

PERBANDINGAN ANALISA KINETIKA REAKSI PEMBENTUKAN KERAK $\text{CaCO}_3\text{-CaSO}_4$ MENGGUNAKAN PERSAMAAN ARRHENIUS DAN ANALISA *DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY* (DSC)

Aulia Nur Rahmadyo D¹⁾, Dini Cahayandari²⁾, Samsudi Rahardjo³⁾
^{1,2,3}Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Semarang

ABSTRAK

Pengerakan kalsium karbonat dan kalsium sulfat merupakan masalah yang sering ditemui dalam berbagai kegiatan industry, hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti alkalin, kalsium, klorid, sulfat, kerak biasanya tumbuh pada peralatan industri seperti cooling tower, heat exchangers, pipes, peralatan industri lainnya yang merupakan masalah serius. Tujuan penelitian mengetahui kinetika reaksi pembentukan kerak $\text{CaCO}_3\text{-CaSO}_4$ pada suhu 50°C dan 60°C , metode yang digunakan melalui percobaan dan Hasil yang dicapai: Semakin tinggi suhu membuat kerak yang terbentuk semakin banyak, pada suhu 50°C menghasilkan massa kerak sebesar 86,5 mg dan tetapan laju reaksi sebesar $8,591 \text{ kJ}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ sedangkan pada suhu 60°C menghasilkan massa kerak 145,2 mg, dan tetapan laju reaksi sebesar $8,591 \text{ kJ}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$. serta Energi aktivasi kerak berdasar hitungan Arrhenius 47,480 kJ. sedangkan berdasar pengujian Differential Scanning Calorimetry (DSC) menghasilkan energi aktivasi sebesar 47,373 kJ. Dengan nilai $R = 0,999$.

Kata kunci: kerak, laju reaksi, energi aktivasi, SEM

PENDAHULUAN

Kerak adalah tumpukan keras dari bahan anorganik terutama pada permukaan perpindahan panas yang disebabkan oleh pengendapan partikel mineral dalam air. Hal ini disebabkan karena terdapatnya unsur-unsur pembentuk kerak seperti alkalin, kalsium, klorida, sulfat dalam jumlah yang melebihi kelarutannya pada keadaan kesetimbangan. Jika konsentrasi siklus ini dibiarkan berlanjut, berbagai kelarutan padat akhirnya akan terlampaui. Padatan kemudian akan menetap di dalam pipa atau pada permukaan pertukaran panas, berakibat ia sering membeku menjadi kerak. Selanjutnya pengerakan banyak terjadi pada pipa pengaliran air, sehingga kecepatan fluida merupakan faktor yang sangat berpengaruh. Fluida yang mengalir dalam pipa mempunyai uraian gaya aksial dan yang menyebabkan pergerakan inti kerak yang terbentuk. Gaya radial menyerupai gaya geser yang mengenai

dinding pipa secara tegak lurus hingga menyebabkan terlepasnya sebagian inti kerak yang telah menempel pada dinding pipa. Selanjutnya inti kerak didorong oleh gaya aksial fluida sehingga terbawa oleh aliran dan menempel pada bagian dinding lain (Basim et al, 2015).

Adanya endapan kerak pada komponen-komponen tersebut diatas, dapat menghambat aliran fluida baik dalam pipa maupun alat *heat exchangers*. Pada *heat exchangers*, endapan kerak akan mengganggu transfer panas sehingga menyebabkan panas akan semakin meningkat. Sedangkan pada pipa-pipa, hambatan aliran terjadi karena adanya penyempitan volume alir fluida serta penambahan kekasaran permukaan pipa bagian dalam yang dapat menyebabkan terjadinya ledakan pada pipa sehingga pipa pecah atau berlubang, seperti yang terlihat pada Gambar.



