

JURNAL
KINETIKA DAN PEMBENTUKAN KERAK FERRO KARBONAT DENGAN
PENAMBAHAN ZEOLIT 1500 mg dan 3000 mg



SKRIPSI

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana S-1 pada Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Semarang

Disusun oleh:
Arif Windarto
C2A216001

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SEMARANG
2018

KINETIKA DAN PEMBENTUKAN FERRO KARBONAT DENGAN PENAMBAHAN ZEOLIT 1500 mg dan 3000 mg

Arif windarto, Dr. Samsudi Raharjo, MT, MM dan
Rubijanto JP., ST, MT

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Semarang

Email : arifwindart@gmail.com

ABSTRAK

Proses alami dari reaksi kimia antara kandungan-kandungan yang terkandung atau terlarut di dalam air dalam suatu pergerakan sistem kerja yang mengakibatkan timbulnya kerak sehingga terjadi kerugian di dalam sistem. Salah satunya komponennya adalah Ferro karbonat $\text{Fe}_2 (\text{CO}_3)^3$. Fenomena pengerakan sering dijumpai di sistem perpipaan industri maupun rumah tangga. Penyumbatan yang dihasilkan dari proses pengerakan menimbulkan masalah teknis maupun ekonomis. Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti besi dan karbonat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada peralatan berat. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri seperti pada pipa pipa hidrolik alat berat. Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti alkalin, magnesium, kalsium, klorid, sulfat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri dan rumah tangga yang memanfaatkan pergerakan fluida untuk proses kerjanya.

Kata Kunci : *Ferro carbonat*, Pengerakan Ferro karbonat

PENDAHULUAN

Pengerakan Ferro karbonat tidak hanya fenomena kristalisasi yang terbentuk dalam proses alami (*biomineralization*), tetapi merupakan masalah yang sering ditemui dalam berbagai alat yang menggunakan pipa sebagai media transfer cairan (Alice et al., 2011). Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti besi dan karbonat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada peralatan berat. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri seperti pada pipa hidrolik alat berat. Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi (Hisyam, 2013).

Ferro karbonat (FeCO_3) merupakan kerak yang terbentuk dalam proses alami dan menjadi masalah yang sering ditemui dalam pipa (Akhyari et al., 2012). Kerak merupakan suatu deposit dari senyawa-senyawa anorganik yang terendapkan dan membentuk timbunan kristal pada permukaan suatu substansi. Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti alkalin, magnesium, kalsium, klorid, sulfat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Kerak biasanya mengendap dan tumbuh pada peralatan industri seperti *cooling tower, heat exchangers, pipe, casing manifold, tank* dan peralatan industri lainnya (Alice et al., 2011; Holyz et al., 2004). (Isopecus et al., 2010; Hisyam, 2013; Gourdon et al., 2011).

Potensi kerak yang disebabkan oleh kerak besi (II) karbonat dimiliki hampir semua jenis pipa. Besi (II) karbonat membentuk padatan atau deposit yang sangat kuat menempel pada permukaan pipa-pipa besi. Se jauh ini FeCO_3 merupakan penyebab kerak pada beberapa sistem seperti pipa hidrolik alat berat (Tzotzi et al., 2007; Amor et al., 2004). Penyebab terjadi kerak di dalam pipa akan mengurangi diameter serta menghambat aliran fluida pada sistem pipa tersebut, sehingga menimbulkan masalah terhambatnya aliran fluida. Terganggunya aliran fluida tersebut menyebabkan tekanan semakin tinggi, sehingga pipa mengalami kerusakan (Basim et al., 2012).

Metode mengatasi pembentukan kerak di industri minyak dan gas biasanya dengan menerapkan bahan kimia yang dikenal sebagai *inhibitor* untuk mengontrol pertumbuhan kristalisasi FeCO_3 dengan tujuan, mengurangi, mencegah atau menunda, pembentukan kerak FeCO_3 (Alimi et al., 2007; Azimi and Papangelakis, 2010; Rabizadeh et al., 2014). Inhibitor

biasanya diinjeksikan kedalam larutan yang secara kontinyu maupun periodik metode ini mampu mengendalikan proses *nucleation*, pertumbuhan kristal FeCO_3 yang terjadi pada permukaan pipa dan peralatan lainnya (Sediono et al., 2011; Ratna, 2011).

Kerak juga dapat dicegah menggunakan zeolit sebagai *adsorben* untuk mengontrol *impurity* senyawa organik serta komposisi morfologi dan fase kristal FeCO_3 dan mencegah proses *nucleation*, pertumbuhan kristal FeCO_3 (Muryanto et al., 2014; Siswoyo dan Erna., 2005; Mullin, 2004). Hal-hal inilah yang mendasari untuk dilakukan suatu penelitian lebih lanjut mengenai inhibitor yang lebih efektif yaitu dengan adsorben zeolit .

