Chemical Engineering*
- ^dSaksono, N., Muhammad, H., Setijo, B., Roekmijati, W. 2007. Pengaruh Medan Magnet terhadap Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta Presipitasi dan Morfologi Partikel CaCO_3 Pada Sistem Fluida Statis. *Jurnal Teknologi* No 4 Tahun XXI.
- ^eSaksono, N., Elisabeth, A. S., Setijo, B., Roekmijati, W., Azwar, M. 2007. Efek Medan Magnet pada Penurunan Kesadahan dan Pencegahan Pembentukan Kerak CaCO_3 . *Jurnal Sain Materi Indonesia*, Edisi Khusus.
- Saksono, N., Misri, G., Setijo., B, Elsa, K., Roekmijati, W., Seung, K. S. 2008. Effects of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation: Ionic and Particle mechanisms. *Korean Journal of Chemical Eng.* Vol. 25, No. 5
- Vlaev, L.T., S.D, Genieva., M.P, Tavlieva. 2003. Concentration Dependence of The Activation Energy of Conductivity in Aqueous Sodium Selenite and Potassium Tellurite. *Journal of Structural Chemistry*, (44) No.6, 995-1000.

- Vlaev, L.T., Genieva, S.D. 2004. Electron Transport Properties of Ions in Aqueous Solutions of Sodium Selenite. *Journal of Structural Chemistry*, 45 no.5, 825-831.
- Wang, Y., R.J, Pugh., E, Forssber. 1994. The influence of particle surface force on the coagulation of weakly magnetic mineral ultrafines in a magnetic field. *Colloid and Surface A: Physical and Engineering Aspects*, (90) : 117-133.
- Wang, Y., A.J, Babchin., L.T, Cherny., R.S, Chow., R.P, Sawatzky. 1997. Rapid Onset of Calcium Carbonate Crystalization Under the Influence of Mangetic Field. *Water Research*, (31) : 346-350.
- Wang, H., Fei, Wu., Yung Ngothai., Brian O'Neill. 2004. A kinetic model of the Fe^{2+} oxidisation process for colour enhancement in natural marble. *Materials Chemistry and Physics*, (86) : 51-58
- Wright, M.R. 2007. *An Introduction to Aqueos Electrolyte Solution*, Wiley and Sons, 527.



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Nelson Saksono
Tempat & tanggal lahir : Jakarta, 8 Nopember, 1967
Jenis kelamin : Laki-laki
Kebangsaan : Indonesia



Pendidikan Formal

1. Sarjana Teknik, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (1992)
2. Magister Teknologi Gas, Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia (1995)

Pekerjaan

1992 – sekarang: Staf Pengajar Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Hasil Publikasi

A. Jurnal Internasional

Nelson Saksono, Misri Gozan, Setijo Bismo, Elsa Krisanti, Roekmijati Widaningrum and Seung Koo Song. 2008. Effects of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation: Ionic and Particle mechanisms. Korean Journal of Chemical Eng. Vol. 25, No. 5 – 2008

B. Jurnal Nasional

1. Nelson Saksono, Setijo Bismo, Elsa Krisanti, dan Roekmijati Widaningrum. Pengaruh Medan Magnet pada Presipitasi CaCO_3 Untuk Pencegahan Pembentukan kerak. Jurnal Teknik Kimia Indonesia vol 5 No.2 Agustus 2006.
2. Nelson Saksono, Setijo Bismo, Elsa Krisanti, Azwar Manaf, dan Roekmijati Widaningrum. Pengaruh Medan Magnet terhadap Proses Presipitasi CaCO_3 dalam Air Sadah. Makara Seri Teknologi vol 10, 2006.
3. Nelson Saksono, Elisabeth A. S., Setijo Bismo, Roekmijati W, dan Azwar Manaf. Efek Medan Magnet pada Penurunan Kepadatan dan Pencegahan Pembentukan Kerak CaCO_3 . Jurnal Sain Materi Indonesia Edisi Khusus oktober 2007.
4. Nelson Saksono, M Husni Mubarak, Roekmijati Widaningroem Soemantojo, Setijo Bismo. Pengaruh Medan Magnet terhadap Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta Presipitasi dan Morfologi Partikel CaCO_3 Pada Sistem Fluida Statis. Jurnal Teknologi No 4 Tahun XXI, 2007.

5. Nelson Saksono. Magnetisasi Air Sadah Untuk Pencegahan Pembentukan Kerak (Review pra-kualifikasi), Jurnal Teknologi No 4 Tahun XX, 2006.

C. Seminar Internasional

Nelson Saksono, Achmad Fauzie, Setijo Bismo, and Roekmijati W S. Effect of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation in Static and Dynamic Fluid Systems. 14th Regional Symposium of Chemical Engineering 2007.

Pubikasi lainnya

1. Saksono. N, Krisanti.E, Noorsaman A, 1996. "Determination of Catalyst Basic Using Electro negativity Data", Regional Symposium on Chemical Eng. Jakarta.
2. Saksono. N, Noorsaman A, 1996, "Selectivity of Oxidative Catalyst Material Kopleng Methane on Knowledge Base, Journal of Technology FTUI,.
3. Saksono N, Roekmijati W, Jannah P, 1997 "Heat Effect due to Stability of Natural & Synthesis Zeolite with Ammonium Acetate and Ammonium Hydroxide Solution ", Journal of Technology FTUI.
4. Saksono. N, "Studi Pengaruh Proses Pencucian Garam Terhadap Komposisi Dan Stabilitas Yodium Garam Konsumsi ", Makara UI Seri Teknologi, vol 6 No. 1, April 2002
5. Saksono. N, "Analisis Iodat Dalam Bumbu Dapur Dengan Metode Iodometri dan X-Ray Fluoresence", " Makara UI Seri Teknologi, vol 6 No. 3 Desember 2002
6. Saksono N, 2003, "Stabilitas Yodium Pada Cabai Ketumbar Dan Merica" , Jurnal Gaky Indonesia vol 4, No 2 .
7. Saksono, N , Slamet, 2003, "Phenol Degradation by Photocatalytic Process on Titianium Oxide Catalyst'., 7 th International Conference ICCRD, Mansoura, Egypt,
8. Saksono N, 2004 " Pembuatan Bio-Oil Sebagai Bahan Bakar Alternatif Melalui Proses Pirolisis Cepat Pelepa Sawit", Journal Teknologi FTUI. Tahun XVIII,
9. Saksono N, 2004 " Efek Magnetisasi Terhadap Perubahan Karaktersitik Air ", Seminar Teknik Kimia Soebardjo Brotoharjono, Jurusan Teknik Kimia UPN Veteran Jawa Timur, Surabaya..
10. Khalid M, Saksono N, 2004," A Study of Influence of Monopole Magnetization System on Kerosine Characteristics", The 7 th International Conference Quality in Research, FTUI & IEEE, Depok.
11. Saksono N, Setijo B, 2005 " Pengaruh laju alir dan tegangan listrik terhadap proses pengayaan oksigen dari udara menggunakan medan magnet', Seminar Nasional Teknologi Proses Kimia VII, Jakarta.
12. Saksono N, Setijo B, 2005, "Studi Pendahuluan Proses Pengayaan Oksigen dari udara menggunakan medan elektromagnet,," Seminar Tciptu Utomo vol 4, Bandung.
13. Saksono S " Magnetizing Kerosine For Increasing Combustion Efficiency", Jurnal Teknologi , Edisi 4 Tahun XVIII, Agustus 2005.

Lampiran A : Ringkasan hasil-hasil penelitian AMT

Referensi	Sistem	Sampel Larutan	Sumber dan Kuat medan Magnet	Waktu Magnetisasi	Laju alir	Orientasi Magnet	Parameter Uji	Hasil
Hasson D, et.al, 1985.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	Air sadah nyata (Ca :250 ppm, Mg : 175 ppm, Alkalinity : 340 ppm, TDS : 900 ppm)	6 pasang Magnet Komercial Permanen	15 -35 jam	2m/s	Orthogonal flow	Deposit growth (gr) selama proses pengujian	Tidak ada efek signifikan terhadap deposit growth
Kronenberg, K.J, 1985.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	Sample solar heater dan cooling tower dengan TDS 500 - 1800 ppm	6 pasang magnet inversi 0,1 Ta	0 - 25 pass	1 - 6 m/s	Orthogonal flow	Struktur deposit menggunakan mikroskop	Terjadi penurunan struktur kristal prismatic pada deposit hingga 80 %
Higashimi K, et al, 1993.	Statik /MTBPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit	Electromagnet 0 - 0,6 T	0 - 30 menit		orthogonal	Absorbansi, jumlah, dan ukuran kristal, jenis kristal	Terjadi penurunan absorbansi, jumlah kristal dan penambahan ukuran kristal
Lundager Madsen H E, 1995	Statik/MTIPP	CaCl ₂ , NaHCO ₃ , MgCl ₂ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , MnSO ₄ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , ZnSO ₄ , CoCl ₂ , H ₂ SO ₄ , Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O	Electromagnet 0,27 T			orthogonal	Ukuran dan jenis kristal	Medan magnet hanya berpengaruh pada diamagnetic salt (CaCl ₂ , NaHCO ₃ dan MgCl ₂ , NH ₄ H ₂ PO ₄) dimana ukuran kristal menurun
Gulkov A N, et al, 1996.	Dinamis/MTIPP	CaSO ₄ .2H ₂ O dalam larutan dengan konsentrasi 0,017 M	Electromagnet 4,75 T		1200 rpm	Orthogonal flow	Ion Ca, potensial zeta, TSS, konduktiviy	Tejadi penurunan Ion Ca, potensial zeta, TSS, conductivity yg menunjukkan peningkatan precipitasi CaSO ₄
Al Qahitani H, 1996.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	Seawater (TDS 43000 ppm)	Permanent magnet tube 0,7 T			Paralel flow	Konduktiviy dan pH	Magnetisasi menaikkan konduktiviy dan pH dan meningkatkan pemisahan garam ketika melewati membran (clustering / nucleation
Parsons S A, et al, 1997.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	NaHCO ₃ dan CaCl ₂ degan konsentrasi Ca 300 ppm dan alkalinity 300 ppm, pH dikontrol dg NaOH	Electromagnet 0,7 T		15 l/m ² /min	Orthogonal flow	pH dan laju scaling	Magnetisasi menurunkan pH, jika pH dikontrol konstan, maka efek magnetisasi menghilang

