



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH MEDAN MAGNET
PADA PRESIPITASI CaCO_3 DALAM AIR SADAH**

RINGKASAN DISERTASI

Untuk memperoleh gelar Doktor Bidang Teknik Kimia yang dipertahankan
di hadapan Sidang Terbuka Senat Akademik Universitas Indonesia
di bawah pimpinan Rektor Universitas Indonesia
Prof. Dr. Ir der Soz Gumilar Rusliwa Sumantri
Pada hari Jumat, 24 Oktober 2008 pukul 13.30 WIB

NELSON SAKSONO



**PROGRAM PASCASARJANA BIDANG TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
OKTOBER 2008**

Promotor :

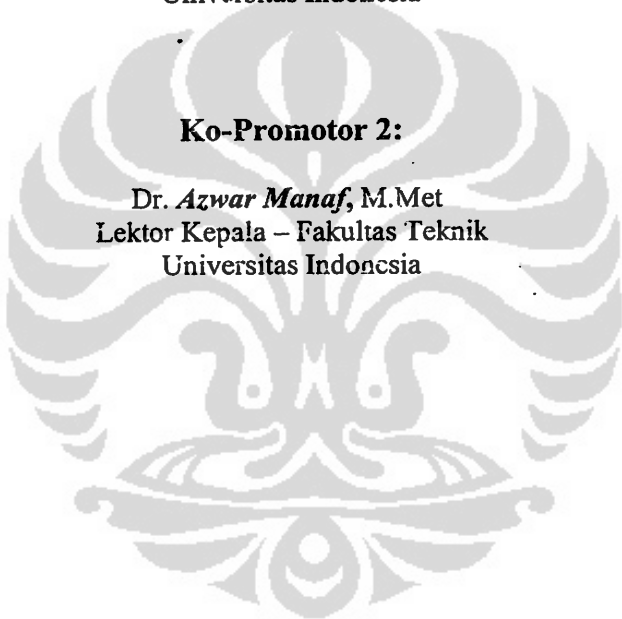
Prof. Dr. Ir. *Roekmijati Widaningroem Sumantojo*, M.Si
Guru Besar Tetap Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Ko-Promotor 1:

Dr. Ir. *Setijo Bismo*, DEA
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

Ko-Promotor 2:

Dr. *Azwar Manaf*, M.Met
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Indonesia



Panitia Penguji :

1. Prof. Dr. Ir. **Roekmijati Widaningroem Sumantojo**, M.Si
Guru Besar Tetap Fakultas Teknik
Universitas Indonesia
2. Dr. Ir. **Setijo Bismo**, DEA
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Indonesia
3. Dr. **Azwar Manaf**, M.Met
Lektor Kepala – Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia
4. Prof. Dr. Ir. **Widodo Wahyu Purwanto**, DEA
Guru Besar Tetap Fakultas Teknik
Universitas Indonesia
5. Dr. Ir. **Bardi Murachman**, DEA
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
6. Dr. Ir. **Asep Handaya Saputra**, M.Eng
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Indonesia
7. Dr. Ir. **Slamet**, MT
Lektor Kepala – Fakultas Teknik
Universitas Indonesia

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 disertation. 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
PROMOTOR DAN KO-PROMOTOR	i
PANITIA PENGUJI	ii
ABSTRAK	v
LATAR BELAKANG	1
RUMUSAN MASALAH	2
TUJUAN PENELITIAN	3
HIPOTESIS	3
BATASAN MASALAH	3
METODE PENELITIAN	4
HASIL DAN PEMBAHASAN	4
1. Efek interaksi hidrat ion	5
A.1 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida statik.	5
A.2 Sifat dan morfologi deposit CaCO_3	6
B. Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik.	8
C. Kinetika presipitasi CaCO_3 dari larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 termagnetisasi sistem fluida statik dan dinamik	10
2. Efek interaksi ion	12
A. Efek interaksi ion sistem fluida statik	12
B. Efek interaksi ion sistem fluida dinamik	14
B.1 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi.	14
B.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.	18
3. Simulasi presipitasi CaCO_3 sistem fluida dinamik	22
A. Persamaan laju presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida sirkulasi.	22
B. Hasil simulasi t_{mc} , $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ dan PKPR	23
C. Analisis sensitivitas variabel proses terhadap efektivitas magnetisasi	26
4. Konsep sistem AMT penurun kesadahan air dan pencegahan kerak	27
A. Tahapan sistem AMT	28
B. Konfigurasi sistem AMT	30
KESIMPULAN	31
DAFTAR ACUAN	33
UCAPAN TERIMA KASIH	34
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	35
Daftar Publikasi	35

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 akan menyebabkan berkurangnya efektivitas 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 kinia larutan sehingga tidak cukup aman untuk penggunaan rumahtangga maupun industri makanan. Investasi yang cukup besar menyebabkan metode ini 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)) merupakan proses fisik yang relatif aman untuk manusia dan cocok untuk pengolahan air skala kecil/rumahtangga. 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 berbau kontroversi tersebut mendorong para peneliti 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), disebabkan masih banyak aspek teori maupun aplikasi yang belum terjawab dengan memuaskan. Pengaruh medan magnet terhadap pembentukan CaCO_3 hingga efektivitas proses AMT masih menjadi perdebatan yang hangat para peneliti, dimana hasil-hasil yang dilaporkan masih bersifat kontradiktif (Chibowski *et al*, 2003).

Efektivitas AMT 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-} yang 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. 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 terjadi pada sistem fluida statik dan dinamik. Hasil pengamatan menunjukkan terjadinya peningkatan presipitasi CaCO_3 dengan adanya medan magnet. 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 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 $q \cdot V \times B$. Gaya Lorentz ini menimbulkan pergeseran ion (local convection movement) yang dapat menyebabkan terjadinya koagulasi ion (presipitasi CaCO_3). 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.

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 yaitu tahap magnetisasi dan tahap agitasi mekanik dengan sistem sirkulasi fluida dinamik, serta tahap pengendapan. 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.

TUJUAN PENELITIAN

Tujuan umum penelitian ini adalah melakukan pengembangan sistem pengolahan air sadah untuk pencegahan kerak menggunakan medan magnet (AMT). Tujuan operasional adalah:

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.

HIPOTESIS

Kejelasan pengaruh medan magnet terhadap air sadah dan presipitasi CaCO_3 melalui pemahaman tentang efek interaksi hidrat ion dan efek interaksi ion pada proses presipitasi CaCO_3 beserta variabel proses yang berpengaruh adalah langkah awal yang penting dalam mengembangkan sistem AMT. Berikut hipotesis penelitian ini:

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.

BATASAN MASALAH

1. Sistem AMT dalam penelitian ini merupakan tahapan-tahapan proses presipitasi saat magnetisasi dan 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. Pengamatan Presipitasi CaCO_3 dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.

METODE PENELITIAN

Bahan penelitian:

Serbuk Na_2CO_3 , CaCl_2 , dan CaCO_3 (*analytical grade*) digunakan sebagai bahan pembuatan air sadah sintetik. 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.

Peralatan penelitian:

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbagi dalam 2 bagian: untuk sistem fluida statik digunakan tabung reaksi yang dilengkapi dengan magnet permanen berbasis NdFeB sebagai sumber medan magnet. Untuk sistem fluida dinamik digunakan glass container, selang silikon, pompa peristaltik, dan 7 pasang magnet permanen berbasis NdFeB sebagai sumber medan magnet yang dipasang secara inversi sepanjang selang silikon. Uji kandungan ion Ca^{2+} dilakukan dengan metode titrasi kompleksometri EDTA. Uji konduktivitas larutan sampel dengan alat konduktometer, dan uji morfologi deposit CaCO_3 dengan SEM dan XRD.