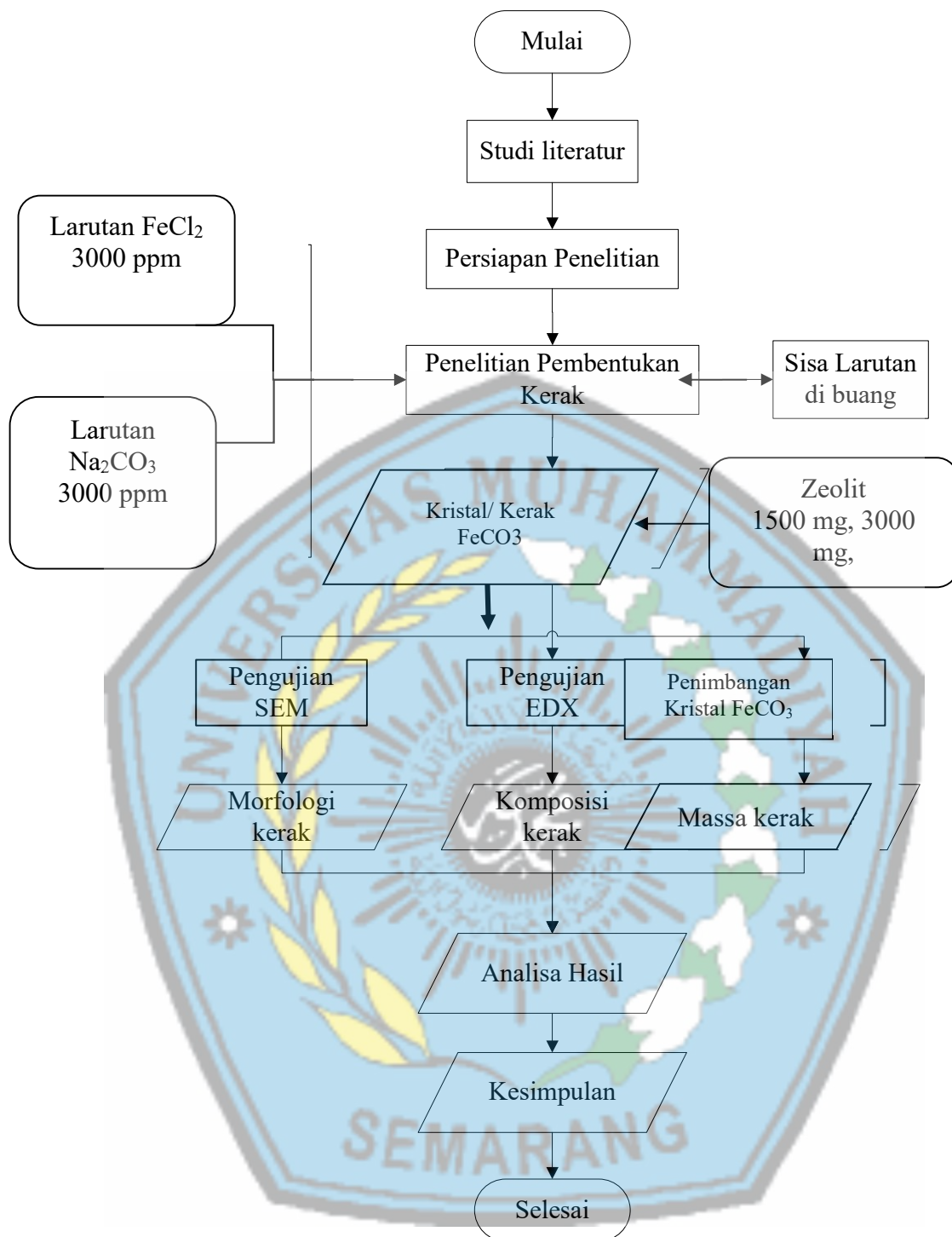
Oleh karena itu, pada penelitian ini menggunakan zeolit sebagai *adsorben* diharapkan mampu menghambat laju pertumbuhan kerak ferro karbonat yang terbentuk di dalam pipa-pipa industri. Penelitian ini juga mempelajari mengetahui perubahan fasa morfologi kristal dan pertumbuhan massa kerak.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Larutan Na_2CO_3 dengan konsentrasi 3000 ppm dibuat dengan melarutkan kristal Na_2CO_3 (*Natrium Carboant*) grade : analitik
- Larutan FeCl_2 dengan konsentrasi 3000 ppm dibuat dengan melarutkan kristal FeCl_2 (*Calcium Chloride Dihydrad*) grade : analitik
- Zeolit dengan massa 1500 mg dan 3000 mg
- Aquades

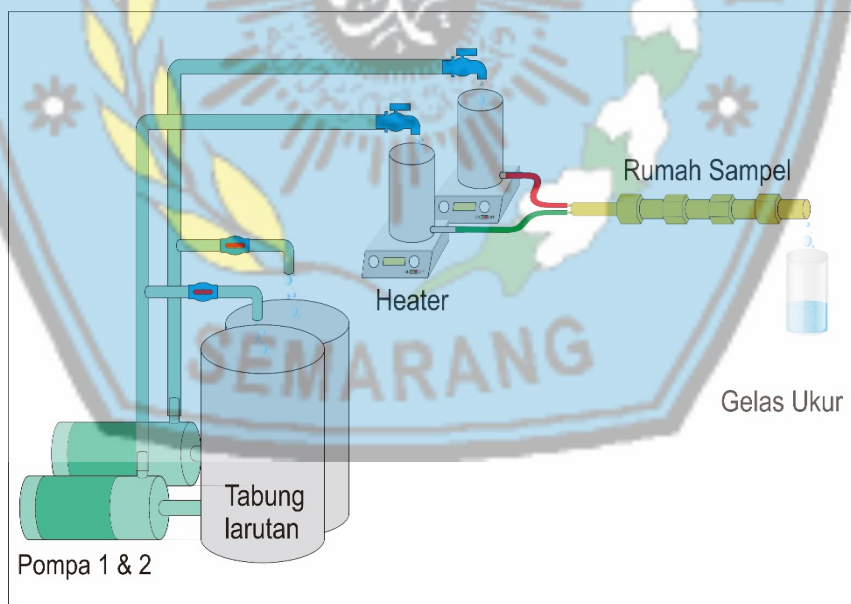


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Alat Eksperimen Pembentukan kerak

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat yang di rancang sendiri oleh peneliti terdahulu. Alat tersebut terdiri dari empat buah bejana yaitu dua bejana dibawah (1,2) dengan kapasitas 6 liter dan dua bejana diatas (3, 4) dengan kapasitas 0,8 liter. Kegunaan bejana tersebut adalah untuk menampung larutan FeCl_2 pada bejana 1 dan 3 dan larutan Na_2CO_3 pada bejana 2 dan 4. Pada alat tersebut dipasang dua buah pompa yang digunakan untuk memompa larutan FeCl_2 dari bejana 1 ke bejana 3 dan larutan Na_2CO_3 dari bejana 2 ke bejana 4. Permukaan larutan pada bejana 3 dan 4 dijaga agar keduanya mempunyai ketinggian yang sama dan dapat diatur naik atau turun guna mendapatkan perbedaan ketinggian permukaan dengan pengeluaran akhir dari rumah kupon sehingga dapat digunakan untuk mengatur laju aliran.

