

PENYERAPAN UAP AIR PADA BAHAN KOMPOSIT CARBON / EPOXY

Bambang Kismono Hadi , Jupriyanto
Jurusan Teknik Penerbangan
Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132
dan
Edi Rusnaedi
Composite and Bonding Technology Dept.
PT IPTN Bandung 40174

ABSTRAK

Dalam makalah ini dibahas kaji analitik dan percobaan proses penyerapan uap air pada bahan komposit. Kondisi lingkungan yang diteliti adalah pada suhu 72 ° C dan kelembaban relatif 85 %. Pada selang waktu tertentu, spesimen bahan komposit tersebut ditimbang. Penambahan berat yang didapat menunjukkan bahwa penyerapan uap air tersebut mengikuti hukum Fick, dan terdapat kesamaan yang sangat baik antara hasil analitik dan hasil percobaan. Rata-rata penyerapan uap air maksimum adalah sebesar 0,84 % dari berat awal.

ABSTRACT

In this paper, moisture absorption process in composite material was analytically and experimentally studied. The environmental condition was 72 ° C and 85 % RH. During a fixed interval time, the composite specimens were taken out from the experimental chamber and weighted. The weight gain showed that the absorption isotherm profile followed Fick Law and there was a good agreement between the analytical and experimental results. The average maximum moisture absorption was 0.84 %.

KEYWORDS : Fickian Diffusion, Moisture Absorption, Composite Materials

1. PENDAHULUAN

Bahan komposit semakin populer terutama di industri kedirgantaraan karena sifat-sifatnya yang unggul seperti ringan, kuat dan ketahanan *fatigue* yang baik. Tetapi terdapat kekhawatiran bahwa sifat-sifat mekaniknya akan menurun akibat pengaruh lingkungan. Karenanya, berbagai usaha telah dilakukan sejak dua puluh tahun yang lalu untuk mengetahui pengaruh lingkungan terutama uap air terhadap bahan komposit dan penurunan sifat-sifat mekaniknya. Ini akan membantu insinyur dan perancang struktur komposit yang bekerja dengan bahan ini.

Penelitian tentang penyerapan uap air ini telah dimulai oleh Springer dalam berbagai makalahnya [3, 4,5]. Jost [1] dan Crank [2] membahas dasar-dasar teori difusi yang dapat digunakan untuk meneliti kasus ini. Shirrell [6] dan Clark, *dkk* [7] membahas proses difusi tersebut pada bahan graphite-epoxy, baik untuk bahan satu arah (*unidirectional*) [6], maupun laminat [7]. Mc Kague, Jr, *dkk*. [8] menunjukkan bahwa bahan epoxy mengalami pembengkakan akibat menyerap uap air dan suhu transisi-gelas-nya bergeser karena penyerapan tersebut.

Tujuan utama penelitian ini adalah mengukur besar penyerapan uap air pada bahan komposit dan meneliti karakteristik proses difusi uap-air-nya. Pada makalah ini akan diberikan hasil analitik dan percobaan penyerapan uap air pada bahan carbon/epoxy. Lingkungan yang diteliti adalah pada kondisi 72° C dan kelembaban relatif 85 %.

2. PROSES DIFUSI

Air, uap air atau bahan cair lain, masuk ke dalam bahan komposit sebagian besar melalui proses difusi, sebagai akibat dari gerak molekul acak bahan matriks komposit tersebut [2]. Masalah difusi uap air pada komposit dapat digambarkan sebagai berikut.

Perhatikan suatu pelat dengan tebal h , dikenai lingkungan uap di kedua sisinya, seperti terlihat pada Gambar 1. Pelat berdimensi tak terhingga dalam arah y dan z , sehingga kadar air dan suhu di dalam pelat bervariasi hanya dalam arah x (satu dimensi). Awalnya ($t < 0$), suhu dan air pada pelat diketahui. Pada $t=0$, kedua sisi pelat tersebut dikenai lingkungan uap dengan suhu T_a dan kadar uap air, C_a , keduanya merupakan fungsi dari t . Tujuan sekarang adalah menghitung kadar

uap air di dalam bahan komposit sebagai fungsi dari waktu, dalam lingkungan suhu T_a dan kelembaban C_a .