Tahapan Penelitian:

Penelitian ini dilakukan melalui 4 tahap. Tahap I adalah melakukan pengamatan efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik. Larutan Na_2CO_3 dimagnetisasi kemudian dicampur dengan larutan CaCl_2 untuk diamati proses presipitasinya. Pengamatan efek interaksi hidrat ion pada Tahap II dilakukan dengan sistem fluida dinamik. Tahap III dilakukan pengamatan efek interaksi ion pada sistem fluida statik dimana sampel yang digunakan adalah larutan CaCO_3 dan pengamatan presipitasi dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi. Tahap IV melakukan pengamatan efek interaksi ion pada sistem fluida dinamik menggunakan sampel larutan CaCO_3 . Efek magnetisasi dan sirkulasi fluida (agitasi mekanik) terhadap presipitasi CaCO_3 diamati pada tahap ini. Pengembangan model persamaan presipitasi CaCO_3 fungsi variabel proses serta konsep sistem AMT penurunan kesadahan dilakukan pada tahap IV ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Laporan hasil penelitian dalam bab ini meliputi: (1) efek interaksi hidrat ion pada sistem fluida statik dan dinamik, (2) efek interaksi ion pada sistem fluida statik dan dinamik, (3) Simulasi presipitasi CaCO_3 sistem fluida dinamik, dan (4) konsep sistem AMT penurunan kesadahan air dan pencegahan kerak. Berikut hasil dan pembahasannya.

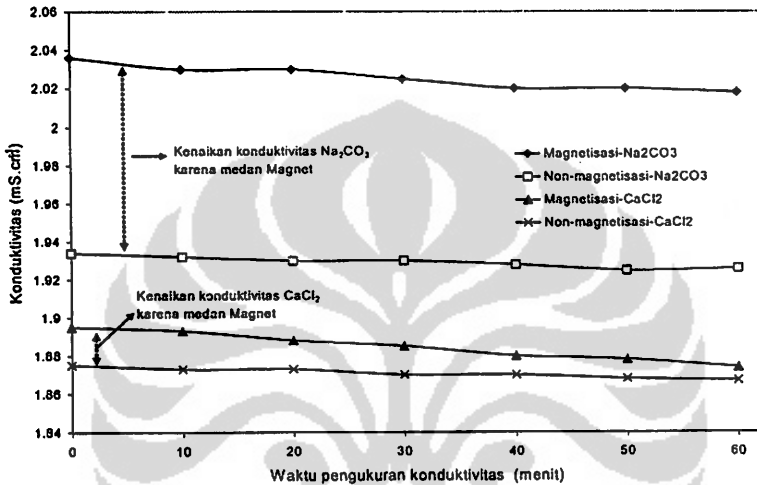
1. Efek interaksi hidrat ion

Pengamatan pengaruh medan magnet terhadap interaksi hidrat ion dan presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida statik dan dinamik dilakukan dengan mengukur konduktivitas larutan sampel dan jumlah partikel CaCO_3 yang terbentuk

menggunakan larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 . Presipitasi total CaCO_3 adalah presipitasi yang terjadi di fasa larutan dan di dinding tabung (deposit).

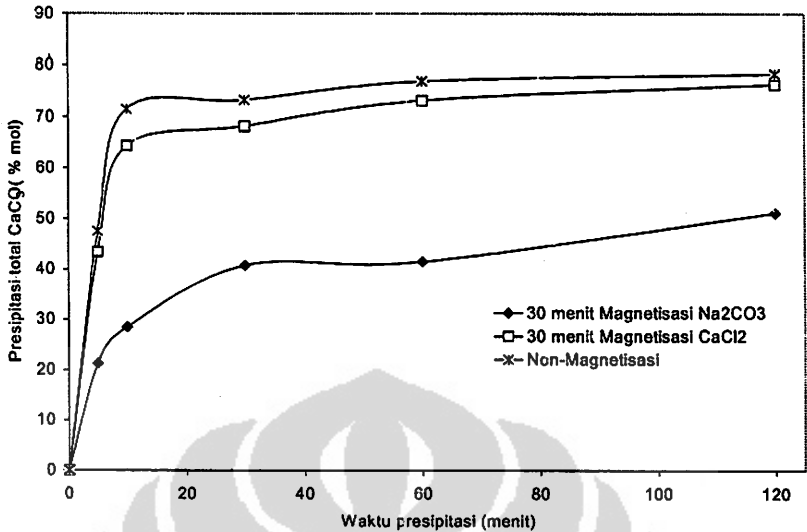
A.1 Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida statik.

Gambar 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).



Gambar 1. Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 setelah magnetisasi. Waktu magnetisasi 30 menit dengan kuat medan (B) : 5,2 kG dan T : 28 °C

Hasil percobaan ini berhasil membuktikan bahwa magnetisasi sistem fluida statik pada larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 meningkatkan interaksi hidrat ionnya. Peningkatan interaksi hidrat ion CO_3^{2-} dan Ca^{2+} akan menyebabkan presipitasi CaCO_3 semakin sulit terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 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 2. Kurva presipitasi total CaCO₃ untuk : (Δ) magnetisasi larutan Na₂CO₃; (◻) magnetisasi larutan CaCl₂; dan (X) tanpa perlakuan magnetisasi.

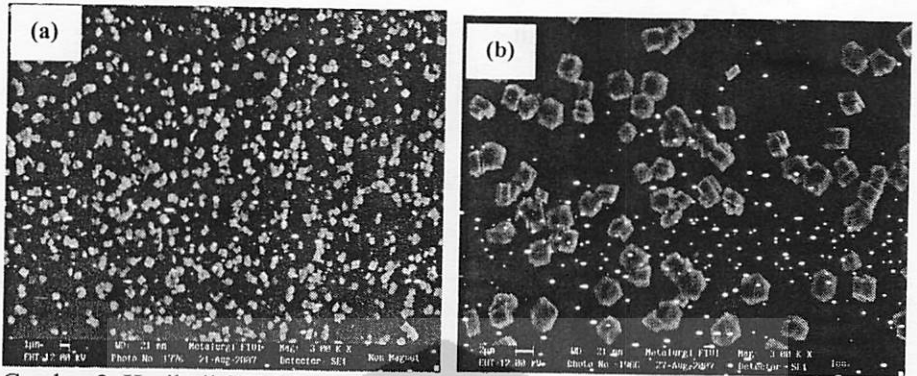
A.2 Sifat dan morfologi deposit CaCO₃

Persentase deposit seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 adalah rasio presipitasi di deposit dengan presipitasi total yang menggambarkan kemampuan deposit CaCO₃ 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.

Hasil uji foto SEM pada gambar 3 menunjukkan bahwa kristal yang terbentuk adalah Kalsit dan jumlah partikel CaCO₃ yang terbentuk pada sampel non-magnetisasi lebih banyak dibanding sampel termagnetisasi sedangkan ukuran partikel CaCO₃ pada sampel termagnetisasi menjadi lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi (^dSaksono *et al*, 2007).

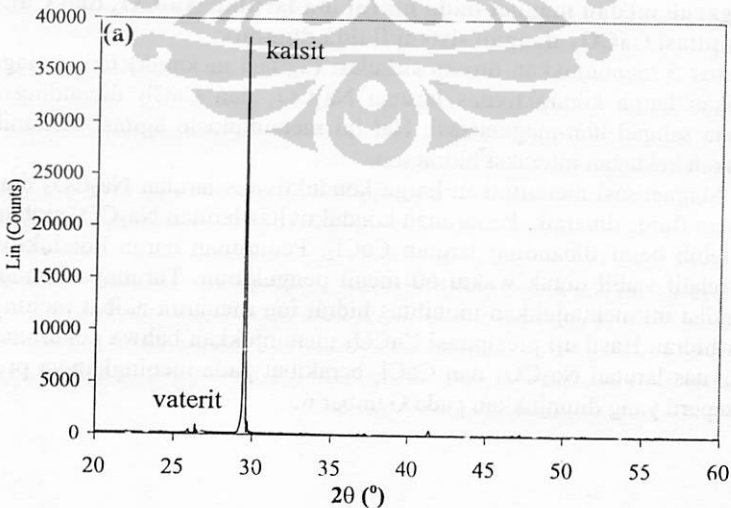
Tabel 1. Presipitasi CaCO₃ di deposit, presipitasi di larutan, dan presipitasi total CaCO₃ untuk 120 menit presipitasi.