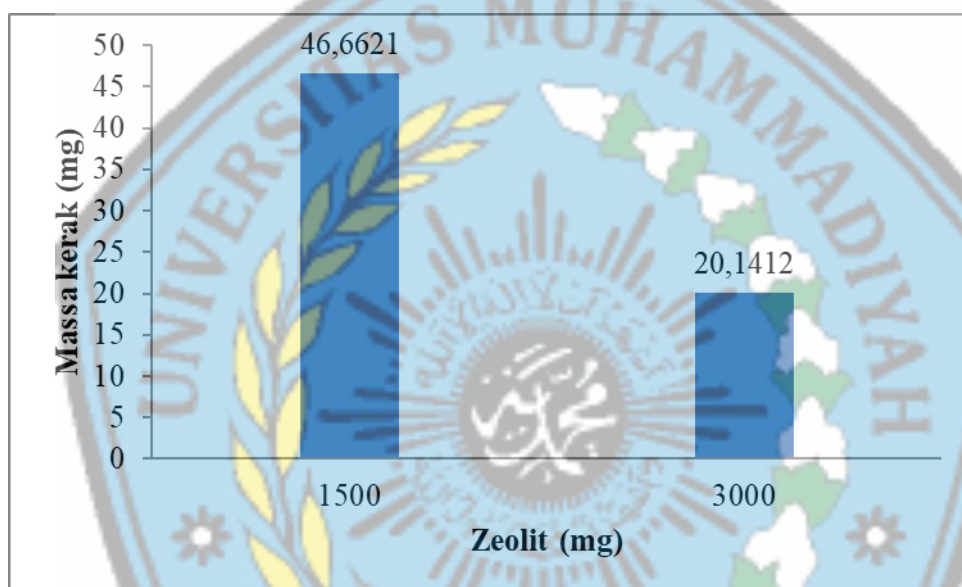
Larutan yang berada didalam bejana 3 dan 4 kemudian secara bersamaan dialirkan menuju kupon, selanjutnya larutan tersebut mengalir dan masuk kedalam bejana penampungan yang kemudian dibuang sebagai limbah. Didalam kupon-kupon larutan FeCl_2 dan Na_2CO_3 bereaksi sehingga membentuk kerak. Kerak tersebut mengendap pada dinding-dinding kupon yang disebut sebagai kerak FeCO_3 . Penambahan asam tartrat dilakukan ketika larutan FeCl_2 dan Na_2CO_3 bertemu di dalam pipa.



Gambar : 2 Skema *Closed Circuit Scale Simulator*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Zeolite ditambahkan dalam proses pembentukan kerak dilakukan dengan tujuan untuk menghambat pertumbuhan kerak. Zeolit yang ditambahkan dalam penelitian ini adalah 1500 mg, 3000 mg. Zeolit dipilih sebagai aditif untuk menghambat pertumbuhan kerak karena zeolit merupakan senyawa yang memiliki daya serap (adsorpsi) yang kuat terhadap ion-ion pembentukan kerak. Penelitian dilakukan dengan membandingkan tanpa penambahan zeolit dan penambahan zeolit 1500 mg dan 3000 mg.



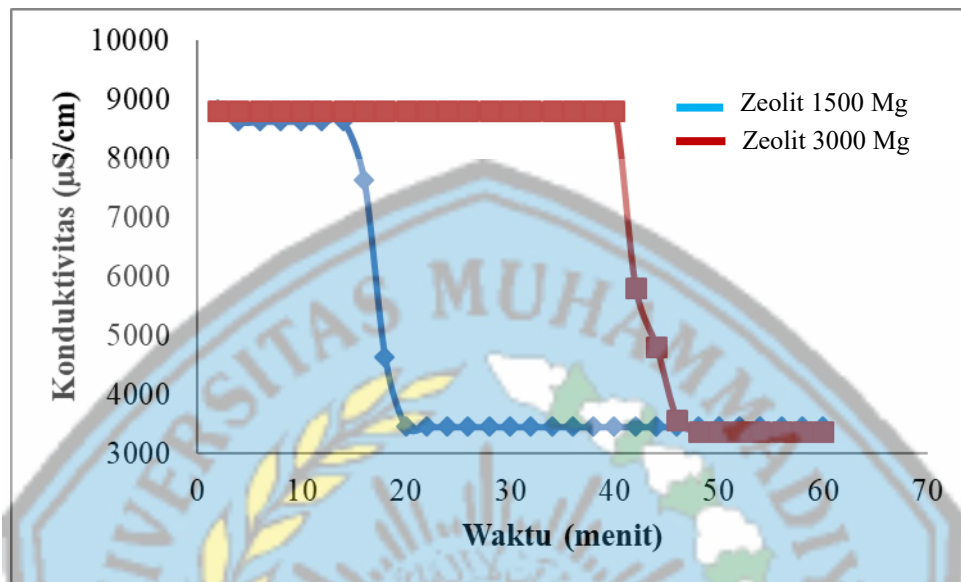
Gambar 3. Grafik pengaruh zeolit terhadap massa kerak FeCO_3

Pada Gambar 4.1, menunjukkan bahwa pada penambahan zeolit 1500 mg menghasilkan 46,6621 mg kerak FeCO_3 sedangkan penambahan zeolit 3000 mg menghasilkan 20,1412 mg kerak FeCO_3 . Hal ini menunjukkan pada kondisi penambahan zeolit, reaksi antara reaktan FeCl_2 dan Na_2CO_3 berjalan lebih lambat dibanding dengan tanpa penambahan. Hal ini disebabkan zeolit merupakan senyawa yang memiliki banyak pori yang berfungsi megadsorpsi ion Fe^{2+} dan CO_3^{2-} sehingga dapat menghambat pembentukan kerak FeCO_3 .