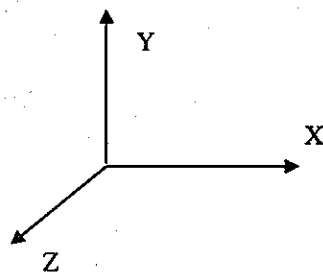
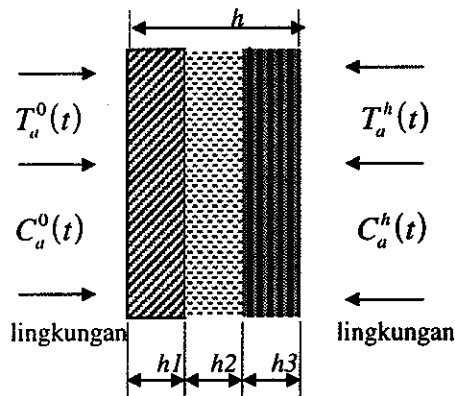
Pada sebagian besar kasus, perilaku difusi suhu dan uap air di dalam komposit dapat diberikan dalam persamaan Fourier dan Fick :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

dengan:

- ρ : massa jenis
- c : panas jenis bahan
- K_x : konduktivitas thermal
- D_x : difusivitas massa bahan
- T : suhu
- C : kadar uap air



Gambar 1 Penggambaran masalah difusi

dengan kondisi batas dan kondisi awal adalah :

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_i(x) \\ C_i &= C_i(x) \end{aligned} \right\} 0 \leq x \leq h, t \leq 0 \quad (3a)$$

$$\left. \begin{aligned} T_a^0 &= T_a^0(t) \\ C_a^0 &= C_a^0(t) \end{aligned} \right\} x \leq h, t \geq 0 \quad (3b)$$

$$\left. \begin{aligned} T_a^h &= T_a^h(t) \\ C_a^h &= C_a^h(t) \end{aligned} \right\} x > h, t > 0 \quad (3c)$$

Solusi bentuk tertutup (*closed form solution*) dari persamaan di atas dapat diberikan dengan membuat penyederhanaan sebagai berikut :

1. Suhu dan kadar air lingkungan konstan dan sama di kedua sisi pelat.
2. $K_x/\rho c$ dan D_x adalah ukuran kecepatan perubahan suhu dan uap air di dalam komposit. Pada sebagian besar bahan, harga $(K_x/\rho c)/D_x$ kira-kira sebesar 10^6 [5], sehingga kesetimbangan suhu terjadi jauh lebih cepat dibanding kesetimbangan uap. Karenanya persamaan Fourier dan Fick dapat dipisahkan (*decoupled*). Maka, suhu pelat dapat diambil sama dengan suhu lingkungan, sehingga perubahan suhu di dalam pelat tidak dibahas di sini.
3. Awalnya, distribusi suhu dan uap air di dalam pelat adalah konstan dan sama di setiap titik di dalam pelat.
4. Konduktivitas panas dan difusivitas massa hanya bergantung pada temperatur dan tidak bergantung pada konsentrasi uap didalam bahan.
5. Pelat bersifat quasi-homogen, sehingga variasi ρ , c , K_x dan D_x terhadap posisi di dalam bahan komposit dapat diabaikan.

Apabila asumsi di atas terpenuhi, proses difusi dikenal dengan Fickian, dan kondisi batas pada persamaan (3) menjadi :

$$T_i = T_a = T \quad 0 < x < h \quad t > 0 \quad (4)$$

Karena keseimbangan suhu terjadi jauh lebih cepat dibanding keseimbangan uap (penyederhanaan no. 2), persamaan Fourier tidak diperlukan di sini, dan konsentrasi uap di dalam bahan komposit diberikan oleh persamaan Fick sebagai berikut :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

dengan kondisi batas :

$$C = C_i \quad 0 < x < h \quad t < 0 \quad (6a)$$

$$C = C_a \quad x < 0 \quad x > h \quad (6b)$$

Solusi persamaan (5) dan (6) diatas diberikan oleh [1,2]

$$\frac{C - C_i}{C_m - C_i} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)} \sin\left(\frac{(2j+1)\pi x}{h}\right) \exp\left(-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 D_x t}{h^2}\right) \quad (7)$$