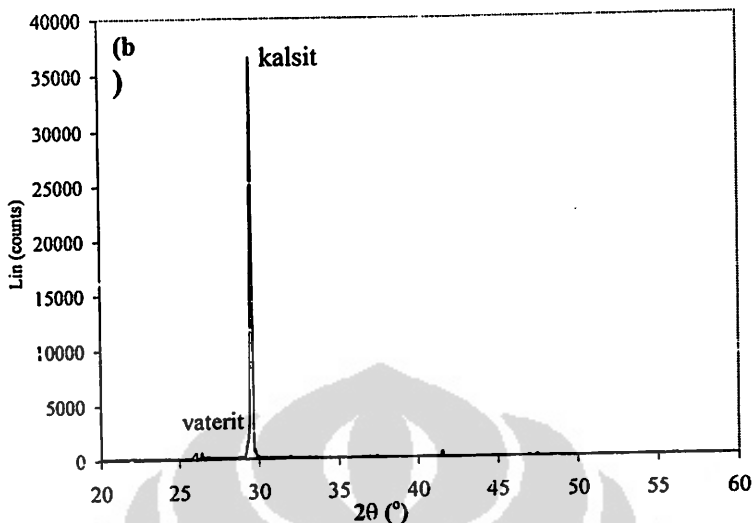
Presipitasi CaCO ₃	Presipitasi CaCO ₃ (%)			
	Non-magnetisasi	Magnetisasi 10 menit	Magnetisasi 20 menit	Magnetisasi 30 menit
Di deposit [D]	71,1	63,9	54,6	47,3
Total [T]	80,2	72,1	61,1	51,1
Persen deposit: 100 x (D / T)	88,6	88,6	89,4	92,6



Gambar 3. 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 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 719,3 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.





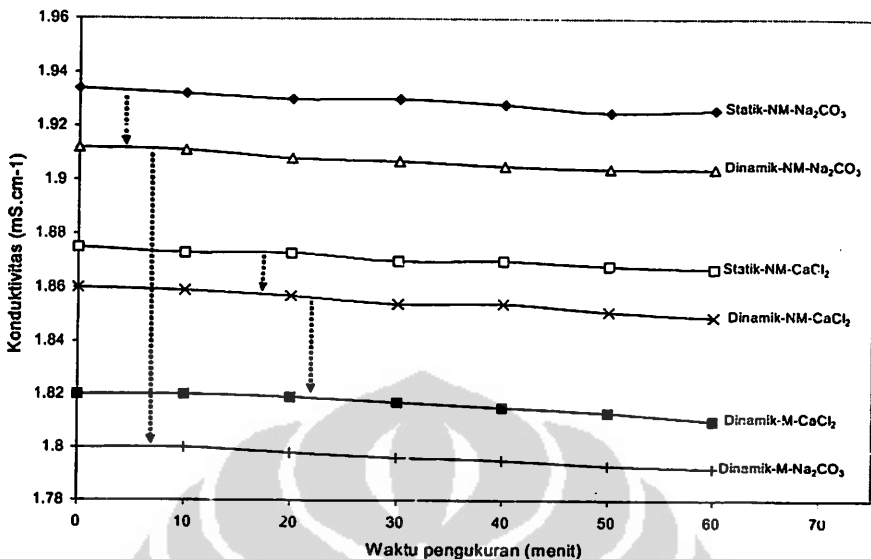
Gambar 4. Analisis XRD deposit kristal CaCO_3 pada 120 Menit Presipitasi dan $T : 28^\circ\text{C}$: (a) non-magnetisasi ; (b) termagnetisasi dengan $t_m : 30$ menit dan $B : 5,2$ kG. (Saksono *et al*, 2008).

Gambar 4 juga menunjukkan 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.

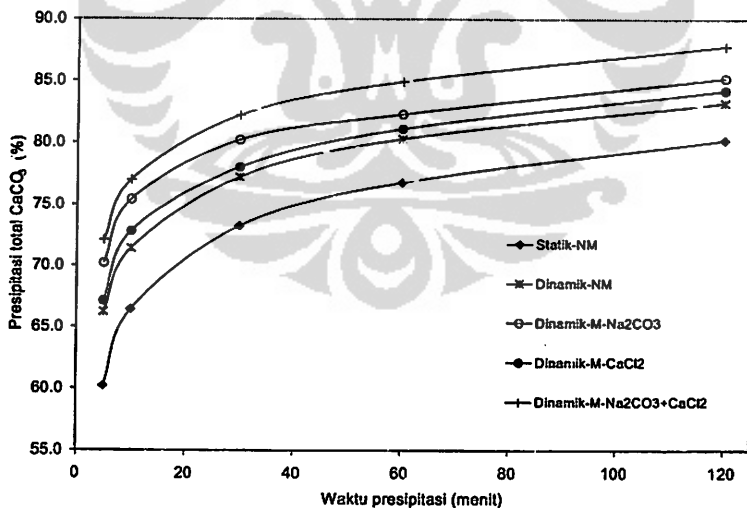
B. Pengaruh medan magnet pada hidrat ion larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 serta presipitasi CaCO_3 dengan sistem fluida dinamik.

Gambar 5 menunjukkan proses sirkulasi (agitasi mekanik) 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.

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 . 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. 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 6.



Gambar 5. Konduktivitas larutan Na_2CO_3 dan CaCl_2 untuk sampel termagnetisasi (M) dan non-magnetisasi (NM) pada sistem fluida statik dan fluida dinamik.



Gambar 6. 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).

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.

C. 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 persamaan kurva sigmoidal seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1:

$$Y = 1 - e^{-Kt^n} \quad \text{dengan } k = K^{1/n} \quad (1)$$

Nilai n merupakan fungsi dari pembentukan inti (nukleasi) dan pertumbuhan kristal CaCO_3 (Jena *et al.*, 1992). Harga n dan K pada persamaan 4.1 dapat dihitung dengan penurunan rumus seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2 sebagai berikut:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1 - Y} \right) = \ln K + n \ln t \quad (2)$$

C1. Persamaan kinetika Sistem fluida statik

Tabel 2 merupakan kurva hasil perhitungan persamaan 2 untuk sampel non-magnetisasi fluida statik (NMS) dan sampel termagnetisasi fluida statik (MS) pada berbagai suhu presipitasi dari data percobaan. Harga n berada pada nilai 0,17 hingga 0,32 yang menunjukkan laju nukleasi CaCO_3 yang tinggi di awal reaksi. Untuk perhitungan harga k_0 dan E_a diturunkan dari persamaan Arrheniuss sebagai berikut:

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

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

Larutan termagnetisasi memiliki harga k yang jauh lebih rendah dibanding larutan non-magnetisasi. Nilai E_p 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 dan k yang lebih rendah pada sampel termagnetisasi memperkuat kesimpulan bahwa magnetisasi menekan proses presipitasi CaCO_3 .

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 (pers 3) dan sampel non-magnetisasi (pers 4) sistem fluida statik sebagai berikut:

$$Y = 1 - \exp(-Kt^n) = 1 - \exp\left[-\left(k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} t\right)^n\right] = 1 - \exp\left[-\left(3609212. e^{\frac{-42566}{8.3147 T}} t\right)^n\right] \quad (3)$$

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

$$Y = 1 - \exp(-Kt^n) = 1 - \exp\left[-\left(1041320 e^{\frac{-49604}{8.3147 T}} t\right)^n\right] \quad (4)$$

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

C2. Persamaan kinetika Sistem fluida dinamik

Tabel 3 menunjukkan Untuk sampel larutan termagnetisasi (MD) memiliki harga k yang lebih tinggi dan E_a yang lebih rendah dibanding sampel non-magnetisasi (NMD). Hal ini menunjukkan proses magnetisasi fluida dinamik mendorong laju presipitasi CaCO_3 .

Tabel 3. Nilai tetapan laju presipitasi CaCO_3 (k), faktor frekuensi tumbukan (k_0), dan Energi aktivasi pembentukan CaCO_3 (E_a) untuk sampel termagnetisasi (MD) dan non-magnetisasi (NMDS) pada sistem fluida dinamik.

Kode sampel	Suhu (°C)	Persamaan Regresi	Nilai k (min ⁻¹)	Ln k_0 (min ⁻¹)	E_a (kJ/mol)
NMD	28	$y = 0,1542x - 0,1474$	0,384	11,33	30,70
NMD	50	$y = 0,1902x - 0,0115$	0,941		
NMD	70	$y = 0,1999x + 0,1083$	1,179		
MD	28	$y = 0,1378x - 0,0048$	0,966	8,37	21,06
MD	50	$y = 0,1733x + 0,0872$	1,654		
MD	70	$y = 0,1968x + 0,1965$	2,714		

Berdasarkan data kinetika tabel 3, maka dapat ditulis persamaan fraksi mol CaCO_3 yang terbentuk (Y), fungsi suhu larutan (T) dan waktu presipitasi (t) untuk

sampel termagnetisasi (pers 5) dan sampel non-magnetisasi (pers 6) sistem fluida dinamik sebagai berikut:

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(83283 \cdot e^{\frac{-30700}{8.314 T}} t \right)^n \right] \quad (5)$$

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

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(4316 e^{\frac{-21060}{8.314 T}} t \right)^n \right] \quad (6)$$

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

2. Efek interaksi ion

Pada tahap ini, magnetisasi dilakukan saat presipitasi CaCO_3 berlangsung menggunakan sistem fluida statik dan dinamik. 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.