Analisa Waktu Induksi

Analisa yang dilakukan yaitu tentang waktu yang dibutuhkan oleh senyawa FeCO_3 untuk membentuk inti kristal pertama kali. Waktu induksi ditandai dengan menurunnya nilai

konduktivitas larutan secara tajam yang menandakan bahwa ion besi telah bereaksi dengan ion karbonat dan mengendap membentuk kerak. Waktu induksi untuk penambahan zeolit 1500 mg dan 3000 mg masing-masing menunjukkan nilai yang berbeda seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Grafik hubungan antara konduktivitas dengan waktu.



Gambar 4. Grafik hubungan konduktivitas dengan waktu

Gambar 4. merupakan grafik hubungan antara konduktivitas larutan dengan waktu penelitian pada penambahan zeolit dengan konsentrasi larutan Fe^{2+} 3000 ppm. Waktu induksi untuk penambahan 1500 mg zeolit adalah 14 menit dengan nilai konduktivitas 8630 $\mu\text{S/cm}$ sedangkan penambahan zeolit 3000 mg memiliki waktu induksi 40 menit dengan nilai konduktivitas sebesar 8815 $\mu\text{S/cm}$. Waktu tersebut merupakan waktu induksi dikarenakan ion larutan mulai bereaksi untuk membentuk inti kristal.

Analisa Kinetika reaksi pembentukan kerak.

Kinetika kristalisasi $\text{CaCO}_3\text{-CaSO}_4$ dapat dijelaskan oleh persamaan laju berikut (Vyazoskin, 2000):

$$d\alpha/dt = K(T) f(\alpha)$$

Keterangan:

K adalah konstanta laju reaksi tergantung suhu, $f(\alpha)$ adalah model reaksi, t adalah waktu.

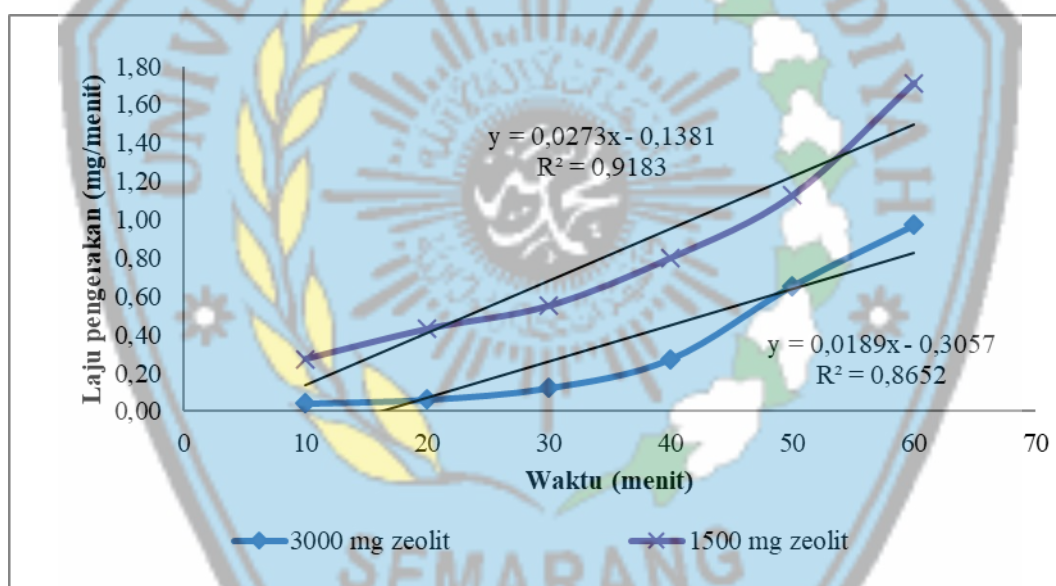
Tetapi laju reaksi konstanta K diberikan oleh persamaan berikut :

$$K(T) = K_0 \exp. (-E_a / RT)$$

Keterangan:

K_0 adalah faktor pre-eksponensial laju konstan, E adalah energi aktivasi, T adalah suhu dan R bersifat universal gas konstan (Jankovic, 2008; Won et al, 2000; Heireche et al, 2007).

Kecepatan reaksi dan suatu reaksi tergantung pada jumlah tabrakan antara molekul-molekul pereaksi yang terjadi tiap satuan waktu. Makin besar jumlah tabrakan ini, maka semakin besar pula kecepatan reaksi. Salah satu cara untuk memperbesar jumlah tabrakan ialah dengan menaikkan jumlah molekul persatuan volume, sehingga kemungkinan terjadinya tabrakan antara molekul-molekul akan bertambah besar pula. Ungkapan matematik yang memberikan hubungan antara kecepatan reaksi dan konsentrasi pada temperatur tetap disebut Hukum Kecepatan Reaksi. Bagi reaksi elementer, kecepatan reaksi pada setiap waktu berbanding lurus dengan konsentrasi zat-zat pereaksi pada saat itu. Reaksi jenis ini, hukum kecepatan reaksinya dapat langsung diturunkan dari persamaan stokiometri. Grafik hubungan antara waktu dengan laju reaksi ditunjukkan pada Gambar 5.