MTDPP : Magnetic treatment during precipitation process ; MTBBB : Magnetic treatment before precipitation process

Lampiran A : Ringkasan hasil-hasil penelitian AMT

Referensi Ref	Sistem	Sampel Larutan	Sumber dan Kuat medan Magnet	Waktu Magnetisasi	Laju alir	Orientasi Magnet	Parameter Uji	Hasil
Wang, Y, et al, 1997	Statik/MTIPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit	Permanen magnet 0,2 T	30 menit		Orthogonal	Turbidity Jumlah dan ukuran kristal	Magnetisasi meningkatkan laju nukleasi, menambah jumlah kristal dan menurunkan ukuran kristal.
Baker J S, et al, 1997	Dinamik / MTIPP, sirkulasi dan non sirkulasi	CaCl ₂ dan NaCO ₃ deg kesadahan 200 pm dan pH dikontrol dg NaOH	Permanen Magnet 0,6 T		8 - 16 lit/jam	Orthogonal flow	Ukuran dan jenis kristal, berat kerak yg terbentuk	Magnetisasi dapat meningkatkan jumlah salt tertolak dalam sistem RO pada sistem sirkulasi . meningkatkan ukuran dan pertumbuhan kristal.
Barret R A, et al, 1998.	Statik /MTBPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit	Electromagne t 0 - 0,45 T	30 menit		orthogonal	Absorbansi, dan jumlah, dan ukuran kristal, jenis kristal	Terjadi penurunan absorbansi, jumlah kristal dan penambahan ukuran kristal
Higashimi K, et al, 1998.	Statik /MTBPP	Elektrolite monovalent 0,004 M	Permanen magnet 0,42 T	0 - 30 min		Orthogonal	Interaction force	Mangetisasi menurunkan laju koagulasi , potensil zeta koef difusi. Memory effect akan hilang dengan naiknya suhu dan penambahan alkohol, Terjadi penebalan adsorber layer.
Coey J M D, et al, 1999	Dinamik / MTIPP	Fresh ground water dengan kandungan ion Ca 132 ppm	Permanen magnet 0,1 T dan gradien 10 T/m		0,04 - 1,2 m /s	Orthogonal	Struktur kristal dan komposisi	Terjadi peningkatan komposisi kristal aragonit setelah dimagnetisasi, hingga 23 %
Jens Skytte S, et al, 2000	Statik/MTIPP	CaCl ₂ dan KH ₂ PO ₄	Eelctromagne t 0,08 - 0,3 T			orthogonal	pH, struktur kristal	Medan magnet meningkatkan nukleasi dan kristalisasi CaSO ₄ serta menurunkan pH
Azuma, N et al, 2000.	Statik/MTIPP	Ca(NO ₃) ₂ dan NaHCO ₃	Electromagne t 0,4 T	700 s		Paralel	Absorbansi	Terjadi peningkatan absorbansi. Efek Magnetik teramati pada tahap akhir precipitasi (tahap pertumbuhan kristal)

MTDPP : Magnetic treatment during precipitation process MTBBB : Magnetic treatment before precipitation process

Lampiran A : Ringkasan hasil-hasil penelitian AMT

Referensi	Sistem	Sampel Larutan	Sumber dan Kuat medan Magnetisasi	Waktu Magnetisasi	Laju alir	Orientasi Magnet	Parameter Uji	Hasil
Gabrielli C, et al, 2001.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	CaCO ₃ powder + bubbling CO ₂ Ion Ca = 200 ppm	7 pasang Magnet permanen 0,16 T	0 - 30 min	0 - 3,6 m/s	Orthogonal flow	Ion Ca, berat kerak	Terjadi penurunan ion Ca, dan peningkatan berat kerak, nucleation & scaling time sebagai fungsi kecepatan aliran, jumlah dan orientasi magnet
Kobe S, et al, 2001.	Dinamik / MTIPP	Ca(HCO ₃) ₂ powder + bubbling CO ₂ In CA 300 ppm	Electromagnet 0,5 - 1,3 T		0,1 m/s	Untuk Patent	Komposisi Kristal	Terjadi peningkatan aragonite sebesar 30 % dan penurunan kalsit 20 %. Kinerja alat jauh lebih baik dibanding produk komersial
Kobe S, et al, 2002.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	Ca(HCO ₃) ₂ powder + bubbling CO ₂ In CA 300 ppm	Electromagnet 0,4 - 1,3 T	8 jam	0,87 m/s		Komposisi kristal	Terjadi peningkatan aragonite sebesar 61 % dengan kuat medan 1220 mT
Hoylsz, L, et al, 2003.	Statik/ MTBPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit, FeCl ₂ ·4H ₂ O, MgCl ₂ ·6H ₂ O	Magnet permanen 0,5 T	20 min		Orthogonal	Potensial zeta, pH, Absorbansi,	Magnetisasi menurunkan Potensial zeta, pH dan absorbansi. Terjadi perubahan hidrasi shell
^c Chibowski E, et al, 2003.	Statik/ MTIPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit	Magnet permanen (s-s pole) 0,1 T	2 jam		orthogonal	Bentuk kristal, berat hard kerak	Magnetisasi menyebabkan penurunan berat kerak, semakin tinggi suhu, kerak keras yg terbentuk berkurang
^a Chibowski, E et al, 2003.	Statik dan dinamik / MTBPP	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit	Magnet Permanen (s-s pole) 0,1 T	5 - 70 min	4 lit/min	Orthogonal flow	Potensial zeta, pH, Absorbansi	Magnetisasi mempengaruhi tahap nukleasi, untuk srikulasi 70 min terjadi penurunan ukuran kristal. Terjadi perubahan pH dan Potensial Zeta.
^b Chibowski E, et al, 2003.	dinamik/ MTBPP/ recycle flow	CaCl ₂ dan NaCO ₃ 0,008 mol/lit, FeCl ₂ ·4H ₂ O, MgCl ₂ ·6H ₂ O	Magnet permanen (s-s pole) 0,4 T	30 min	20,7 ml/min	Orthogonal flow	Potensial zeta, pH, Absorbansi	Perubahan zeta, pH dan absorbansi tergantung konsentrasi CaCl ₂ dan NaCO ₃

MTDPP : Magnetic treatment during precipitation process MTBBB : Magnetic treatment before precipitation process

Lampiran A : Ringkasan hasil-hasil penelitian AMT

Referensi	Sistem	Sampel Larutan	Sumber dan Kuat medan Magnet	Waktu Magnetisasi	Laju alir	Orientasi Magnet	Parameter Uji	Hasil
Lundager Madsen H, E., 2004.	Statik/ MTIPP	CaCl ₂ .2H ₂ O dan NaHCO ₃ 0,006 mol/lit + ordinary & heavy water	Magnet Permanent & electromagnet 0 – 0,25 T	1 jam			Ukuran kristal,	Terjadi peningkatan pertumbuhan kristal dengan meningkatnya kuat medan , proses ini berhubungan dengan proses transfer proton dari ion HCO ₃ ke ion Ca
Botello-Zubiette, M E et al, 2004.	Statik/ MTIPP	Air sadah ground water dimana Ca ²⁺ : 228 ppm	electromagnet 1T		0,77 m/s		Morfologi kristal	Aragonite yg terbentuk 40 % dan stabil selama 200 jam sesudah treatment, terjadi peningkatan laju korosi
Cho Y I, et al, 2005	Dinamik / MTIPP	Natural Hard water dg Ca ²⁺ : 780 ppm	Permanent magnet 1600 Gauss		1 – 6,3 m/s	Paralel flow	Tegangan permukaan, konsentrasi ion Ca	Terjadi penurunan tegangan permukaan sebesar 8,2 %, Terjadi penurunan kandungan ion Ca hingga 65 %
Knez, S, et al, 2005.	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	Ca(HCO ₃) ₂ powder + bubling CO ₂ CaCO ₃ terlarut 1000 – 1200 ppm	electromagnet 0,71 – 1,12 T	4,2 dan 8,4 min	0,1 – 3 l/min	Orthogonal flow	Potensial zeta, pH, komposisi kristal	Terjadi peningkatan kristal aragonite hingga 71 % pada 1,12 T dan waktu magnetisasi selama 8,4 min
Alimi F, et al, 2006	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	CaCO ₃ powder + bubling CO ₂	7 pasang Magnet permanen 0,16 T	15 – 30 menit	0,54 – 0,94 l/min	Orthogonal flow	Konsentrasi Ca ²⁺ Dengan titrasi EDTA	Terjadi peningkatan presipitasi dengan adanya medan magnet hingga 23 %
Alimi F, et al, 2007	Dinamik / MTIPP/ recycle flow	CaCO ₃ = 400 ppm CaCO ₃ powder + bubling CO ₂ CaCO ₃ = 400 ppm	7 pasang Magnet permanen 0,16 T	15 – 30 menit	0,54 – 0,94 l/min	Orthogonal flow	Konsentrasi Ca ²⁺ Dengan titrasi EDTA	Terjadi peningkatan presipitasi dengan adanya medan magnet sebagai fungsi dan laju alir

MTDPPP : Magnetic treatment during precipitation process MTBBBB : Magnetic treatment before precipitation process

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel

I. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

- Serbuk Na_2CO_3 , CaCl_2 , dan CaCO_3 (*analytical grade*) digunakan sebagai bahan pembuatan air sadah sintetik.
- Larutan HCl 0,1 M untuk pelarut deposit CaCO_3 yang terbentuk
- Larutan standar CaCO_3 , larutan buffer pH 10, larutan Indikator Erio Black-T (EBT) dan larutan EDTA 0,01 M untuk uji titrasi kompleksometri EDTA.
- Gas karbondioksida (HP), digunakan sebagai gelembung gas pada pembuatan larutan CaCO_3 .
- Air bebas mineral (de-min). yang diperoleh dari unit milipore Milli-Q Plus, digunakan sebagai pelarut dalam preparasi bahan.
- Magnet permanen berbasis NdFeB

II. Preparasi bahan :

a. Pembuatan larutan air sadah sintetik:

Pembuatan larutan Natrium Karbonat (Na_2CO_3) 0,01 M dan larutan kalsium klorida (CaCl_2) 0,01 M dilakukan dengan melarutkan masing-masing sebanyak 1060 mg dan 1100 mg dengan air de-min hingga mencapai volum 1000 mL menggunakan labu takar. Pembuatan larutan CaCO_3 dilakukan dengan melarutkan 400 mg serbuk CaCO_3 dalam 1000 mL air demin menggunakan gelas beaker yang telah dilengkapi dengan mixer dan selang gelembung gas CO_2 . Gas CO_2 dialirkan ke dalam larutan CaCO_3 dengan laju 3.50 mL/detik dan mixer diset pada 20 rpm selama 3 - 4 jam hingga pH larutan mencapai 5,6. Penggunaan gas CO_2 bertujuan mempercepat kelarutan serbuk CaCO_3 dalam air de-min.

b. Pembuatan larutan untuk uji titrasi kompleksometri EDTA:

- Larutan standar CaCO_3

Larutan standar CaCO_3 digunakan untuk menstandarisasi volum titrasi EDTA hasil uji konsentrasi ion Ca^{2+} pada larutan air sadah. 500 mg serbuk CaCO_3 ditambahkan 100 ml HCl 0,1 M dan dipanaskan hingga 100 °C untuk memastikan semua CaCO_3 terlarut. Penambahan dengan air demin dan NaOH 0,1 N hingga mencapai 1000 mL dan pH 7 - 8 guna mendapatkan larutan standar CaCO_3 0.01 M.

