

KOEFISIEN DIFUSI PADA PROSES PENGERINGAN KAYU MAHONI DI SEKITAR KANDUNGAN AIR KRITIK

Wibawa Endra Juwana¹
Suyitno¹
Tri Istanto

Abstract : *The objectives of this research is to estimate diffusion coefficient D_{AB} around Critical Moisture Content (CMC) in Mahogany wood drying. The diffusion coefficient in this research shows the movement velocity of moisture from wood to the air drier. Heat and mass transfer analogy approximation is applied to estimate that coefficient. Results indicate that the value of average diffusion coefficient (D_{AB}) increases with increasing drying temperature, for region above CMC as well as below CMC. The increment of average D_{AB} is exponential function of drying temperature. For above CMC region, D_{AB} 's equation as function of drying temperature ($^{\circ}\text{C}$) is; $D_{AB} = 2E-05e^{0,014T}$, meanwhile for below CMC; $D_{AB} = 2E-05e^{0,0126T}$. The value of average D_{AB} above CMC region is larger than below CMC.*

Keywords : *diffusion coefficient, drying, wood, moisture*

PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan proses pemindahan substansi yang mudah menguap (kandungan air) dari padatan. Pada pengeringan kayu terjadi proses perpindahan panas dan massa (Mujumdar, A.S., 1995). Selama proses pengeringan kayu, permukaan kayu akan lebih cepat kering dibandingkan bagian dalam kayu, karena terjadi proses penguapan (*evaporation*) kandungan air pada permukaan. Proses penguapan kandungan air ini dapat dinyatakan dengan proses difusi kandungan air dari permukaan kayu ke udara.

Laju pergerakan air dalam kayu sebanding dengan laju pergerakan air dari permukaan kayu ke udara (D_{AB}). D_{AB} adalah koefisien difusi, merupakan konstanta kecepatan pergerakan air antara kayu dan udara. Harga D_{AB} dapat juga dipandang sebagai koefisien perpindahan massa. D_{AB} sangat dipengaruhi oleh temperatur. Diperkirakan, semakin besar temperatur, harga D_{AB} akan meningkat. Harga D_{AB} di atas dan di bawah kandungan air kritik (*Critical Moisture Content* = CMC) diperkirakan mempunyai karakter yang berbeda, hal ini disebabkan perilaku pergerakan air dalam kayu di sekitar titik CMC juga berbeda. CMC adalah titik dimana terjadi

perubahan laju pengeringan dari laju pengeringan konstan menjadi laju pengeringan turun. Koefisien difusi merupakan hal yang sangat penting dalam proses pengeringan dan untuk pemodelan sifat-sifat higroskopis dari kayu (Mukam Fotsing, J.A., 2000).

Penelitian ini bertujuan menentukan pengaruh temperatur pengeringan terhadap nilai koefisien difusi (D_{AB}) rata-rata di sekitar kandungan air kritik pada proses pengeringan kayu. Penelitian tentang koefisien difusi pada proses pengeringan telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Hassini, L., 2004, Liu, J.Y., 2000, Mukam Fotsing, J.A., 2000). Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan ternyata belum ada metoda standard untuk pengujian koefisien difusi pada proses pengeringan. Dalam penelitian ini untuk analisis digunakan pendekatan analogi perpindahan panas dan massa dari Chilton-Colburn. Di dalam lapisan batas termal dan konsentrasi, harga D_{AB} dapat diperoleh dengan melakukan serangkaian proses pengujian perpindahan panas dan massa.

