

**M8-013 Laju Penguapan Air dari Tetesan pada Variasi Temperatur, Laju Aliran dan Kelembaban: Suatu Perbandingan antar Model.**

**Engkos Achmad Kosasih**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Indonesia

Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

Phone: +62-21-7270032, FAX: +62-21-7270033, E-mail: [kosri@eng.ui.ac.id](mailto:kosri@eng.ui.ac.id)

**ABSTRAK**

*Diantara masalah yang penting dalam analisis pengering semprot adalah laju penguapan air dari permukaan tetesan (droplet) ke lingkungan. Selain dalam pengering semprot, masalah ini ditemukan juga dalam proses-proses pendinginan evaporatif dan semprotan bahan bakar cair didalam ruang bakar. Koefisien perpindahan yang digunakan biasanya dihitung dengan menggunakan analogi Ranz-Marshall,  $Nu = 2 + 0.6Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$  untuk perpindahan panas dan  $Sh = 2 + 0.6Re_p^{1/2} Sc^{1/3}$  untuk perpindahan massa. Diantara persyaratan analogi ini adalah bilangan Lewis  $Le$  bernilai satu (uap air di udara pada temperature 300 – 700 K sekitar 0,88 s/d 0,89). Selain itu terdapat enam persyaratan yang diantaranya adalah laju perpindahan massa yang kecil. Untuk laju perpindahan yang besar, penghitungan laju perpindahan sering model (analitis) film stagnan. Dengan menggunakan data eksperimen dari Walton (2004), Kosasih dan Alhamid mengusulkan modifikasi pada model film stagnan yang menghasilkan 2 parameter tambahan yaitu  $C_1$  dan  $C_2$ . Penelitian ini bertujuan melakukan perbandingan antara model film stagnan dan model modifikasinya dengan menggunakan data eksperimen untuk tetesan air (aquades dengan diameter  $\pm 2$  mm). Yang divariasikan disini bukan hanya temperatur dan laju aliran tapi juga kelembaban udara. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa model modifikasi lebih dekat dengan persamaan Ranz-Marshall, baik untuk bilangan  $Nu$  maupun bilangan  $Sh$ . Dengan demikian model modifikasi bisa lebih diterima.*

*Kata Kunci: Droplet Evaporation, Analogy Ranz-Marshall, Stagnant Film Model.*

**1. Pendahuluan**

Indonesia sangat kaya dengan hasil hasil pertanian, perikanan dan peternakan yang membutuhkan proses pengeringan, diantaranya pengering semprot (spray drying). Jenis pengering ini merupakan salah satu pengering yang banyak digunakan baik untuk produk makanan (pengawetan), obat-obatan, kosmetik, maupun untuk produk bahan-bahan yang digunakan dalam industri. Diantara masalah yang penting dalam analisis pengering semprot ini adalah laju penguapan air dari permukaan tetesan (droplet) ke lingkungan. Selain dalam pengering semprot, masalah ini ditemukan juga dalam proses-proses pendinginan evaporatif (Fisenko, 2004), dan semprotan bahan bakar cair didalam ruang bakar (Kryukov, 2004). Koefisien perpindahan yang digunakan biasanya dihitung dengan menggunakan analogi Ranz-Marshall, yaitu untuk menghitung koefisien perpindahan panas:

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

dan untuk menghitung koefisien perpindahan massa:

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

### 1. Model

Diantara persyaratan analogi ini adalah bilangan Lewis Le bernilai satu (uap air di udara pada temperature 300 – 700 K sekitar 0,88 s/d 0,89). Selain itu terdapat enam persyaratan lain (Bird: 681, 2003) yang diantaranya adalah sifat-sifat tidak bervariasi dan laju perpindahan massa yang kecil. Menurut Arun S. Mujumdar (2003), laju perpindahan panas dan perpindahan massa untuk suatu tetesan yang bergerak didalam pengering semprot adalah tinggi. Sehingga model analogi menjadi kurang tepat untuk digunakan. Hasil penelitian Chen (2002) menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas dan massa menyimpang dari hasil perhitungan konvensional (analogi), demikian juga hasil yang ditunjukkan oleh penelitian M. I. Alhamid dan E. A. Kosasih (2006). Model analogi biasanya dikombinasikan dengan model analitis model film stagnan untuk menghitung laju perpindahan panas dan massa berturut-turut :