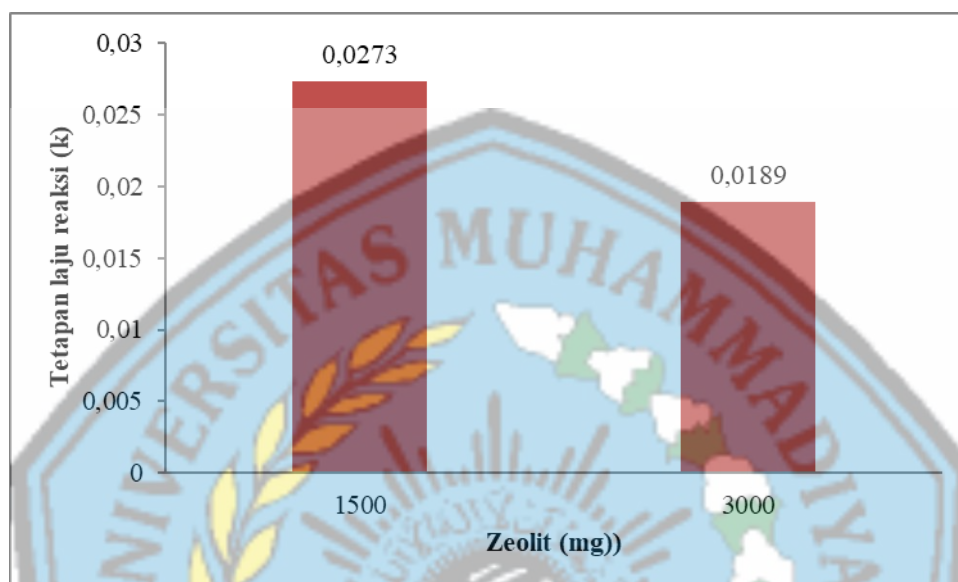
Gambar 5. Grafik hubungan antara waktu dengan laju reaksi

Tabel 1. Tetapan laju reaksi (k)

Zeolit	Persamaan	R^2	k (mg.det ⁻²)
1500 mg	$Y = 0,0273 x - 0,3057$	0,9183	0,0273
2000 mg	$Y = 0,0189 x - 0,1381$	0,8652	0,0189

Dari data nilai k menunjukkan kecepatan reaksi. Nilai k semakin besar, maka kecepatan reaksi pembentukan kerak akan semakin meningkat. Dari data tersebut menunjukkan semakin

besar massa zeolit yang ditambahkan membuat nilai tetapan kecepatan reaksi menurun. Hal ini membuktikan penambahan zeolit mampu berperan sebagai inhibitor yang menghambat laju reaksi (Aboulkas and Harfi, 2008; Chiang et al., 2007; Vyazovkin and Dranca, 2006; Won et al., 2000; Zhijia et al., 2013). Hubungan antara massa zeolit dengan tetapan laju reaksi ditunjukkan pada Gambar 4.4.

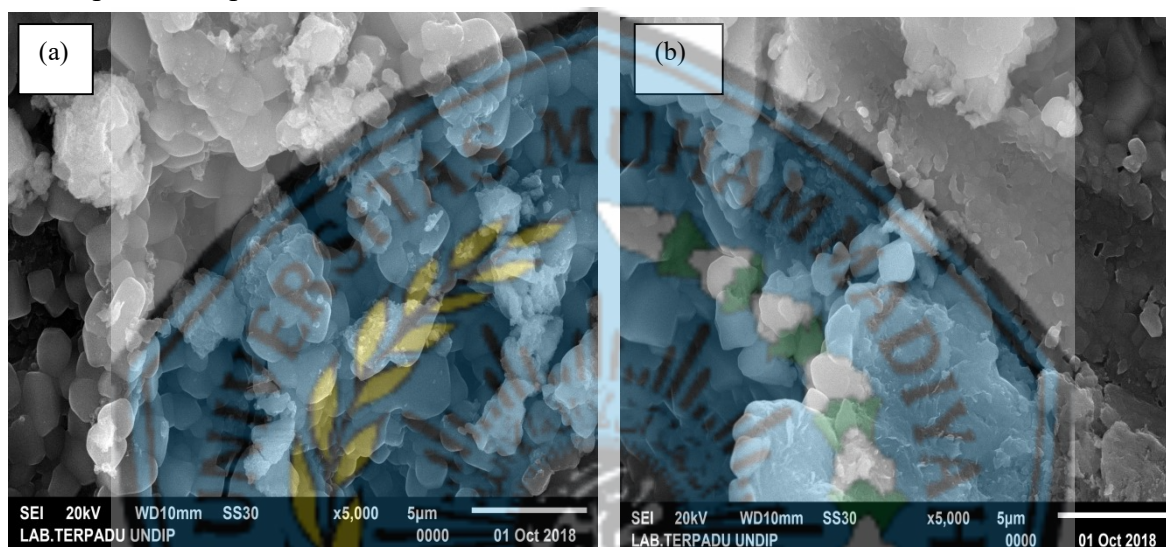


Gambar 6. Hubungan antara massa zeolit dengan tetapan laju reaksi

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara massa zeolit dengan tetapan laju reaksi. Semakin banyak zeolit yang ditambahkan semakin kecil nilai tetapan laju reaksi. Pada penambahan zeolit 1500 mg menghasilkan nilai tetapan laju reaksi $0.0273 \text{ mg} \cdot \text{det}^{-2}$ sedangkan pada penambahan zeolit 3000 mg menghasilkan tetapan laju reaksi $0.0189 \text{ mg} \cdot \text{det}^{-2}$. Tetapan laju reaksi menunjukkan besarnya kecepatan pembentukan kristal. Semakin besar nilai tetapan laju reaksi maka semakin cepat laju reaksi sehingga massa kerak yang terbentuk akan semakin sedikit. Begitu pula sebaliknya, semakin kecil tetapan laju reaksi maka semakin sedikit massa kerak yang terbentuk. Berdasarkan hasil analisa kinetika laju reaksi yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 menunjukkan penambahan zeolite yang 3000 mg mampu mengurangi tetapan laju reaksi lebih besar dibandingkan dengan penambahan zeolite 1500 mg. Hasil ini menunjukkan zeolite mampu berperan sebagai penghambat laju reaksi yang ditunjukkan dengan semakin sedikitnya tetapan laju reaksi dengan semakin besar massa zeolite yang ditambahkan. Mekanisme zeolite menurunkan tetapan laju reaksi dengan cara mengadsorpsi ion ion pembentuk kristal FeCO_3 sehingga jumlah partikel yang bereaksi membentuk kristal FeCO_3 semakin sedikit.

