

KINETIKA KRISTALISASI LARUTAN KALIUM SULFAT

Ir. Arif Jumari, M.Sc.^{*)}, Goemarang Moertanto^{**)} dan Sri Nugroho Nursigit^{**)}

^{*)} Stاپ Pengajar Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNS

^{**)} Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNS

Abstract : Crystallization is one of the most important separation processes. To able to design crystallization process crystallization kinetic data must be available. These kinetic data can be obtained from either literature or experiment. The objectives of experiment was to determine the values of crystallization kinetic parameters, i.e., frequency factor ($K_{g,0}$), activation energy (E_g) and crystallization order (g) for potassium sulphate in solvent of water. The variables were temperature (10, 20 and 30°C) and agitator speed (200 and 400 rpm). The experiments were carried out using agitated batch crystallizer. The result of the experiment indicated that frequency factor ($K_{g,0}$) was affected by agitator speed and the others were independent from agitator speed and temperatur. The value of $K_{g,0}$ for 200 and 400 rpm were 24.5662 minute^{-1} and 28.1357 minute^{-1} , respectively. The value of E_g and g were 14.4529 kJ mol^{-1} and 1.2491.

Keywords : crystallization, crystallization kinetic, potassium sulphate, frequency factor, activation energy, crystallization order

PENDAHULUAN

Kalium sulfat merupakan senyawa yang sangat penting yang digunakan dalam bidang pertanian. Sering digunakan dalam pemupukan, khususnya untuk tanaman-tanaman seperti tembakau, semangka, buah anggur, jeruk, dan kentang (Tsui, 2004).

Kalium sulfat (K_2SO_4) atau *Sulphate of Potash (SOP)* adalah pupuk rendah klorida yang paling populer di dunia. Kombinasi dari kalium (50% K_2O) dan belerang (18%) menjadikan SOP sebagai nutrisi yang berkonsentrasi tinggi, yang sangat berguna bagi tanaman. *Sulphate of Potash* memiliki indeks kadar garam yang rendah, sehingga sangat aman bagi lahan yang memiliki resiko kerusakan akibat penggaraman. SOP dapat memberikan peningkatan hasil panen dan mutu. Dan juga dapat membuat tanaman lebih tahan terhadap kekeringan, hama dan penyakit (Tessenderlogroup, 2004).

Kristalisasi dari larutan sangat penting dalam industri karena banyaknya ragam bahan yang dipasarkan dalam bentuk kristal. Penggunaannya sangat luas karena dua hal: kristal yang terbentuk dari larutan yang tak-murni selalu murni (kecuali jika terjadi pembentukan kristal campuran), dan kristalisasi merupakan metode yang praktis untuk mendapatkan bahan-bahan kimia murni dalam kondisi yang memenuhi syarat pengemasan dan penyimpanan (Mc Cabe et al., 1993).

Di dalam proses kristalisasi, data-data kinetik kristalisasi merupakan hal yang penting untuk mendesain alat pengkristal (*crystallizer*) yang optimal, atau mengevaluasi unjuk kerja (*performance*) dari *crystallizer* yang ada. Data-data kinetika kristalisasi tersebut hanya dapat diperoleh melalui penelitian. Selanjutnya data-data kinetik kristalisasi ini dapat dipergunakan untuk menentukan laju pembentukan dan pertumbuhan kristal yang pada gilirannya dapat menentukan desain dan kondisi operasi *crystallizer*.

Kinetika kristalisasi ini dipengaruhi konsentrasi kesetimbangan dari larutan (*solubility*) yang dipengaruhi oleh temperatur dan konsentrasi larutan. Dalam penelitian ini kedua variabel tersebut akan dievaluasi untuk mendapatkan data-data kinetika kristalisasi larutan kalium sulfat pada berbagai temperatur dan putaran pengadukan.

DASAR TEORI

Kristalisasi ialah peristiwa pembentukan partikel-partikel zat padat di dalam suatu fase homogen. Kristalisasi dapat terjadi sebagai pembentukan partikel padat di dalam uap, seperti dalam hal pembentukan salju; sebagai pembekuan (*solidification*) di dalam lelehan cair sebagaimana dalam pembuatan kristal tunggal yang besar; atau sebagai kristalisasi dari larutan cair (Mc Cabe et al., 1993).

