



Pemodelan Pengeringan *Polyvinyl Alcohol* dalam Larutan Organik dengan *Reaction Engineering Approach* (REA)

Geraldly Suhendro¹, dan Aditya Putranto²

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Merdeka No. 30, Bandung 40117, Indonesia
E-mail : geraldly6210018@hotmail.com

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit No. 137, Bandung 40141, Indonesia
E-mail : adityaptr@yahoo.com

Abstract

Drying is water removal process involving mass and heat transfer simultaneously. The accurate drying model can be used to assist in process design and monitoring the quality of the product. The Reaction engineering approach (REA) have been proven for various drying chases involving water removal. In this study, the REA is develop to model removal of non-water solvent. The REA is implemented for convective and intermittent drying of polyvinyl alcohol from organic solvent which is a mixture of water and methanol. In order for REA modification, a minor modification of the equilibrium activation energy is introduced since there are two kinds of solvent in a mixture. Equilibrium activation energy was determined from the final product temperature and corresponding humidity of air. The results of the modeling match well with the experimental data. The REA can model the drying of the organic solvent accurately. The REA can be used for troubleshooting and optimization in organic solvent drying.

Keywords: *Reaction Engineering Approach (REA), modeling, intermittent drying, convective drying*

Pendahuluan

Pengeringan merupakan proses pemisahan air yang melibatkan perpindahan massa dan panas secara simultan. Pengeringan merupakan salah satu proses yang memerlukan konsumsi energi yang besar dan mempengaruhi kualitas dari produk. Pengeringan merupakan proses yang sangat intensif terhadap energi karena dibutuhkan sejumlah panas yang harus dipasok untuk penguapan air. Beberapa skema pengeringan, operasi pengeringan terkontrol dan intensifikasi proses pengeringan perlu diimplementasikan untuk meminimalkan konsumsi energi dan mempertahankan kualitas produk dari material yang ingin dikeringkan (Chou et al, 2000; Chua et al 2001).

Model pengeringan yang akurat dapat digunakan untuk membantu dalam perancangan proses dan memprediksi kualitas produk selama pengeringan. Berbagai model pengeringan yang ada dapat dikategorikan menjadi model empirik maupun mekanistik. Model empirik maupun model mekanistik masih memiliki kekurangan jika digunakan sebagai model dalam pengeringan. Metode empirik memiliki keuntungan yaitu formulasi matematika dan solusi yang sederhana tetapi model ini tidak dapat menangkap fenomena fisik selama proses pengeringan. Pada sisi lain, model mekanistik diturunkan dari fenomena pengeringan sehingga dapat menjelaskan fisik dari proses pengeringan. Model mekanistik memiliki kerugian yaitu menghasilkan persamaan diferensial parsial yang lebih rumit untuk diselesaikan. Model pengeringan yang berguna adalah model yang dapat menangkap fisik dari proses pengeringan, akurat, sederhana, dan membutuhkan waktu komputasi yang cepat sehingga dapat digunakan dalam pengambilan keputusan pada industri (Putranto et al, 2011)

Reaction Engineering Approach (REA) merupakan pendekatan yang dicetuskan oleh Prof. X.D. Chen pada tahun 1996 dan sudah diimplementasikan untuk berbagai kasus pengeringan. REA sudah banyak digunakan dan terbukti akurat dalam kasus pengeringan dengan pelarut air (Putranto et al, 2011^{a-b}; Putranto et al, 2011^{a-b}). REA memiliki keuntungan yaitu menghasilkan persamaan yang sederhana, akurat, dan membutuhkan sedikit eksperimen untuk menghasilkan parameter pengeringan (Chen dan Putranto, 2013).

Pada studi ini, REA ingin dikembangkan dalam kasus pengeringan dengan pelarut non-air. Pelarut non-air yang digunakan merupakan pelarut organik yaitu campuran antara air dengan metanol. Modifikasi dilakukan terhadap REA karena pelarut yang digunakan adalah pelarut non-air. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan dan



mengimplementasikan REA serta mengevaluasi akurasi dari REA dalam memodelkan pengeringan terhadap larutan organik.

