

## PERBANDINGAN LAJU PENGUAPAN TETESAN: AQUADES DAN AIR GULA

**Engkos Achmad Kosasih**

Laboratorium Perpindahan Kalor  
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia  
Kampus Baru UI Depok  
e-mail: kosri@eng.ui.ac.id

### Abstrak

*Dalam beberapa proses seperti spray drying, evaporatif cooling dan pembakaran bahan bakar cair, penguapan tetesan memegang peranan penting. Laju perpindahan yang digunakan dalam perhitungan biasanya persamaan analogi Ranz-Marshall yaitu  $Nu = 2 + 0,6Re^{1/2} Pr^{1/3}$  untuk perpindahan panas dan  $Sh = 2 + 0,6Re^{1/2} Sc^{1/3}$  untuk perpindahan massa. Namun Model analogi mempunyai beberapa persyaratan yang diantaranya adalah: Keserupaan profil suhu dan profil konsentrasi, yang berarti bilangan Lewis ( $Le$ ) harus bernilai sekitar satu (pada kasus ini bilangan Lewis adalah 0,83 - 0,90) dan laju perpindahan massa yang rendah. Selain itu mengingat laju perpindahan massa yang tinggi maka sering digunakan model film stagnan untuk menghitung laju perpindahan.*

*Tetesan berupa air gula dan aquades. Tetesan dijatuhkan pada wire probe thermocouple dan udara dialirkan melalui tetesan dengan kecepatan dan temperatur bervariasi. Dimensi tetesan berubah terhadap waktu. Untuk mengetahui perubahan ini maka digunakan kamera untuk mencitrakan gambar. Selanjutnya gambar tersebut diolah dengan software sehingga didapat perubahan dimensi tersebut. Hasil pengolahan data berupa bilangan tak berdimensi yaitu Nusselt dan Sherwood. Pers. Ranz-Marshall digunakan sebagai pembandingan. Terlihat bahwa air gula lebih sulit menguap dibandingkan dengan aquades. Data yang didapat dari penelitian mempunyai kecenderungan selalu berada di atas model analogi Ranz-Marshall.*

*Kata Kunci: Penguapan tetesan, Bilangan: Nusselt dan Sherwood, Model analogi perpindahan massa Ranz-Marshall.*

### 1. Pendahuluan

Pemodelan laju penguapan dari tetesan mempunyai peranan penting dalam berbagai industri. Misalnya pengeringan bahan-bahan yang berupa sistem dispersi (larutan, suspensi, slurry, dan pasta) dan terutama yang sensitif terhadap suhu tinggi umumnya menggunakan pengering semprot (*spray drying*). Selain itu, pemodelan ini juga digunakan dalam pendingin evaporatif [5] dan teknik pembakaran bahan bakar cair [9], baik untuk perancangan maupun simulasi [4-14]. Pemodelan yang digunakan pada umumnya adalah analogi perpindahan massa dan perpindahan panas, yaitu menggunakan persamaan Ranz-Marshall untuk permukaan berbentuk bola. Semua proses tersebut di atas melibatkan laju perpindahan massa yang tinggi. Terdapat 3 (tiga) buah model analitis untuk laju perpindahan massa yang tinggi yaitu model film stagnan, model penetrasi dan model lapisan batas plat datar [12]. Ketiga model tersebut menghasilkan laju penguapan yang hampir sama. Model film stagnan adalah model yang paling banyak digunakan.

Persamaan Ranz-Marshall tersebut adalah sbb:

$$Nu = 2 + 0.6Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (1)$$

dengan:  $Nu$  = bilangan Nusselt  
 $Re_p$  = bilangan Reynold partikel  
 $Pr$  = bilangan Prandtl

Dengan analogi perpindahan panas dan massa, didapat:

$$Sh = 2 + 0.6Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2)$$

dengan:  $Sh$  = bilangan Sherwood  
 $Sc$  = bilangan Schmidt

Model analogi mempunyai beberapa persyaratan yang tiga diantaranya adalah [12]:

- Keserupaan profil suhu dan profil konsentrasi, yang berarti bilangan Lewis ( $Le$ ) harus bernilai sekitar satu. Pada kasus penguapan (air) dari tetesan sperik larutan (dalam air) ke udara, bilangan Lewis (uap air di udara) sekitar 0,83 s/d 0,90.
- Sifat-sifat (*properties*) yang tidak ber-variiasi.
- Tahanan antar-muka yang dapat diabaikan.