Gambar. Endapan kerak kalsium karbonat dalam Pipa (b) permukaan Heat exchangers (S. Raharjo, 2017)

Pembentukan kerak, faktor utama berpengaruh terhadap pembentukan, pertumbuhan Kristal serta pengendapan kerak antara lain adalah perubahan kondisi tekanan, laju alir serta temperatur, percampuran dua jenis air yang mempunyai susunan mineral tidak sesuai, adanya supersaturasi, penguapan akibat dari perubahan konsentrasi, pengadukan (agitasi, pengaruh dari turbulensi), waktu kontak antara padatan dengan permukaan media pengendapan serta perubahan pH air (Azimi and Papangelakis, 2010; Amor et al., 2004)

Mekanisme pembentukan endapan kerak berkaitan erat dengan komposisi air di dalam formasi. Secara umum, air mengandung ion-ion terlarut, baik itu berupa kation (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} dan Fe^{3+}), maupun anion (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} dan CO_3^{2-}). Kation dan anion yang terlarut dalam air akan membentuk senyawa yang mengakibatkan terjadinya proses kelarutan. Kelarutan didefinisikan sebagai batas suatu zat yang dapat dilarutkan dalam zat pelarut pada kondisi fisik tertentu. Proses terlarutnya ion-ion dalam air formasi merupakan fungsi dari tekanan, temperatur serta waktu kontak antara air dengan media pembentukan (Amjad and Koutsoukos, 2014).

Proses terlarutnya ion-ion dalam air formasi merupakan fungsi dari tekanan, temperatur serta waktu kontak (*contact time*) antara air dengan media pembentukan. Air mempunyai batas kemampuan dalam menjaga senyawa ion-ion tersebut tetap dalam larutan,

sehingga pada kondisit tekanan dan temperatur tertentu, dimana harga kelarutan terlampaui, maka senyawa tersebut tidak akan terlarut lagi, melainkan terpisah dari pelarutnya dalam bentuk padatan (Amer et al., 2009)

Dalam proses produksi, perubahan kelarutan terjadi seiring dengan penurunan tekanan dan perubahan temperatur selama produksi. Perubahan angka kelarutan pada tiap zat terlarut dalam air formasi akan menyebabkan terganggunya keseimbangan dalam air formasi, sehingga akan terjadi reaksi kimia antara ion positif (kation) dan ion negatif (anion) dengan membentuk senyawa endapan yang berupa kristal (Alice et al., 2011).

Dari penjelasan diatas, faktor yang mendukung pembentukan selama pengendapan kerak yang berpengaruh pada dua faktor penting, yaitu laju pembentukan inti (nukleasi) dan laju pertumbuhan kristal.

Pembentukan inti (nukleus)

Laju pembentukan inti tersebut dapat dinyatakan dengan jumlah inti yang terbentuk dalam satuan waktu, yang dimana jika laju pembentukan itu tinggi maka akan banyak sekali kristal yang akan terbentuk yang berupa partikel-partikel kecil. Pada pembentukan inti bergantung pada derajat lewat jenuh dari larutan semakin tinggi derajat lewat jenuh maka akan semakin besar kemungkinan untuk pembentukan inti baru yang pada akhirnya akan membuat semakin besar laju pembentukan inti.

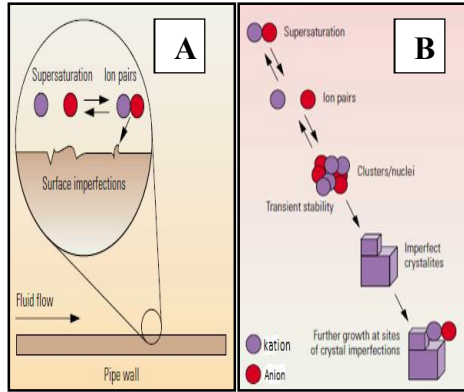
Laju pertumbuhan kristal

Laju pertumbuhan kristal merupakan faktor penting lainnya yang mempengaruhi ukuran kristal yang terbentuk selama pengendapanberlangsung. Semakin tinggi pertumbuhan maka kristal yang terbentuk akan semakin besar. Laju aliran juga bergantung pada derajat lewat jenuh atau bisa disebut juga rekristalisasi.