Pengujian SEM

Pengujian morfologi bisa dilakukan pada suatu instrumen yaitu dengan menggunakan perangkat SEM. Pengujian SEM dilakukan untuk mengkaji morfologi kristal untuk membuktikan bahwa ada perubahan morphology kerak akibat penambahan Zeolit 1500 mg dan 3000 mg. Kajian morfologi adalah kajian yang meliputi kekasaran kristal, ukuran kristal, bentuk kristal, proses pengintian erta fenomena pembentukan kristal. Hasil pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 7.



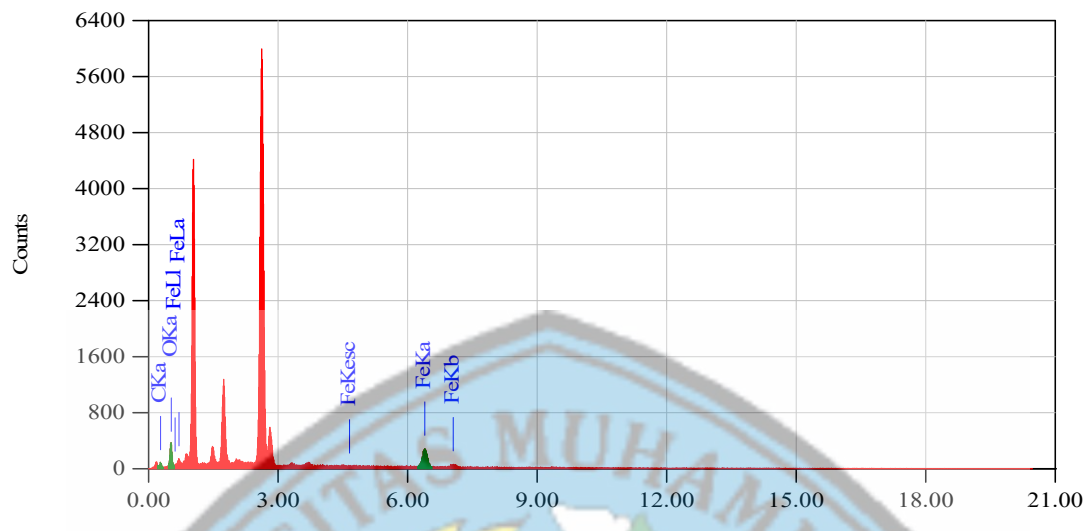
Gambar 4.5. Morfologi kerak Ferro karbonat hasil percobaan (a) penambahan Zeolit 1500 ppm, (b) penambahan Zeolit 3000 ppm.

Pada Gambar 7. menunjukkan penambahan massa zeolit yang semakin besar berpengaruh terhadap bentuk morfologi kristal FeCO_3 . Hasil SEM menunjukkan perubahan bentuk kristal dari plate siderit (tanpa penambahan) menjadi bentuk yang menggumpal. Hal ini disebabkan Zeolit dapat berperan sebagai adsorben yang mampu menghambat pembentukan kerak FeCO_3 . Zeolit mampu menyerap partikel penyusun kerak FeCO_3 sehingga morfologi kristal FeCO_3 menjadi tidak beraturan (Las dkk., 2011; Lestari dan Dewi, 2010; Marsidi, 2001; Muhaji dan Mulyani, 2007; Nurullita dkk., 2010).

Pengujian EDX

Pada prinsipnya mikroskop elektron dapat mengamati morfologi, struktur mikro, komposisi, dan distribusi unsur. Untuk menentukan komposisi unsur secara kualitatif dan kuantitatif perlu dirangkaikan satu perangkat alat EDX (*Energy Dispersive X-ray*

Spectrometer). Hasil Pengujian EDS hasil percobaan pada laju alir 30 mL/menit pada konsentrasi 3000 ppm dapat dilihat pada Gambar 8.

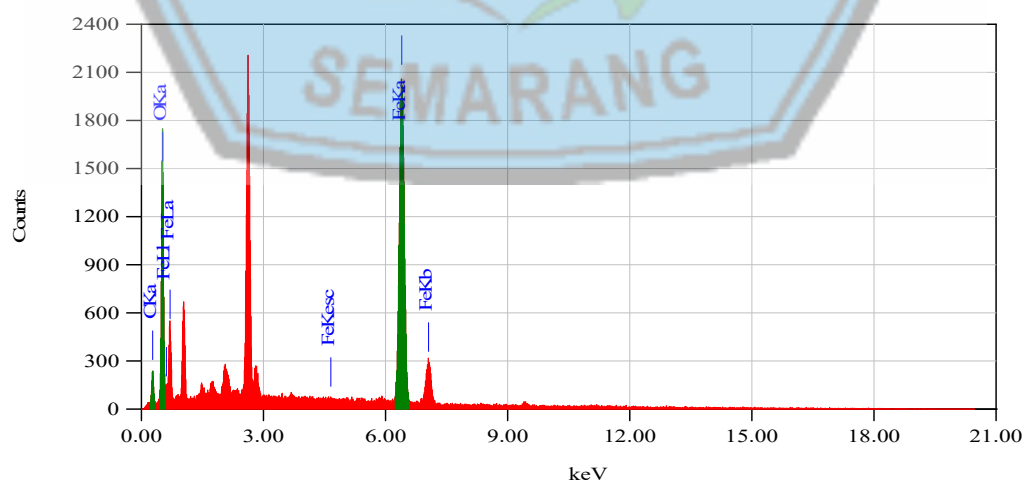


Gambar 8. Gambar Hasil Analisis EDS FeCO_3 penambahan 1500 mg Zeolit

Tabel 2. Hasil analisa mikro kristal FeCO_3 penambahan 1500 mg zeolit

Element	Wt %
C K	21,93
O K	17,51
Fe K	61,11

Hasil Pengujian EDS hasil percobaan pada penambahan Zeolit 3000 mg dengan laju alir 30 mL/menit dan konsentrasi larutan 3000 ppm dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Gambar Hasil Analisis EDS FeCO_3 dengan Zeolit 3000 mg