Menurut Nyvilt (1985), proses kristalisasi dapat dibagi menjadi tahap-tahap dasar sebagai berikut :

- Perpindahan zat dari larutan ke lapisan difusi.
- Difusi zat melewati lapisan difusi.
- Penggabungan partikel zat ke kristal.
- Pembuangan panas yang terjadi selama pertumbuhan kristal dari kristal ke larutan induk.

Kecepatan pertumbuhan kristal total ditentukan oleh kecepatan terendah dari masing-masing proses di atas. Yang sering terjadi kecepatan pertumbuhan kristal total ditentukan oleh kecepatan difusi zat melalui lapisan difusi atau kecepatan penggabungan partikel zat ke kristal.

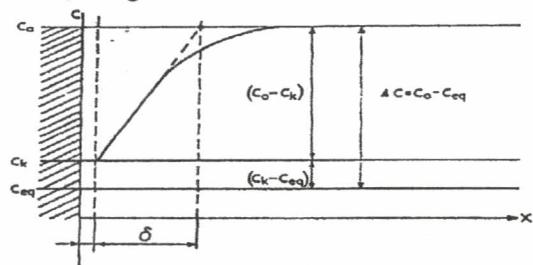
Kecepatan pertambahan massa kristal dapat disamakan dengan kecepatan difusi melalui lapisan difusi dengan persamaan :

$$-\frac{dm_c}{dt} = D \cdot A_c \frac{dc}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

dimana :

- D : Koefisien difusi
- A_c : Luas permukaan kristal

Untuk kasus satu dimensi, ketergantungan konsentrasi terhadap jarak dari permukaan kristal oleh Nyvilt (1985) digambarkan secara skematik pada gambar 1, sebagai berikut :



Gambar 1. Profil hubungan konsentrasi dengan pertumbuhan kristal.

Hubungan konsentrasi dan posisi di dalam lapisan difusi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C - C_k}{\delta} \dots\dots\dots(2)$$

- C_k : Konsentrasi zat pada permukaan kristal
- C : Konsentrasi zat pada larutan supersaturasi
- δ : Ketebalan lapisan difusi

substitusi persamaan (2) ke persamaan (1) diperoleh :

$$-\frac{dm_c}{dt} = k_d A_c (C - C_k) \dots\dots\dots(3)$$

dimana $k_d = D/\delta$

Kecepatan penggabungan partikel zat ke permukaan kristal dapat didekati oleh persamaan:

$$-\frac{dm_c}{dt} = k_1 A_c (C_k - C_{eq})^i \dots\dots\dots(4)$$

untuk $i = 1$ kombinasi persamaan (3) dan (4) menghasilkan

$$-\frac{dm_c}{dt} = k_G A_c \Delta C \dots\dots\dots(5)$$

dengan $\frac{1}{k_G} = \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_1}$

Bila k_d lebih besar dari k_1 kecepatan pertumbuhan kristal ditentukan oleh kecepatan difusi, sebaliknya bila k_d lebih kecil k_1 kecepatan pertumbuhan kristal ditentukan oleh kecepatan penggabungan partikel zat ke permukaan kristal.

Untuk $i = 2$, kombinasi persamaan (3) dan (4) menghasilkan :

$$-\frac{dm_c}{dt} = A_c \frac{1}{k_1/k_d} \left(1 + \frac{2k_1}{k_d} \Delta C - \left(\frac{4k_d}{k_1} \Delta C + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \dots\dots\dots(6)$$

dimana :

- m_c : Massa kristal
- k_1 : Konstanta kecepatan penggabungan partikel zat ke permukaan kristal
- k_d : Konstanta kecepatan difusi
- k_G : Konstanta kecepatan gabungan

Persamaan (6) dapat didekati oleh persamaan yang sederhana (Nývlt, 1985) sebagai berikut :

$$-\frac{dm_c}{dt} = K_g \Delta C^g \dots\dots\dots(7)$$

dengan konstanta $K_g = k_G A_c$

Konstanta K_g tergantung pada temperatur dan konstanta tersebut sesuai dengan persamaan Arrhenius untuk memperoleh persamaan umum kecepatan pertumbuhan kristal sebagai fungsi temperatur.

$$K_g = K_{g,0} \exp \left(-\frac{E_G}{RT} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Substitusi persamaan (8) ke persamaan (7) diperoleh:

$$-\frac{dm_c}{dt} = K_{g,0} \exp \left(-\frac{E_G}{RT} \right) \Delta C^g \dots\dots\dots(9)$$

Metode Pengukuran Laju Pertumbuhan Kristal

Pada prinsipnya, metode pengukuran laju pertumbuhan kristal dapat dibagi menjadi dua cara, yaitu secara langsung (*direct method*) dan tidak langsung (*indirect method*) (Nývlt et.al, 1985) :

a) Pengukuran langsung laju pertumbuhan kristal linier.

