

## Pengaruh Kecepatan Tangensial Udara Masuk Pengering Semprot terhadap Penguapan dan Posisi Tetesan Air yang Disemprotkan

Engkos Achmad Kosasih

Laboratorium Heat Transfer, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia  
Kampus Baru UI Depok 16424  
E-mail : kosri@eng.ui.ac.id

### Abstrak

*Kinerja pengering semprot sampai saat ini masih sangat rendah, sehingga dibutuhkan metode untuk meningkatkannya. Untuk meningkatkan kinerja tersebut, penelitian mensimulasikannya dengan menerapkan variasi kecepatan tangensial udara masuk pengering. Simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2.16 untuk spray drying 2 dimensi simetri sumbu dan spray drying 3 dimensi. Simulasi menunjukkan bahwa penambahan kecepatan tangensial masuk menaikkan kinerja penguapan karena menambah panjang lintasan tetesan sebelum keluar. Namun terdapat nilai maksimum kecepatan tangensial yang mengakibatkan tetesan menumbuk dinding.*

*Kata Kunci : spray drying, droplet drying*

### 1. PENDAHULUAN

Pada umumnya bahan yang berupa sistem dispersi (larutan, suspensi, slurry, dan pasta) dikeringkan dengan proses pengering semprot (*spray drying*). Pengering semprot (*spray drying*) adalah alat pengering yang bekerja dengan menyemprotkan sistem dispersi tersebut kedalam aliran udara kering dan (biasanya) panas didalam ruangan pengering. namun pengering ini masih mempunyai kinerja yang rendah. Peningkatan kinerjanya berarti peningkatan laju penguapan dari tetesan.

Penyemprotan cairan kedalam aliran udara dalam suatu ruangan ini, juga terdapat pada beberapa proses yang lain misalnya proses pendinginan evaporatif dan penyemprotan bahan bakar cair. Kinerja kedua proses ini juga akan meningkat jika laju penguapannya meningkat.

Mengingat beberapa hal tersebut diatas maka proses ini menjadi salah satu proses yang membutuhkan penelitian yang luas dan mendalam.

Silva, M. A. dan Nebra, S. A.(1997) melakukan simulasi numerik 2-D (koordinat silinder) pengering semprot didalam siklon. Mereka mengembangkan model matematika: *slip*, pengkerutan and perpindahan panas *interfacial*. Penggunaan siklon untuk pengering semprot ini mungkin akan meningkatkan kinerjanya. Mujumdar (1995) menjelaskan bahwa distribusi aliran udara didalam pengering semprot harus menjamin bahwa partikel tidak mencapai dinding sebelum kering. Penggunaan siklon justru menimbulkan gaya sentrifugal yang akan lebih mendorong tetesan kearah dinding.

Tujuan penelitian ini adalah melihat pengaruh kecepatan tangensial udara masuk terhadap penguapan tetesan air yang disemprotkan didalam silinder vertikal dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Fluent untuk 2 dimensi simetri sumbu dan 3 dimensi.

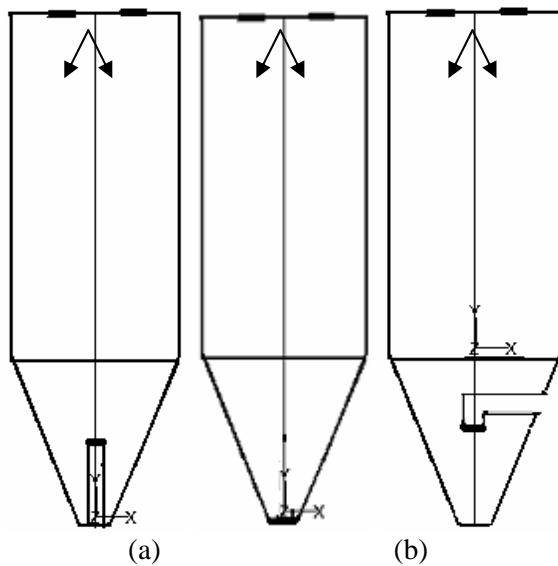
Penelitian ini melakukan simulasi semprotan air (murni) kedalam aliran udara panas aliran searah didalam silo pengering semprot 2-dimensi simetri sumbu dan 3-dimensi (lihat gb. 1)