Tahap Pengendapan

Kecepatan pertumbuhan kristal dipengaruhi oleh ukuran dan berat jenis kristal yang membesar pada tahap sebelumnya. Selain itu proses pembentukan juga dipengaruhi oleh aliran fluida pembawa, dimana kristal akan mengendap apabila kecepatan pengendapan

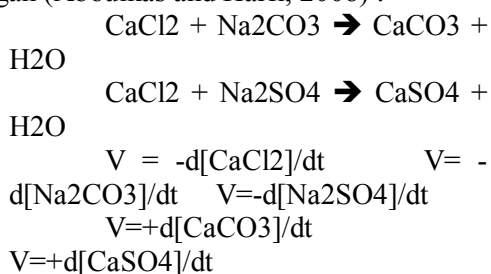
lebih besar dari kecepatan aliran fluida (Siswoyo dan Erna, 2005). Sedangkan berdasarkan metode pembentukannya, pembentukan kristal dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu secara homogen (*homogeneous nucleation*) dan heterogen (*heterogeneous nucleation*) 9), seperti yang terlihat pada gambar.



Gambar. Pertumbuhan dan pengendapan kerak (a) Homogen nucleation (b) Heterogeneous nucleation (Crabtree dkk, 1990)

Kinetika Reaksi CaCO₃-CaSO₄

Kinetika reaksi terjadi ketika berlangsungnya reaksi kimia dan energy yang berhubungan dengan proses tersebut, serta mekanisme berlangsungnya reaksi. Mekanisme reaksi adalah serangkaian reaksi tahap demi tahap yang terjadi berturut-turut selama proses perubahan reaktan menjadi produk, atau urutan langkah-langkah reaksi menuju tersusunya reaksi total. Laju reaksi merupakan laju pengurangan reaktan tiap satuan waktu, atau laju pembentukan produk tiap satuan waktu. Secara umum, bila $A \sim B$, maka laju reaksi (V) dapat dinyatakan dengan (Aboulkas and Harfi, 2008) :



Reaksi kimia adalah proses berubahnya pereaksi menjadi hasil reaksi. Proses itu ada yang lambat dan ada yang cepat. Contohnya bensin terbakar lebih cepat dibandingkan

dengan minyak tanah. Ada reaksi yang berlangsung sangat cepat, seperti membakar dinamit yang menghasilkan ledakan, dan yang sangat lambat adalah seperti proses berkaratnya besi. Pembahasan tentang kecepatan (laju) reaksi disebut kinetika kimia. Dalam kinetika kimia ini dikemukakan cara menentukan laju reaksi dan faktor apa yang mempengaruhinya (Boonchom, 2009).

Tujuan utama kinetika kimia ialah menjelaskan bagaimana laju bergantung pada konsentrasi reaktan dan mengetahui mekanisme suatu reaksi berdasarkan pengetahuan tentang laju reaksi yang diperoleh dari eksperimen (Boyaci, 2005).

Laju reaksi didefinisikan sebagai perubahan konsentrasi persatuan waktu. Satuan yang umum adalah mol/dm⁻³. Umumnya laju reaksi meningkat dengan meningkatnya konsentrasi dan dapat dinyatakan sebagai

$$\text{Laju} = k f(C_1, C_2, \dots, C_i)$$

Di mana k adalah konstanta laju, juga disebut konstanta laju spesifik atau konstanta kecepatan, C_1, C_2, \dots adalah konsentrasi dari reaktan-reaktan dan produk-produk (Brown and Gallagher, 2008).

Laju reaksi kimia terlihat dari perubahan konsentrasi molekul reaktan atau konsentrasi molekul produk terhadap waktu. Laju reaksi tidak tetap melainkan berubah terus-menerus seiring dengan perubahan konsentrasi (Chiang et al., 2007).