$$N_{A0} = k_{cL} \ln \left( \frac{1 - X_{A,\infty}}{1 - X_{A0}} \right) \quad (3)$$

dan

$$q_0 = \frac{N_{A0} \bar{C}_{pA} (T_\infty - T_0)}{\exp \left( N_{A0} \bar{C}_{pA} / h_L \right) - 1} \quad (4)$$

dengan

$k_{cL}$  : koefisien perpindahan massa

$X_A$  : fraksi mole uap di udara.

$h_L$  : koefisien perpindahan panas

$T$  : Temperatur.

Dengan menggunakan data eksperimen dari Walton (2004), Kosasih dan Alhamid mengusulkan modifikasi pada model film stagnan yang menghasilkan 2 parameter tambahan yaitu  $C_1$  dan  $C_2$ , sehingga laju perpindahan massa menjadi:

$$N_{A0} = k_{cL} \left[ \ln \left( \frac{1 - X_{A,\infty}}{1 - X_{A0}} \right) - C_1 \right] \quad (5)$$

$$C_1 = -0,0011(\bar{C}_{A\infty} - T_{A0}) + 1,0082(\bar{C}_{A\infty} - X_{A0}) \quad (6)$$

dan laju perpindahan panas :

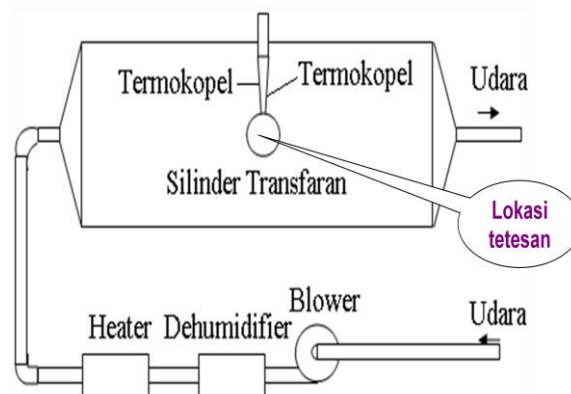
$$q_0 = \frac{N_{A0} \bar{C}_{pA} (\bar{C}_{\infty} - T_0)}{\left[ \exp\left( -\frac{N_{A0} \bar{C}_{pA}}{h_L} - \frac{\bar{C}_{pA}}{k} C_2 \right) - 1 \right]} \quad (7)$$

$$C_2 = -4,633 \cdot 10^{-10} (\bar{C}_{\infty} - T_0) + 1,6 \cdot 10^{-7} (\bar{C}_{A\infty} - X_{A0}) \quad (8)$$

Penelitian ini bertujuan melakukan perbandingan antara model film stagnan dan model modifikasinya dengan menggunakan data eksperimen untuk tetesan air (aquades dengan diameter  $\pm 2$  mm). Yang divariasikan disini bukan hanya temperatur dan laju aliran tapi juga kelembaban udara. Dalam hal ini yang diperbandingkan adalah bilangan  $Nu$  dan bilang  $Sh$ , dan yang menjadi standar adalah bilangan  $Sh$  dan bilangan  $Nu$  Ranz-Marshall yaitu pers.(1) dan pers.(2).