### 2. Persamaan Model

Simulasi menyelesaikan sistem persamaan diferensial dengan cara meng-integrasikannya untuk setiap volume terhingga yang ada didalam domain (*finite volume method*). Untuk aliran turbulen, seperti biasanya, sistem persamaan mengalami perata-rataan (waktu) terlebih dahulu sehingga menghasilkan suku-suku tambahan. Suku tambahan tersebut adalah suku-suku difusi turbulen, yaitu difusi momentum, difusi energi dan difusi massa (spesies).

Pendekatan yang dilakukan untuk droplet adalah droplet dipandang sebagai partikel yang disebut model fase diskrit (discrete phase model).

Persamaan diferensial parsial (PDE) spray drying untuk fase Gas, yaitu untuk koordinat silinder yang meliputi:



Gambar 1 Pengering Semprot: (a) 2-dimensi simetri sumbu (b) 3-dimensi

#### Persamaan kontinuitas:

Jika  $\rho$  adalah rapat massa udara dan  $\vec{V}$  adalah vektor kecepatan udara, maka persamaan kontinuitas bisa dinyatakan dengan:

$$\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = S_M \quad (1)$$

$S_M$  adalah sumber pertambahan massa yang dihasilkan dari penguapan tetesan air (fase diskrit) didalam volume kontrol.

$$S_M = -\frac{1}{d(\text{volume})} \sum \frac{dm_d}{dt}$$

$m_d$  : massa tetesan;

#### Persamaan Momentum:

Jika  $\tau$  adalah tensor tegangan,  $P$  adalah tekanan,  $\vec{g}$  adalah vektor percepatan gravitasi dan  $\vec{F}$  adalah gaya luar sebagai interaksi (aksi-reaksi) dengan fase diskrit, maka persamaan momentum bisa dinyatakan dengan:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \rho \vec{g} + \vec{F} - \vec{\nabla} \cdot \tau \quad (2)$$

dengan:  $\vec{F}$  : gaya drag tiap satuan volume kendali

$$\vec{F} = \sum \vec{F}_{drag} / d(\text{volume})$$

$$\frac{\vec{F}_{drag}}{m_d} = \frac{3C_{drag} \rho |\vec{V}_d - \vec{V}| (\vec{V}_d - \vec{V})}{4 \rho_d D_d}$$

$\rho_d$  adalah massa jenis tetesan.

$C_{drag}$  adalah koefisien drag dan merupakan fungsi dari bilangan Reynolds  $Re_d$ :

$$\text{Re}_d = \frac{\rho D_d |\vec{V} - \vec{V}_d|}{\mu}$$

$D_d$  : diameter tetesan.  
 $V_d$  : kecepatan tetesan.  
 $\mu$  : viskositas udara

### Persamaan Energi:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} H) = \lambda \nabla^2 T + \frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} P + \tau : \vec{\nabla} \vec{V} - A + S_H \quad (3)$$

dengan:

$$A = \left( \frac{\partial (J_{ix} H_i)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r J_{ir} H_i)}{\partial r} \right) \text{ untuk 2 dimensi simetri sumbu.}$$

$$A = \left( \frac{\partial (J_{ix} H_i)}{\partial x} + \frac{\partial (J_{iy} H_i)}{\partial y} + \frac{\partial (J_{iz} H_i)}{\partial z} \right) \text{ untuk tiga dimensi.}$$

$H$  : energi jenis (persatuan massa)

$$= c_p T + 1/2 |\vec{V}|^2$$

$\lambda$ : konduktivitas panas

$T$  : temperatur udara.