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinetika Reaksi

Sifat dan Keadaan Zat

Dalam reaksi kimia terjadi pemutusan dan pembentukan ikatan, dimana jenis ikatan yang dimiliki oleh reaktan dapat mempengaruhi laju reaksi. Selain itu, luas permukaan zat-zat yang bereaksi sangat berpengaruh terhadap laju reaksi, sehingga suatu zat dalam bentuk serbuk dan bongkahan/kepingan akan memiliki laju reaksi yang berbeda.

Konsentrasi

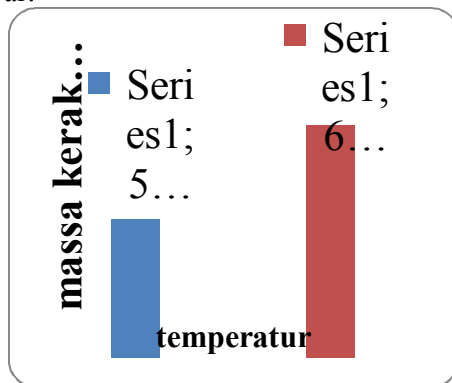
Makin besar konsentrasi zat reaktan berarti besar kemungkinan terjadinya tumbukan yang efektif, sehingga laju reaksinya akan

semakin cepat. Tumbukan yang efektif adalah tumbukan antar molekul yang menghasilkan reaksi, dan hanya dapat terjadi jika molekul yang bertumbukan tersebut memiliki energi aktivasi yang cukup. Energi aktivasi adalah energi minimum yang harus dimiliki molekul agar tumbukannya menghasilkan reaksi.

Kecepatan reaksi bergantung pada banyak faktor. Konsentrasi reaktan memainkan peran penting dalam mempercepat atau memperlambat reaksi tertentu. Konsentrasi mempengaruhi laju reaksi karena banyaknya partikel memungkinkan lebih banyak tumbukan, dan itu membuka peluang semakin banyak tumbukan efektif yang menghasilkan perubahan.

PEMBAHASAN

Pengaruh suhu terhadap massa kerak kalsium sulfat dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh suhu terhadap pembentukan massa kerak campuran kalsium karbonat dan kalsium sulfat. Suhu yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50°C dan 60°C. Hasil variasi suhu tersebut kemudian dilakukan penimbangan. Pengaruh suhu terhadap massa kerak kalsium sulfat ditunjukkan pada Gambar.



Gambar. Grafik hubungan antara Suhu dengan Massa Kerak (mg)

Pada Gambar, menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu membuat kerak yang terbentuk semakin banyak. Pada suhu 50°C menghasilkan massa kerak sebesar 86.5 mg sedangkan pada suhu 60°C menghasilkan massa kerak 145.2 mg. Ini menunjukkan pada kondisi suhu tinggi, reaksi antara reaktan CaCl₂, Na₂SO₄, Na₂CO₃ berjalan lebih cepat dibanding pada kondisi suhu rendah. Semakin tinggi suhu dalam suatu

reaksi akan memberikan tekanan yang kuat, tumbukan antara molekul reaktan CaCl₂ dan Na₂SO₄, Na₂CO₃ akan semakin banyak, sehingga kecepatan reaksi akan meningkat dan jumlah kerak yang terbentuk semakin banyak (Alice et al., 2011; Basim et al., 2012).