Pengeringan dilakukan terhadap campuran polivinil alkohol dengan larutan organik. Polivinil alkohol disintesa melalui hidrolisis dari polivinil asetat untuk mengubah gugus asetat menjadi gugus hidroksil. Pada industri, polivinil alkohol ditemukan pada kondisi yang terbasahi oleh larutan organik sehingga perlu dikeringkan. Proses pengeringan polivinil alkohol merupakan proses yang kritis karena mempengaruhi warna dan kelarutan dari produk akhir. Tunnel dryer merupakan alat yang sering digunakan untuk mengeringkan polivinil alkohol (Chen dan Yoon, 2014).

Reaction Engineering Approach (REA)

Pada umumnya REA merupakan aplikasi dari prinsip-prinsip teknik reaksi kimia untuk memodelkan kinetika pengeringan yang pertama kali dilaporkan pada tahun 1996-1997 (Chen dan Xie, 1997; Chen, 2008). Pada umumnya kecepatan pengeringan dari suatu material dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m_s \frac{dX}{dt} = -h_m A (\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \quad (1)$$

Persamaan (1) merupakan persamaan perpindahan massa sederhana. Koefisien perpindahan massa (h_m) ditentukan berdasarkan korelasi bilangan Sherwood berdasarkan geometri dan kondisi aliran pengeringan atau ditentukan secara eksperimental untuk kondisi pengeringan yang spesifik. Konsentrasi uap pada permukaan ($\rho_{v,s}$) dapat dihubungkan dengan konsentrasi uap jenuh ($\rho_{v,sat}$) menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\rho_{v,s} = \exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT_s}\right) \rho_{v,sat}(T_s) \quad (2)$$

Dimana ΔE_v merupakan variabel tambahan yang menunjukkan kesulitan untuk memisahkan air dari material melebihi *free water effect*. Nilai dari ΔE_v bergantung terhadap kandungan air (X). T_s adalah temperature permukaan dari material yang akan dikeringkan (K).

Neraca massa (persamaan 1) dapat dituliskan ulang menjadi sebagai berikut :

$$m_s \frac{dX}{dt} = -h_m A \left[\exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT_s}\right) \rho_{v,sat}(T_s) - \rho_{v,b} \right] \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan (3), dapat diobservasi bahwa REA merupakan persamaan differensial biasa orde 1 terhadap waktu dan model ini disebut dengan L-REA (lumped reaction engineering approach). REA tidak mengasumsikan kandungan air yang seragam pada sampel tetapi mengevaluasi kandungan air rata-rata pada sampel selama pengeringan.

Energi aktivasi (ΔE_v) ditentukan melalui eksperimen dengan mengubah persamaan (3) menjadi bentuk baru sebagai berikut :

$$-\Delta E_v = -RT_s \ln \left(\frac{m_s \frac{dX}{dt} \frac{1}{h_m A} + \rho_{v,b}}{\rho_{v,sat}} \right) \quad (4)$$

Parameter seperti dX/dt , kandungan air rata-rata, luas permukaan, dan temperatur ditentukan secara eksperimen. Nilai dari energi aktivasi bergantung pada kandungan air basis kering (X) yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{v,b}} = f(X - X_b) \quad (5)$$

Variable f merupakan fungsi dari perbedaan kandungan air, $\Delta E_{v,b}$ adalah energi aktivasi 'kesetimbangan' yang menyatakan nilai ΔE_v maksimum yang dipengaruhi kelembaban relative dan temperatur udara pengering.

$$\Delta E_{v,b} = -RT_b \ln(RH_b) \quad (6)$$

RH_b adalah kelembaban relatif dari udara pengering dan T_b adalah temperatur udara pengering (K).

Dalam menggenerasi *relative activation energy* yang ditunjukkan oleh persamaan (6), dibutuhkan satu eksperimen pengeringan yang akurat. Energi aktivasi dibagi dengan energi aktivasi kesetimbangan yang menunjukkan *relative activation energy* selama pengeringan. *Relative activation energy* yang sudah diperoleh dapat diimplementasikan untuk kondisi pengeringan dengan material yang sama dan kandungan air awal yang mirip (Chen, 2008).

Metodologi

Data eksperimen dari pengeringan polivinil alkohol dalam pelarut organik diperoleh dari pekerjaan Wong, Altinkaya, dan Mallapragada (2007). Pengeringan polivinil alkohol dilakukan dengan dua cara yaitu pengeringan secara konvektif dan intermiten. Larutan PVA (10% b/v) disiapkan dengan melarutkan bubuk PVA ke dalam campuran air-metanol. Perbandingan volume campuran metanol terhadap air bervariasi dari 1:1, 1:2, dan 1:4 (Wong et al, 2007).