$J_{ij}$  : fluks difusi massa spesies ke- $i$  (uap air) dalam arah-j.

$S_H$  : Pertukaran panas antara droplet dengan udara.

$$= -h \pi D_d^2 / 4 \cdot (T - T_d)$$

Koefisien konveksi  $h$  dihitung dari rumus bilangan Nuselts, pers. Ranz-Marshall:

$$Nu = 2 + 0.6 \text{Re}_p^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad \text{dan} \quad h = \frac{Nu \lambda}{D_d}$$

### Persamaan Fraksi Massa Spesies

$$\frac{\partial \rho m_{H2O}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho m_{H2O} \vec{V}) = B + S_M \quad (4)$$

dengan:  $B = \frac{\partial J_{H2Ox}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_{H2Or}}{\partial r}$  untuk 2 dimensi simetri sumbu.

$$B = \frac{\partial J_{H2Ox}}{\partial x} + \frac{\partial J_{H2Oy}}{\partial y} + \frac{\partial J_{H2Oz}}{\partial z} \quad \text{untuk 3 dimensi}$$

### Persamaan Tetesan:

Gaya grafatisi - gaya apung - gaya drag = laju perubahan momentum, sehingga:

$$\frac{m_d(\rho_d - \rho)\vec{g}}{\rho_d} - F_{drag} = m_d \frac{d\vec{V}_d}{dt} +$$

$$\vec{V}\rho_d \frac{1}{2}\pi D_d^2 \frac{dD_d}{dt}$$

Dengan mengabaikan percepatan yang muncul akibat pengurangan diameter tetesan, didapat percepatan tetesan:

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = -\frac{F_{drag}}{m_d} + \vec{g} \left( \frac{\rho_d - \rho}{\rho_d} \right) \quad (5)$$

Temperatur  $T_d$  tetesan dihitung dengan persamaan berikut:

$$m_d C_{p,d} \frac{dT_p}{dt} = -S_H + \frac{dm_d}{dt} H_{fg} \quad (6)$$

Massa droplet dihitung dari persamaan perpindahan massa (uap) antar-muka:

$$\frac{dm_d}{dt} = h_m \pi d_d^2 / 4. (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (7)$$

dengan:  $\rho_{v,s} = \frac{P_{sat}(T_d)}{RT_d}$  : rapat massa uap air pada permukaan tetesan

$$\rho_{v,\infty} = 18 \frac{p_{v,\infty}}{RT} : \text{rapat massa uap air dalam udara}$$

$p_{v,\infty}$  : tekanan parsial uap air dalam udara disekitar tetesan

R: tetapan gas umum = 8314,5 [J/(kmole K)]

$h_m$  : koefisien perpindahan massa, didapat dari rumus analogi perpindahan massa dengan perpindahan panas Ranz-Marshall:

$$Sh = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad \text{dan} \quad h_m = \frac{Sh \cdot D_v}{D_d}$$

$D_v$  : difusivitas massa uap air didalam udara

### Persamaan Turbulensi

Persamaan ini digunakan untuk menghitung besaran-besaran difusi (yaitu momentum, energi dan massa) total yang merupakan hasil penjumlahan besaran molekulernya dengan besaran turbulennya, sebagai berikut:

$$\mu = \mu_o + \mu_t; \quad \lambda = \lambda_o + \lambda_t; \quad D_v = D_{v,o} + D_{v,t} \quad (8)$$

Besaran turbulen dihitung dengan persamaan berikut:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad \lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t}; \quad D_{v,t} = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t} \quad (9)$$

Energi kinetik turbulen  $k$  dan disipasinya  $\varepsilon$  dihitung dengan menggunakan model dua persamaan  $k$  -  $\varepsilon$  berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \vec{\nabla}(\rho \cdot k \cdot \vec{V}) = \vec{\nabla} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \vec{\nabla} k \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (10)$$