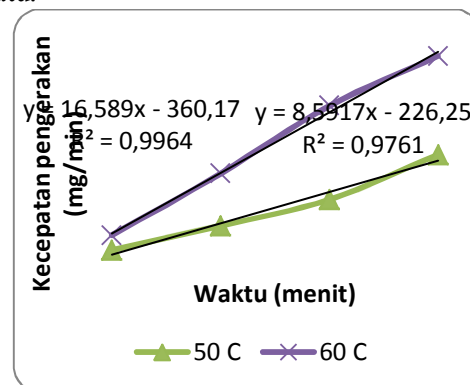
Setiap partikel selalu bergerak dengan menaikkan temperatur, energi gerak atau energi kinetik partikel bertambah, sehingga tumbukan lebih sering terjadi. Dengan frekuensi tumbukan yang semakin besar, maka kemungkinan terjadinya tumbukan efektif yang mampu menghasilkan reaksi juga semakin besar. Suhu atau temperatur juga mempengaruhi energi potensial suatu zat. Zat-zat yang energi potensialnya kecil, jika bertumbukan akan sukar menghasilkan

No	Suhu (°C)	Persamaan	k (x 10 ⁻³) J.mg ⁻¹ .C ⁻¹	kJ.mg ⁻¹ .C ⁻¹
1	50	Y = 8.591.x + 226.1	8.591	8.591
2	60	Y = 16.58x + 360.1	16.58	16.58

tumbukan efektif. Hal ini karena zat-zat tersebut tidak mampu melampaui energi aktivasi. Dengan menaikkan suhu, maka hal ini akan memperbesar energi potensial sehingga ketika bertumbukan akan menghasilkan energi (Rabizadeh et al., 2014; Setta and Neville, 2011).

Penentuan Tetapan Laju Reaksi

Tetapan Laju reaksi disebut juga koefisien laju atau laju reaksi jenis, dengan lambing k (konstanta). Tetapan laju adalah tetapan perbandingan antara laju reaksi dan hasil kali konsentrasi spesi yang mempengaruhi laju reaksi. Tetapan laju juga merupakan perubahan konsentrasi pereaktan atau produk reaksi per satuan waktu dalam suatu reaksi jika konsentrasi semua pereaksi sama dengan satu.



Gambar. Pengaruh waktu terhadap kecepatan pergerakan

Dari Gambar menunjukkan pengaruh waktu terhadap kecepatan per waktu. Dari Grafik tersebut dapat diperoleh persamaan linier (Aboulkas and Harfi, 2008). Dari persamaan tersebut dapat ditentukan nilai konstanta berdasarkan persamaan :

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = kt + C$$

Jadi dapat diperoleh nilai konstanta laju reaksi (k) : **Tabel.** Data persamaan linier

Dari data nilai k menunjukkan kecepatan reaksi. Nilai k semakin besar, maka kecepatan reaksi pembentukan kerak akan semakin meningkat. Dari data tersebut menunjukkan semakin tinggi temperature membuat nilai tetapan kecepatan reaksi meningkat. Hal ini disebabkan suhu tinggi membuat tekanan menjadi meningkat sehingga ion-ion reaktan akan bergerak cepat, tumbukan antar ion akan semakin banyak, akibatnya kerak yang terbentuk semakin banyak (Aboulkas and Harfi, 2008; Chiang et al., 2007; Vyazovkin and Dranca, 2006; Zhijia et al., 2013).

Penentuan Nilai Energi Aktivasi

Suatu reaksi terjadi bila energi tumbukan antara molekul-molekul reaktan melampaui energi pengaktifan (energi minimum yang harus dimiliki molekul agar tumbukannya menghasilkan reaksi) dan orientasi molekul-molekul harus sesuai untuk terjadinya reaksi. Dari nilai k tersebut, dengan menggunakan persamaan Arrhenius, dapat ditentukan nilai Energi Aktivasi (Ea). Untuk menentukan nilai Ea dilakukan menggunakan persamaan :

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{Ea}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

$$\ln \frac{16.58}{8.591} = \frac{Ea}{0.082 \times 50 \times 60}$$

$$Ea = 47,48 \text{ kJ}$$

Dengan memasukan data suhu dan nilai tetapan laju reaksi maka didapatkan nilai Energi aktivasi sebesar 47.48 kJ. Reaksi pergerakan bisa berlangsung lebih cepat jika energi kinetic melampaui energi aktivasi tersebut.