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 air sadah. Supersaturasi pada larutan diukur dari harga pH larutan dan konsentrasi CaCO_3 terlarut. Pengamatan presipitasi CaCO_3 dilakukan saat magnetisasi dan sesudah magnetisasi.

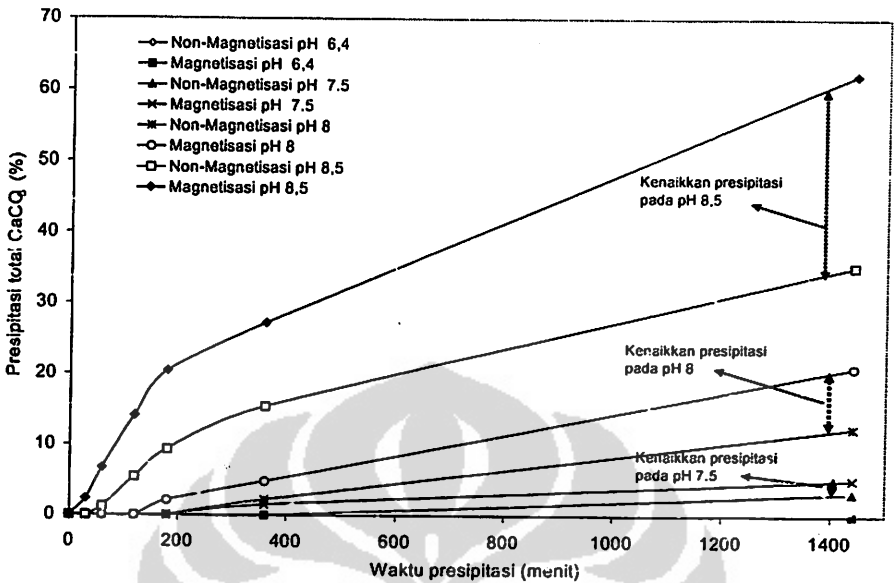
A. Efek interaksi ion sistem fluida statik

A1. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi.

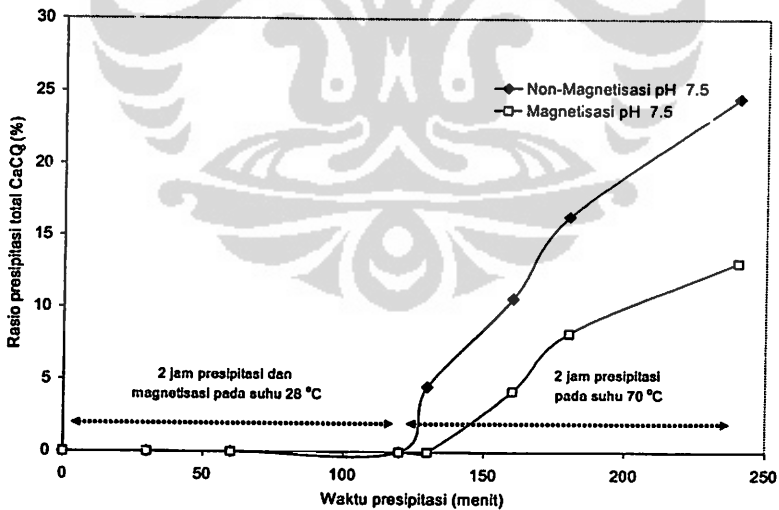
Gambar 7 menunjukkan efek magnetisasi dalam mendorong presipitasi CaCO_3 meningkat dengan meningkatnya pH larutan. Terjadi peningkatan persen kenaikan absolut dan relatif dari masing-masing $1,9 \%$ dan $59,4 \%$ pada pH $7,5$ menjadi $26,9 \%$ dan $76,4 \%$ pada pH $8,5$. Supersaturasi yang tinggi akan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

A.2 Pengaruh medan magnet terhadap presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.

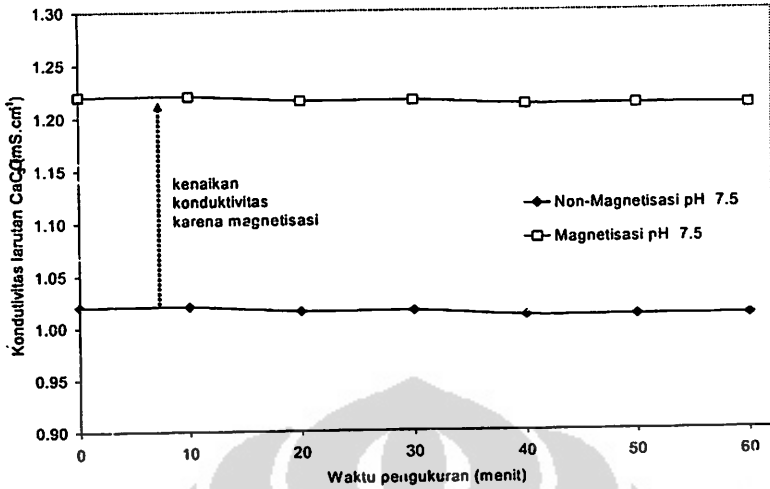
Gambar 8 menunjukkan tidak terjadi presipitasi selama 2 jam magnetisasi. Setelah magnetisasi 2 jam mulai terjadi presipitasi CaCO_3 akibat dinaikkannya suhu larutan. Gambar 8 menunjukkan terjadi penurunan presipitasi CaCO_3 pada sampel termagnetisasi setelah proses magnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi penguatan efek interaksi hidrat ion selama proses magnetisasi statik yang telah dilakukan sebelumnya..



Gambar 7. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 di bawah pengaruh medan magnet dengan $B : 5,2 \text{ kG}$ dan $T : 28^\circ\text{C}$.



Gambar 8. 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 $T : 28^\circ\text{C}$.



Gambar 9. 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 9). 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 .

B. Efek interaksi ion sistem fluida dinamik

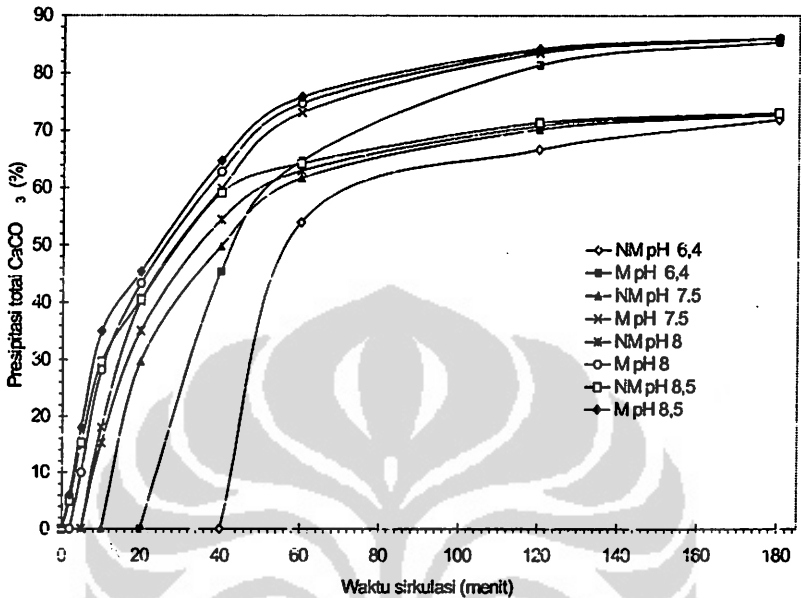
B.1 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 saat magnetisasi.

B.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 10 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. Untuk larutan pH 8,5 presipitasi sudah teramati sejak awal sirkulasi.

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 71 % - 72 % (gambar 10).