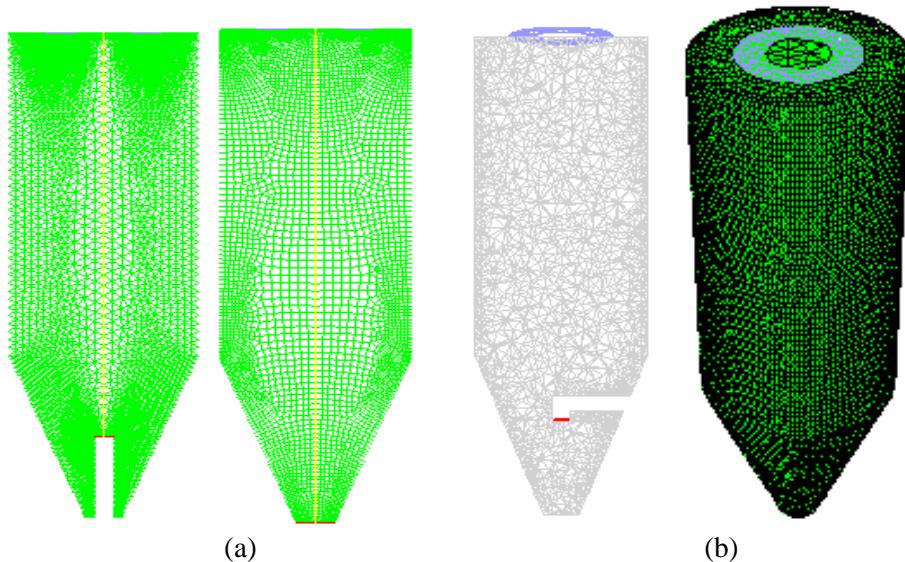
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \vec{\nabla}(\rho \cdot \varepsilon \cdot \vec{V}) = \vec{\nabla} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

dengan:  $C_m = 0,09$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  
 $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$

### 3. Grid dan Kondisi Batas

Simulasi menggunakan 2 jenis pengering semprot 2-dimensi dan 1 jenis 3-dimensi. dengan ukuran global yang sama. Grid yang dibentuk adalah seperti yang ditunjukkan dengan gb.2. Garis warna kuning adalah sumbu simetris, warna biru sisi masuk udara dan warna merah adalah sisi keluar udara.

Air disemprotkan dari bagian tengah lingkaran atas dengan kecepatan 50 m/s dan membentuk sudut 30° terhadap vertikal. Tetesan air mempunyai diameter homogen 0.0001 [m] dan laju aliran 0.00016 [m³/s].