Untuk persyaratan terakhir, jika tahanan antar muka tidak dapat diabaikan, maka pada permukaan akan terdapat lompatan potensial baik termal maupun konsentrasi. Pada perpindahan massa yang tinggi lompatan potensial ini tidak dapat diabaikan sehingga model analogi dikombinasikan dengan model film stagnan. Lompatan potensial (konsentrasi dan temperatur) telah diterapkan oleh Ben-Dor, G. et. al. [2] dalam perhitungan simulasi numerik untuk droplet yang berukuran cukup besar. Lompatan ini terjadi pada lapisan Knudsen di permukaan tetesan. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa laju penguapan yang dihitung lebih besar jika dibandingkan dengan laju penguapan yang dihasilkan dari persamaan analogi Ranz-Marshall. Penyimpang koefisien perpindahan panas dan massa dari hasil perhitungan konvensional (analogi Ranz-Marshall) juga ditunjukkan oleh penelitian Xiao Dong Chen et. al. [1]. Simulasi yang dilakukan M. Kadja, dan G. Bergeles [14] juga menerapkan koreksi terhadap persamaan analogi Ranz-Marshall. Juga sering terjadi bahwa gradien temperatur besar sehingga sifat-sifat bervariasi [9].

Dengan demikian maka penelitian ini bertujuan melihat seberapa besar penyimpangan model ang ada dari data eksperimen khususnya untuk aquades dan larutan 10 % gula dalam air dan membandingkan keduanya.

## 2. Dasar Teori

### *Perpindahan Kalor*

Bila dua benda atau lebih terjadi kontak termal maka akan terjadi aliran kalor dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal. Proses perpindahan panas ini berlangsung dalam 3 mekanisme, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Mekanisme konveksi mendominasi pada penelitian tetesan ini. Dengan tidak mengabaikan radiasi maka koefisien konveksi didapat dari,

$$Q_{\text{radiasi}} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_{\text{udara}}^4 - T_{\text{tetesan}}^4) \cdot A \quad (3)$$

dengan:

$\alpha$  = absorptivitas, untuk air  
bernilai 0,95

$\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann  
 $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$

$$Q_{\text{total}} = \frac{-dm}{dt} \cdot h_{fg} \quad (4)$$

$$Q_{\text{konveksi}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{radiasi}} \quad (5)$$

sehingga,

$$h = \frac{Q_{\text{konveksi}}}{A \cdot (T_{\text{udara}} - T_{\text{tetesan}})} \quad (6)$$

Dari koefisien konveksi tersebut, tentunya bilangan Nusselt dapat diketahui dari pers. dibawah,

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (7)$$

dengan:

$h$  = koefisien konveksi kalor

[W/m<sup>2</sup>.K]

$A$  = luas permukaan tetesan [m<sup>2</sup>]

$k$  = konduktivitas termal udara [W/m.K]

### Perpindahan massa

Udara dianggap sebagai gas ideal karena suhunya cukup tinggi dibandingkan suhu jenuhnya, dan uap air dianggap ideal karena tekanannya cukup rendah dibandingkan dengan tekanan jenuhnya [3].

Sehingga hukum-hukum yang berlaku untuk gas ideal akan berlaku juga pada udara, yaitu

$$PV = mR_aT \quad (8)$$

dengan:

$P$  = tekanan atmosfer udara basah [Pa]

$V$  = volume udara basah [m<sup>3</sup>]

$m$  = massa udara basah [kg]

$R_a$  = konstanta gas [kJ/kg.K]

$T$  = temperatur udara basah [K]

Tetapan gas untuk udara kering berdasarkan adalah :

$$R_a = \frac{\mathfrak{R}}{M_a} \quad (9)$$

$$R_a = 287,7 \text{ [J/kg.K]}$$

Kelembaban, tekanan, temperatur, entalpi dan volume jenis merupakan sifat termodinamika dari udara basah. Udara basah merupakan campuran biner antara udara kering dengan uap air, sehingga:

$$x_\omega = \frac{\omega}{0,622(1 + \omega)} \quad (10)$$

$$x_o = \frac{P_o}{P_{udara}} \quad (11)$$

dengan:

$\omega$  = rasio kelembaban

$P_v$  = tekanan uap jenuh [Pa]

Rasio kelembaban ( $\omega$ ) disebut juga *moisture content* atau *mixing ratio*, adalah perbandingan massa uap air terhadap massa udara kering yang terkandung dalam udara basah pada tekanan dan temperatur tertentu.