### 3. Eksperimen

Tetesan ( dengan diameter  $\pm 2$  mm), yang dihasilkan oleh nozel (jarum), menggantung pada termokopel rambut type-K. Udara yang lebih panas mengalir disekitar tetesan tersebut. Laju aliran udara divariasikan dengan menggunakan inverter dan temperatur udara divariasikan dengan menggunakan pemanas yang dikontrol. Untuk menghasilkan udara yang kering maka sebelum dipanaskan udara dilakukan pada dehumidifier. Alat uji adalah sebagai berikut:



Gambar 1 Skema Alat Uji



Gambar 2 Alat Uji

Eksperimen akan mengukur laju penguapan dari tetesan dengan cara mengukur perubahan diameter tetesan pada setiap waktu dengan menggunakan photo kamera digital yang kemudian diproses dengan perangkat lunak *image processing*. Dengan mengetahui (melalui pengukuran dan perhitungan) laju aliran udara, suhu bola basah dan bola kering udara dan diameter tetesan (dari waktu ke waktu diukur dengan foto kamera) maka laju perpindahan massa (penguapan) dan laju perpindahan panas pada setiap saat bisa dihitung. Demikian juga halnya dengan bilangan Prandtl's, bilangan Schmidt's, bilangan Reynold's, bilangan Nuselt's dan bilangan Sherwood's bisa dihitung. Laju penguapan [ $\text{kmole}/(\text{m}^2\text{s})$ ] dihitung sebagai berikut:

$$N_{A0} = -\frac{1}{18} \rho_w \frac{dr}{dt} \quad (9)$$

Selanjutnya koefisien perpindahan massa  $k_{cL}$  dihitung dengan pers.(3) untuk model film stagnan dan dengan pers.(5) untuk model pendekatan baru.

Panas yang digunakan untuk penguapan tetesan ( $q_{evap}$ ) ini berasal dari panas konveksi dari udara ( $q_0$ ) ditambah dengan panas radiasi ( $q_{rad}$ ) dari udara dan panas konduksi dari termokopel ( $q_{TK}$ ), sehingga:

$$q_0 = q_{evap} - q_{rad} - q_{TK} \quad (10)$$

Kalor penguapan:

$$q_{evap} = N_{A0} h_{fg} \quad (11)$$

Kalor radiasi:

$$q_{rad} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_{udara}^4 - T_{tetesan}^4) \cdot A \quad (12)$$

dengan:

$\alpha$  = absorptivitas, untuk air

bernilai 0,95

$\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann

$5,67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]

Kalor konduksi dari termokopel:

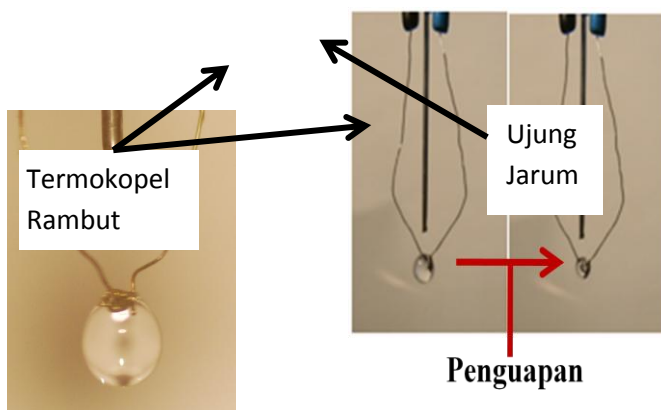
$$q_{TK} = \left[ \frac{e^{m_1 L} - e^{-m_1 L}}{e^{m_1 L} + e^{-m_1 L}} m_1 k_{TK1} + \frac{e^{m_2 L} - e^{-m_2 L}}{e^{m_2 L} + e^{-m_2 L}} m_2 k_{TK2} \right] \pi r_{TK}^2 (T_{\infty} - T_0) \quad (13)$$

Panas konduksi dari termokopel adalah berasal dari panas konveksi dari udara ke termokopel dan termokopel mengkonduksikan semuanya (asumsi) ke tetesan. Parameter  $m$  adalah  $\sqrt{(2h_{TK}/k_{TK}r_{TK})}$  dengan  $h_{TK}$  adalah koefisien konveksi udara-termokopel,  $k_{TK}$  adalah konduktivitas termokopel dan  $r_{TK}$  adalah jari-jari termokopel, sedangkan subskrip 1 dan 2 adalah kromel dan alumel.

Selanjutnya koefisien perpindahan panas  $h_L$  dihitung dengan pers. (4) untuk model film stagnan dan dengan pers.(7) untuk model pendekatan baru.