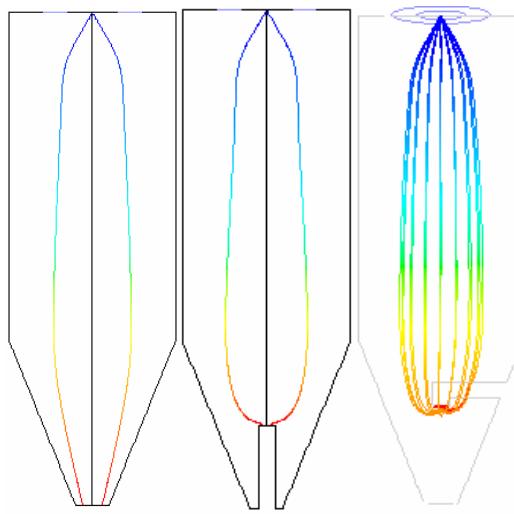


Gambar 2 Grid (a) 2 dimensi simetri sumbu, (b) 3 dimensi

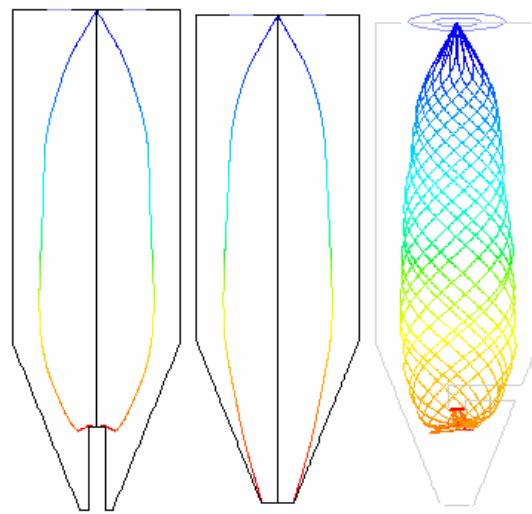
Udara mengalir dengan kecepatan aksial masuk 4 [m/s] dan temperatur 400 [K]. Kecepatan tangensial udara masuk ( $V_{t0}$ ) divariasikan mulai dari 0 [m/s] sampai dengan kecepatan maksimum, yaitu tetesan tersebut ‘hampir’ menumbuk dinding sebelum keluar dari ruang pengering.

### 4. Hasil dan Analisa

Gambar 3 dan gambar 4 berikut adalah trajektori tetesan pada kondisi ekstrim yaitu kecepatan tangensial 0 (nol) dan kecepatan tangensial maksimum,  $V_{t0,maks}$ .

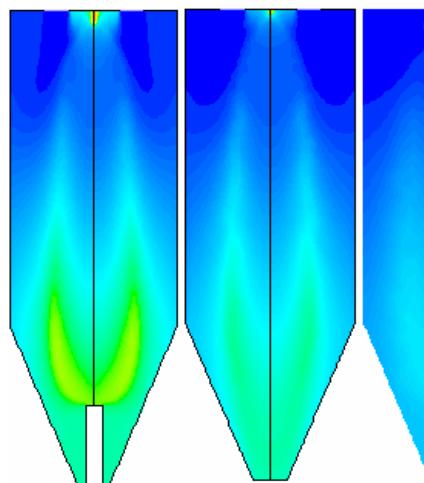


Gambar 3 Trajektori pada  $V_{t0} = 0$

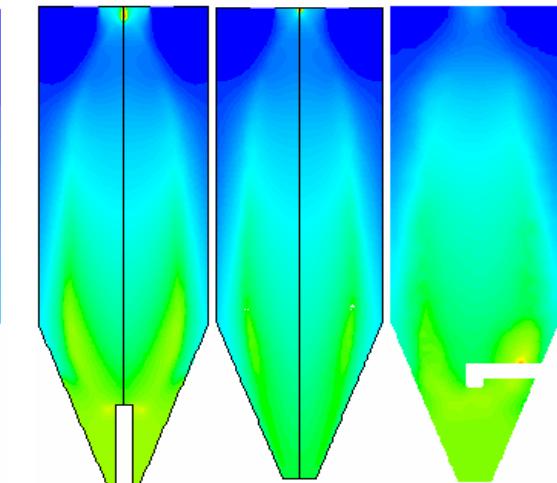


Gambar 4 Trajektori pada  $V_{t0} = V_{t0,maks}$

Kecepatan tangensial udara masuk maksimum  $V_{t0,maks}$  ditentukan sampai 2 angka signifikan, yaitu untuk 2,3 m/s untuk 2 dimensi yang pertama, 2,2 m/s untuk 2 dimensi yang kedua dan 3,4 m/s untuk 3 dimensi. Gambar 3 dan gambar 4