Penambahan zat terlarut pada zat pelarut, menyebabkan zat pelarut mengalami penurunan fraksi mol sehingga terjadi penurunan tekanan uap, kenaikan titik didih, penurunan titik beku dan tekanan osmotik larutan. Ini merupakan sifat koligatif larutan, yaitu sifat fisis larutan yang tidak tergantung dari jenis zat terlarut tapi hanya tergantung pada jumlah partikel zat terlarut.

$$\varphi = \frac{m_{gula}}{m_{tetesan}} = \frac{0,1 \times \frac{4}{3} \pi r_1^3 \times \rho}{\frac{4}{3} \pi r_{rata-rata}^3 \times \rho} \quad (12)$$

$$Y = \left( \frac{\varphi}{\varphi + 0,9 \times \frac{180}{18}} \right) \quad (13)$$

$$P_o = (1 - Y) \cdot P_v \quad (14)$$

dengan:

- $\varphi$  = fraksi massa gula
- $Y$  = fraksi mol gula
- $P_v$  = tekanan uap jenuh air [Pa]
- $P_o$  = tekanan uap jenuh air di dalam larutan [Pa]
- $\rho$  =  $\rho_{air}$  [kg/m<sup>3</sup>]

Uap air mengalami difusi dalam udara. Laju penguapan atau laju difusi molal didapat dari pers. berikut:

$$N = \frac{-dm/dt}{18 \cdot A} \quad (15)$$

Untuk koefisien konveksi massa :

$$k_c = \frac{N}{C \ln \left( \frac{1 - X_{A\infty}}{1 - X_{A0}} \right)} \quad (16)$$

dengan:

- $X_{A0}$  = fraksi mol uap di permukaan
- $X_{A\infty}$  = fraksi mol uap lingkungan

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{\mathfrak{R}T} \quad (17)$$

dengan:

$$\mathfrak{R} = 8314,5 \text{ [J / kg.mol.K]}$$

Bilangan Sherwood dapat diketahui dari persamaan:

$$Sh = \frac{k_c \cdot d}{D_{AB}} \quad (18)$$

dengan:

- $d$  = diameter tetesan [m<sup>2</sup>]
- $D_{AB}$  = difusi massa [m<sup>2</sup>/s]

Bilangan Schmidt digunakan untuk menentukan karakter aliran fluida bila terjadi perpindahan momentum dan difusi massa secara simultan selama proses konveksi. Persamaannya adalah:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \quad (19)$$

dengan:

$v$  = viskositas kinematik [ $m^2/s$ ]  
 $D_{AB}$  = difusi massa [ $m^2/s$ ]

### 3. Metode Penelitian

Penelitian digunakan dengan menggunakan alat sebagai berikut.

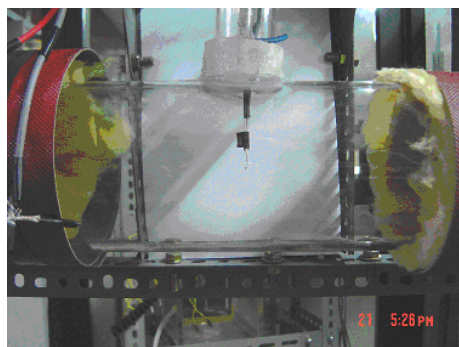


**Gambar 1.** Sistem pengujian

Terdapat *blower* yang membantu menghembuskan udara. Inverter digunakan sebagai pengatur frekuensi listrik sehingga kecepatan aliran fluida dapat dikendalikan.

Pemanas dengan daya 3 kW difungsikan sebelum *test section*. Suhu keluaran dari pemanas dikendalikan oleh pengendali digital, untuk mendapatkan keadaan yang tunak.