TINJAUAN PUSTAKA

Menurut Chilton-Colburn, koefisien perpindahan panas konveksi (h) dan

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin – FT Universitas Sebelas Maret Surakarta

perpindahan massa (h_m) dapat dihubungkan dengan : (Incropera, F.P., 1996)

$$St.Pr^{2/3} = St_m.Sc^{2/3} \quad (1)$$

dimana:

- St = bilangan Stanton untuk perpindahan panas
- St_m = bilangan Stanton untuk Perpindahan massa
- Pr = bilangan Prandtl
- Sc = bilangan Schmidt

Dengan :

$$St.Pr^{2/3} = \left(\frac{h}{r.V.c_p} \right).Pr^{2/3} \quad (2)$$

$$St_m.Sc^{2/3} = \left(\frac{h_m}{V} \right).Sc^{2/3} \quad (3)$$

Dari persamaan (1), (2), dan (3) diperoleh :

$$h_m = \frac{h}{c_p.r} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad (4)$$

dimana :

- h_m = koefisien perpindahan massa konveksi (m/s)
- h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².K)
- c_p = panas spesifik dari udara (kJ/kg.K)
- ρ = massa jenis dari udara (kg/m³)
- Pr = bilangan Prandtl
- Sc = bilangan Schmidt

Koefisien perpindahan panas di dalam lapisan batas untuk temperatur permukaan kayu konstan (*isothermal*) dapat dihitung dari persamaan :

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (5)$$

dimana :

- k_f = konduktivitas panas dari udara (W/m.K)
- T_s = temperatur permukaan kayu (K)
- T_∞ = temperatur udara pada aliran bebas (K)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \text{gradien temperatur udara di atas}$$

kayu mulai di atas kayu (K/m). Harga ini dicari dalam pengujian.

Dengan mengetahui harga koefisien perpindahan panas ini, maka koefisien perpindahan massa dapat dicari dari persamaan (4).

Menurut Incropera & De Witt (1996), besarnya koefisien perpindahan massa juga merupakan fungsi dari koefisien difusi dan perbedaan massa jenis di permukaan *isothermal* dan di udara bebas seperti terlihat pada persamaan (6).

$$h_m = \frac{-D_{AB} \left. \frac{\partial r}{\partial y} \right|_{y=0}}{r_{A,s} - r_{A,\infty}} \quad (6)$$

Dengan asumsi uap air dianggap sebagai gas sempurna, maka :

$$PV = mRT$$

$$P = rRT \quad (\text{dimana } RT = \text{konstan})$$

$$\left. \frac{\partial r}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0}$$

persamaan (6) diubah menjadi:

$$h_m = \frac{-D_{AB} \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0}}{p_{A,s} - p_{A,\infty}} \quad (7)$$

Dengan demikian harga D_{AB} dapat dicari setelah harga h_m , $\left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0}$, $p_{A,s}$, dan $p_{A,\infty}$

diketahui. Harga $\left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0}$ dicari dari eksperimen

yang merupakan gradien perubahan tekanan uap dihitung tepat di atas permukaan kayu.

Dari persamaan (4), (5), (7) didapatkan persamaan untuk D_{AB} :

$$D_{AB} = \left(\frac{k_f \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \cdot (p_{A,s} - p_{A,\infty}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{C_p \cdot r \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot (T_s - T_\infty) \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0}} \right)^3 \quad (8)$$

dimana :

- D_{AB} = koefisien difusi (m²/s)
- k_f = konduktivitas termal udara (W/m.K)
- Pr = bilangan Prandtl
- $p_{A,s}$ = tekanan parsial uap air permukaan kayu (atm)
- $p_{A,\infty}$ = tekanan parsial uap air aliran bebas (*free stream*) (atm)

$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}$ = gradien temperatur terhadap y (K/m)

- C_p = panas spesifik udara (KJ/kg.K)
- T_s = temperatur permukaan kayu (K)
- T_∞ = temperatur aliran udara bebas (*free stream*) (K)

kelembaban dapat juga digunakan untuk menghitung tekanan parsial uap air (Shapiro, Moran., 2000)