- Larutan EDTA 0,01 M

Larutan EDTA digunakan sebagai larutan penitar dari sampel larutan air sadah yang akan diukur konsentrasi ion Ca^{2+} nya. Larutan EDTA dibuat dari kristal titripex III ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yang dilarutkan dengan air de-min hingga mendapatkan larutan penitar 0,01 M EDTA

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel

- Larutan Buffer pH 10

Larutan ini berfungsi menahan pH sampel larutan air sadah pada pH basa sebelum ditambahkan indikator Erio Black-T (EBT) yang bekerja pada suasana basa. Buffer pH 10 dibuat dengan melarutkan padatan $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ dan Tritipex III dengan air demin dan selanjutnya dicampur dengan larutan NH_4Cl .

- Larutan Erio Black-T (EBT)

Larutan EBT berfungsi menangkap ion-ion Ca^{2+} pada sampel larutan air sadah yang terlihat dari berubahnya larutan sampel dari bening menjadi merah violet (keunguan). Larutan EBT dibuat dengan menambahkan padatan Hydroxilamin-HCl dan Erio Black-T dalam pelarut etanol.

III. Uji presipitasi $CaCO_3$.

Uji presipitasi pada sampel larutan air sadah dilakukan dalam tabung reaksi yang terbuat dari kaca pyrex dengan volume larutan sampel sebanyak 20 ml. Uji presipitasi dilakukan pada larutan sampel yang disebut uji presipitasi total $CaCO_3$ dan uji presipitasi di dinding tabung yang disebut uji presipitasi deposit $CaCO_3$. Untuk mendapatkan campuran homogen pada pencampuran larutan $CaCl_2$ dan Na_2CO_3 , maka digunakan alat shaker untuk menghomogenkan larutan sampel selama 1 menit pertama presipitasi.

- Uji Presipitasi total $CaCO_3$.

Setelah terjadi presipitasi dalam waktu tertentu larutan sampel dipindahkan labu erlemeyer untuk diukur kandungan ion Ca^{2+} nya. Pertama larutan sampel ditambahkan 2mL larutan buffer 10 untuk membuat suasana basa dimana indikator EBT dapat bekerja. Penambahan indikator EBT sebanyak 2-3 tetes akan menangkap semua ion Ca^{2+} bebas yang ada dilarutan hingga tidak terjadi presipitasi lanjut. Selanjutnya larutan ini dititrasi dengan larutan EDTA dimana molekul EDTA akan menarik kembali ion Ca^{2+} dari indikator EBT hingga warna sampel larutan berubah menjadi biru. Volum tirasi EDTA akan dihitung sebagai jumlah $CaCO_3$ yang belum terpresipitasi dengan rumus :

$$[CaCO_3] = \frac{[EDTA] \times V_{EDTA} \times BM_{CaCO_3} \times \left(\frac{1000mg}{g} \right)}{V_{sampel}}$$

Dengan :

- $[CaCO_3]$: Konsentrasi $CaCO_3$ yang belum terpresipitasi (mg/L)
- $[EDTA]$: Konsentrasi EDTA yg telah distandarisasi (mol/L)
- V_{EDTA} : Volume EDTA yg dibutuhkan untuk menitar larutan sampel (ml)
- V_{sampel} : Volume larutan sampel (mL)

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel

Untuk menentukan persen presipitasi total CaCO_3 digunakan persamaan :

$$\text{Presipitasi total } \text{CaCO}_3 (\%) = \frac{([\text{CaCO}_3]_{t=0} - [\text{CaCO}_3]_t) \times 100}{[\text{CaCO}_3]_{t=0}}$$

Dengan :

$[\text{CaCO}_3]_{t=0}$: Konsentrasi CaCO_3 yang belum terpresipitasi pada $t = 0$ menit (mg/L)

$[\text{CaCO}_3]_t$: Konsentrasi CaCO_3 yang belum terpresipitasi pada t menit (mg/L)

Untuk menghitung harga EDTA yang telah distandarisasi [EDTA] :

$$[\text{EDTA}] = \left(\frac{m\text{CaCO}_3}{\text{BM}\text{CaCO}_3} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ ml/l}}{V\text{CaCO}_{3\text{standar}}} \right) \times \left(\frac{V_{\text{sampel}}}{V_{\text{EDTAstandarisasi}}} \right)$$

Dengan :

[EDTA] = Konsentrasi EDTA yang sebenarnya (mol/L)

$V\text{CaCO}_{3\text{standar}}$ = Volume CaCO_3 standar yang di buat atau Volume CaCO_3 induk (ml)

$m\text{CaCO}_3$ = Massa CaCO_3 standar yang di timbang (g)

BMCaCO_3 = Berat Molekul CaCO_3 (g/mol)

$V_{\text{EDTAstandarisasi}}$ = Volume EDTA yang dibutuhkan untuk menitar CaCO_3 standar (ml)

$V\text{CaCO}_{3\text{sampel}}$ = Volume standar yang dititar dengan EDTA (ml)

- Uji presipitasi deposit CaCO_3 dan perhitungan presipitasi CaCO_3 di larutan
Setelah larutan pada tabung presipitasi dipindahkan, maka akan terdapat partikel padat berwarna putih yang menempel di dinding tabung berupa deposit CaCO_3 . Jumlah deposit CaCO_3 ini dapat dihitung menggunakan titrasi EDTA dengan cara melarutkannya dengan larutan asam HCl 0,1 M sehingga membentuk ion Ca^{2+} . Rumus Perhitungan persen presipitasi CaCO_3 di deposit sama dengan yang digunakan untuk persen presipitasi total. Data presipitasi CaCO_3 dilarutan didapat melalui hasil perhitungan neraca massa presipitasi total CaCO_3 dan presipitasi CaCO_3 di deposit yang dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\text{Presipitasi total } \text{CaCO}_3 = \text{Presipitasi } \text{CaCO}_3 \text{ di deposit} + \text{Presipitasi } \text{CaCO}_3 \text{ di larutan}$$

IV . Uji morfologi Deposit CaCO_3

Uji morfologi Deposit CaCO_3 dilakuan dengan analisis SEM (Scanning electron microscope) dan XRD (X-ray Diffraction). Preparasi sampel deposit CaCO_3 untuk uji SEM dan XRD dilakukan menggunakan kaca preparat yang dicelupkan pada sampel larutan air sadah selama waktu tertentu.

Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel

Partikel CaCO_3 yang menempel pada kaca preparat akan membentuk deposit. Selanjutnya kaca preparat dikeringkan dalam desikator guna menghilangkan kandungan air pada deposit.

• Karakterisasi XRD

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal deposit CaCO_3 dengan mengetahui puncak sampel dan dibandingkan dengan puncak standar. Komposisi kristal Kalsit, Aragonit, dan Vaterit pada kerak CaCO_3 dapat dievaluasi dari data 3 intensitas puncak tertinggi untuk ketiga jenis kristal tersebut. Berikut data sudut difraksi (2θ) masing-masing kristal tersebut untuk jenis tabung anoda Cu ($\lambda=0,154184$):

Kalsit : 29,395°; 47,501°; 48,495°

Aragonit : 26,233°; 45,883°; 27,238°

Vaterit : 27,047°; 32,778°; 50,078°

Persentase masing masing jenis kristal dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan beriku

$$X = [1 + (0,8I_K) / (I_A + I_V)]^{-1}$$

Dengan :

X = Fraksi Berat jenis kristal kalsit pada CaCO_3

I_K , I_A , dan I_V = Intensitas X-ray dari puncak tertinggi kalsit, aragonit, vaterit

Alat yang digunakan adalah X-RD Philips PW 1710 dengan Ni-filtered Cu $K\alpha$ radiation ($\lambda = 0.154184$ nm) pada 40 kV dan 30 mA, Harga 2θ dipindai pada rentang 20° - 60° dengan interval step $0,01^\circ$ dan lama per step 1 detik.

Pengolahan data hasil pengukuran XRD akan dilakukan dengan software PC APD versi 3.5B yang dilengkapi dengan PCPDFWIN versi 2.01 sebagai standard data bank. Untuk mendapatkan pola difraksi sinar-X yang baik dari setiap sampel, maka akan dilakukan fitting terhadap raw data dengan menggunakan PC APD versi 3.5B, kemudian hasilnya dikonversi ke MS-Excel dengan program "Bella".