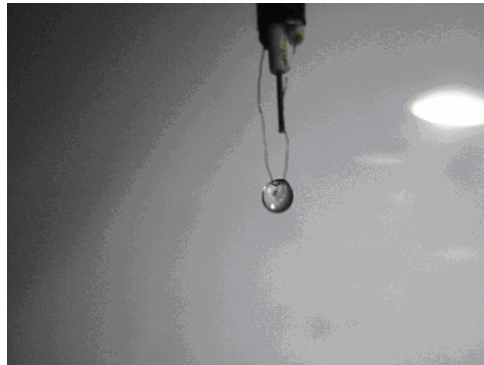
*Test section* dapat dilihat pada gambar berikut.



## Gambar 2. Test section

Tetesan dibentuk oleh suntikan dan dijatuhkan tepat pada *hot wire thermocouple*. Temperatur tetesan dapat dibaca pada *display*.

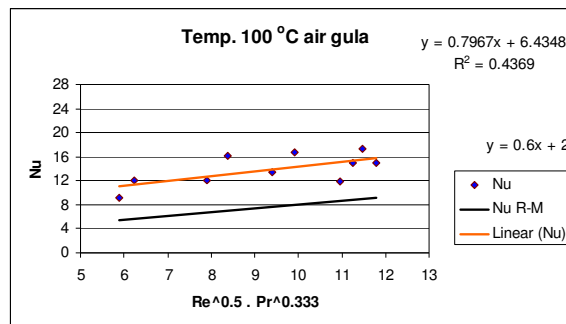
Dimensi tetesan berubah terhadap waktu. Untuk mengetahui perubahan ini maka digunakan *handycam* untuk mencitrakan gambar. Selanjutnya gambar tersebut diolah dengan *software* sehingga didapat perubahan dimensi tersebut. Berikut adalah contoh tetesan.



Gambar 3. Tetesan

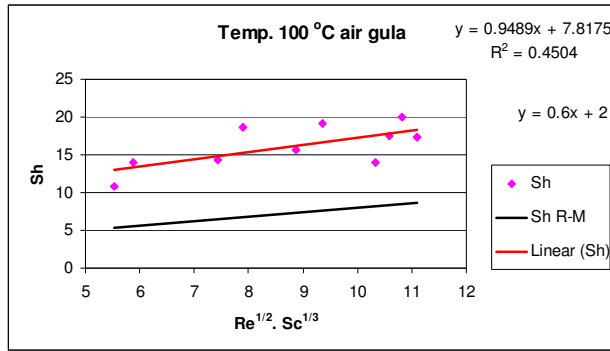
## 4. Hasil dan analisa

Dari grafik yang didapat dari langkah-langkah perhitungan, terlihat bahwa Nusselt (Nu) hasil pengujian berada diatas garis pers. Ranz-Marshall dengan tingkat kemiringan garis (gradien) yang berbeda pula.



Gambar 4. Grafik Nu vs Nu R-M pada 100°C, air gula

Dengan kecepatan aliran udara yang divariasikan (naik) maka bilangan Reynolds (Re) berangsur naik. Kenaikan Re menyebabkan Nu bertambah besar.

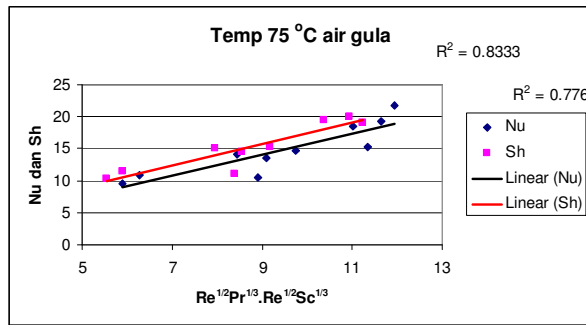


**Gambar 5.** Grafik Sh vs Sh R-M pada 100°C, air gula.

Gradien garis Nu hasil pengujian semakin melandai ketika temperatur divariasikan (naik). Tetapi dari pengujian yang dilakukan, pada temperatur 100 °C dan 122 °C tidak terjadi perubahan Nu yang signifikan, perubahan baru dapat dilihat pada temperatur 146 °C. Hal seperti ini terjadi juga pada bilangan Sherwood. Dari kemiripan nilai Nu dan Sh dapat diketahui bahwa terdapat analogi antara perpindahan kalor dan perpindahan massam walaupun tidak persis.