Eksperimen pengeringan dilakukan menggunakan analisis termogravimetri untuk mengukur berat dari sampel dan mengontrol temperatur lingkungan. Udara pengering dialirkan pada bagian atas sebanyak 30 mL/min selama eksperimen berlangsung. Pengeringan dilakukan dengan dua kondisi yang berbeda. Pada kondisi pertama merupakan pengeringan konvektif dengan temperatur pengeringan sebesar 75°C selama 3 jam. Kondisi eksperimen

yang kedua adalah pengeringan intermiten, kondisi ini memiliki dua zona pengeringan dengan temperatur pengeringan sebesar 25°C selama 1 jam kemudian temperatur ditingkatkan menjadi 75°C selama 2 jam.

Model Matematika

Untuk pemodelan dengan menggunakan REA, nilai dari relative activation energy ($\Delta E_v/\Delta E_{v,b}$) harus digenerasi terlebih dahulu. Pelarut yang digunakan merupakan campuran dari air dengan metanol sehingga terdapat dua persamaan relative activation energy yang berbeda. Persamaan *relative activation energy* untuk pengeringan polivinil alkohol dengan pelarut air adalah sebagai berikut (Putranto et al, 2010) :

$$\frac{\Delta E_{v1}}{\Delta E_{v,b1}} = \exp [-1,0794 (X_1 - X_{b1})^{1,6874}] \quad (7)$$

Persamaan *relative activation energy* untuk pengeringan polivinil alkohol dengan pelarut metanol perlu digenerasi terlebih dahulu. Parameter pada persamaan *relative activation energy* diperoleh dengan menggunakan persamaan neraca massa dan neraca energi. Parameter dari persamaan *relative activation energy* ditebak menggunakan tebakan awal kemudian persamaan neraca massa dan neraca energi diselesaikan hingga diperoleh hasil yang sesuai dengan data eksperimen. Persamaan *relative activation energy* untuk pengeringan polivinil alkohol dengan pelarut metanol adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta E_{v2}}{\Delta E_{v,b2}} = -0,674 \times (X_2 - X_{b2})^3 + 2,029 \times (X_2 - X_{b2})^2 - 2,33 \times (X_2 - X_{b2}) + 1,005 \quad (8)$$

Nilai dari energi aktivasi kesetimbangan tiap komponen akan berbeda ($\Delta E_{v,b1}$ dan $\Delta E_{v,b2}$) tergantung pada kelembaban relatif masing-masing komponen pada udara pengering. Energi aktivasi masing-masing komponen ($\Delta E_{v,1}$ dan $\Delta E_{v,2}$) diperoleh dari hasil kali antara *relative activation energy* dengan energi aktivasi kesetimbangan. Energi aktivasi tersebut akan digunakan dalam persamaan neraca massa komponen.

Larutan organik yang akan dipisahkan dari polivinil alkohol merupakan campuran dari metanol dengan air. Pada eksperimen ini terdapat dua neraca massa yang berasal dari masing-masing komponen dari larutan organik. Neraca massa komponen dari air yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m_s \frac{dX_1}{dt} = -h_m A \left[\exp \left(\frac{-\Delta E_{v1}}{RT_s} \right) \rho_{v,sat1}(T_s) - \rho_{v,b1} \right] \quad (9)$$

Sedangkan untuk neraca massa komponen dari metanol yang dapat dituliskan pada persamaan :

$$m_s \frac{dX_2}{dt} = -h_m A \left[\exp \left(\frac{-\Delta E_{v2}}{RT_s} \right) \rho_{v,sat2}(T_s) - \rho_{v,b2} \right] \quad (10)$$

Dengan keterangan m_s adalah massa polimer kering (kg polimer kering), X_1 adalah kadar air pada sampel, X_2 adalah kadar metanol pada sampel, h_m adalah koefisien perpindahan massa ($m \cdot s^{-1}$), A adalah luas permukaan dari material (m^2). Konsentrasi uap jenuh dari air dan metanol dinyatakan dengan $\rho_{v,sat1}$ dan $\rho_{v,sat2}$. Konsentrasi air dan metanol pada udara pengering dinyatakan dengan $\rho_{v,b1}$ dan $\rho_{v,b2}$. Nilai dari $\rho_{v,b2} = 0$, hal ini karena diasumsikan pada udara pengering hanya mengandung sedikit metanol. Larutan organik yang ingin dipisahkan merupakan campuran metanol dengan air sehingga melalui persamaan (9) dan (10) diperoleh persamaan (11) yang menunjukkan kadar dari larutan organik pada sampel (X).