Metode yang biasa digunakan :

- Menggunakan mikroskop (pada awal dan akhir eksperimen).
 - Menggunakan *travelling microscope*, dengan pengamatan secara kontinu selama eksperimen.
 - Pengukuran menggunakan *screw micrometer*.
 - Metode lain dimana laju pertumbuhan kristal linier dihitung dari pengukuran kenaikan massa atau volume.
- b) Metode pengukuran tidak langsung berdasarkan data eksperimen selain laju pertumbuhan. Misalnya:
- Pengukuran pada *agitated batch crystallizer*, dimana kenaikan massa suspensi kristal diukur.
 - Pengukuran pada *continuous MSMPR (Mixed Suspension, Mixed Product Removal) crystallizer*.
 - Pengukuran penurunan supersaturasi pada sistem isothermal yang terisolasi.

Metode Penentuan Kinetika Kristalisasi Secara Tidak Langsung

Penentuan secara tidak langsung didasarkan pada pengukuran konsentrasi terhadap waktu kristalisasi di dalam eksperimen. Masa deposit akibat kelahiran kristal baru diabaikan.

Dengan demikian kinetika kelahiran kristal baru tidak dapat diperkirakan dan pertumbuhan kristal dianggap sebagai proses yang dominan dalam kristalisasi. Maka perubahan supersaturasi sama dengan perubahan massa kristal dan dapat dituliskan :

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{d\Delta C}{dt} \dots\dots\dots(10)$$

persamaan (10) ke persamaan (9) diperoleh

$$-\frac{d\Delta C}{dt} = K_{g,0} \exp \left(-\frac{E_G}{RT} \right) \Delta C^g \dots\dots\dots(11)$$

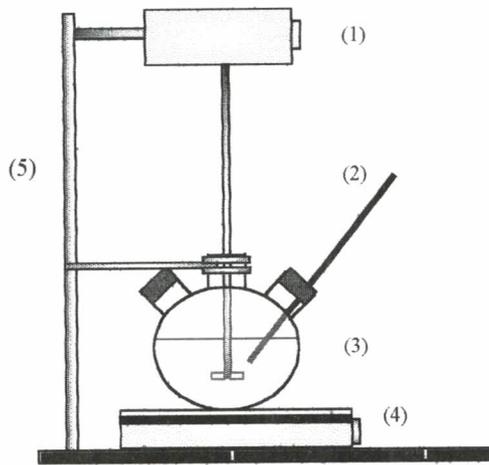
dimana :

- ΔC : Beda konsentrasi larutan dengan konsentrasi jenuhnya
- t : Waktu kristalisasi
- $K_{g,0}$: Faktor frekuensi
- E_G : Energi aktivasi
- R : Tetapan gas
- T : Temperatur kristalisasi
- g : Orde kristalisasi

PELAKSANAAN PENELITIAN

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kalium Sulfat dan bibit kristal gula serta aquades sebagai pelarut.

Alat-alat yang digunakan dan susunannya dapat dilihat pada gambar 2



Keterangan gambar :