Tabel 3. Hasil analisa mikro kristal FeCO_3 + Zeolit 3000 mg

Element	Wt %
C K	51,63
O K	10,77
Fe K	37,6

Hasil analisa mikro meliputi komposisi atom pembentuk kristal yang dinyatakan dalam presentase atom. Presentase diatas bila dibandingkan dengan hitungan secara teoritis ternyata mempunyai perbedaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan zeolit mampu menurunkan massa kerak FeCO_3 yang terbentuk. Pada penambahan zeolit 1500 mg menghasilkan 46,6621 mg kerak FeCO_3 sedangkan penambahan zeolit 2000 mg menghasilkan 20,1412 mg kerak FeCO_3 .
2. Hasil pengujian waktu induksi, waktu induksi untuk penambahan 1500 mg zeolit adalah 14 menit dengan nilai konduktivitas 8630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sedangkan penambahan zeolit 3000 mg memiliki waktu induksi 40 menit dengan nilai konduktivitas sebesar 8815 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
3. Semakin banyak zeolit yang ditambahkan semakin kecil nilai tetapan laju reaksi. Pada penambahan zeolit 1500 mg menghasilkan nilai tetapan laju reaksi 0.0273 $\text{mg}\cdot\text{det}^{-2}$ sedangkan pada penambahan zeolit 3000 mg menghasilkan tetapan laju reaksi 0.0189 $\text{mg}\cdot\text{det}^{-2}$.
4. Hasil analisa SEM menunjukan semakin banyak massa zeolite yang ditambahkan morfologi Kristal FeCO_3 semakin menjadi tidak beraturan. Analisa EDX dihasilkan komposisi unsur penyusun kristal adalah C, O dan Fe. Hal ini dapat disimpulkan bahwa kristal yang terbentuk adalah kristal FeCO_3 .

DAFTAR PUSTAKA

- Akhyari K. B., Yudy S. I., Tjuk O., 2012. Pengaruh Penambahan CaCO_3 Sebagai *Blowing Agent* Terhadap Porositas Dan Kekuatan Tekan Pada *Aluminium Foam*. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
- Alice, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P., Leslie, G. (2011). *Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review*. Journal of Membrane Science, 383, 1-16.
- Alimi, F., Tlili, M., Amor, M.B., Gabrielli, C., Maurin, G. (2007), *Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation*, Desalination, 206, 163-168.
- Amor, M. B., Zgolli, D., Tlili, M. M., Manzola, A. S. 2004. Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation. Desalination, 166:79-84.
- Andrzej M. Anderko. 2000. Simulation of FeCO_3/FeS Scale Formation Using Thermodynamic and Electrochemical Models. NACE-00102. CORROSION 2000, 26-31 March, Orlando, Florida
- Azimi G and Papangelakis V. G. 2010. Thermodynamic modeling and experimental measurement of calcium sulfate in complex aqueous solutions. Fluid Phase Equilibria 290: 88–94.
- Basim O. Hasan, Graham J. Nathan, Peter J. Ashman, Richard A. C. 2012. The Effects of temperature and Hydrodynamics on The Crystallization Fouling Under Cross Flow conditions, Journal applied Thermal Engineering. Volume, 36 : 210-218
- Gourdon. 2011. The Effects of Flow Velocity on Crystallization Fouling in Falling Film Black Liquor Evaporators. Proceeding of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, 4 : 23-30
- Hernandez, A. Muñoz and J. Genesca, 2012. Formation of iron-carbonate scale-layer and corrosion mechanism of API X70 pipeline steel in carbon dioxide-saturated 3% sodium chloride. AfinidAd LXIX, 560
- Hisyam, 2013. Pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) di dalam pipa beraliran laminar pada laju alir 30 ml/menit hingga 50 ml/menit dan penambahan aditif. In Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik (Vol. 1, No. 1).
- Holysz, L., Szczes, A., Chibowski, E. (2007). Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 316(2), 996-1002.