Ukuran kristal CaCO_3 yang terbentuk dapat dihitung dari full width at half maximum (FWHM) dengan persamaan Scherrer berikut :

$$L = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Dengan : L : ukuran kristal (nm)

K : konstanta dengan nilai 0,89

λ : panjang gelombang radiasi sinar X-Ray (Cu $K\alpha = 0,154184$)

β : lebar dari setengah puncak tertinggi (rad)

θ : sudut difraksi ($^\circ$)

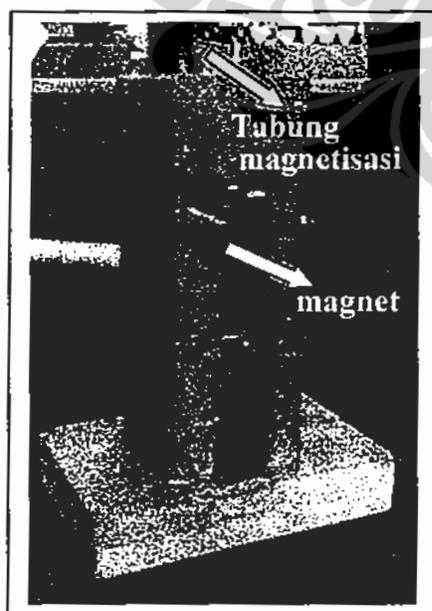
Prosedur preparasi sampel, pengujian sampel, dan analisis sampel

- Uji morfologi SEM

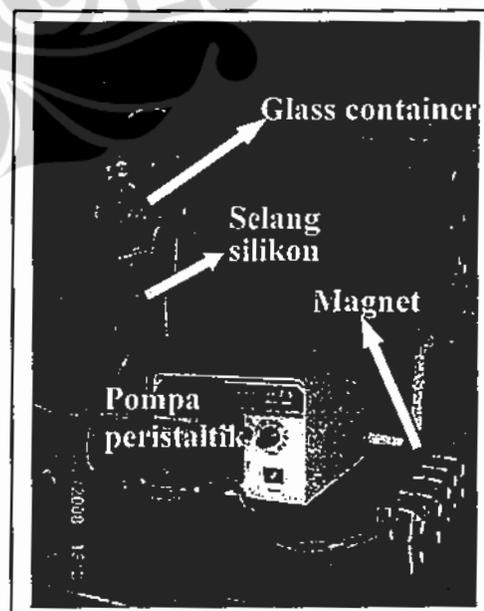
Karakterisasi SEM dilakukan untuk melihat morfologi deposit CaCO_3 , sehingga dapat diketahui jenis, ukuran dan populasi kristal deposit CaCO_3 . Uji morfologi SEM dilakukan menggunakan LEO 420 Oxford PHILIPS pada tegangan operasi 12 KV dan pembesaran hingga 12000 kali. Sampel deposit yang akan di uji dengan SEM terlebih dahulu dilakukan pelapisan (coating) dengan VAu (Vanadium Aurum).

V. Peralatan Magnetisasi

Peralatan magnetisasi terdiri dari dua jenis yaitu magnetisasi fluida statik dan magnetisasi fluida dinamik. Untuk magnetisasi fluida statik, Magnet permanen diletakkan diantara tabung larutan sampel dan disanggah dengan bahan alumunim dan kayu seperti yang terlihat pada gambar B2. Untuk magnetisasi fluida dinamik, magnet permanen yang telah dilapisi alumunim pada bagian luarnya ditempelkan berpasangan pada selang silikon dengan susunan inversi. Selang silikon dengan panjang 2 m dan ID 6 mm dan tebal 2 mm digunakan untuk mengalirkan larutan sampel. Glass container tempat menampung sampel larutan terbuat dari bahan kaca pirex, sedangkan pompa yang digunakan untuk sirkulasi adalah pompa peristaltik Masterfex L/S Cole Parmer model 77200-62. Gambar alat ditunjukkan pada Gambar B2

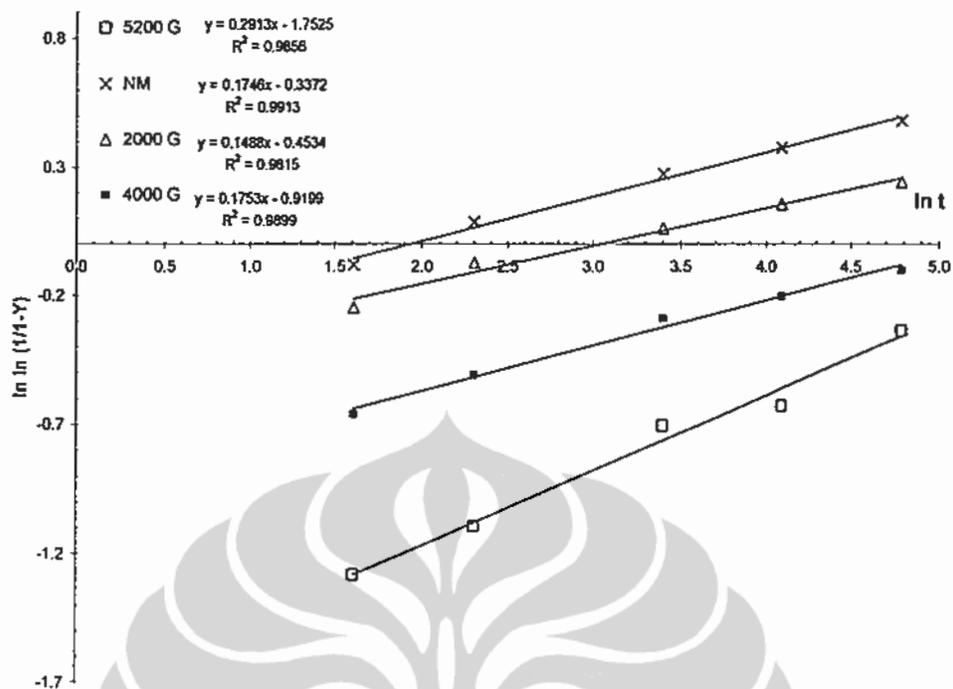


Gambar B2.1. Magnetisasi fluida statik

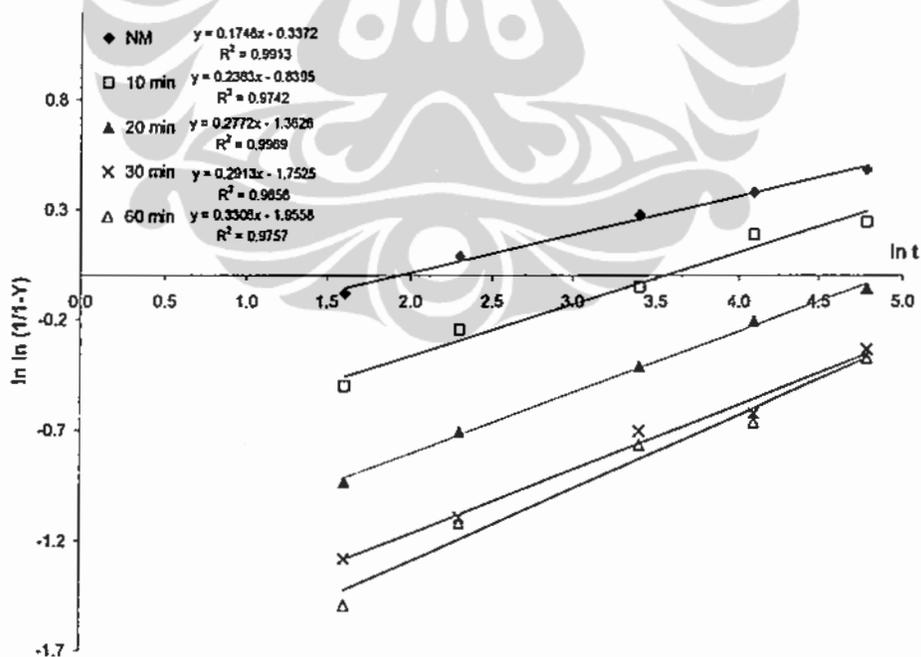


Gambar B2.2 . Magnetisasi fluida dinamik

Kurva dan persamaan Regresi untuk menghitung parameter k , k_0 , n , dan E_a persamaan kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2

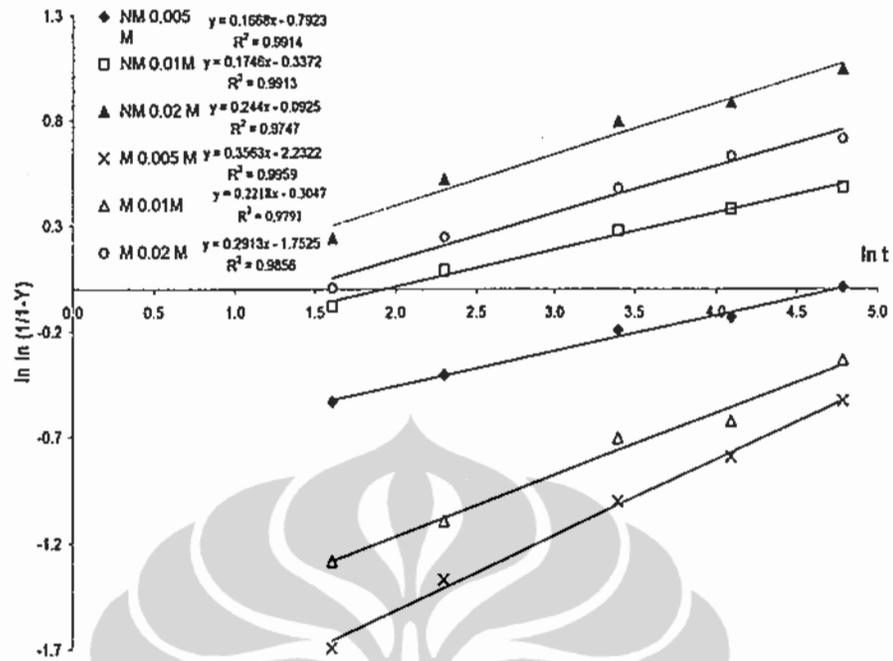


Gambar C1. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ pada berbagai kuat medan dengan Waktu magnetisasi 30 menit dan suhu 28°C sistem fluida statik.