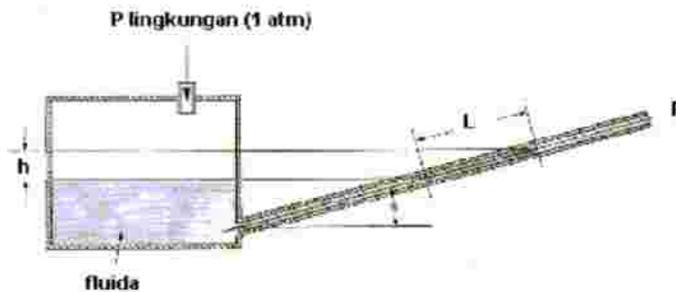
$$w = 0,622 \frac{p_A}{p - p_A} \quad (9)$$

dimana :

- p = tekanan campuran yang terukur manometer (absolut) (atm)
- p_A = tekanan parsial uap air (atm)
- w = rasio kelembaban (kg /kg udara kering)

Rasio kelembaban (w) dapat dicari dengan mengetahui temperatur bola kering (T_{DB}) dan temperatur bola basah (T_{WB}) menggunakan grafik psikrometrik. Sedangkan p (tekanan campuran) diukur dengan manometer, seperti terlihat pada gambar 1. Spesifikasi manometer yang dipakai sebagai berikut :

- Fluida = Alkohol 70 % ($r_{alk} = 617,8 \text{ kg/m}^3$)
- $q = 7^\circ$
- $h = L \cdot \sin q$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $p_{abs} = -(r_{alk} \cdot g \cdot h) + 1 \text{ atm}$ (10)



Gambar 1. Inclined manometer

$\frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0}$ = gradien tekanan terhadap y (atm/m)

Pada proses pengeringan kayu terdapat campuran antara uap air dan udara kering. Besarnya komposisi campuran ini dapat dicari dengan menggunakan rasio kelembaban. Rasio

METODE PENELITIAN

Spesimen penelitian yang digunakan adalah kayu Mahoni (*Mahogany*) dengan ukuran panjang 30 cm; lebar 15 cm dan tebal 5 cm. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini seperti terlihat pada gambar 2. Udara luar oleh blower dialirkan melewati *heater* untuk dipanaskan. Udara panas tersebut akan

mengalir ke *air duct* sehingga melewati permukaan atas spesimen uji. Campuran udara panas dan uap air dari kayu kemudian di keluarkan ke lingkungan. Pada peralatan uji dibuat perpindahan panas dan massa pada kayu adalah 1 dimensi dan permukaan atas kayu diusahakan konstan. Untuk mencapai maksud tersebut, keempat sisi samping kayu diisolasi dan bagian bawah ditiup dengan kipas.

Prosedur pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat kadar air awal kayu seragam $\pm 45\%$ (untuk spesimen diatas CMC) dan kadar air awal $\pm 25\%$ (untuk spesimen di bawah CMC).
2. Mengukur dan menimbang sampel awal dengan dimensi yang telah ditentukan.
3. Menyeting dan mengkalibrasi peralatan penelitian dengan kecepatan udara memasuki *air duct* konstan 5 m/s, temperatur aliran udara konstan (40°C, 60°C, 80°C, 100°C dan 110°C).
4. Memasukkan spesimen uji ke *air duct*.
5. Memasang termokopel yang sudah dihubungkan dengan data akuisisi, diatas permukaan spesimen uji pada jarak (0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm dan 10 mm) di atas spesimen uji.
6. Menghidupkan data akuisisi dan menyimpan data setiap satu jam sekali sebelum penimbangan spesimen.
7. Mengukur tekanan dengan manometer pada jarak (0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5

mm, 7 mm dan 10 mm) di atas spesimen uji.

8. Mengukur massa sampel setiap satu jam sekali.
9. Proses pengeringan dilakukan sampai spesimen mencapai kadar air yang diinginkan (spesimen diatas CMC dari 45 % sampai kadar air kritik, dan spesimen di bawah CMC dari 25 % sampai kadar air 12 %). Dari penelitian pendahuluan dengan variasi temperatur pengeringan yang sama didapatkan bahwa nilai kadar air kritik (CMC) kayu mahoni berkisar antara 18-28% d.b. dengan rata-rata 24,05% d.b.