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dX_1}{dt} + \frac{dX_2}{dt} \quad (11)$$

Neraca energi pada pengeringan konvektif maupun intermiten dapat dituliskan sebagai berikut :

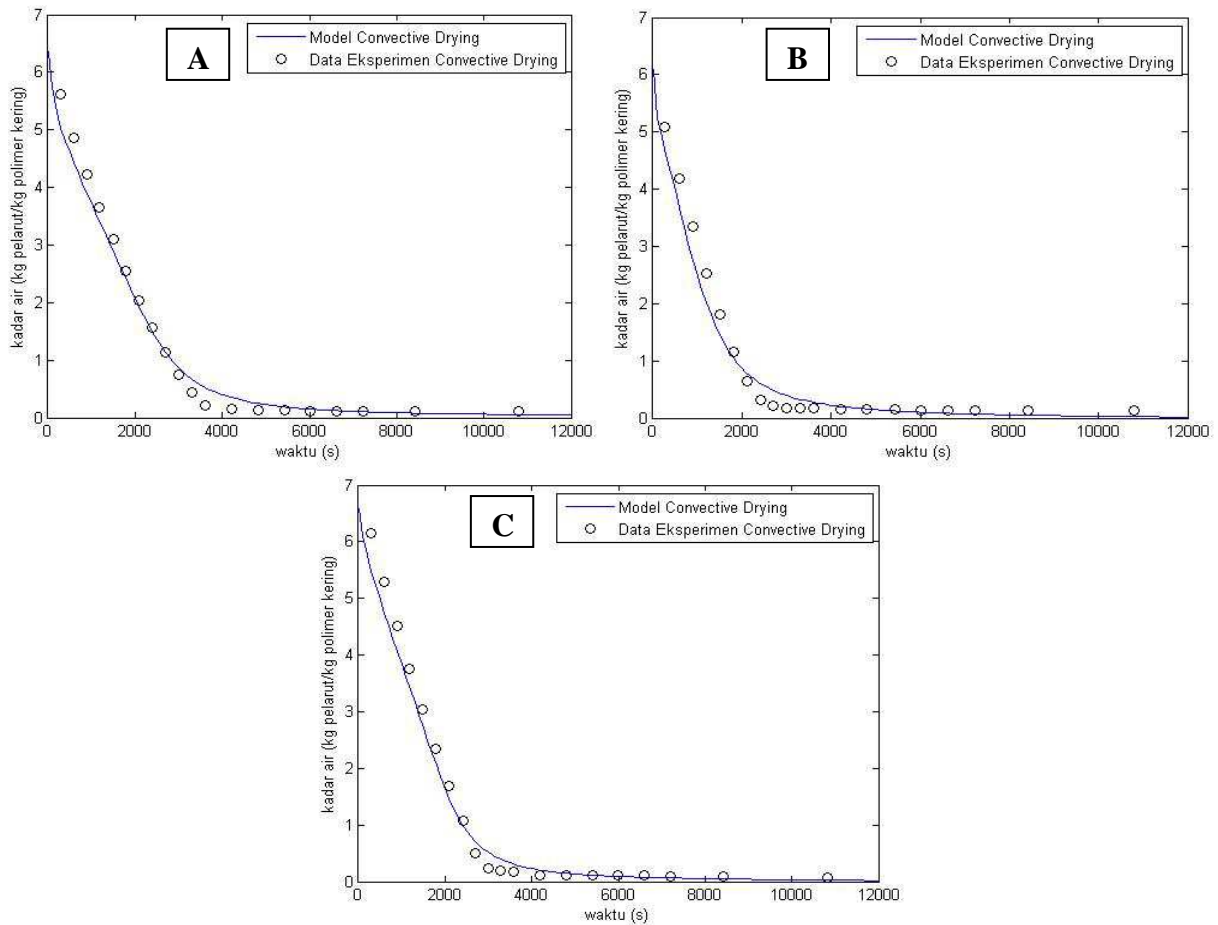
$$\frac{d[m_s C_p T]}{dt} = h A (T_b - T) + m_s \frac{dX_1}{dt} \Delta H_{v1} + m_s \frac{dX_2}{dt} \Delta H_{v2} \quad (12)$$