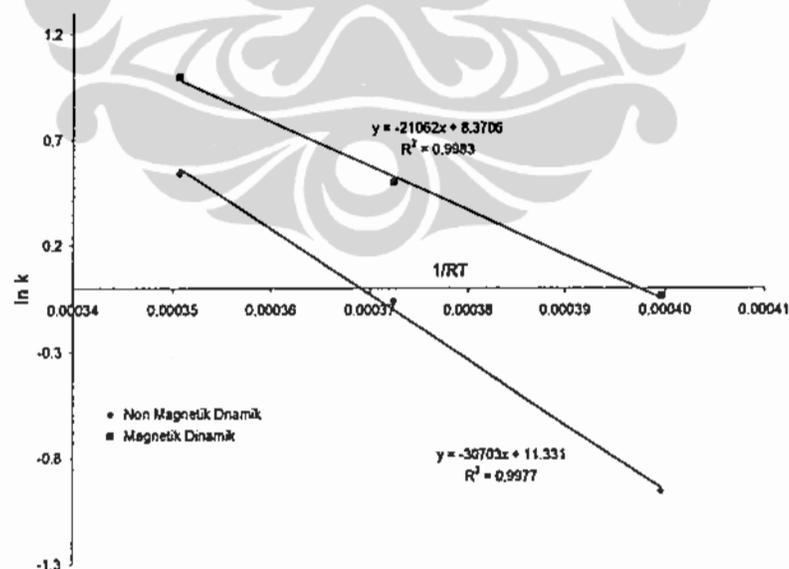


Gambar C2. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1-Y)$ terhadap $\ln t$ pada berbagai waktu magnetisasi dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan suhu 28°C sistem fluida statik

Kurva dan persamaan Regresi untuk menghitung parameter k , k_0 , n , dan E_a persamaan kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2

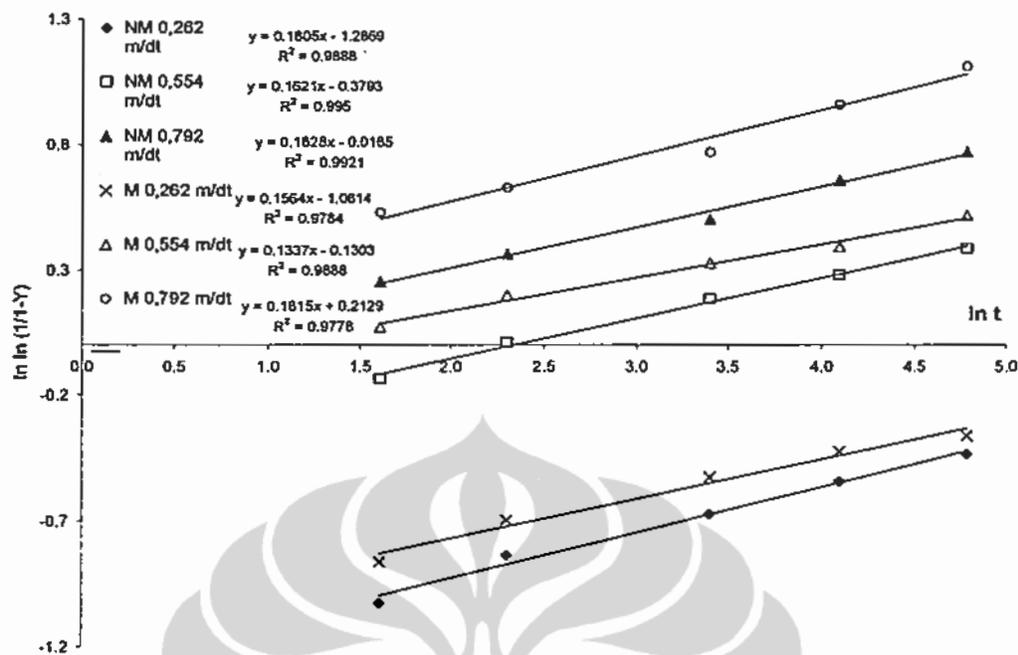


Gambar C3. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ pada berbagai konsentrasi sampel untuk sampel non magnetisasi (NM) dan sampel termagnetisasi (M) dengan $B : 5,2 \text{ kG}$, $T_m : 30 \text{ menit}$ dan suhu 28°C .

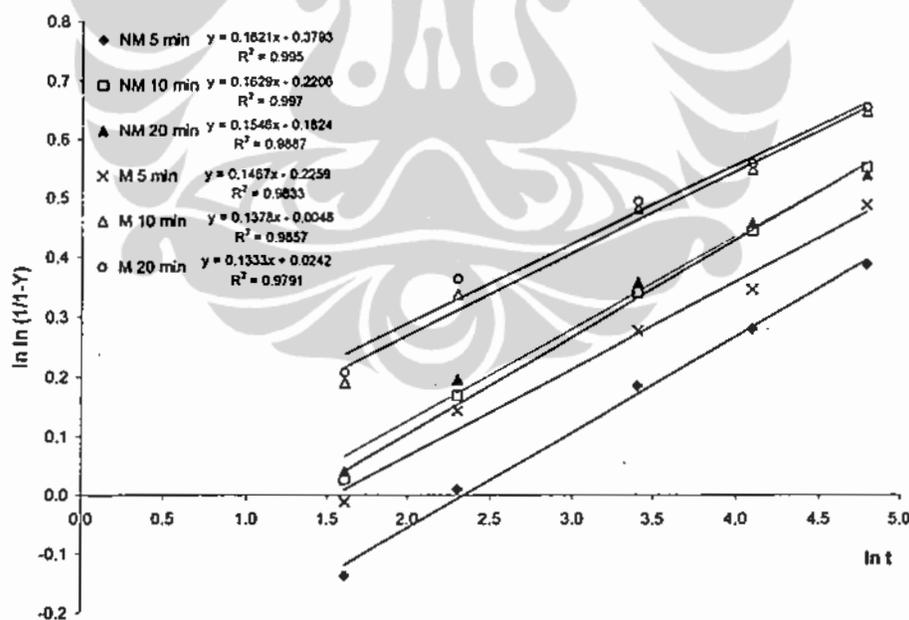


Gambar C4. Kurva persamaan linier $\ln k$ terhadap $1/RT$ waktu sirkulasi 10 menit dan $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,3 \text{ m}$, $v : 0,554 \text{ m/s}$

Kurva dan persamaan Regresi untuk menghitung parameter k , k_0 , n , dan E_a persamaan kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2

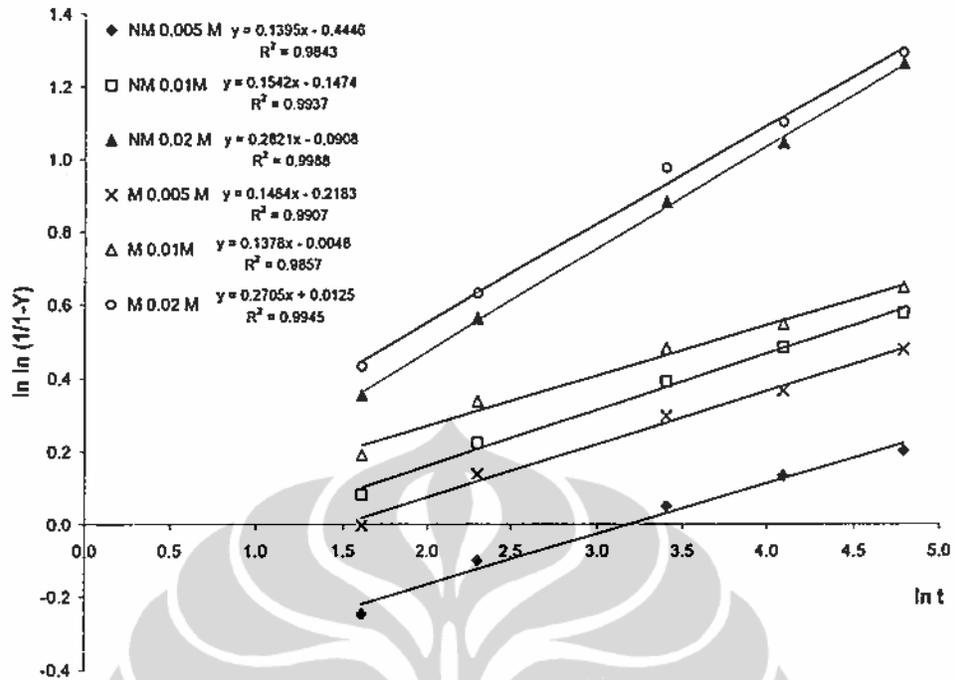


Gambar C5. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ untuk sampel dimagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) pada berbagai kecepatan alir dengan t_s : 5 menit. B : 5,2 kG dan suhu 28 °C.



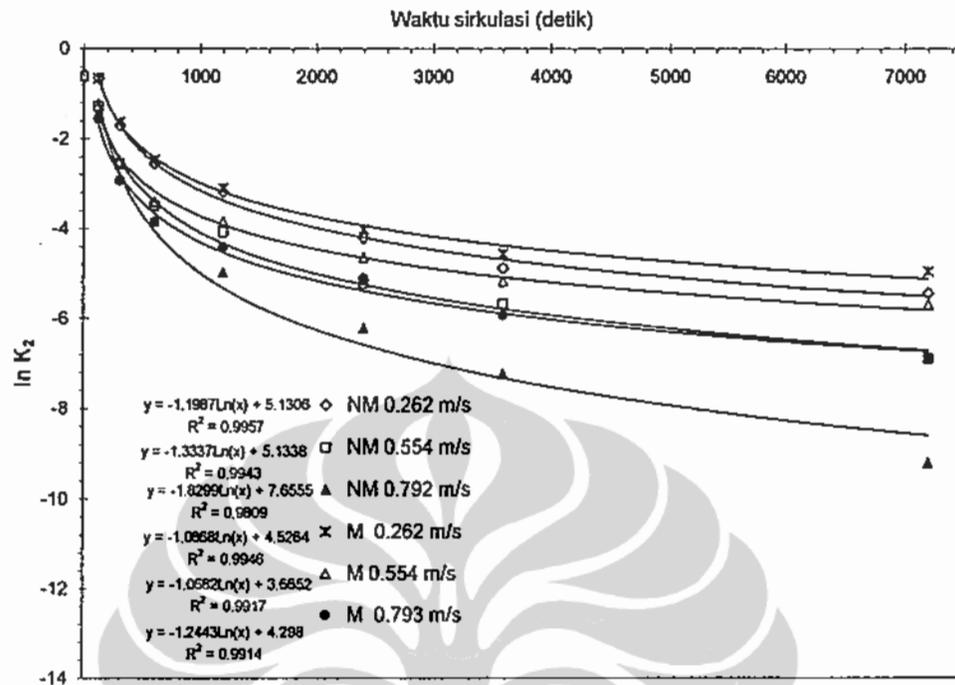
Gambar C6. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ untuk sampel dimagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) pada berbagai waktu sirkulasi dengan v : 0,554 m/s, B : 5,2 kG, L_m : 0,35 m dan suhu 28 °C.