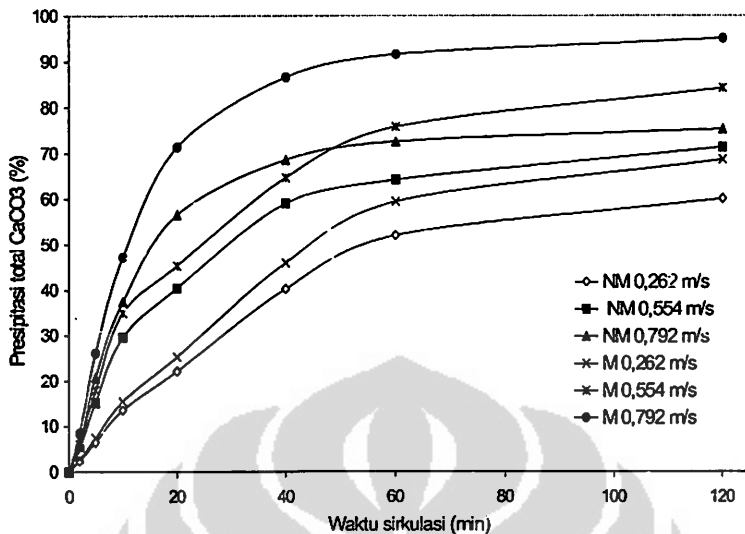


Gambar 10. Pengaruh pH larutan terhadap presipitasi total CaCO_3 pada sampel non- magnetisasi (NM) dan sampel termagnetisasi (M)

B.1.2 Pengaruh Kecepatan alir larutan.

Gambar 11 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.

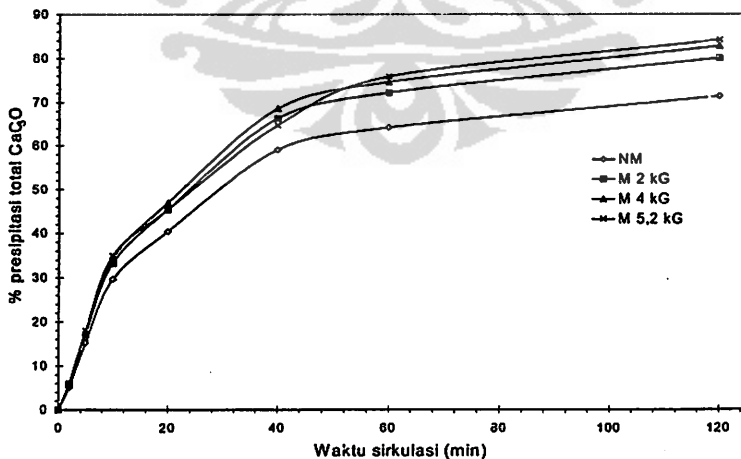
Gambar 11 menunjukkan presipitasi total CaCO_3 sampel termagnetisasi lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi. Semakin tinggi kecepatan alir, maka akan semakin tinggi efek kenaikan presipitasi antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi. Gaya Lorentz menyebabkan efek pergeseran ion (ion shift) yang dapat meningkatkan interaksi antar ion. 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 .



Gambar 11. Pengaruh kecepatan alir terhadap presipitasi total CaCO_3

B.1.3 Pengaruh kuat medan, waktu magnetisasi.

Gambar 12 menunjukkan terjadi peningkatan persen presipitasi total CaCO_3 dengan meningkatnya kuat medan. Semakin tinggi kuat medan, maka akan semakin tinggi efek kenaikan presipitasi antara sampel termagnetisasi dan sampel non-magnetisasi.



Gambar 12. Pengaruh kuat medan terhadap presipitasi total CaCO_3

Gambar 11 dan 12 membuktikan bahwa kenaikan kecepatan alir 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. 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 (t_{me}).

Tabel 4 menunjukkan waktu sirkulasi dengan magnetisasi mencapai harga optimum pada 1,5 menit (90 detik) karena tidak terdapat perbedaan jumlah presipitasi yang terjadi pada 120 menit sirkulasi. 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 m^2 luas penampang dalam pipa (A), adalah sebagai berikut:

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

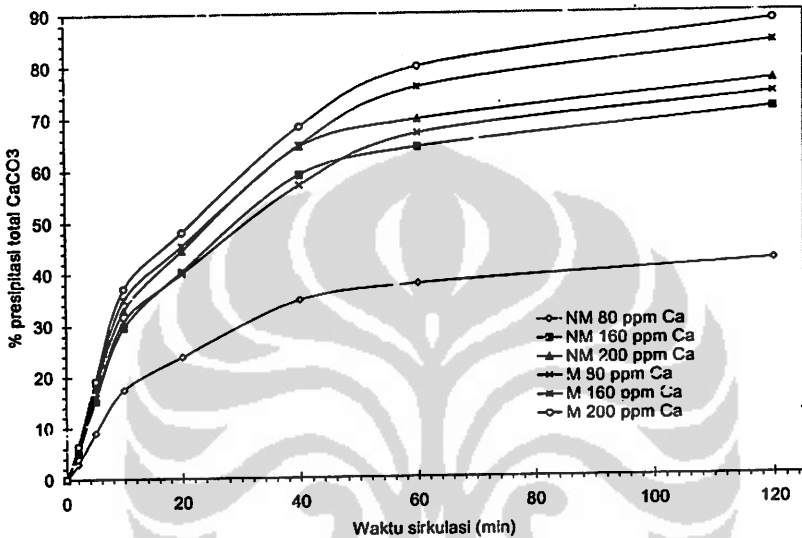
Waktu sirkulasi dengan magnetisasi di atas 90 detik tidak berpengaruh lagi terhadap presipitasi CaCO_3 . Hal ini menunjukkan bahwa proses magnetisasi efektif dilakukan hanya 1,5 menit pertama sirkulasi.

Tabel 4. Pengaruh waktu magnetisasi terhadap presipitasi total CaCO_3

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
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

B.1.4 Pengaruh konsentrasi sampel.

Gambar 13 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. Presipitasi total CaCO_3 sampel termagnetisasi lebih tinggi dibanding sampel non-magnetisasi. Semakin rendah konsentrasi sampel maka akan semakin besar efek medan magnet menaikkan presipitasi CaCO_3 dibanding sampel non-magnetisasi.



Gambar 13. Pengaruh konsentrasi sampel terhadap presipitasi total CaCO_3 .

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.

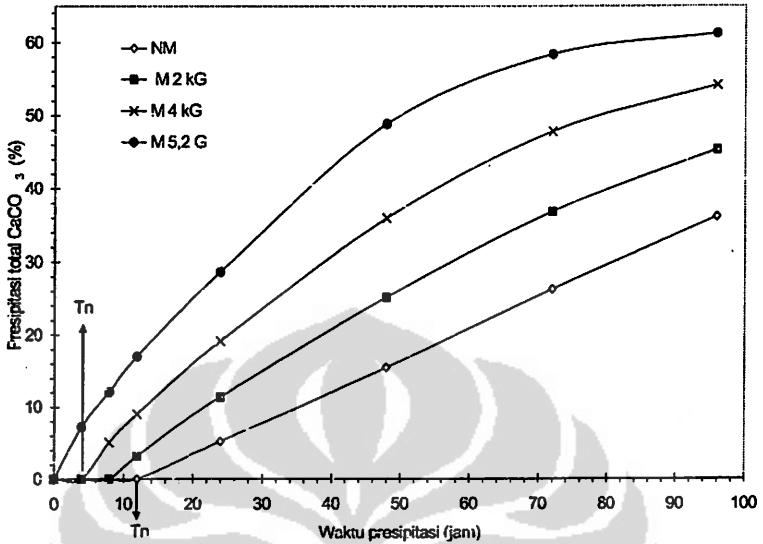
B.2 Pengaruh variabel proses pada presipitasi CaCO_3 sesudah magnetisasi.