HASIL DAN PEMBAHASAN

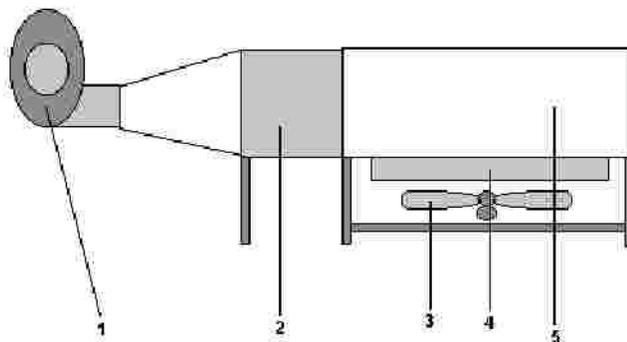
Dengan menggunakan analogi perpindahan panas dan massa dapat diperoleh harga koefisien difusi (D_{AB}). D_{AB} dihitung berdasarkan persamaan (8), dimana :

1. Harga $\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$ merupakan gradien yang

didapatkan dengan mendefersialkan persamaan T_{DB} yang dihasilkan pada titik-titik diatas permukaan kayu.

2. Harga $\left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0}$ merupakan gradien tekanan

parsial uap air yang didapatkan dengan mendefersialkan persamaan P_A yang dihasilkan pada titik-titik diatas permukaan kayu.



Keterangan :

1. Blower
2. Heater
3. Kipas
4. Tempat spesimen
5. Air duct

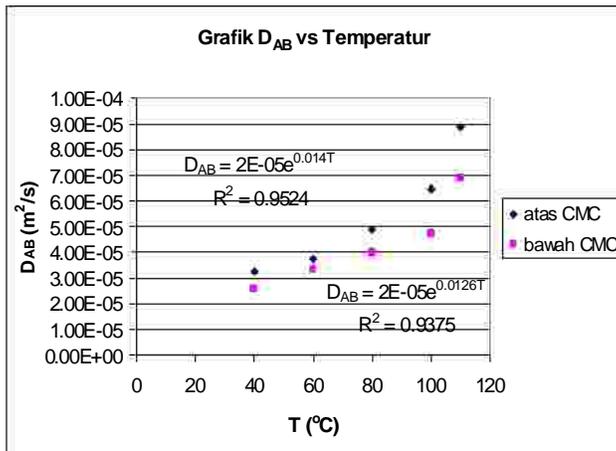
Gambar 2. Skema peralatan penelitian

3. Harga P_A merupakan harga tekanan parsial uap air yang didapatkan dari persamaan (9). w merupakan rasio kelembaban yang dapat dicari dengan diagram psikometrik dengan mengetahui harga T_{DB} dan T_{WB} . Sedangkan p merupakan tekanan absolut pada titik-titik diatas permukaan kayu yang didapatkan dari pengukuran manometer.
4. Harga k_f, Pr, C_p, r, n di evaluasi pada T_f .

Dari hasil pengujian untuk berbagai temperatur pengeringan pada daerah dibawah CMC maupun diatas CMC, maka didapatkan nilai D_{AB} rata-rata seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan D_{AB} rata-rata pada pengujian

T (°C)	D_{AB} (m ² /s)	
	Di atas	Di bawah
40	3.24E-05	2.58E-05
60	3.72E-05	3.29E-05
80	4.87E-05	4.02E-05
100	6.49E-05	4.72E-05
110	8.91E-05	6.91E-05



Gambar 3. Pengaruh temperatur pengeringan terhadap D_{AB} rata-rata kayu mahoni diatas CMC dan dibawah CMC