Dengan menggunakan nilai-nilai  $k_{cL}$  dan  $h_L$ , selanjutnya dihitung nilai bilangan Sherwood  $Sh$  dan bilangan Nusselt  $Nu$ , baik untuk model stagnan film maupun untuk model pendekatan baru. Selanjutnya nilai-nilai ini dibandingkan dengan nilai-nilai  $Sh$  dan  $Nu$  yang dihitung dengan persamaan Ranz-Marshall yaitu pers.(1) dan pers.(2).

Gambar 3 berikut adalah foto tetesan aquades (diameter  $\pm 2$  mm) yang menggantung pada termokopel rambut dan difoto di Departemen Teknik Mesin FTUI. Penelitian akan menggunakan cara ini untuk mengukur diameter dan suhu tetesan dari waktu ke waktu.



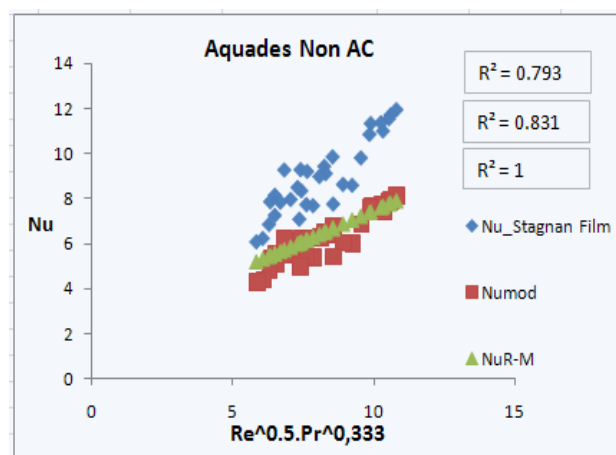
Gambar 3 Foto Tetesan Air

#### 4. Hasil dan analisa

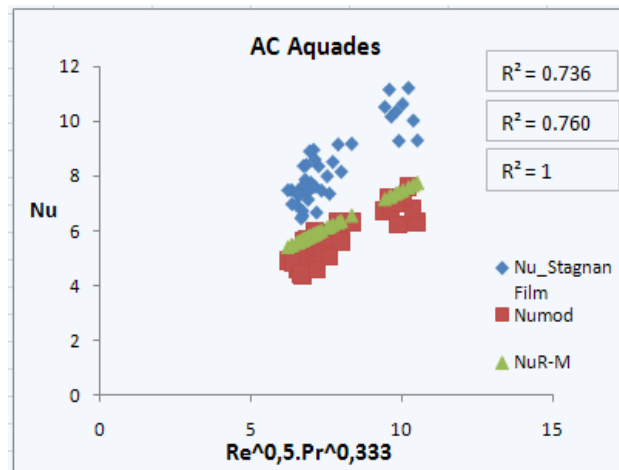
Data-data hasil perhitungan yang telah didapatkan akan digunakan untuk membantu proses analisa mengenai proses perpindahan panas (*heat transfer*) dan perpindahan massa (*mass transfer*). Grafik yang ditampilkan pada bab ini merupakan perbandingan nilai bilangan Sherwood dan nilai bilangan Nusselt yang dihitung dengan menggunakan dua model laju perpindahan yaitu model film stagnan dan model modifikasi terhadap film stagnan. Kemudian keduanya diperbandingkan dengan persamaan Ranz-Marshall. Analisa grafik ini terdiri dari dua bagian yaitu grafik perbandingan antar model yaitu grafik Sherwood dan Nusselt untuk tetesan aquades baik yang non ac (pada pengujian dehumidifier/ac dimatikan) maupun ac (pada pengujian dehumidifier/ac dihidupkan) dan grafik perbandingan pengaruh kelembaban yaitu antara yang non ac dan ac.