B.2.1 Pengaruh kuat medan magnet

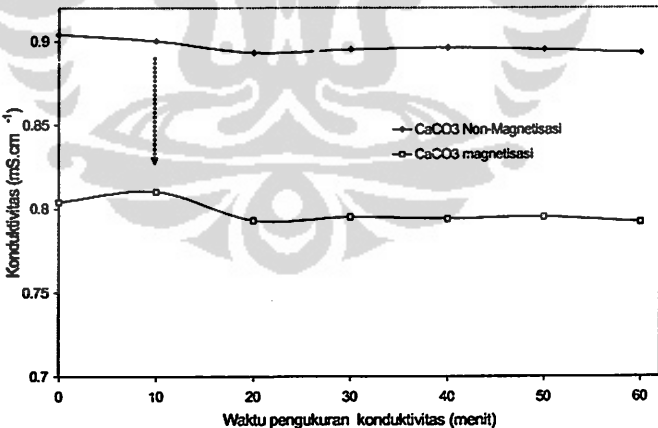
Gambar 14 menunjukkan terjadi kenaikan jumlah presipitasi CaCO_3 pada 96 jam presipitasi dengan meningkatnya kuat medan. Waktu dimana presipitasi mulai terjadi disebut waktu nukleasi (T_n). Sampel non-magnetisasi memiliki T_n yang lebih lama yaitu di atas 12 jam, sedangkan untuk sampel termagnetisasi dengan kuat medan 2 kG, 4 kG, dan 5,2 kG masing-masing memiliki T_n sebesar 12 jam, 8 jam, dan 4 jam. Hasil ini menunjukkan sampel larutan yang telah termagnetisasi memiliki sifat ion yang lebih mudah membentuk inti (nukleat) CaCO_3 .

Gambar 14 menunjukkan Efek magnetisasi terhadap presipitasi CaCO_3 dari sampel larutan pada pH 6,4 baru teramati sesudah proses magnetisasi. Efek medan

magnet yang muncul sesudah proses magnetisasi dikenal dengan efek memori magnetik.



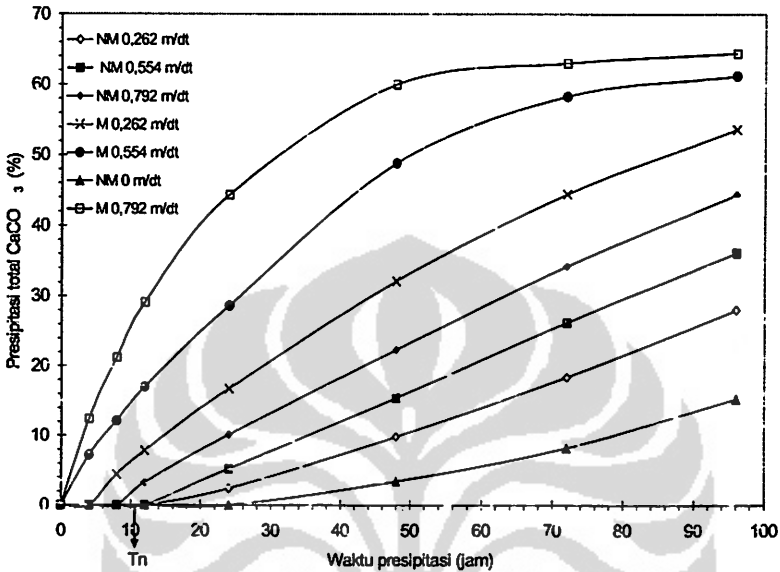
Gambar 14. Pengaruh kuat medan magnet terhadap presipitasi total CaCO_3 (t_c : 10 menit, L_m 0,35 m. v : 0,554 m/s, Ca : 0,004 M, pH awal larutan 6,4, V : 240 mL dan T : 28 °C).



Gambar 15. Pengaruh medan magnet pada konduktivitas larutan CaCO_3 setelah 10 menit sirkulasi

Gambar 15 menunjukkan terjadi penurunan 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 keempat dari laporan disertasi ini.



Gambar 16. 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).

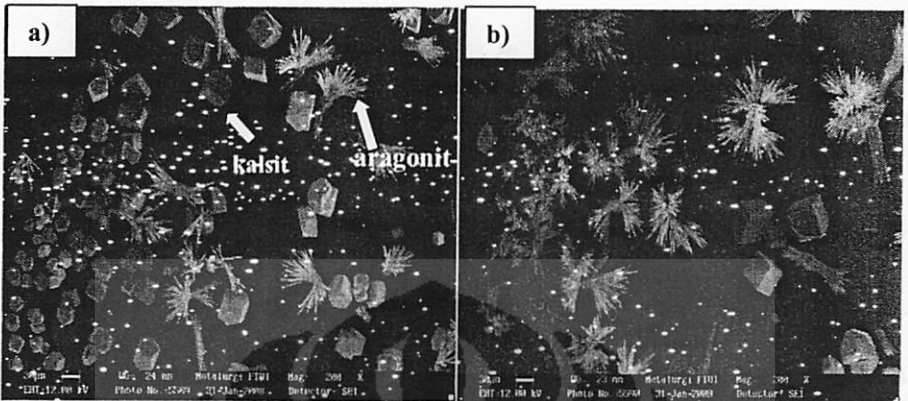
B.2.2 Pengaruh kecepatan alir

Gambar 16 menunjukkan Sampel termagnetisasi (M) memiliki presipitasi CaCO_3 yang lebih besar dibanding sampel non-magnetisasi (NM) dimana 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 %.

B.2.3 Morfologi dan sifat deposit

Gambar 17 menunjukkan partikel CaCO_3 yang terbentuk dari sampel non-magnetisasi memiliki ukuran kristal deposit yang relatif lebih kecil sehingga dapat berpengaruh terhadap kekuatan/stabilitas deposit menempel di dinding. Hasil foto

SEM pada gambar 17 juga menunjukkan Jenis kristal yang terbentuk umumnya berupa Kalsit dan Aragonit.



Gambar 17. Deposit kristal CaCO_3 hasil presipitasi larutan CaCO_3 selama 24 jam presipitasi : a) sampel termagnetisasi b) non-mangetisasi.

Tabel 5 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.

Tabel 5. 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

Presipitasi CaCO_3	Presipitasi CaCO_3 pada 96 jam presipitasi (%)			
	Non-magnet	2 kG	4 kG	5200 G
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
% Penurunan deposit		6,6	12,7	18,4

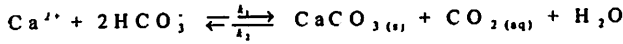
3. Simulasi presipitasi CaCO_3 sistem fluida dinamik

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.

A Persamaan laju presipitasi CaCO_3 pada sistem fluida sirkulasi.

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:

$$\left[\frac{d[\text{CaCO}_3]}{dt} \right] = r_{\text{CaCO}_3} = k_1[\text{Ca}^{2+}][\text{HCO}_3^-]^2 - k_2[\text{CaCO}_3][\text{CO}_2]$$

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

$$[\text{Ca}^{2+}]_i = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{CaCO}_3]$$

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

$$\left[\frac{d[\text{Ca}^{2+}]}{dt} \right] = - \left[\frac{d[\text{CaCO}_3]}{dt} \right] = -k_1[\text{Ca}^{2+}][\text{HCO}_3^-]^2 + k_2[\text{CO}_2]([\text{Ca}^{2+}] - [\text{Ca}^{2+}]_i)$$

Jika $K_1 = k_1[\text{HCO}_3^-]^2$ dan $K_2 = k_2[\text{CO}_2]$ maka:

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

Persamaan diferensial diatas dapat diintegrasikan menjadi persamaan sebagai berikut:

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

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

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

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:

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

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.

Nilai K_2 merupakan fungsi konsentrasi CO_2 terlarut. Proses sirkulasi pada larutan akan menyebabkan lepasnya CO_2 ke fasa gas disertai naiknya pH larutan. 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). 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 :

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

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-data percobaan yang tersedia. Model persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung waktu efektif magnetisasi (t_{me}), penurunan Ca/Ca_i efektif ($(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$) dan persen kenaikan presipitasi relatif (PKPR) dari proses magnetisasi air sadah.

B Hasil simulasi t_{me} , $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ dan PKPR

Waktu efektif magnetisasi (t_{me}) adalah waktu dimana proses magnetisasi masih berpengaruh pada penurunan Ca/Ca_i (presipitasi $CaCO_3$). Nilai penurunan Ca/Ca_i yang dicapai saat waktu efektif magnetisasi disebut penurunan Ca/Ca_i efektif ($(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$). Nilai t_{me} dan $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ merupakan parameter efektivitas magnetisasi larutan $CaCO_3$ untuk sistem sirkulasi fluida dinamik. Peningkatan nilai $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ akan menyebabkan meningkatnya presipitasi $CaCO_3$ yang ditunjukkan dengan bertambahnya persen kenaikan presipitasi relatif antara sampel termagnetisasi dan non-magnetisasi. Model persamaan laju presipitasi $CaCO_3$ dapat digunakan untuk memprediksi nilai t_{me} dan $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ yaitu dengan membuat tetap variabel K_2 untuk menghilangkan efek sirkulasi pada presipitasi $CaCO_3$.