Hasil perhitungan energy aktivasi dengan persamaan Arrhenius dibandingkan dengan analisa energy aktivasi dengan DSC (Diferensial Scanning Kalorimeter).

Analisa Energi aktivasi dari hasil uji DSC

Kinetika kristalisasi dari kerak CaCO₃-CaSO₄ dipelajari menggunakan diferensial scanning kalorimeter (DSC) di tingkat pemanasan yang berbeda (2, 5, 10, 20 dan 300K / min) dalam kondisi non-isothermal. Empat metode iso-conversional (Kissinger-Akahira-Sunose) digunakan untuk menentukan berbagai parameter kinetik: suhu kristalisasi (Tp), energi aktivasi kristalisasi (Eα,) dalam mode non-isothermal (Aboulkas and Harfi, 2008; Heireche and Belhadji, 2007; Indra and Kedar, 2013). Tahap pembentukan kristal dalam kerak CaCO₃-CaSO₄ dianggap sebagai mekanisme reaksi. Hasil uji *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

Nilai-nilai Tp sesuai dengan b tercantum dalam Tabel 1. Dari Tabel 1 kita amati perubahan sistematis dalam Tp untuk suhu yang lebih tinggi dengan meningkatnya tingkat pemanasan.

Tabel. Data Thermograms DSC dari kerak CaCO₃ - CaSO₄

β (C/min)	Tp(C)
1	148.6
2	164.4
5	188.2
10	208.5

Dalam kondisi non-isothermal dengan panas konstan ing tingkat $\beta = dT / dt$ dan menggunakan Persamaan (2), Persamaan (1) dapat ditulis sebagai:

$$d\alpha/dT = d\alpha/dt$$

$$(1/\beta) = (K_0/\beta)$$

$$\exp. (-E/RT)f(\alpha)$$

(3)

Ada berbagai model teoritis dan persamaan matematika untuk menjelaskan estimasi kinetika kristalisasi. Empat berikut iso-conversional methods telah digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis kinetika kristalisasi dari kerak CaCO₃-CaSO₄. Semua empat metode memerlukan penentuan Tp suhu dimana β tetap dari jumlah total berubah (Boonchom, 2009; Jankovic, 2008; Joraid, 2007; Liu et al., 2003; Peter et al., 2014; Vlaev et al., 2004; Wu et al., 2010).

Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) Method

Dalam metode KAS, hubungan antara temperatur T_{pi} dan tingkat pemanasan β_i diberikan oleh (Kissinger, 1957; Burnhan dan Dinh, 2007);

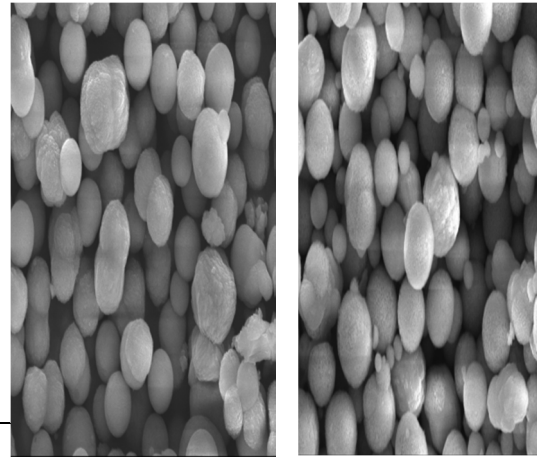
$$\ln(\beta_i/T_{p_i}^2) = -E_a/RT_p + \text{Constant} \quad (4)$$

Subscript i menunjukkan tingkat pemanasan yang berbeda. Untuk setiap derajat dari α konversi, yang sesuai T_{pi} dan tingkat pemanasan yang digunakan. Grafik dari $\ln(\beta_i / T_{p_i}^2)$ vs $1 / T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 CaSO_4 ditunjukkan pada Gambar. Dari lereng garis lurus yang diperoleh kita telah mengevaluasi nilai E_a . nilai-nilai yang diperoleh dari E_a tercantum dalam Tabel.