### ➤ Perbandingan antar model

Berikut adalah grafik untuk bilangan Nusselt:



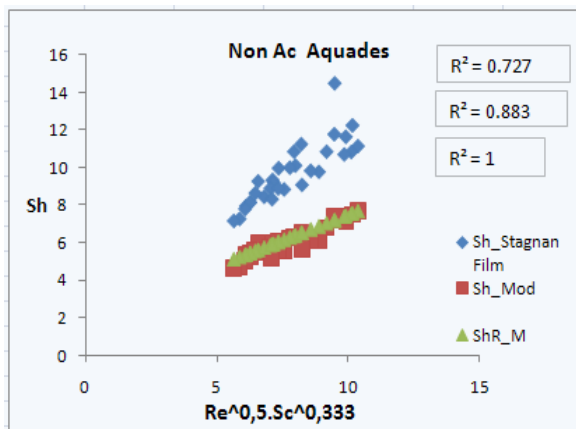
Gambar 4. Perbandingan  $Nu$  aquades non ac



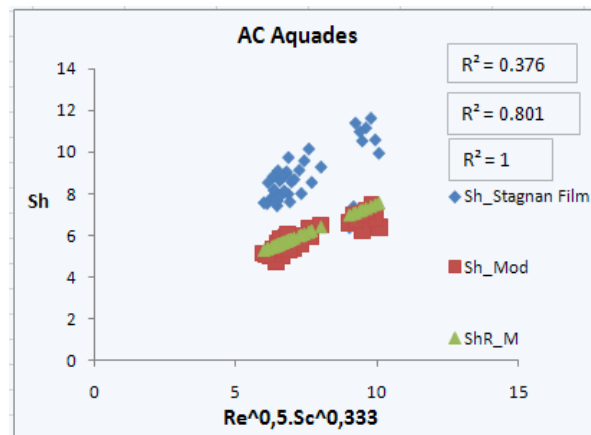
Gambar 5. Perbandingan  $Nu$  aquades ac

Perbandingan antar model untuk bilangan Sherwood, gb.4 dan gb.5, menunjukkan bahwa model modifikasi lebih mendekati persamaan Ranz-Marshall dibandingkan model stagnan film secara signifikan. Selain itu model modifikasi juga mempunyai korelasi yang lebih baik. Hal ini berlaku baik untuk pengujian non ac maupun pengujian dengan ac.

Berikut adalah grafik untuk bilangan Sherwood:



Gambar 6. Perbandingan  $Sh$  aquades non ac

*Perbandingan air garam dan aquades*Gambar 7. Perbandingan  $Sh$  aquades ac

Dari grafik pada gb.6 dan gb.7 diatas terlihat bahwa nilai bilangan  $Sh$  menunjukkan kecenderungan yang sama dengan nilai bilangan  $Nu$ . Gambar 4 dan gb.5, menunjukkan bahwa model modifikasi lebih mendekati persamaan Ranz-Marshall dibandingkan model stagnan film secara sigifikan dan dengan korelasi yang lebih baik. Hal ini juga berlaku baik untuk pengujian non ac maupun pengujian dengan ac.

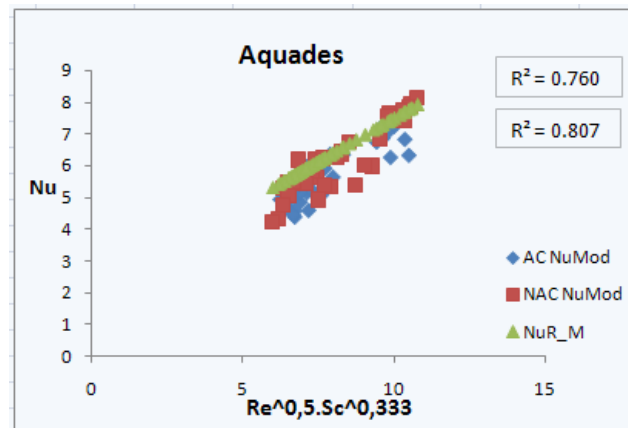
Berarti model modifikasi untuk perhitungan laju perpindahan lebih baik dibandingkan model film stagnan, yaitu jika digunakan persamaan Ranz-Marshall dalam menghitung koefisien laju perpindahan tersebut.