Dengan keterangan C_p adalah kapasitas panas dari sampel ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), T adalah temperature dari sampel (K), h adalah koefisien perpindahan panas ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), ΔH_{v1} adalah kalor penguapan air ($J \cdot kg^{-1}$), ΔH_{v2} adalah kalor penguapan metanol ($J \cdot kg^{-1}$), dan T_b merupakan temperatur dari lingkungan (K).

Terdapat 4 buah persamaan differensial yaitu persamaan (9), (10), (11), dan (12) yang diselesaikan secara simultan untuk memperoleh profil kadar larutan organik dalam sampel dan temperature sampel. Pada pengeringan intermiten, energi aktivitas kesetimbangan ($\Delta E_{v,b}$) dan neraca energi diimplementasikan sesuai dengan kondisi pengeringan tiap zona.

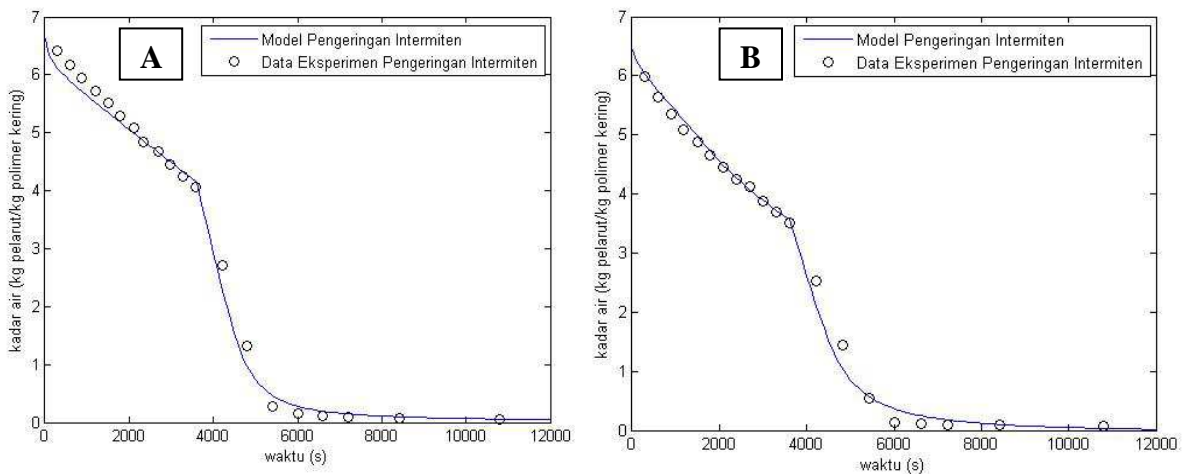
Hasil dan Pembahasan

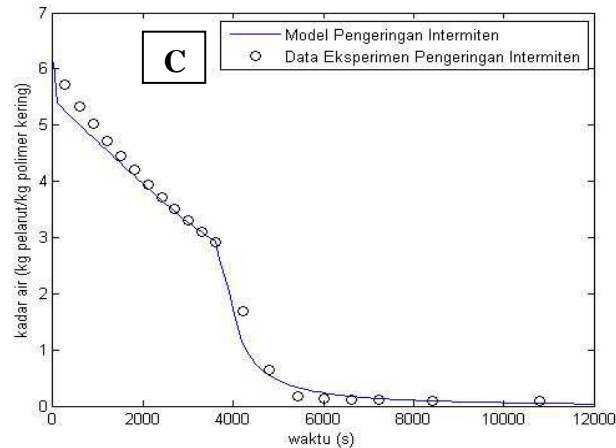
Pengeringan konvektif dari polivinil alkohol dengan berbagai perbandingan campuran air dan metanol pada temperatur udara pengering sebesar 75°C, hasil dari pemodelannya ditampilkan pada gambar 1. Berdasarkan hasil yang diperoleh, prediksi kandungan pelarut sangat cocok dengan data eksperimen. REA dapat menggambarkan pengeringan konvektif polivinil alkohol dari pelarut organik dengan baik.