1. Motor pengaduk
2. Termometer
3. Labu leher tiga
4. Kompor listrik
5. Statif

Gambar.2. Gambar rangkaian alat untuk proses kristalisasi

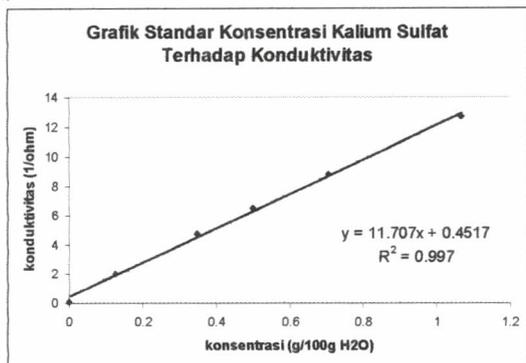
Penelitian dilakukan dengan membuat larutan kalium sulfat lewat jenuh. Caranya dengan memanaskan larutan sampai suhu tertentu sampai semua solut larut semua kemudian didinginkan sampai suhu tertentu. Larutan kemudian dimasukkan ke dalam reaktor. Kristalisasi dimulai dengan memasukkan bibit kristal kalium sulfat. Setiap selang waktu tertentu sampel larutan diambil dan ditentukan konsentrasinya. Penentuan konsentrasi larutan dilakukan dengan cara mengukur konduktivitasnya dan dibandingkan dengan kurva standar yang telah dibuat sebelumnya.

Dari data konsentrasi dan waktu pada temperatur dan kecepatan putar pengadukan tertentu, maka dengan menggunakan bantuan program komputer MATLAB dapat diperoleh konstanta-konstanta faktor frekuensi ($K_{g,0}$), energi aktivasi (E_g), dan orde kristalisasi (g) pada proses kristalisasi larutan kalium sulfat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL PENELITIAN

Pada gambar 3 ditunjukkan kurva hubungan antara konduktivitas dan konsentrasi larutan kalium sulfat dalam air



Gambar.3. Hubungan antara konduktivitas dan Konsentrasi Kalium Sulfat

Data yang diperoleh selama eksperimen dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi larutan kalium sulfat pada berbagai temperatur dan kecepatan putar pengaduk.

Waktu (menit)	Konsentrasi Larutan Kalium Sulfat (g/L)					
	200 rpm			400 rpm		
	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C
0	97.20	116.10	134.70	97.20	116.10	134.70
5	94.98	114.12	133.06	94.70	114.02	132.87
10	93.95	112.99	132.03	93.76	112.80	131.93
15	93.29	112.43	131.28	93.11	112.43	131.18
20	92.92	112.05	131.09	92.83	112.05	131.09
25	92.73	111.77	130.72	92.73	111.68	130.53
30	92.64	111.68	130.53	92.54	111.58	130.43
35	92.54	111.58	130.34	92.45	111.49	130.25
40	92.45	111.49	130.25	92.36	111.39	130.06

Konsentrasi jenuh larutan kalium sulfat pada temperatur antara 10 sampai 30°C menurut Dean (1973) dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi jenuh larutan kalium sulfat

Temperatur (°C)	Konsentrasi (g/L)
10	92.2
20	111.1
30	129.7

Untuk pengolahan data, diperlukan data beda konsentrasi (ΔC), yaitu selisih konsentrasi dengan konsentrasi jenuhnya pada temperatur tertentu. Dari tabel 1 dan 2 diperoleh ΔC yang dapat dilihat pada tabel 3.

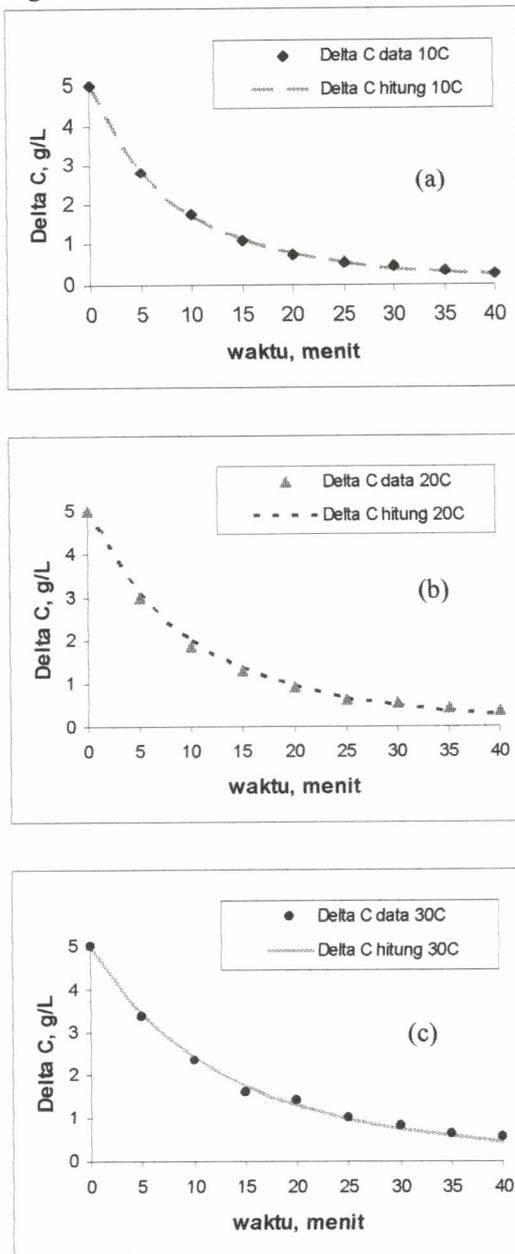
Tabel 3. Beda Konsentrasi larutan kalium sulfat pada berbagai temperatur dan kecepatan putar pengadukan