➤ **Pengaruh kelembaban udara**

Mengingat model modifikasi lebih baik, maka perbandingan pada pengaruh kelembaban udara ini hanya akan membandingkan model modifikasi saja.

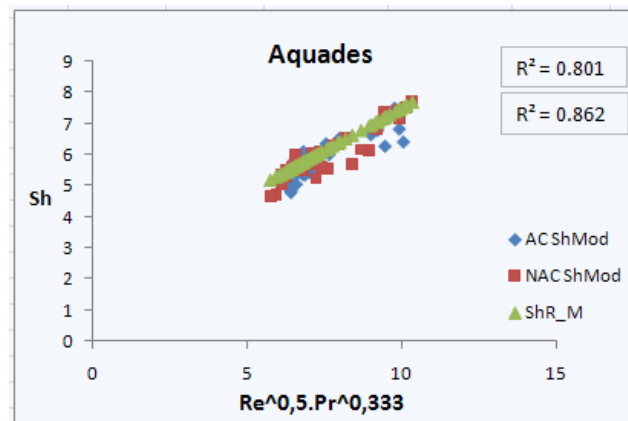


Berikut adalah grafik untuk bilangan Nusselt:



Gambar 8. Perbandingan  $Nu$  non ac dan ac

Berikut adalah grafik untuk bilangan Sherwood:



Gambar 9. Perbandingan  $Sh$  non ac dan ac

Ternyata walaupun dehumidifier/ac menurunkan kelembaban cukup signifikan (yaitu dari kelembaban spesifik 2 % menjadi 1 %) tapi baik bilangan  $Nu$  maupun bilangan  $Sh$  model modifikasi tidak hampir tidak berbeda.

Berarti kelembaban udara tidak berpengaruh secara signifikan, artinya model modifikasi bisa digunakan baik untuk udara yang basah maupun untuk udara yang cukup kering.

## 5. Kesimpulan

Pembahasan diatas memberikan dua buah kesimpulan sebagai berikut:

- Dalam perhitungan laju perpindahan, model modifikasi lebih baik dibandingkan model film stagnan, yaitu jika digunakan persamaan Ranz-Marshall dalam menghitung koefisien laju perpindahan tersebut.
- Model modifikasi bisa digunakan baik untuk udara yang basah maupun untuk udara yang cukup kering.

## Daftar Acuan

- [1] 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, 157-166, 2003.
- [2] Bird R. B. et al., *Transport Phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [3] 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, pp. 4369–4372, 2002.
- [4] Chen, X. D., “Heat-Mass Transfer and Structure Formation During Drying of Single Food Droplets”, *Journal of Drying Technology*, 22(1 & 2), pp. 179–190, 2004.
- [5] Fisenko S.P., Brin, A.A., Petrushik, A.I, “Evaporative Cooling of Water in a Mechanical Draft Cooling tower”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 165–177, 2004.
- [6] Frydman, A., et. al. , Comparison of Superheated Steam and Air Operated Spray Dryers Using Computational Fluids Dynamics, *Journal of Drying Technology*, 16(7), 1305-1338, 1998.
- [7] Gemci, T., et. al., Simulation of Evaporating Spray and Comparison with Droplet, *Fluid Engineering Division - vol. 253 59-66*, *Proceedings of ASME*, 2000.
- [8] Kadja, M., Bergeles, G., Modelling of Slurry Droplet Drying, *Journal of Applied Thermal Engineering*, 23, pp. 829–84, (2003).

- [9] Kosasih, EA., “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, Sinopsis Disertasi, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006.
- [10] Kosasih E.A. and Alhamid, M. I., *Heat and Mass Transfer in Water Droplet Evaporation: A New Approach on Film Stagnant Model*, Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Jakarta, Indonesia, 2006.
- [11] 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, 2541–2549, 2004.
- [12] Silva, M. A., Nebra, S. A., Numerical Simulation of Drying in A Cyclone, *Journal of Drying Technology*, 15(6-8), 1731-1741, 1997.
- [13] Walton, D. E., The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment, *Journal of Drying Technology*, 22(3), pp. 431-456, 2004.