Kurva dan persamaan Regresi untuk menghitung parameter k , k_0 , n , dan E_a persamaan kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2

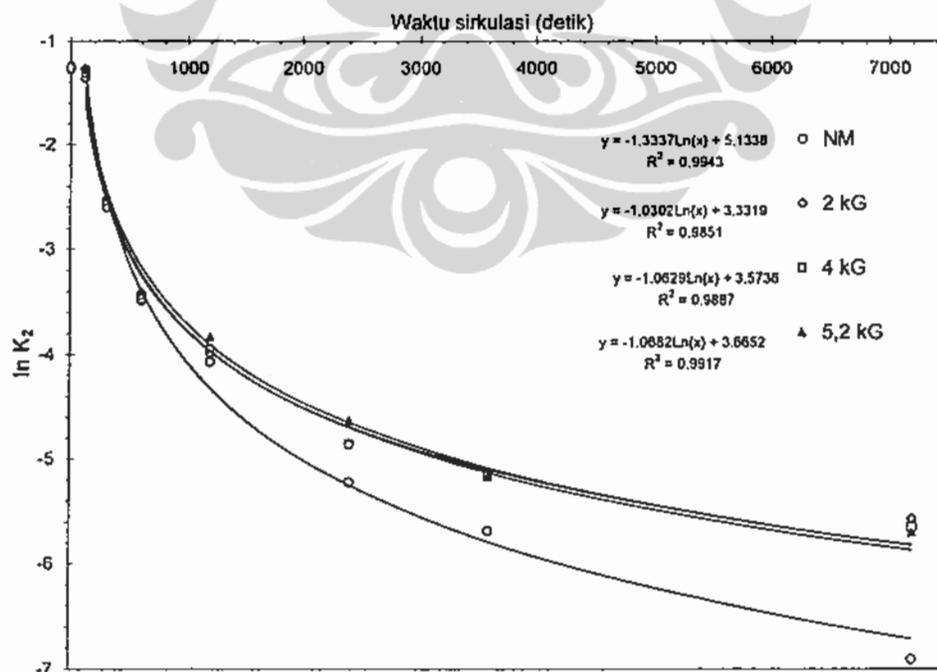


Gambar C7. Kurva persamaan linier $\ln \ln(1/(1-Y))$ terhadap $\ln t$ untuk sampel dimagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) pada berbagai konsentrasi sampel dengan $V : 0,554 \text{ m/s}$, $B : 5,2 \text{ kG}$, $L_m : 0,3 \text{ m}$ dan suhu $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volum sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b serta kurva regresi a dan b sebagai fungsi v , B , L_m , Ca_j , dan V

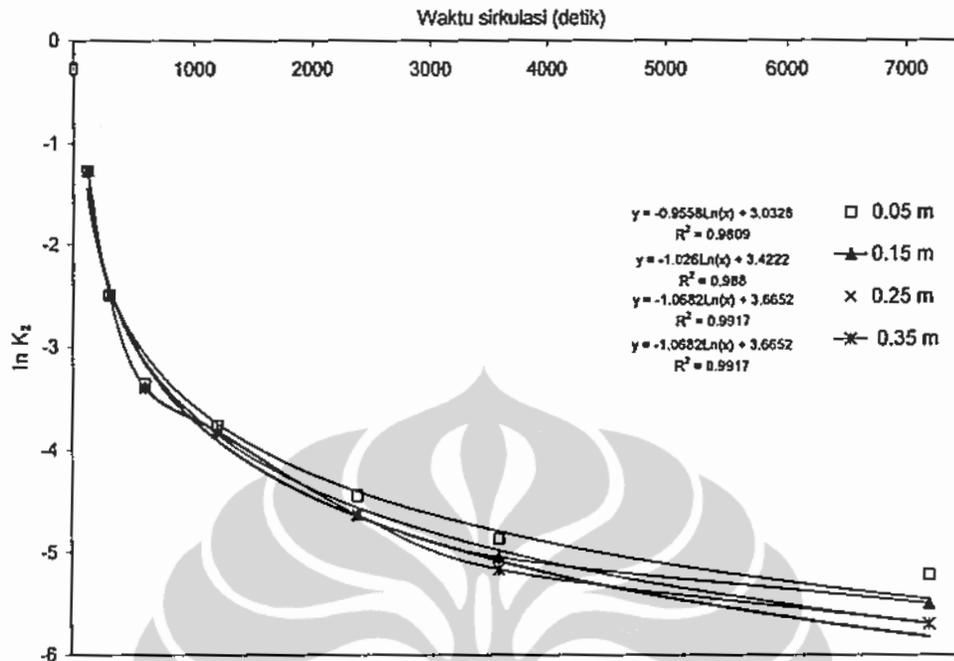


Gambar D1. Kurva $\ln K_2$ (sumbu y) fungsi waktu sirkulasi t_s (sumbu x) pada berbagai kecepatan alir larutan termagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) (data dari Gambar 4.39)

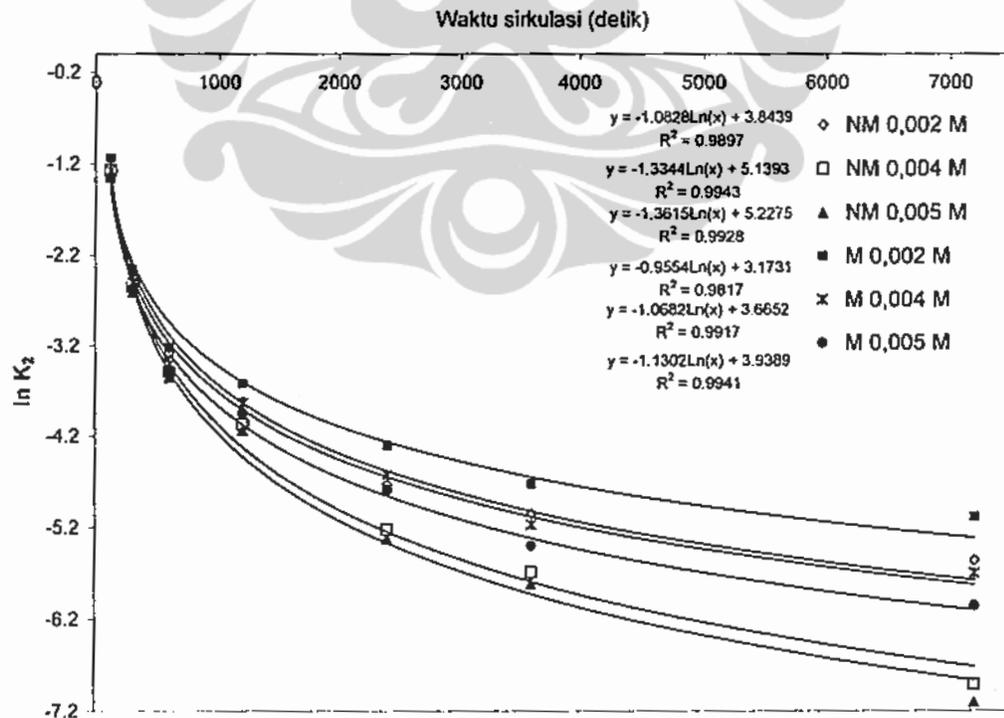


Gambar D2. Kurva $\ln K_2$ (sumbu y) fungsi waktu sirkulasi t_s (sumbu x) pada berbagai kuat medan B : (data dari Gambar 4.40)

Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volum sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b serta kurva regresi a dan b sebagai fungsi v, B, L_m, C_ai, dan V

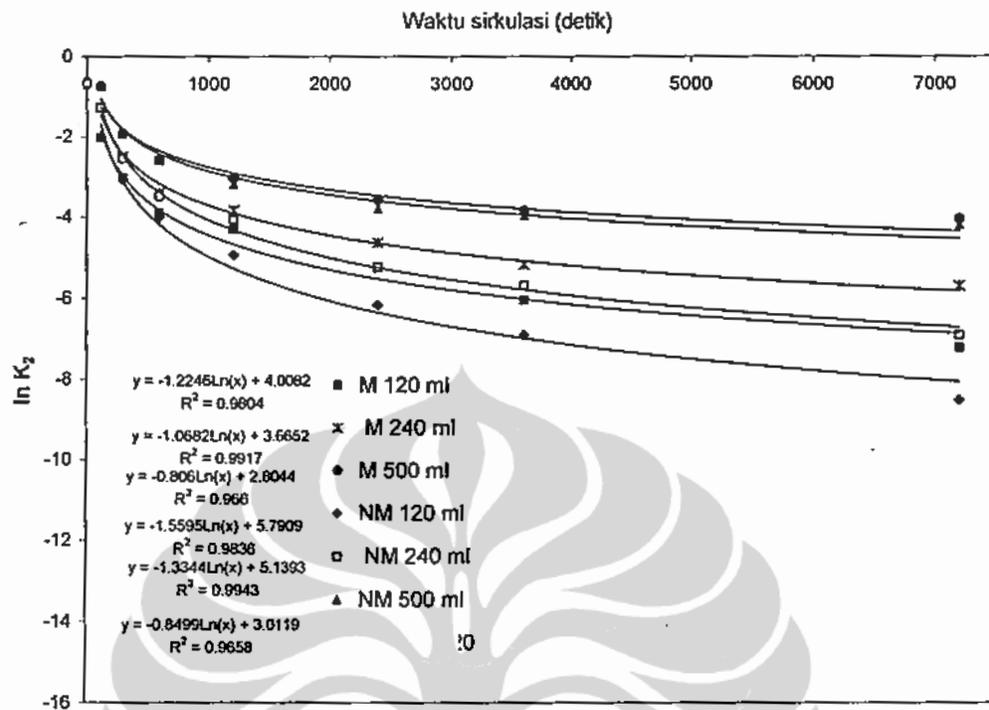


Gambar D3 Kurva $\ln K_2$ (sumbu y) fungsi waktu sirkulasi t_s (sumbu x) pada berbagai panjang magnet larutan termagnisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) (data dari Gambar 4.42)