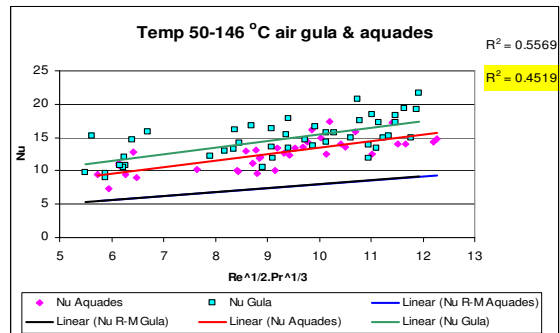
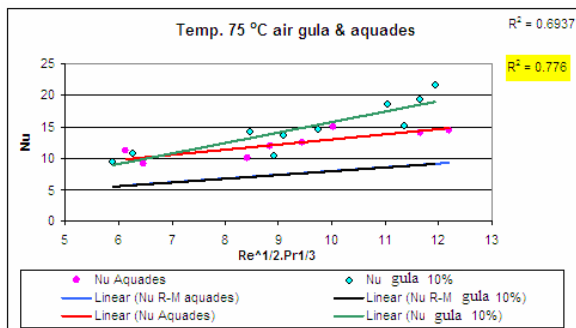
Untuk Nu pers. Ranz-Marshall (Nu R-M) relatif sama untuk temperatur 50°C; 75 °C; 100 °C dan juga pada temperatur 122 °C; 146 °C. Sedangkan Sh pers. Ranz-Marshall (Sh R-M) relatif sama untuk seluruh variasi temperatur.

Sementara nilai Nu dan Sh terlihat mirip sekali pada temperatur 75 °C. Analogi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



**Gambar 6.** Grafik Nu vs Sh pada 75°C, air gula.

**Perbandingan air gula dan aquades**



(a) 75 °C

(b) 50 - 146 °C

**Gambar 7.** Grafik Nu vs Nu R-M pada 75°C, air gula dan aquades.

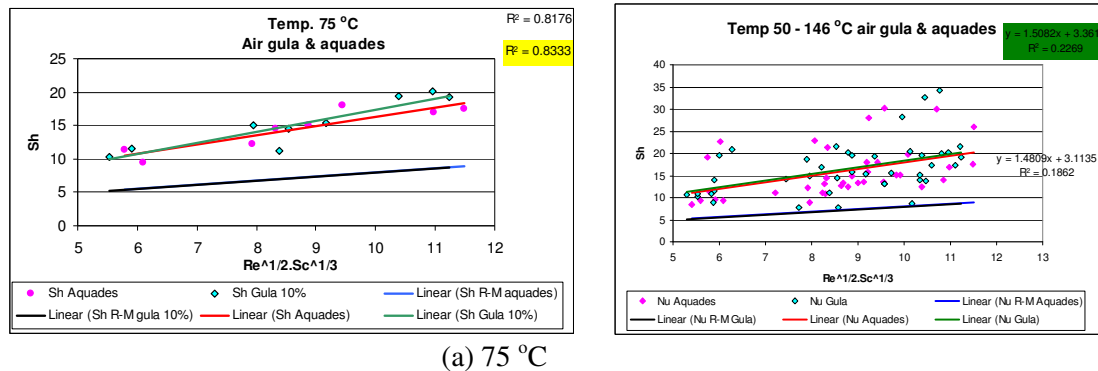
Dari grafik diatas terlihat bahwa nilai Nu air gula berada diatas Nu aquades, dengan gradien yang berbeda. Keberadaan gula dalam air menyebabkan fraksi mol air terhadap larutan turun sehingga tekanan uap jenuh air menjadi turun. Turunnya tekanan uap jenuh ini menyebabkan titik didih tinggi sehingga air membutuhkan kalor yang lebih banyak untuk menguap.

Temperatur permukaan tetesan air gula lebih tinggi dibandingkan temperatur permukaan aquades, pada kondisi yang sama. Hal ini terjadi karena energi (kalor laten) yang dilepaskan berkurang.

Dari grafik diatas terlihat bahwa nilai Nu air gula berada diatas Nu aquades mempunyai nilai dan gradien yang berbeda.