Waktu (menit)	Beda Konsentrasi Larutan Kalium Sulfat (g/L) untuk Temperatur:					
	200 rpm			400 rpm		
	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C
0	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
5	2.7832	3.0153	3.3598	2.5019	2.9215	3.1722
10	1.7516	1.8899	2.3281	1.5640	1.7023	2.2344
15	1.0951	1.3271	1.5779	0.9075	1.3271	1.4841
20	0.7199	0.9520	1.3903	0.6262	0.9520	1.3903
25	0.5324	0.6707	1.0152	0.5324	0.5769	0.8276
30	0.4386	0.5769	0.8276	0.3448	0.4831	0.7338
35	0.3448	0.4831	0.6400	0.2510	0.3893	0.5462
40	0.2510	0.3893	0.5462	0.1572	0.2955	0.3587

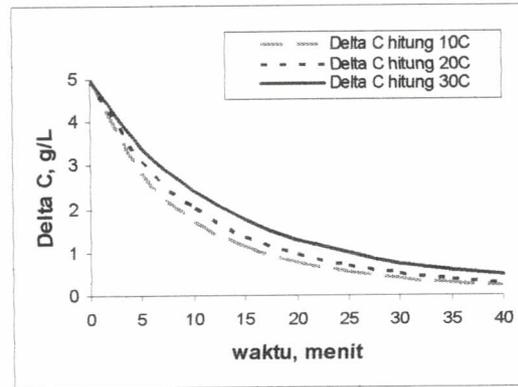
Dari hasil pengukuran konsentrasi tiap-tiap sampel untuk masing-masing temperatur, diperoleh data beda konsentrasi larutan dan waktu kristalisasi. Dari data-data tersebut harga konstanta-konstanta dalam persamaan (12) dapat ditentukan untuk masing-masing temperatur percobaan.

Untuk memperoleh persamaan umum kinetika kristalisasi sebagai fungsi temperatur kristalisasi, konstanta-konstanta yang diperoleh diolah sedemikian rupa sehingga diperoleh persamaan kinetika kristalisasi kalium sulfat sebagai fungsi temperatur.

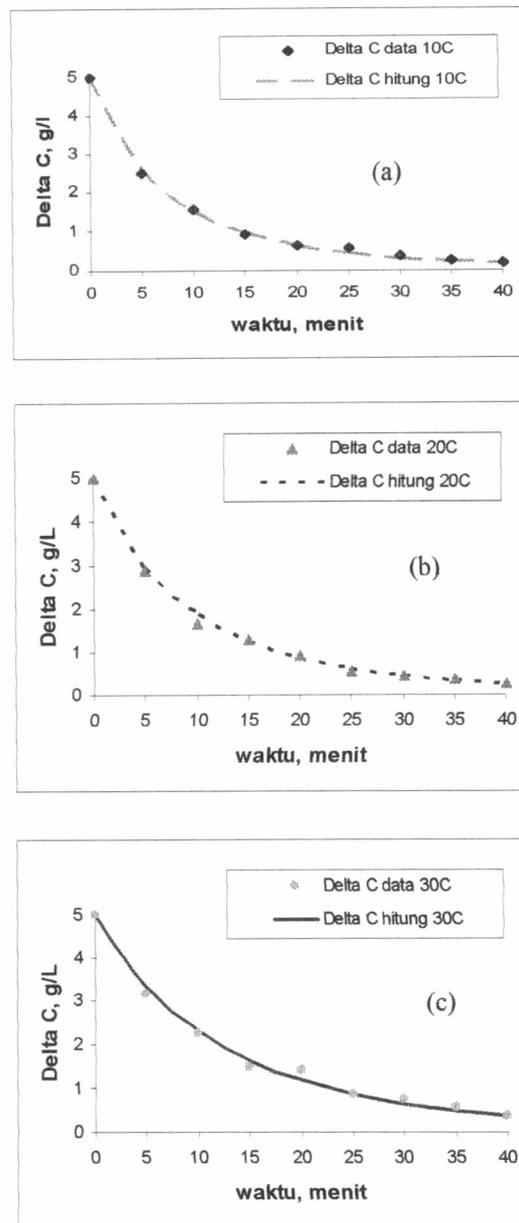
Dengan menggunakan bantuan program komputer MATLAB, dapat diketahui perbandingan antara ΔC data dengan ΔC hasil perhitungan pada masing-masing temperatur seperti yang terlihat pada grafik-grafik berikut ini :