- Isopescus, R., Mateescu, C., Mihai, M., Dabija, G. (2010). The effects of organic additives on induction time and characteristics of precipitated calcium carbonate. *Chemical Engineering Research and Design*, 88, 1450-1454.
- Izhar, M Dody, K, Haripurnomo K, dan S. Darmoatmodjo. 2007. Hubungan Antara Kesadahan Air Minum, Kadar Kalsium dan Sedimen Kalsium Oksalat Urin. *Berita Kedokteran Masyarakat* 23(4):200209.
- Las, T., F. Firdiyono, dan A. Hendrawan. 2011. Adsorpsi Unsur Pengotor Larutan Natrium Silikat Menggunakan Zeolit Alam Karangnunggal. *Valensi* 2(2): 368-378.
- Lestari, Dewi Y.. 2010. Kajian Modifikasi Dan Karakterisasi Zeolit Alam Dari Berbagai Negara. Prosiding seminar Nasional Kimia dan pendidikan, Tema: “Profesionalisme Peneliti dan Pendidik dalam Riset dan Pembelajaran yang Berkualitas dan Berkarakter”, Universitas Yogyakarta, 30 Oktober 2010
- Ma'mun, H., Bayuseno, A. P., Muryanto, S. (2013). Pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) di dalam pipa beraliran laminar pada laju alir 30 ml/menit hingga 50 ml/menit dan penambahan aditif asam malat. In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik* (Vol. 1, No. 1).
- Marsidi, R. 2001. Zeolit Untuk Mengurangi Kesadahan Air. *Jurnal Teknologi Lingkungan* 2(1): 1-10.
- Muhaji dan Mulyani, 2007. Pengaruh Proses Pembentukan Endapan Batuan Terhadap Kualitas Zeolit Alam, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya. Surabaya.
- Mullin J.W. 2004. *Crystallization*. Butterworth Heinemann : Boston, MA. 280:185-198.
- Muryanto, S., Bayuseno, A. P., Ma'mun, H., Usamah, M. (2014). Calcium carbonate scale formation in pipes: effect of flow rates, temperature, and malic acid as additives on the mass and morphology of the scale. *Procedia Chemistry*, 9, 69-76.
- Nurullita, U., A. Rahayu, dan M. Z. Arifin. 2010. Pengaruh Lama Kontak Karbon Aktif Sebagai Media Filter Terhadap Persentase Penurunan Kesadahan CaCO_3 Air Sumur Artesis. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Indonesia* 6: 48-56.
- Omkar A. Nafday, Srdjan N., 2005. Iron Carbonate Scale Formation And CO_2 Corrosion In The Presence Of Acetic Acid. Institute for Corrosion and Multiphase Technology, Ohio University, No. 05295
- Pardoyo, L. dan A. Darmawan. 2009. Pengaruh Perlakuan HCl Pada Kristalinitas Dan Kemampuan Adsorpsi Zeolit Alam Terhadap Ion Ca^{2+} . *Jurnal Sains dan Matematika (JSM)* 17(2): 100-104.

- Rabizadeh, T., Caroline., Reacock, Liane G. B. 2014. Carboxylic acid : Effective for Calcium Sulfate Precipitation. Mineralogical
- Raharjo et al., 2016. Coulding CaCO₃ Scale depotion on the pump system lamunaif art low audition of citive acids. BISTECH, 2016.
- Raharjo S. Muryanto S., J. Jamari, A.P Bayuseno, 2016, 'Modeling and optimization of CaCO₃ precipitated from laminar-flow water in the presence of citric acid at an elevated temperature', *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol 11 (15), pp: 8533-8539.
- Raharjo S., A.P. Bayuseno, , J. Jamarib, M. Muryanto, S., 2016, 'Calcium carbonate scale formation in copper pipes on laminar flow', *Matec web of conferences*, 58, 01029.
- Raharjo, S. Muryanto, J. Jamari and A. P. Bayuseno, 2016, 'Optimization of Calcium Sulfate Precipitated in the Laminar Flow Pipe through Response Surface Modeling of Temperature, Ca²⁺ Concentration and Citric acid Additives', *Oriental Journal of Chemistry*, ISSN 0970-020 X, Vol 32 (6), pp: 3145-3154.
- Rahman, A. dan B. Hartono. 2004. Penyaringan Air Tanah Dengan Zeolit Alami Untuk Menurunkan Kadar Besi dan Mangan. *Makara Kesehatan* 8(1): 1-6.
- Ratna P. S., 2011. Studi Penanggulangan Problem Scale Dari Near-Wellbore Hingga Flowline di Lapangan Minyak Limau, Fakultas Teknik UI, Depok.
- Rehan A., 2016. A Combined Experimental and Modelling Approach to Elucidate FeCO₃ Scale Formation Kinetics. Disertation. The University of Leeds Institute of Functional Surfaces, iFS School of Mechanical Engineering.
- Saeid K., Mokhtar C. I., Bothi R., Hamed M., Seyed S. E., Majid M., 2016. Formation of Nano-Scale FeCO₃ Protective Corrosion Product in Carbon Dioxide-Saturated 3% Sodium Chloride Solution. *Engineering Materials*, ISSN: 1662-9795, Vol. 740, pp 3-8
- Sediono, W., Bayuseno, A. P., Muryanto, S. (2011). Eksperimen Pembentukan Kerak Gypsum Dengan Konsentrasi Ca²⁺: 3500 Ppm Dan Aditif Fe²⁺. *Momentum*, 7(2).
- Setiadi, dan Astri Pertiwi. 2007. Preparasi dan Karakterisasi Zeolit Alam Untuk Konversi Senyawa ABE Menjadi Hidrokarbon. *Prosiding Konggres Dan Simposium Nasional Kedua MKICS* : 1-6.
- Setiawan, D. 2006. Karakterisasi Beberapa Zeolit Alam Dalam Kaitannya Dengan Penyerapan Radionuklida Cesium 134 (134Cs). *Jurnal Bionatura*. 8(2):122-138
- Siswoyo, Erna, K. (2005), Identifikasi Pembentukan Scale, Jurusan Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta.

- Suriawan, M. C. Vahindra, dan T. G. T. Nindhia. 2010. Studi Hubungan Struktur Mikro dan Keaktifan Zeolit Alam Akibat Proses Pengasaman. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CakraM* 4(2): 129-131.
- Tzotzi, C., Pahiadaki, T., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., Andritsos, N. (2007). A study of CaCO_3 skala formation and inhibition in RO and NF membrane processes. *Journal of Membrane Science*, 296(1), pp.171-184.
- Winia F., Tor H., Tonje B., Patrick R., 2012. Effect of Precorrosion and Temperature on the Formation Rate of Iron Carbonate Film. *Pipeline technology conference*.
- ZZZIzhar dkk., 2007; Las dkk., 2011; Lestari dan Dewi, 2010; Marsidi, 2001; Muhaji dan Mulyani, 2007; Nurullita dkk., 2010; Pardoyo dan Darmawan, 2009; Rahman dan Hartono, 2004; Setiadi dan Astri, 2007; Setiawan, 2006; Suriawan dkk., 2010)