Massa uap air total di dalam bahan didapat dengan mengintegrasikan persamaan (7) sepanjang ketebalan pelat :

$$m = A \int_0^h C dx \quad (8)$$

dengan A adalah luas permukaan bahan. Hasil integrasi ini adalah [1] :

$$\frac{m - m_i}{m_m - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left(\frac{-(2j+1)^2 \pi^2 D_x t}{h^2}\right) = G \quad (9)$$

dengan m_i adalah massa awal bahan sebelum terkena uap, dan m_m adalah kadar uap air maksimum di dalam bahan, bila pelat telah jenuh, seimbang dengan kondisi lingkungan.

Kadang-kadang persamaan (9) didekati oleh persamaan [5] :

$$G = 1 - \exp\left(-7.3 \left(\frac{D_x t}{h^2}\right)^{0.75}\right) \quad (10)$$

Suatu parameter yang penting adalah penambahan berat, yang didefinisikan sebagai [5]

$$M = \frac{\text{Berat mengandung uap} - \text{Berat kering}}{\text{Berat kering}} \times 100\%$$

$$M = \frac{w - w_d}{w_d} \times 100\% \quad (11)$$

Berat total bahan sama dengan jumlah berat kering dan berat uap yang diserap :

$$w = w_d + m \quad (12)$$

Sehingga persamaan (9), (11) dan (12) dapat ditulis dalam bentuk :

$$M = G(M_m - M_i) + M_i \quad (13)$$

Prosedur analitik diatas telah dipakai secara luas untuk menggambarkan perilaku difusi Fickian pada bahan komposit. Masalahnya sekarang adalah menentukan koefisien difusivitas massa, D_x , dan kadar uap

maksimum, M_m . Kedua parameter ini akan dicari dengan percobaan.

3. METODOLOGI PENENTUAN D_x DAN M_m

Prosedur percobaan untuk menentukan D_x dan M_m diberikan oleh Shen dan Springer [5]. Pada intinya, prosedur ini berupa pemanasan dan penimbangan spesimen (untuk menentukan berat awal) dan memasukan spesimen tersebut pada kotak tertutup dengan suhu dan kelembaban tertentu. Pada selang waktu tertentu, spesimen diambil dan ditimbang. Penambahan berat yang terjadi dicatat. Shen dan Springer menunjukkan bahwa paling tidak dalam waktu yang pendek, M bervariasi linier terhadap \sqrt{t} . Ini memberikan parameter difusivitas yang didefinisikan sebagai berikut :

$$D_x = \pi \left(\frac{h}{4M_m}\right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}}\right)^2 \quad (14)$$

Kemiringan kurva M vs \sqrt{t} dapat ditentukan, dan kemudian D_x dapat dicari dengan menggunakan persamaan (14) diatas. Percobaan dapat dihentikan bila kadar uap air, M , konstan terhadap \sqrt{t} . Ini akan memberikan kadar uap air maksimum, M_m , yang berarti spesimen telah jenuh.

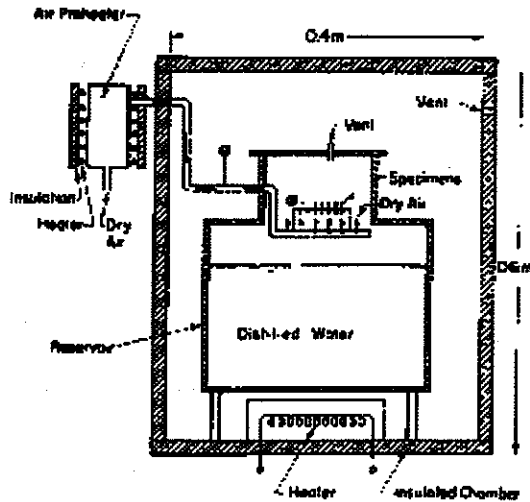
4. HASIL PERCOBAAN DAN DISKUSI

Percobaan telah dilakukan pada bahan komposit karbon tipe T300/6376C plain weave buatan Hexcell, Duxford, Inggris. Percobaan ini merupakan bagian dari Data Allowable Program yang dilakukan oleh PT. IPTN. Percobaan dilakukan di Heath-Techna, USA dan dilakukan pada suhu 72° C dan kelembaban relatif 85%.