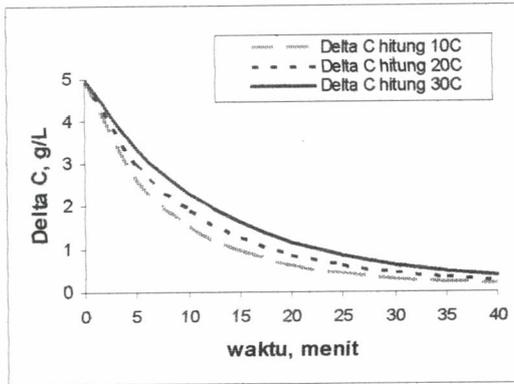
Gambar 4. Grafik perbandingan ΔC_{hitung} terhadap waktu pada kecepatan putar 200 rpm dan temperatur : : (a) 10°C; (b) 20°C dan (c) 30°C .



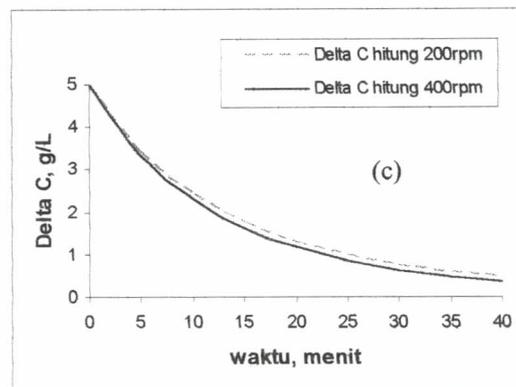
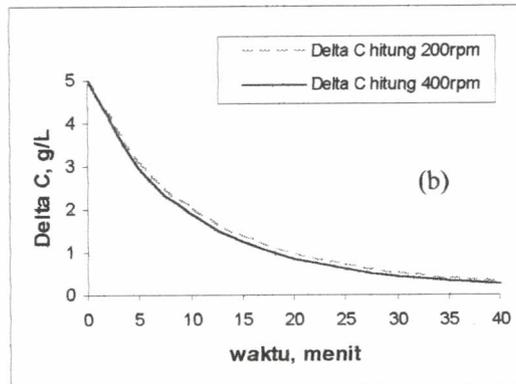
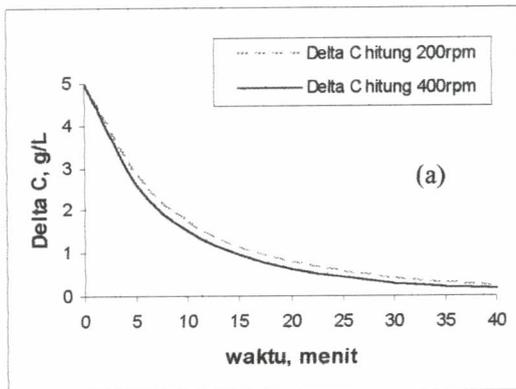
Gambar 5. Grafik perbandingan ΔC_{hitung} terhadap waktu pada masing-masing temperatur pada kecepatan putar 200 rpm.



Gambar 4. Grafik perbandingan ΔC_{hitung} terhadap waktu pada kecepatan putar 400 rpm dan temperatur : : (a) 10°C; (b) 20°C dan (c) 30°C .