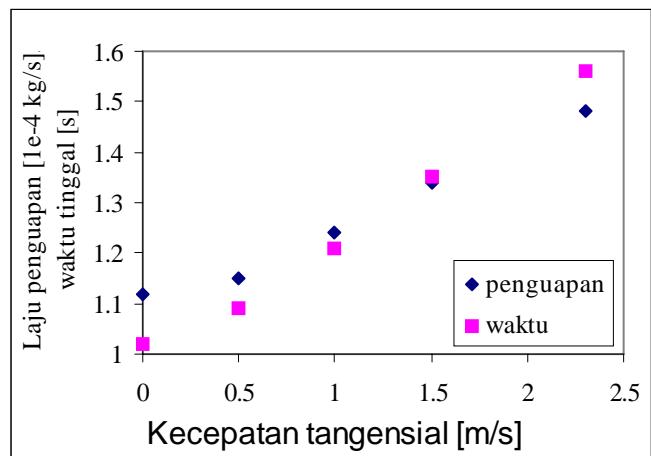


Gambar 5 Kandungan air pada  $V_{t0} = 0$

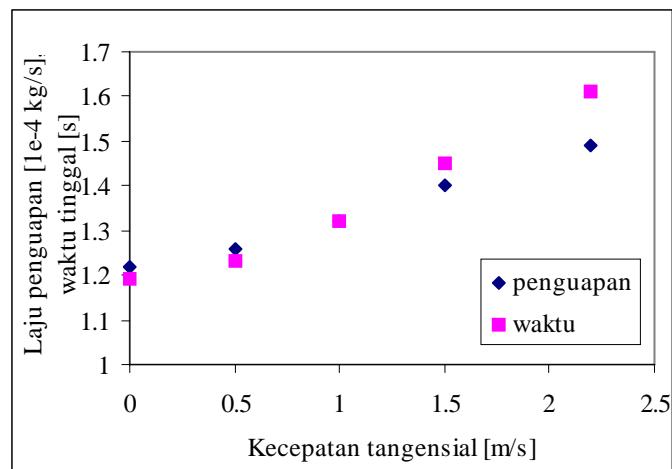


Gambar 6 Kandungan air pada  $V_{t0} = V_{t0,maks}$

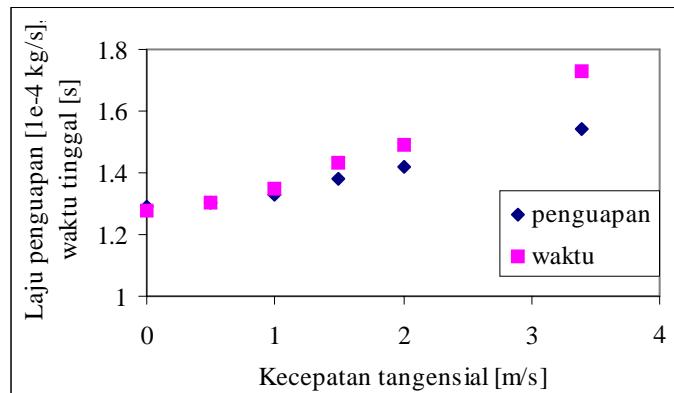
Gambar 5 dan gambar 6 memperlihatkan bahwa kadar uap air dalam udara pada sisi keluar untuk  $V_{t0} = V_{t0,maks}$  adalah lebih besar dari kadar uap air dalam udara pada sisi keluar untuk  $V_{t0} = 0$ . Hal ini juga bisa dilihat dari gb.7, yaitu laju penguapan (air teruapkan) yang naik terus.