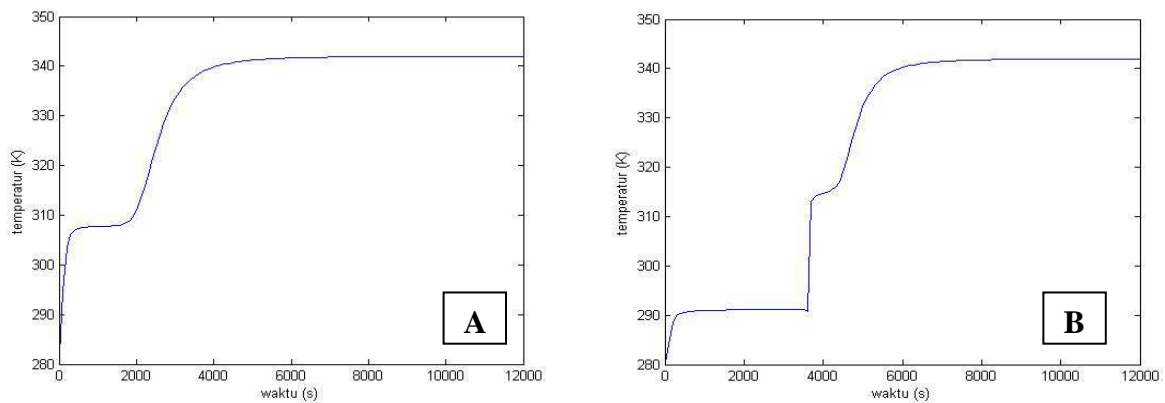
Gambar 1. Profil kandungan pelarut selama pengeringan konvektif dari polivinil alcohol pada temperatur 75°C (a) Rasio air terhadap metanol sebesar 1 : 1, (b) 2 : 1, (c) 4 : 1.

Untuk pengeringan intermiten, pada waktu pengeringan selama 1 jam temperatur pengeringan sebesar 25°C kemudian selama 2 jam temperatur pengeringan ditingkatkan menjadi 75°C . Pengeringan intermiten dilakukan dengan berbagai perbandingan campuran air dan metanol, hasil dari pemodelannya ditampilkan pada gambar 2. Berdasarkan gambar 2, hasil dari pemodelan sangat cocok dibandingkan dengan data eksperimen.





Gambar 2. Profil kandungan pelarut selama pengeringan intermiten dari polivinil alkohol (a) Rasio air terhadap metanol sebesar 1 : 1, (b) 2 : 1, (c) 4 : 1.



Gambar 3. Profil temperatur selama pengeringan dari polivinil alkohol dari larutan organik dengan rasio air terhadap metanol sebesar 4 : 1 (a) pengeringan konvektif, (b) pengeringan intermiten.

Selain menghasilkan profil kadar larutan pada sampel, REA juga dapat memprediksi profil temperatur dari proses pengeringan polivinil alkohol. Profil temperatur dari pengeringan polivinil alkohol ditunjukkan pada gambar 3. Berdasarkan gambar 1 dan 2, REA mampu memodelkan pengeringan konvektif maupun intermiten dari polivinil alkohol dalam larutan organik dengan baik. Sebagai perbandingan dengan model difusi yang dilakukan oleh Wong, Altinkaya, dan Mallapragada (2007) menunjukkan bahwa REA memberikan hasil yang sebanding bahkan lebih baik.

Berdasarkan hasil yang diperoleh bahwa REA dapat memodelkan pengeringan konvektif maupun intermiten polivinil alkohol dari pelarut organik pada berbagai perbandingan air dengan metanol. Akurasi REA dapat disebabkan karena akurasi dan fleksibilitas dari energi aktivasi dalam menggambarkan perubahan dari perilaku internal sampel selama pengeringan konvektif maupun intermiten. Energi aktivasi kesetimbangan dievaluasi sesuai dengan kondisi kelembaban tiap komponen pelarut dan temperature akhir sampel, dapat mengatasi perubahan lingkungan selama pengeringan intermiten. Neraca massa masing-masing komponen dapat mewakili keadaan metanol dan air dalam campuran larutan organik. REA dapat memberikan hasil yang akurat dalam memodelkan pengeringan konvektif dan intermiten polivinil alkohol dari larutan organik.