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

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

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

Nilai $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ menunjukkan kenaikan presipitasi akibat magnetisasi di awal presipitasi, sedangkan PKPR menunjukkan kenaikan presipitasi sampel termagnetisasi setelah 120 menit proses sirkulasi.

Data percobaan PKPR sebagai pengaruh kecepatan alir, kuat medan, panjang magnet, konsentrasi, dan volume sampel didapat dari data percobaan yang telah dilakukan pada penelitian ini, sedangkan untuk hasil simulasi nilai t_{me} , $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ dan PKPR diberikan pada tabel 6,7,8,9 dan 10.

Tabel 6. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$, dan PKPR pada berbagai kecepatan alir

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

Tabel 7. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$, dan PKPR pada berbagai kuat medan

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

Tabel 6 dan 7 menunjukkan terjadi kenaikan t_{me} , $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$, dan PKPR dengan naiknya kecepatan alir dan kuat medan, sedangkan panjang magnet dan volume sampel tidak mempengaruhi efektivitas magnetisasi (t_{me} dan $(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$) seperti yang ditunjukkan pada tabel 8 dan 9. Panjang magnet dan volume sampel hanya mempengaruhi waktu sirkulasi magnetisasi.

Tabel 8. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), $(\Delta(C_a/C_{ai})_{ef})$, dan PKPR pada berbagai panjang magnet

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

Tabel 9. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), $(\Delta(C_a/C_{ai})_{ef})$, dan PKPR pada berbagai volume sampel

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

Tabel 10 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. Data percobaan menunjukkan pada konsentrasi Ca_i 0,002 M menyebabkan peningkatan PKPR hingga 79,7 persen.

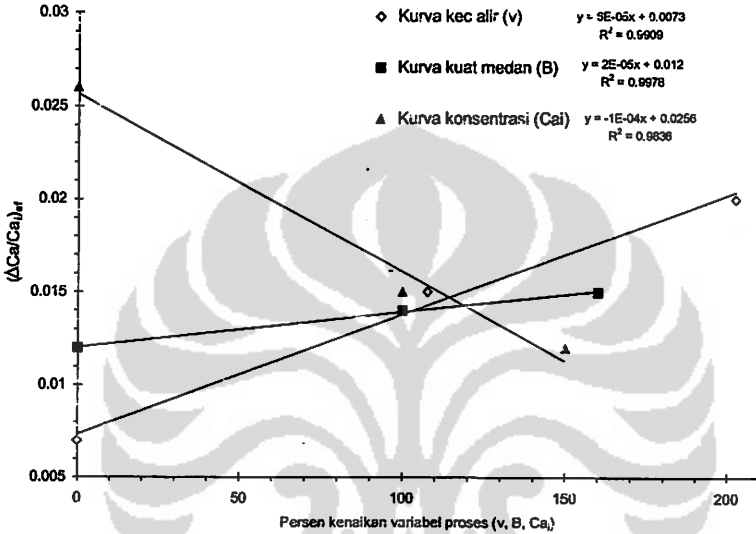
Tabel 10. Hasil simulasi waktu magnetisasi efektif (t_{me}), $(\Delta(C_a/C_{ai})_{ef})$, dan PKPR pada berbagai konsentrasi sampel

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

Efek medan magnet terhadap penurunan ion Ca^{2+} ($(\Delta(C_a/C_{ai})_{ef})$) yang ditunjukkan pada tabel 6 hingga tabel 10 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.

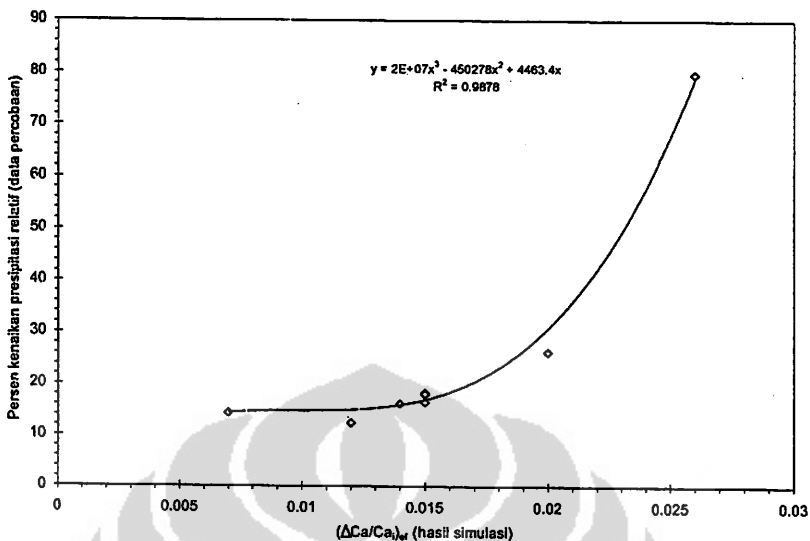
C Analisis sensitivitas variabel proses terhadap efektivitas magnetisasi

Gambar 18 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 18. Kurva regresi linier $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ terhadap persen kenaikan kecepatan alir (v), kuat medan (B), dan konsentrasi sampel (Ca).

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 19 menunjukkan adanya hubungan kuantitatif antara PKPR data percobaan dengan nilai $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ yang merupakan hasil simulasi. Gambar 19 menunjukkan peningkatan persen kenaikan presipitasi relatif pada harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ di atas 0,015 bersifat eksponensial.



Gambar 19. Kurva persen kenaikan presipitasi relatif (sumbu y) terhadap harga $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$ (sumbu x) hasil regresi

4. Konsep sistem AMT penurun kesadahan air dan pencegahan kerak

A. Tahapan sistem AMT

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 kerak yang terbentuk (deposit) lebih mudah terlepas dari dinding. Magnetisasi dilakukan dengan sistem sirkulasi fluida dinamik yang dilanjutkan dengan proses agitasi mekanik dan pengendapan. Tahapan proses tersebut akan dikaji efektivitasnya dalam mendorong presipitasi CaCO_3 dan juga sifat depositnya berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.

A1. 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. Untuk larutan CaCO_3 dengan supersaturasi rendah, 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 5).

A2. 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 4). Efek medan magnet yang terjadi pada awal presipitasi mendorong pembentukan inti (nuklei) yang akan sangat menentukan pada proses pertumbuhan kristal selanjutnya. 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 18).

A.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 dalam waktu singkat (kurang dari 10 menit) pada larutan dengan saturasi rendah (pH rendah) dimana belum terjadi presipitasi saat magnetisasi dan sirkulasi.

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.

B. Konfigurasi sistem AMT

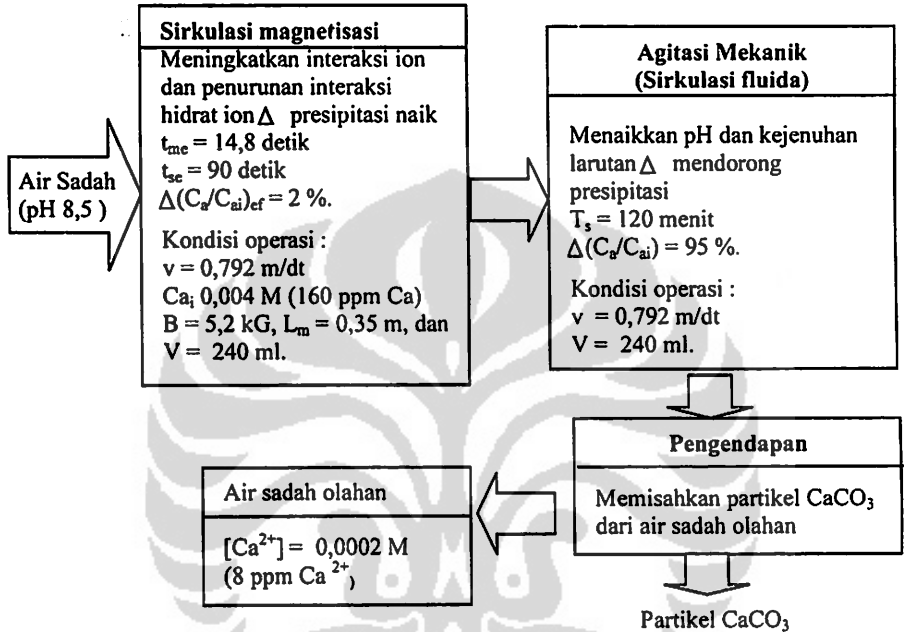
Ada 2 konfigurasi proses sistem AMT yang akan diajukan pada laporan ini dimana masing-masing alternatif akan dibahas efektivitasnya dalam menekan jumlah ion Ca^{2+} pada air sadah, berikut pembahasannya.