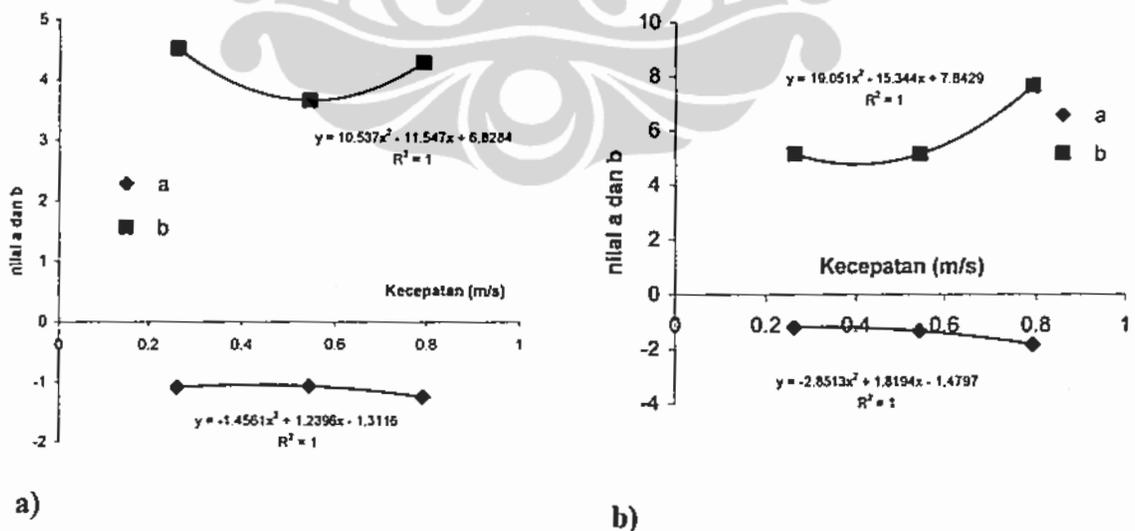


Gambar D4. Kurva $\ln K_2$ (sumbu y) fungsi waktu sirkulasi t_s (sumbu x) pada berbagai konsentrasi larutan termagnisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) (data dari Gambar 4.43)

Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volum sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b serta kurva regresi a dan b sebagai fungsi v, B, L_m, C_ai, dan V

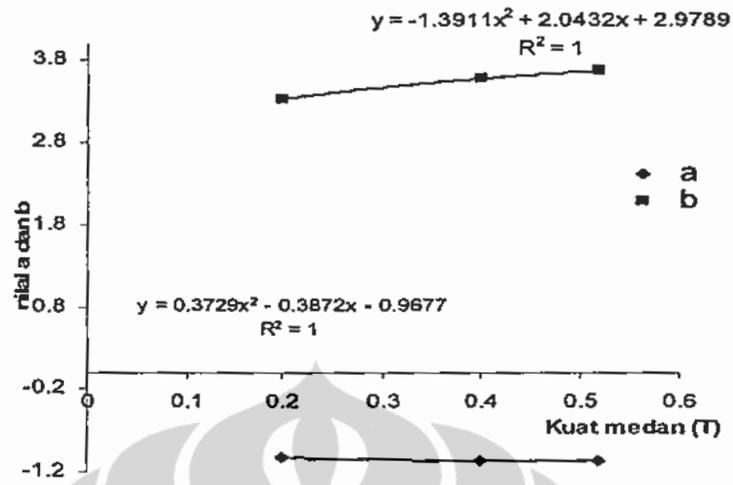


Gambar D5. Kurva $\ln K_2$ (sumbu y) fungsi waktu sirkulasi t_s (sumbu x) pada berbagai volum sampel larutan termagnetisasi (M) dan tanpa magnetisasi (NM) (data dari Gambar 4.44)

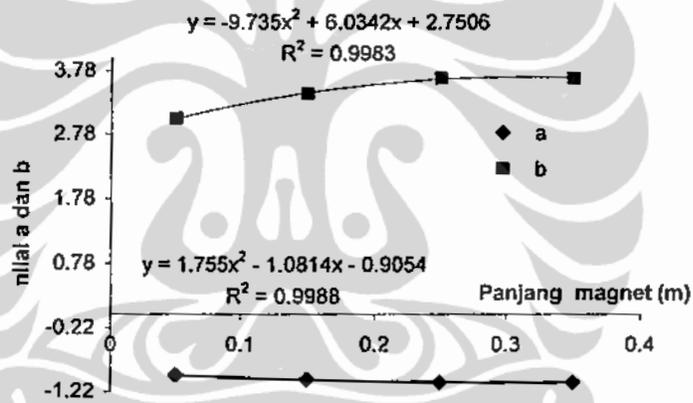


Gambar D6. Kurva a dan b fungsi kecepatan alir: a) untuk sampel termagnetisasi b) sampel non-magnetisasi

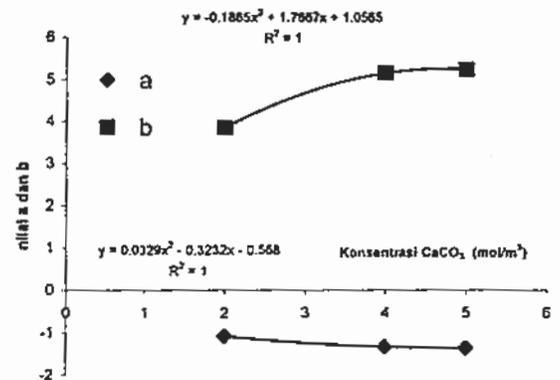
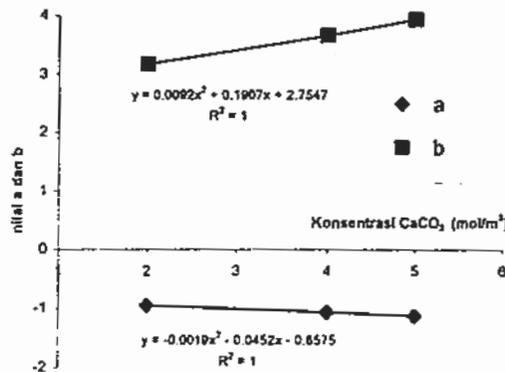
Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volum sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b serta kurva regresi a dan b sebagai fungsi v, B, L_m, Ca_i, dan V



Gambar D7. Kurva a dan b fungsi kuat medan



Gambar D8. Kurva a dan b fungsi panjang magnet

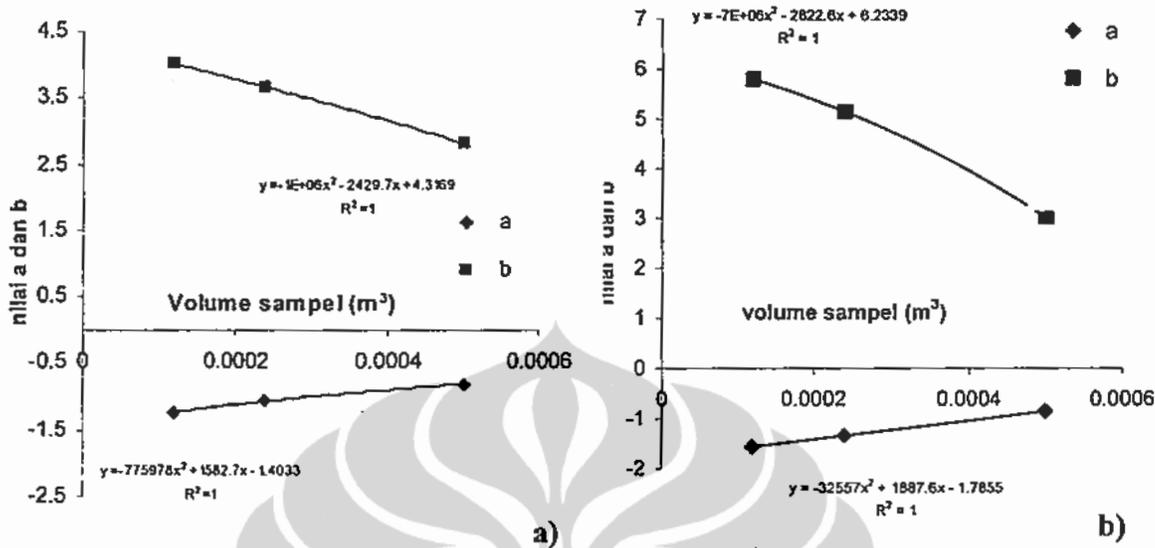


a)

b)

Gambar E8. Kurva a dan b fungsi konsentrasi : a) sampel termagnetisasi; b) sampel non magnet

Kurva hasil regresi data percobaan pengaruh kuat medan, kecepatan aliran, panjang magnet, konsentrasi dan volum sampel untuk mendapatkan nilai koefisien a dan b serta kurva regresi a dan b sebagai fungsi v, B, L_m, C_{ai}, dan V



Gambar D9. Kurva a dan b fungsi volum sampel: a) sampel termagnetisasi;
b) sampel non magnet

Perhitungan konstanta a dan b untuk kondisi kuat medan $B = 5,2$ kG, panjang magnet $L_m = 0,35$ m, kecepatan alir $v = 0,792$ m/s, konsentrasi awal sampel $Ca_i : 0,002$ M, dan volum sampel 240 ml Sebagai berikut :

Pertama mendapatkan harga a dan b pada 0.792 m/s dan 0,554 m/s dari persamaan a(v) dan b(v) pada tabel 4.33 dengan persamaan sebagai berikut:

$$a(v) = -1,4561v^2 + 1,2396 v - 1,3116 ; a(v = 0,792 \text{ m/s}) = -1,0588 ; a(v = 0,554 \text{ m/s}) = -1,0588$$

$$b(v) = 10,537 v^2 - 11,547 v + 6,8284 ; b(B = 0,792 \text{ m/s}) = 3,22505 ; b(v = 0,554 \text{ m/s}) =$$

Persamaan a(Ca_i) dan b(Ca_i) pada table 4.31 diberikan sebagai berikut :

$$a(Ca_i) = -0,0019 Ca_i^2 - 0,0452 Ca_i - 0,8575$$

$$b(Ca_i) = 0,0092 Ca_i^2 + 0,1907 Ca_i + 2,7547$$

Selanjutnya dibuat persamaan a'(Ca_i) dan b'(Ca_i) dengan metode dilatasi dari persamaan a(Ca_i) dan b(Ca_i)

$$a'(Ca_i) = a(v = 0,792 \text{ m/s})/a(v = 0,554 \text{ m/s}) \quad a'(Ca_i) = 1,165 (-0,0019 Ca_i^2 - 0,0452 Ca_i - 0,8575)$$

$$b'(Ca_i) = b(v = 0,792 \text{ m/s})/b(v = 0,554 \text{ m/s}) \quad b'(Ca_i) = 1,173 (0,0092 Ca_i^2 + 0,1907 Ca_i + 2,7547)$$