Keberadaan gula dalam air menyebabkan fraksi mol air terhadap larutan turun sehingga tekanan uap jenuh air menjadi turun, pada saat yang sama temperatur tetesan naik. Dengan demikian perbedaan konsentrasi uap air pada permukaan tetesan larutan gula lebih kecil sehingga menghasilkan nilai bilangan Sh yang lebih besar, serta perbedaan temperatur pada permukaan tetesan larutan gula lebih kecil pula sehingga menghasilkan bilangan Nu yang lebih besar.

Temperatur permukaan tetesan air gula lebih tinggi dibandingkan temperatur permukaan aquades, pada kondisi yang sama. Hal ini terjadi karena energi (kalor laten) yang dilepaskan berkurang.



(a) 75 °C

(b) 50 - 146 °C

**Gambar 8.** Grafik Sh vs Sh R-M, air gula dan aquades.

## 5. Kesimpulan

- Nilai data hasil pengujian memiliki kecenderungan berada diatas nilai pers. Ranz-Marshall.
- Larutan gula membutuhkan kalor yang lebih banyak untuk menguapkan air yang berarti juga bahwa air pada larutan gula lebih sulit untuk menguap dibandingkan dengan aquades.
- Perpindahan massa mempengaruhi perpindahan panas.
- Analogi perpindahan kalor dengan perpindahan massa terlihat jelas ketika temperatur aliran udara 75 °C.

## Daftar Pustaka

- [1] Chen, X. D., Sean X.Q. Lin A, Guohua Chen b, *On The Ratio of Heat to Mass Transfer Coefficient for Water Evaporation and Its Impact Upon Drying Modeling*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45 (2002) 4369–4372.
- [2] Ben-Dor, G., et. al., *Numerical Analysis of The Effects of Temperature and Concentration Jumps on Transient Evaporation of Moderately Large* ( $0.01 \leq Kn \leq$



- 0.3) *Droplets in Non-isothermal Multicomponent Gaseous Mixtures*, Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (2003) 157-166.
- [3] Mujumdar, A. S., *Innovation in Thermal Drying Technologies and Future R&D Needs*, The 14th International Symposium on Transport Phenomena, Bali, Indonesia, 2003, pp.
- [4] Chen, X. D., *Heat-Mass Transfer and Structure Formation During Drying of Single Food Droplets*, Journal of Drying Technology, 22(1 & 2) (2004) 179–190.
- [5] Fisenko S.P., Brin, A.A., Petruchik, A.I, *Evaporative Cooling of Water in a Mechanical Draft Cooling tower*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) 165–177.
- [6] Frydman, A., et. al. , *Comparison of Superheated Steam and Air Operated Spray Dryers Using Computational Fluids Dynamics*, Journal of Drying Technology, 16(7) (1998) 1305-1338.
- [7] Fyhr, C., Kemp, I. C., *Comparison of Different Drying Kinetics Models for Single Particles*, Journal of Drying Technology, 16(7) (1997) 1339-1369.
- [8] Gemci, T., et. al., *Simulation of Evaporating Spray and Comparison with Droplet*, Proceedings of ASME, Fluid Engineering Division - vol. 253, 2000, pp.59-66.
- [9] Kryukov, A.P., Levashov, V.Yu., Sazhin. S.S., *Evaporation of diesel fuel droplets: kinetic versus hydrodynamic models*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) 2541–2549.
- [10] Hindmarsh. J.P., Russell1, A.B., Chen X.D., *Experimental and Numerical Analysis of The Temperature Transition of a Freezing Food Solution Droplet*, Chemical Engineering Science 59 (2004) 2503 – 2515.
- [11] Silva, M. A., Nebra, S. A., *Numerical Simulation of Drying in A Cyclone*, Journal of Drying Technology, 15(6-8) (1997) 1731-1741.
- [12] Bird R. B. et al., *Transport Phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 2003 pp.681, 689.
- [13] Walton, D. E., *The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment*, Journal of Drying Technology, 22(3), pp. 431-456, 2004.
- [14] Kadja, M., Bergeles, G., *Modelling of Slurry Droplet Drying*, Journal of Applied Thermal Engineering, 23, pp. 829–84, (2003).