(a) 2 dimensi I



(b) 2 dimensi II

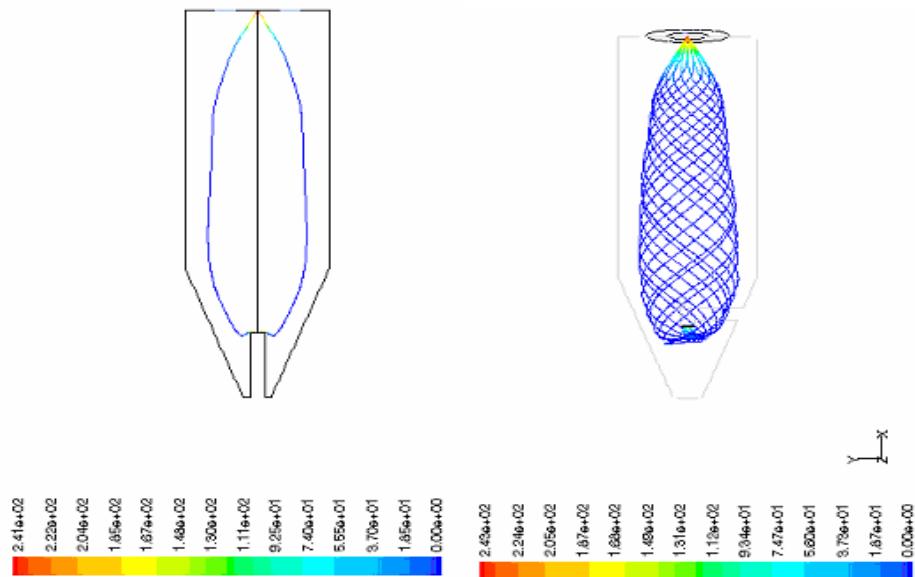


(c) 3 dimensi

Gambar 7 Laju penguapan dan waktu tinggal

Dari gb.7 di atas, peningkatan laju penguapan didalam ruang pengering tersebut dikarenakan trajektori partikel mengikuti aliran udara yang mempunyai kecepatan tangensial sehingga waktu tinggal partikel lebih besar yang berarti waktu penguapan lebih besar. Dilain pihak peningkatan kecepatan tangensial udara, secara keseluruhan, tidak meningkatkan bilangan Reynolds tetesan sehingga tidak begitu

berpengaruh terhadap koefisien perpindahan massa. Hal ini ditunjukkan dengan gb.8, yaitu bilangan Reynolds tetesan secara keseluruhan hampir sama dengan nol.



Gambar 8 Trajektori tetesan pada  $V_{t0} = V_{t0,maks}$

## 5. Kesimpulan

Peningkatan kecepatan tangensial udara masuk menghasilkan peningkatan laju penguapan yaitu lebih disebabkan terjadinya peningkatan waktu tinggal.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan, staf pengajar dan karyawan Kolej Univesiti Teknologi Tun Husein Onn (KUiTTHO), atas segala kebaikan dan bantuananya, yang telah memberikan ijin pemanfaatan perangkat lunak Fluent 6.2.16 di Laboratorium CAE KUiTTHO.

## Daftar Pustaka

- Bhandari, Bhesh R., *Problem associated with Spray Drying of Sugar-Rich Foods*, Journal of Drying Technology, 15(2), 671, 1997.
- Frydman, A., dkk , *Comparison of Superheated Steam and Air Operated Spray Dryers Using Computational Fluids Dynamics*, Journal of Drying Technology, 16(7), 1305-1338, 1998.
- Gemci, T., dkk., *Simulation of Evaporating Spray and Comparison with Droplet Temperature Measurement Obtained by Rainbow Refractory*, Proceedings of ASME , Fluid Engineering Division - vol. 253 59-66, 2000.
- Menshutina, N.V.; Gordeev,L.S.; Nakulina, E.A. and Shoheva E.E., *Simulation of Drying on the Basis of Nonequilibrium Thermodynamics of Heterogeneous Multiphase Polydespersed System. Formation of the Morphological Structure of Emulsive Elastomers Using Method of Spray – Drying for Latexes*, Journal of Drying Technology, 15(1), 23, 1997.
- Mujumdar, Arun S. Handbook of Industrial Drying, 2nd ed., volume 1, Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
- Okuyama, K., Lenggoro, I. W., dkk , *Preparation of Nanoparticles Via Spray Route*, Chemical Engineering Science, 58, 537-547, 2003.
- Silva, M. A., Nebra, S. A., *Numerical Simulation of Drying in A Cyclone*, Journal of Drying Technology, 15(6-8), 1731-1741, 1997.