Dari gambar 3 terlihat bahwa nilai D_{AB} kayu mahoni semakin naik dengan makin tingginya temperatur pengeringan, baik untuk daerah

didas CMC maupun dibawah CMC. Nilai D_{AB} untuk daerah diatas CMC lebih tinggi dibanding dengan nilai D_{AB} untuk daerah dibawah CMC. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan berpindahnya massa air dari kayu mahoni ke udara pada daerah diatas CMC, lebih cepat dibanding daerah dibawah CMC. Fenomena ini disebabkan karena di daerah atas CMC, air yang keluar selama pengeringan adalah air bebas. Pengeringan di daerah bawah CMC menyebabkan air terikat dalam serat kayu akan menuju ke permukaan dan keluar dari kayu. Perbedaan jenis air yang dikeluarkan ini, akan mempengaruhi besar kecepatan berpindahnya massa air ke udara.

Semakin besar temperatur pengeringan menyebabkan kenaikan D_{AB} . Kenaikan nilai D_{AB} rata-rata untuk kayu mahoni merupakan fungsi eksponensial dari temperatur pengeringan. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan berpindahnya massa air ke udara semakin cepat apabila temperatur pengeringan meningkat. Fenomena ini menunjukkan bahwa meningkatnya temperatur pengeringan akan mempermudah pergerakan molekul air dalam pori ke permukaan.

Dari gambar 3 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai D_{AB} yang signifikan saat mencapai temperatur 100°C, karena pada temperatur ini terjadi perubahan fasa dari fasa air ke fasa uap, sehingga terjadi perubahan mekanisme perpindahan massa.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai koefisien difusi (D_{AB}) rata-rata pengeringan kayu mahoni naik seiring dengan naiknya temperatur pengeringan, baik di daerah atas CMC maupun dibawah CMC.
2. Penelitian dengan spesimen ini menghasilkan persamaan D_{AB} sebagai fungsi temperatur pengeringan (T °C), $D_{AB} = 2E-05e^{0.014T}$ untuk daerah diatas CMC dan $D_{AB} = 2E-05e^{0.0126T}$ untuk daerah dibawah CMC.

3. Nilai koefisien difusi (D_{AB}) pengeringan kayu mahoni untuk daerah diatas CMC lebih tinggi dibanding daerah dibawah CMC, hal ini menunjukkan berpindahnya massa air dari permukaan kayu mahoni ke udara pada daerah diatas CMC lebih cepat dibandingkan daerah dibawah CMC.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada DP3M DIKTI yang telah mendukung penelitian ini melalui Proyek Penelitian Ilmu Pengetahuan Dasar dengan kontrakNO: 70 / P2IPT / DPPM / PID / III /2004.

DAFTAR PUSTAKA

- Hassini, L, Azzouz, S., and Belghith, A., 2004, *Estimation of The Moisture Diffusion Coefficient of Potato During Hot-Air Drying*, Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) Sao Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B., pp. 1488-1495
- Incropera, F.P. and De Witt, D.P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Third Edition, John Wiley & Sons.
- Liu. J.Y., Simpson, W.T., and Verrill, S.P., 2000, *An Inverse Moisture Diffusion Algorithm For The Determination Of Diffusion Coefficient*, Proceedings of the 12th International Drying Symposium, IDS2000 Paper No 24, 28-31 August 2000 Noordwijkerhout the Netherlands
- Mujumdar, A.S., 1995, *Basic Process Calculation in Drying*, dalam Mujumdar, A.S (ed), *Hand Book of Industrial Drying, 2nd ed*, vol. 1, Marcel Dekker, In.C, USA.
- Mukam Fotsing, J.A, 2000, *Experimental Determination of The Diffusion Coefficients of Wood in Isothermal Conditions*, University of Younde Cameroon
- Shapiro, Moran, 2000, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 4th Edition*, John Wiley and Sons, Inc.