Gambar 7. Grafik perbandingan ΔC_{hitung} terhadap waktu pada masing-masing temperatur pada kecepatan putar 400 rpm.



Gambar 8. Grafik perbandingan ΔC_{data} dan ΔC_{hitung} pada masing-masing kecepatan putar pada temperatur : (a) 10°C; (b) 20°C dan (c) 30°C.

Dari optimasi parameter kinetik diperoleh hasil seperti terlihat pada tabel 4 dan tabel 5 berikut

Tabel 5. Harga parameter kinetik kristalisasi pada kecepatan putar 200 rpm

Temperatur	$K_{g,0}$ (menit ⁻¹)	E_g (KJ/mol)	g
10	25.6337	13.6467	1.2951
20	24.6607	14.2837	1.2534
30	23.4043	15.2628	1.2255

Tabel 6. Harga parameter kinetik kristalisasi pada kecepatan putar 400 rpm

Temperatur	$K_{g,0}$ (menit ⁻¹)	E_g (KJ/mol)	g
10	29.0194	13.6124	1.2843
20	27.5403	14.5671	1.2682
30	27.8472	15.3447	1.1682

Dari tabel 5 dan tabel 6 dapat dihitung konstanta kinetika kristalisasi sebagai berikut:

- $K_{g,0}$ rata-rata pada 200 rpm : 24.5662 menit⁻¹
- $K_{g,0}$ rata-rata pada 400 rpm : 28.357 menit⁻¹
- E_g rata-rata : 14,4529 KJ/mol
- g rata-rata : 1.2491

Dari konstanta-konstanta kinetika kristalisasi tersebut maka dapat disusun persamaan kinetika kristalisasi sebagai berikut :

- Pada kecepatan putar 200 rpm

$$-\frac{d\Delta C}{dt} = 24.5662 \exp\left(-\frac{14.4529}{RT}\right) \Delta C^{1.2491}$$

- Pada kecepatan putar 400 rpm

$$-\frac{d\Delta C}{dt} = 28.1357 \exp\left(-\frac{14.4529}{RT}\right) \Delta C^{1.2491}$$

PEMBAHASAN

Kristalisasi dilakukan pada konsentrasi lewat jenuh. Selama proses kristalisasi terjadi penurunan konsentrasi. Hal ini menunjukkan semakin banyaknya jumlah kristal yang terbentuk dengan berkurangnya konsentrasi larutan kalium sulfat.

Penurunan konsentrasi larutan kalium sulfat ini akan mendekati konsentrasi jenuhnya dan tidak melampaui konsentrasi jenuhnya hingga proses kristalisasi berakhir.

Pada gambar (5) dan (7) tampak bahwa dengan ΔC awal yang sama, temperatur tinggi memberikan penurunan ΔC yang lebih kecil. Hal ini disebabkan karena kelarutan kalium sulfat semakin besar terhadap kenaikan temperatur dan semakin kecil dengan penurunan temperatur.

Sehingga pada temperatur yang lebih tinggi akan memberikan penurunan ΔC yang lebih rendah, demikian pula sebaliknya, pada temperatur yang lebih rendah akan memberikan penurunan ΔC yang lebih tinggi. Dengan demikian kalium sulfat lebih mudah terkristalisasi pada suhu yang lebih rendah.

Dari gambar (8) diketahui bahwa ΔC pada kecepatan putar 200 rpm lebih besar daripada pada

kecepatan putar 400 rpm untuk temperatur yang sama. Hal ini ditunjukkan oleh harga $K_{g,0}$ yang lebih besar pada kecepatan putar pengadukan yang lebih besar. Hal ini dapat terjadi karena dengan pengadukan, partikel-partikel kristal yang sudah terbentuk akan terdistribusi secara merata (homogen) ke seluruh bagian kristalisator membentuk suspensi. Bila kecepatan pengadukan lebih tinggi, maka suspensi yang terbentuk lebih homogen dan partikelnya lebih merata.

Dengan tersebarnya partikel kristal ke seluruh bagian larutan kalium sulfat, akan lebih mempermudah transfer massa dari larutan ke kristal karena permukaan antar fase-nya lebih luas. Makin luas permukaan antar fase maka makin cepat proses kristalisasi.