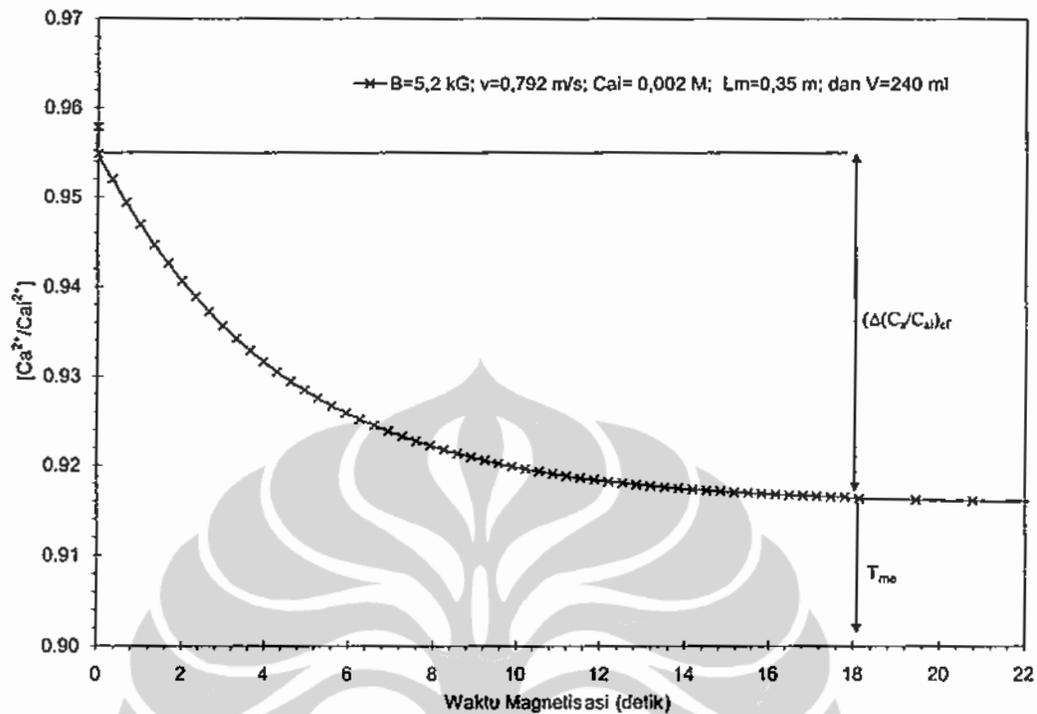
dan selanjutnya dihitung harga a dan b dari a'(Ca_i) dan b'(Ca_i) pada harga $Ca_i = 0,002$ M

$$a'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = -1,108$$

$$b'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = 3,716$$

Tabel E1 hasil perhitungan presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{ai} untuk kondisi kuat medan 0,3 T konsentrasi Ca_i 0,002 M, panjang magnet 0,35 m, kecepatan alir 0,554 m/s, dan volume sampel 240 ml.

Ca^{2+}/Ca_i^{2+}	K_1	K_2	a	b	t_m (detik)	t_s (detik)
0,958	0,0161	0,4396	-1,108	3,716	9,9	60
0,934	0,0161	0,2342	-1,108	3,716	19,8	120
0,845	0,0161	0,1040	-1,108	3,716	49,4	300
0,726	0,0161	0,0563	-1,108	3,716	98,9	600
0,562	0,0161	0,0304	-1,108	3,716	197,8	1200
0,385	0,0161	0,0165	-1,108	3,716	395,5	2400
0,291	0,0161	0,0115	-1,108	3,716	593,3	3600
0,166	0,0161	0,0062	-1,108	3,716	1186,5	7200



Gambar F1. Harga penurunan $\Delta(C_2/Ca_i)_{ef}$ tertinggi dari hasil simulasi dicapai pada 0.041 dengan waktu efektif magnetisasi T_{me} sebesar 18.1 detik untuk kondisi $B : 5,2$ kG, $v : 0,792$ m/s, $L_m : 0,35$ m, $Ca_i : 0,002$ M, $V : 240$ ml dan pH awal 8,5.

Perhitungan harga a dan b pada kondisi $Ca_i : 2 \text{ mol/m}^3$, $v : 0,792 \text{ m/s}$, $B : 0 \text{ kG}$ (non-magnet), dan $V : 0,00024 \text{ m}^3$:

Pertama mendapatkan harga a dan b pada $0,792 \text{ m/s}$ dan $0,554 \text{ m/s}$ dari persamaan a(v) dan b(v) pada tabel 4.31.b (proses tanpa magnetisasi) dengan persamaan sebagai berikut:

$$a(v) = -2,8513 v^2 + 1,8194 v - 1,4797;$$

$$a(v = 0,792 \text{ m/s}) = -1.2443 ; a(v = 0,554 \text{ m/s}) = -1.0682$$

$$b(v) = 19,051 v^2 - 15,344 v + 7,8429 ;$$

$$b(B = 0,792 \text{ m/s}) = 4.2983 ; b(v = 0,554 \text{ m/s}) = 3.6652$$

Selanjutnya dibuat persamaan $a'(Ca_i)$ dan $b'(Ca_i)$ dengan metode dilatasi dari persamaan a(Ca_i) dan b(Ca_i) dari Tabel 4.31.b sebagai berikut :

$$a'(Ca_i) = a(v = 0,792 \text{ m/s})/a(v = 0,554 \text{ m/s}) \quad a(Ca_i) = 1.37 (0,0329 Ca_i^2 - 0,3232 x Ca_i - 0,568)$$

$$b'(Ca_i) = b(v = 0,792 \text{ m/s})/b(v = 0,554 \text{ m/s}) \quad b(Ca_i) = 1.49 (-0,1865 Ca_i^2 + 1,7667 Ca_i + 1,0565)$$

dan selanjutnya dihitung harga a dan b dari $a'(Ca_i)$ dan $b'(Ca_i)$ pada harga $Ca_i = 0,00$ M sebagai berikut :

$$a'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = -1,486 \text{ dan } b'(Ca_i = 0,002 \text{ M}) = 5,731$$

Tabel F1. Hasil perhitungan presipitasi $CaCO_3$ sebagai Ca/C_{ai} selama 120 menit sirkulasi untuk kondisi konsentrasi Ca_i : 0,002 M, L_m : 0,35 m, v : 0,792 m/s, volume sampel 240 ml dan pH awal 8,5.

Ca^{2+}/Ca_i^{2+}	K_1	K_2	a	b	t_s (detik)
0,985	0,0215	0,7038	-1,4856	5,731255	60
0,961	0,0215	0,2513	-1,4856	5,731255	120
0,875	0,0215	0,0644	-1,4856	5,731255	300
0,759	0,0215	0,0230	-1,4856	5,731255	600
0,638	0,0215	0,0082	-1,4856	5,731255	1200
0,560	0,0215	0,0029	-1,4856	5,731255	2400
0,535	0,0215	0,0016	-1,4856	5,731255	3600
0,513	0,0215	0,0006	-1,4856	5,731255	7200

Tabel F.2 Persen kenaikan presipitasi relatif hasil simulasi dan data percobaan pada 120 menit sirkulasi untuk berbagai kondisi variabel proses.

Variabel proses	Sampel termagnetisasi		Sampel non-magnetisasi		% presipitasi $CaCO_3$ hasil simulasi		% kenaikan presipitasi relatif hasil simulasi $(KPRS)=100 * (M-M)/NM$		% presipitasi $CaCO_3$ Data percobaan		% kenaikan presipitasi relatif percobaan $(KPRP)=100 * (M-M)/NM$	% penyimpangan $= 100 * (KPRS - KPRM) / KPRM$
	a	b	a	b	Magnet (M)	Non magnet (NM)	Magnet (M)	Non magnet (NM)	Magnet (M)	Non magnet (NM)		
Kecepatan alir												
0,262 m/s	-1,0868	4,5264	-1,1987	5,1306	72,3	62,8	15,1	68,6	60	14,3	5,3	
0,544 m/s	-1,0682	3,6652	-1,404	5,42393	85,9	71,9	19,5	84,2	71,3	18,1	7,2	
0,792 m/s	-1,2443	4,298	-1,8299	7,6555	94,3	74,4	26,7	95	75,3	26,2	1,9	
Kuat medan												
2 kG	-1,0302	3,3319			81,6	71,9	13,5	80,1	71,3	12,3	8,9	
4 kG	-1,0629	3,5736			84,6	71,9	17,7	82,2	71,3	16,1	9,0	
5,2 kG	-1,0682	3,6652			85,9	71,9	19,5	84,2	71,3	18,1	7,2	
Panjang magnet												
0,15 m	-1,026	3,4222			84,2	71,9	17,1	83	71,3	16,4	4,1	
0,25 m	-1,0682	3,6652			85,9	71,9	19,5	84,1	71,3	17,9	8,2	
0,35 m	-1,0682	3,6652			85,9	71,9	19,5	84,2	71,3	18,0	7,7	
Konsentrasi sampel												
0,002 M	-0,9554	3,1731	-1,0828	3,8439	78,5	43,3	81,3	74,2	41,9	79,7	2,0	
0,004 M	-1,0682	3,6652	-1,404	5,42393	85,9	71,9	19,5	84,2	71,3	18,1	7,2	
0,005 M	-1,1302	3,9389	-1,3615	5,2275	88,9	76	17,0	88,4	76,8	15,1	11,2	
Volum sampel												
120 ml	-1,2246	4,0082	-1,5595	5,7909	94,5	78,8	19,9	94,5	78,8	18,0	9,5	
240 ml	-1,0682	3,6652	-1,404	5,4239	85,9	71,9	19,5	85,9	71,3	18,1	7,2	
500 ml	-0,806	2,8044	-0,8499	3,0119	58,3	48,8	19,5	58,3	48,8	18,2	6,7	