B.1 Sistem AMT 1.

Gambar 20 adalah Sistem AMT 1 untuk umpan dengan Supersaturasi tinggi (pH 8,5, Ca_i : 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}) 14,8 detik (t_{se} : 90 detik) dan penurunan ion Ca ($(\Delta(C_a/C_{ai}))_{ef}$ adalah 2 %.

Penurunan ion Ca^{2+} setelah 120 menit agitasi mekanik dengan aliran sirkulasi mencapai 95 %. Sebagai perbandingan, jika pengolahan air sadah hanya menggunakan agitasi mekanik (sirkulasi tanpa medan magnet) maka penurunan ion Ca^{2+} yang dicapai adalah 75,3 %, dan jika tanpa magnetisasi dan tanpa agitasi mekanik, maka penurunan ion Ca^{2+} hanya mencapai 5,4 %



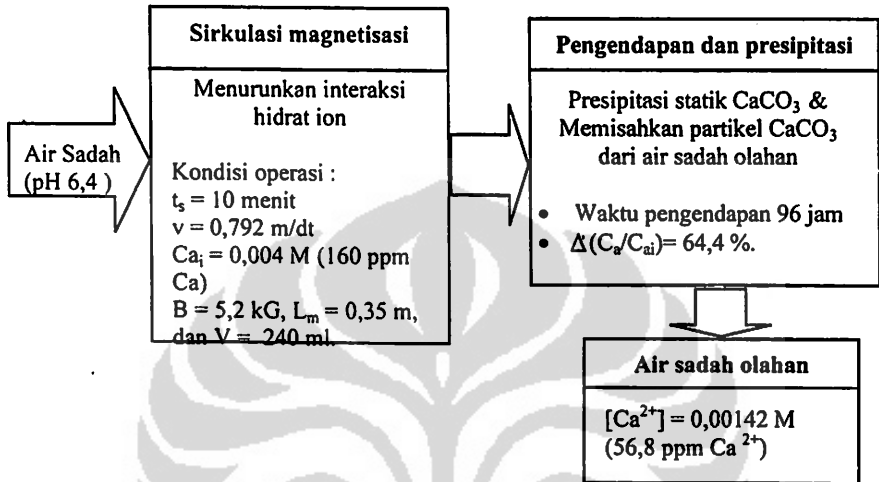
Gambar 20. Skema proses konsep sistem AMT 1 untuk umpan dengan supersaturasi tinggi.

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.

B2. Sistem AMT 2.

Gambar 21 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.



Gambar 23. 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 %. 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 %.

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

Ca²⁺ sebesar 160 ppm dan pH 6,4. Untuk kondisi umpan yang sama dengan AMT 2 (160 ppm Ca²⁺ dan pH 6,4) maka AMT 1 membutuhkan pretreatment berupa agitasi mekanik untuk menaikkan pH umpan menjadi 8,5.

Proses AMT 1 dapat menurunkan kesadahan hingga 8 ppm ion Ca²⁺ (gambar 20) 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 4.11. 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 11. Klasifikasi kesadahan air (Hardness) berdasarkan konsentrasi ion Ca²⁺ 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⁺	

KESIMPULAN

Magnetisasi air sadah mempengaruhi interaksi hidrat ion dan interaksi ion serta presipitasi CaCO₃ baik pada sistem fluida statik maupun dinamik. Magnetisasi larutan CaCO₃ dengan sistem fluida dinamik meningkatkan presipitasi CaCO₃ 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 Na₂CO₃ dan CaCl₂ sistem fluida statik menimbulkan efek penguatan interaksi hidrat ion dan menurunkan presipitasi CaCO₃. Untuk sistem fluida dinamik terjadi efek pelemahan interaksi ion dan menaikkan presipitasi CaCO₃. 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 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.

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 memperlemah 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, sedangkan efek sirkulasi terjadi terus selama 120 menit proses sirkulasi.

Magnetisasi larutan CaCO_3 sistem fluida dinamik menunjukkan terjadi kenaikan persen penurunan deposit. 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 :

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

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+} ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$). Efek kenaikan kecepatan alir dan penurunan konsentrasi sampel dalam meningkatkan ($\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$) 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 $\Delta(C_a/C_{ai})_{ef}$.

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.

DAFTAR ACUAN

- ^aChibowski, E., Lucyana 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.
- 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.
- Gabrielli, C., R, Jaouhari., G, Maurin, M, Keddam. 2001. Magnetic Water Treatment for Scale Prevention. *Water Research*. (35) : 3249-4359.
- 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.
- 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. Prentince-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
- Kozic, V., L.C, Lipus. 2003. Magnetic Water Treatment for a Less Tenacious Scale. *Journal of. Chemical. Inf. Computer Scince*, (43) : 1815-1819.
- Kemmer, F. N. *The NALCO Water Handbook*. 1988. 2nd Ed, New York : McGraw-Hill Book Co.
- 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.
- ^aSaksono, N., A, Fauzi., Setijo, B., Azwar, M., Roekmijati, W.S. 2007. Effect of magnetic field on Cadium Carbonate precipitation in static and dynamic fluid systems. *14TH Regional Symposium Chemical Engineering*
- ^bSaksono, N., Muhammad, H., Setijo, B., Roekmijati, W. 2007. Pengaruh Medan Magnet terhadap Konduktivitas larutan Na₂CO₃ dan CaCl₂ serta Presipitasi dan Morfologi Partikel CaCO₃ Pada Sistem Fluida Statis. *Jurnal Teknologi* No 4 Tahun XXI.
- ^cSaksono, N., Elisabeth, A. S., Setijo, B., Roekmijati, W., Azwar, M. 2007. Efek Medan Magnet pada Penurunan Kesadahan dan Pencegahan Pembentukan Kerak CaCO₃. *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*

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 CaCO_3 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:

1. **Prof. Dr. Roekmijati Widaningroem Sumantojo M.Si** atas bimbingannya dalam pelaksanaan penelitian, penulisan makalah dan laporan disertasi.
2. **Dr. Setijo Bismo, DEA** atas bimbingannya dalam pelaksanaan penelitian, penulisan makalah dan laporan disertasi.
3. **Dr. Azwar Manaf, M.Met** atas bimbingannya dalam pelaksanaan penelitian, penulisan makalah dan laporan disertasi.
4. Panitia Penguji Disertasi. **Prof. Dr. Widodo W.P, DEA, Dr. Slamet, MT, Dr. Asep Handaya Saputra, M.Eng, Dr. Bardi Murachman, DEA,** yang telah memberikan masukan pada laporan disertasi ini.
5. Rekan-rekan sekerja di Departemen Teknik Kimia FTUI, **Dr.fng. Misri Gozan, M.Tech, Dr. rer.nat Yuswan Muharam, MT, Ir. Diyan Supramono, MSc, Ir. Setiadi M.Eng,** dan seluruh staf dan karyawan yang tidak bisa disebutkan satu per satu, atas dukungannya moril dalam mengikuti program doktor ini.
6. 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.
7. **Osaka Gas Fondation** yang telah memberikan bantuan finansial atas penelitian ini dan semua pihak yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.

Semoga Allah S.W.T. berkenan membalas budi baik yang telah diberikan oleh semua pihak.

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 Petrokemia, 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

1. 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
2. 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.
3. 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.
4. Nelson Saksono, Elisabeth A. S., Setijo Bismo, Roekmijati W, dan Azwar Manaf. Efek Medan Magnet pada Penurunan Kesadahan dan Pencegahan Pembentukan Kerak CaCO_3 . Jurnal Sain Materi Indonesia Edisi Khusus oktober 2007.

- 5 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.
- 6 Nelson Saksono. Magnetisasi Air Sadah Untuk Pencegahan Pembentukan Kerak (Review pra-kualifikasi), Jurnal Teknologi No 4 Tahun XX, 2006.
- 7 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.