$K_{g,0}$ adalah faktor frekuensi tumbukan antar molekul zat terlarut. $K_{g,0}$ merupakan suatu konstanta yang dipengaruhi oleh kecepatan pengadukan dan tidak dipengaruhi oleh temperatur.

Pada penelitian ini $K_{g,0}$ pada kecepatan putar pengadukan 400 rpm lebih besar dari kecepatan putar pengadukan 200 rpm. Penyebabnya adalah pada pengadukan yang lebih cepat, gerak molekul zat terlarut lebih cepat, sehingga frekuensi tumbukannya lebih besar.

Orde kristalisasi, g , besarnya 0,5 sampai 2,5 (Nývilt, 1985). Orde kristalisasi penelitian ini sudah termasuk dalam harga kisaran tersebut. Orde kristalisasi tidak dipengaruhi oleh temperatur dan gerak molekul. Orde kristalisasi hanya dipengaruhi oleh karakteristik zat terlarut dan pelarutnya. Oleh karena itu harga orde kristalisasi antara kecepatan putar pengadukan 200 rpm dan 400 rpm dapat disamakan dan diambil rata-ratanya.

E_g adalah energi aktivasi, yaitu jumlah energi minimal yang diperlukan untuk terjadinya proses kristalisasi. Harga E_g dipengaruhi oleh sifat intrinsik yang dimiliki suatu zat dan tidak dipengaruhi oleh temperatur serta kecepatan putar pengadukan.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Besarnya faktor frekuensi ($K_{g,0}$) dalam proses kristalisasi larutan kalium sulfat dipengaruhi oleh kecepatan putar pengadukan dan tidak dipengaruhi oleh temperatur.
- Besarnya kebutuhan energi aktivasi (E_g) dalam proses kristalisasi larutan kalium sulfat tidak dipengaruhi oleh kecepatan putar pengadukan dan temperatur.
- Besarnya orde kristalisasi (g) dalam proses kristalisasi larutan kalium sulfat tidak dipengaruhi oleh temperatur dan kecepatan putar pengadukan.
- Persamaan kecepatan kristalisasi yaitu :

- Pada kecepatan putar pengadukan 200 rpm:

$$-\frac{d\Delta C}{dt} = 24.5662 \exp\left(-\frac{14.4529}{RT}\right) \Delta C^{1.2491}$$

- Pada kecepatan putar pengadukan 400 rpm:

$$-\frac{d\Delta C}{dt} = 28.1357 \exp\left(-\frac{14.4529}{RT}\right) \Delta C^{1.2491}$$

SARAN

Untuk mendapatkan data kinetika kristalisasi yang lebih akurat, penelitian kinetika kristalisasi dengan metode langsung perlu dilakukan.

DAFTAR LAMBANG

D	: Koefisien difusi
A_c	: Luas permukaan kristal
C_k	: Konsentrasi zat pada permukaan kristal
C	: Konsentrasi zat pada larutan supersaturasi
δ	: Ketebalan lapisan difusi
m_c	: Massa kristal
kI	: Konstanta kecepatan penggabungan partikel zat ke permukaan kristal
kd	: Konstanta kecepatan difusi
kG	: Konstanta kecepatan gabungan
ΔC	: Beda konsentrasi larutan dengan konsentrasi jenuhnya
t	: Waktu kristalisasi
$K_{g,0}$: Faktor frekuensi
EG	: Energi aktivasi
R	: Tetapan gas
T	: Temperatur kristalisasi
g	: Orde kristalisasi

DAFTAR PUSTAKA

- Dean, John A., 1973, *Lange's Handbook of Chemistry*. 11th edition. McGraw-Hill, New York.
- McCabe, W., Smith, J., and Harriot, P., 1993, *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5thed, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Nývilt, J., Söhnel, O., Matuchová, M., and Broul, M., 1985 *The Kinetics of Industrial Crystallization*, Elsevier, Amsterdam.
- Pärt-Enander, E., Sjonberg, A., Melin, B., and Isaksson, P., 1996, *The Matlab Handbook*, Addison-Wesley, Harlow.
- Tsui, C M., 2004, *Potassium Sulphate*, <http://www.gzchemweek.com/lfchem/products/k2so4.htm>