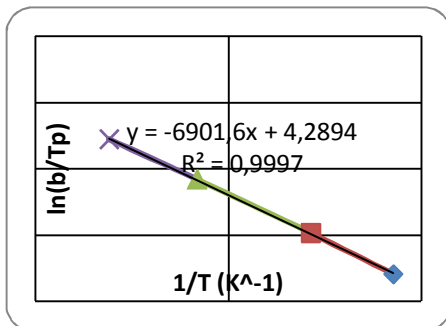
Tabel. Analisa Data DSC

b(C/min)	T_p (C)	T_p (K)	$1/T_p$	$\ln(b/T_p^2)$
1	148.6	421.75	0.002371	-12.088825
2	164.4	437.55	0.002285	-11.469235
5	188.2	461.35	0.002168	-10.658876
10	208.5	481.65	0.002076	-10.05185

microanalyser bertujuan untuk mengetahui komposisi kristal. Kajian morfologi adalah kajian yang meliputi kekasaran kristal, ukuran kristal, bentuk kristal, proses pengintian serta fenomena pembentukan kristal. Hasil pengujian SEM dapat dilihat pada **Gambar**.



Gambar. Morfologi kerak kalsium karbonat dan kalsium Sulfat hasil percobaan (a) 50°C (b) 60°C.



Gambar. Figure Grafik hubungan $\ln(\beta_i/T_{p_i}^2)$ dengan $1/T_{pi}$ kerak CaCO_3 - CaSO_4

Grafik of $\ln(\beta_i/T_{p_i}^2)$ vs $1/T_{pi}$ kerak CaCO_3 - CaSO_4 menghasilkan persamaan :

$$\ln(b/T_p^2) = \ln(AR/E_a) - E_a/(RT_p)$$

Grafik $\ln(\beta_i/T_{p_i}^2)$ dengan $1/T_{pi}$ untuk kerak CaCO_3 - CaSO_4 menghasilkan persamaan $y = -5698.x + 4.289$ dan $R^2 = 0.999$. Berdasarkan persamaan tersebut dihasilkan nilai $E_a = 47373 \text{ J/mol} = 47,373 \text{ kJ/mol}$.

Pengujian SEM

Pengujian SEM dan pengujian *microanalyser* bisa dilakukan pada suatu instrumen yaitu dengan menggunakan perangkat SEM-EDS. Pengujian SEM dilakukan untuk mengkaji morfologi kristal sedangkan pengujian

Setelah melakukan pengamatan terhadap hasil SEM yang di cantumkan pada Gambar 4.3 dengan perbesaran 3000 kali. Proses pembentukan kristal yang dilakukan melalui percobaan dimana dengan menggunakan konsentrasi larutan Ca^{2+} 3000 ppm dengan variasi suhu. Gambar (a) merupakan bentuk morfologi kerak hasil uji kristalisasi suhu 50°C. Pada gambar tersebut terlihat bahwa jenis kristal, CaCO_3 berbentuk granulat bulatan (rombohedral) dan CaSO_4 berbentuk lempengan (gypsum). Gambar (b) merupakan hasil uji kristalisasi dengan temperatur 60°C gambar tersebut terlihat bahwa bentuk kristal sama.

Dari kedua hasil uji SEM tersebut menandakan bahwa semakin besar suhu maka semakin banyak fasa calsit (CaCO_3) yang terbentuk. Hal ini ditunjukkan pada gambar hasil SEM semakin rapat dan besar besar bentuk granulat bulatan. Apabila kristal ini terbentuk dan mengendap di dalam pipa maka akan menghasilkan kerak yang sulit untuk dibersihkan dari suatu sistem perpipaan. Sedangkan kedua jenis kristal lainnya, yaitu aragonite dan vaterite, merupakan jenis *softscale* yang lebih mudah

dibersihkan apabila menempel pada dinding dalam pipa (Holysz dkk, 2007).