Kesimpulan

Pada studi ini, REA digunakan untuk memodelkan pengeringan konvektif maupun intermiten dari polivinil alkohol dengan pelarut organik. Terdapat dua buah persamaan *relative activation energy* pada percobaan ini. Persamaan tersebut akan dikombinasikan dengan energi aktivasi kesetimbangan yang sesuai dengan kelembaban dan temperatur akhir produk. Persamaan neraca massa dan neraca energi diselesaikan secara simultan untuk memperoleh profil dari kadar larutan dan temperature. Hasil dari pemodelan sangat cocok dengan data eksperimen. REA dapat memodelkan kadar larutan pada sampel baik untuk pengeringan konvektif maupun intermiten. REA dapat memberikan hasil yang dapat bersaing bahkan lebih baik dibandingkan dengan model berbasis difusi. REA dapat memberikan hasil yang akurat dengan persamaan yang lebih sederhana.



Daftar Pustaka

- Chen, G. X., & Yoon, S. W. (2014). Drying of Methanol and Methyl Acetate from Poly (vinyl alcohol) Flakes. *Drying Technology*, 32(10), 1210-1218.
- Chen, X.D., 2008. The basics of a reaction engineering approach to modeling air drying of small droplets or thin layer materials. *Drying Technology* 26, 627-639.
- Chen, X.D., Peng, X.F., 2005. Modified Biot number in the context of air drying of small moist porous objects, *Drying Technology* 23, 83-103.
- Chen, X.D., Putranto, A., 2013. Modeling Drying Processes: A Reaction Engineering Approach, Cambridge University Press, UK
- Chen, X.D., Xie, G.Z., 1997. Fingerprints of the drying behavior of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model, *Trans IChemE, Part C: Food and Bioproducts Processing* 75, 213-222.
- Chou, S.K., Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., 2000. On the intermittent drying of an agricultural product. *TransIChemE Part C* 78, 193-203.
- Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., 2003. Intermittent drying of bioproducts—an overview. *Bioresource Technology* 90, 285–295.
- Putranto, A, Chen, X.D., Xiao, Z., Webley, P.A., 2011b. Intermittent drying of mango tissues: implementation of the reaction engineering approach (REA). *Industrial Engineering Chemistry Research* 50, 1089-1098.
- Putranto, A., Chen, X.D., Webley, P.A., 2010a, Infrared and convective drying of thin layer of polyvinyl alcohol (PVA)/glycerol/water mixture - The reaction engineering approach (REA). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49, 348-357.
- Putranto, A., Chen, X.D., Webley, P.A., 2010b, Application of the reaction engineering approach (REA) to model cyclic drying of polyvinyl alcohol(PVA)/glycerol/water mixture. *Chemical Engineering Science* 65, 5193-5203.
- Putranto, A., Chen, X.D., Webley, P.A., 2011a, Modeling of drying of thick samples of mango and apple tissues using the reaction engineering approach (REA). *Drying Technology* 29, 961-973.
- Wong, S. S., Altinkaya, S. A., & Mallapragada, S. K., 2007, Multi-zone drying schemes for lowering the residual solvent content during multi-component drying of semicrystalline polymers. *Drying technology*, 25(6), 985-992.





Lembar Tanya Jawab

Moderator : IGS Budi Aman (UPN "Veteran" Yogyakarta)

Notulen : Putri Restu Dewati (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : IGS Budi Aman (UPN "Veteran" Yogyakarta)
Pertanyaan :
 - Pelarut yang digunakan dalam penelitian ini apa?
 - Apakah pengeringannya dengan menggunakan *rotary dryer*?Jawaban :
 - Pelarut yang digunakan adalah campuran metanol dan air.
 - Pengeringannya tidak dengan *rotary dryer*, tetapi menggunakan udara pengering biasa.
2. Penanya : Didi Dwi Anggoro (Universitas Diponegoro, Semarang)
Pertanyaan : Jenis udara pengering yang digunakan apa?
Jawaban : Menggunakan udara pengering biasa. Jenis pengeringannya adalah intermiten. Intermiten adalah metode untuk konservasi energi. Intermiten menjaga kualitas produk agar tidak rusak.