Pengujian EDS

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 EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometer*). Hasil Pengujian EDS hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar.

KESIMPULAN

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

1. Semakin tinggi suhu membuat kerak yang terbentuk semakin banyak, pada suhu 50°C menghasilkan massa kerak sebesar 86,5 mg sedangkan pada suhu 60°C menghasilkan massa kerak 145,2 mg.
2. Semakin tinggi suhu membuat nilai tetapan kecepatan reaksi meningkat, pada suhu 50°C menghasilkan tetapan laju reaksi sebesar 8,591 kJ.mg⁻¹.C⁻¹. sedangkan pada suhu 60°C menghasilkan tetapan laju reaksi sebesar 16,58 kJ.mg⁻¹.C⁻¹.
3. Energi aktivasi pada reaksi pembentukan kerak CaCO₃-CaSO₄ adalah 47,480 kJ sedangkan hasil pengujian DSC menghasilkan energi aktivasi sebesar 47,373 kJ.

REFERENSI

- Aboulkas and Harfi K.E., 2008. Study of the kinetic and mechanisms of thermal decomposition of morocco oil shale Vol 25 No 4, pp: 426-443
- 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.
- Amer, B. M. Abu A. M. Y. 2009 Solubility of Common Oil Scales of Injection Water and High Barium

Concentration and High Salinity Formation Water. Universitas Teknologi malaysia. *Jurnal Malaysia Technology*, 50: 67 – 77

- Amjad, Z., and Koutsoukos, P.G., 2014, "Evaluation of maleic acid based polymers as scale inhibitors and dispersants for industrial water applications," *Desalination*, 335, pp 55-63.
- 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.
- Anderton, J. D. 1997. *Foundations of Chemistry*. Edisi kedua. Melbourne: Longman
- Atkins, P. W. 1999. *Kimia Fisika Jilid 2*. Erlangga: Jakarta
- Azimi G, and Papangelakis V.G. 2010 Thermodynamic modeling and experimental measurement of calcium sulfate in complex aqueous solutions. *Fluid Phase Equilibria*. 2010;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. Elsevier applied Thermal Engineering*. Volume, 36 : 210-218
- Boonchom, B. 2009. Kinetic and Thermodynamic Studies of MgHPO₄·3H₂O by Non-Isothermal Decomposition Data. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 98, No. 3, 2009, pp. 863-871
- Boyaci, I. H., 2005, "A new approach for determination of enzyme kinetic constants using response surface methodology," *Biochem. Eng. J.*, 25, pp 55-62
- Brown M. E. and P. K. Gallagher, 2008. *Hand Book of Ther-mal Analysis and Calorimetry*, Burnham A. K. and L. N. Dinh, 2007. A Comparison of Iso-conversional and Model-Fitting Approaches to Kinetic Parameter Estimation and

- Application Predictions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 89, No. 2, 2007, pp. 479-490.
- Chiang C.L., R.C. Chang, Y. C. Chiu. 2007. Thermal Stability and degradation kinetic of novel organic/inorganic. Epoxy hybrid containing nitrogen/silicon/phosphorus by sol-gel method *thermochimica Acta* 453 : 97-104
- 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
- Han, Y. S., Hadiko, G., Fuji, M., & Takahashi, M. (2005). Effect of flow rate and CO₂ content on the phase and morphology of CaCO₃ prepared by bubbling method. *Journal of Crystal Growth*, 276(3), 541-548.
- Rabizadeh, T., Caroline., Reacock, Liane G. B. 2014. Carboxylic acid : Effective for Calcium Sulfate Precipitation. *Mineralogical Magazine*, 78(6):1465 - 1472.