Spesimen yang diuji mempunyai ketebalan $h = 2$ mm, lebar $b = 12,7$ mm dan panjang $L = 101$ mm, dengan susunan lapisan (0/90)_{10s}. Skema peralatan yang digunakan oleh Heath-Techna terlihat pada Gambar 2 di bawah. Selama percobaan, suhu udara, air dan spesimen dikontrol oleh suatu pemanas, dan diukur dengan termokopel. Kelembaban udara di sekitar spesimen diatur dengan melewati udara kering yang sudah dipanaskan, ke sekitar spesimen (lihat Gambar 2). Penimbangan spesimen dilakukan setiap satu minggu sekali dan hasilnya dicatat. Data-data perubahan berat inilah yang dikirim ke IPTN untuk diolah kembali, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 2 Harga D_x dan M_m untuk masing-masing spesimen.

No Spesimen	D_x (m^2 / detik)	M_m (%)
1	$0,4826 \cdot 10^{-12}$	0,8088
2	$0,4375 \cdot 10^{-12}$	0,8750
3	$0,4849 \cdot 10^{-12}$	0,8023
4	$0,4468 \cdot 10^{-12}$	0,8725
5	$0,4838 \cdot 10^{-12}$	0,8675
6	$0,4734 \cdot 10^{-12}$	0,8149
Rata-rata	$0,4682 \cdot 10^{-12}$	0,8402



Gambar 2 Skema Peralatan yang Digunakan

Tabel 1 Data-data penambahan berat spesimen Carbon/epoxy.

t (hari)	M (gram)					
	Spesimen					
	1	2	3	4	5	6
0	4,124	4,255	4,047	4,153	4,547	4,388
7	4,147	4,280	4,070	4,178	4,575	4,413
14	4,153	4,287	4,076	4,184	4,582	4,419
21	4,155	4,289	4,078	4,186	4,584	4,421
28	4,156	4,291	4,079	4,188	4,586	4,422

Tabel 1 menunjukkan data yang diperoleh dari Heath Techna, berupa data penambahan berat pada spesimen komposit yang diukur pada tenggang waktu satu minggu.

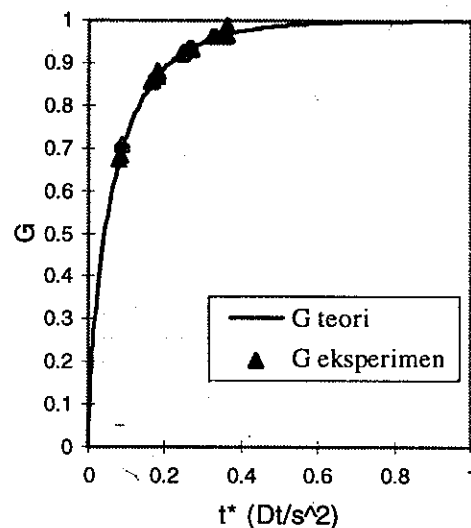
Untuk menghitung harga-harga D_x dan M_m setiap spesimen, data-data tersebut kemudian diolah dan diplot sebagai kurva M vs \sqrt{t} , yang hasilnya terlihat pada Gambar 3.

Dengan cara regresi linier dari dua titik pertama, kemiringan awal masing-masing kurva M vs \sqrt{t} dapat dicari, yang hasilnya juga diberikan pada Gambar 3. Dari data kemiringan awal tersebut, dan dengan persamaan (14), dapat dihitung koefisien difusivitas D_x dan M_m , yang besarnya diberikan dalam Tabel 2 berikut :

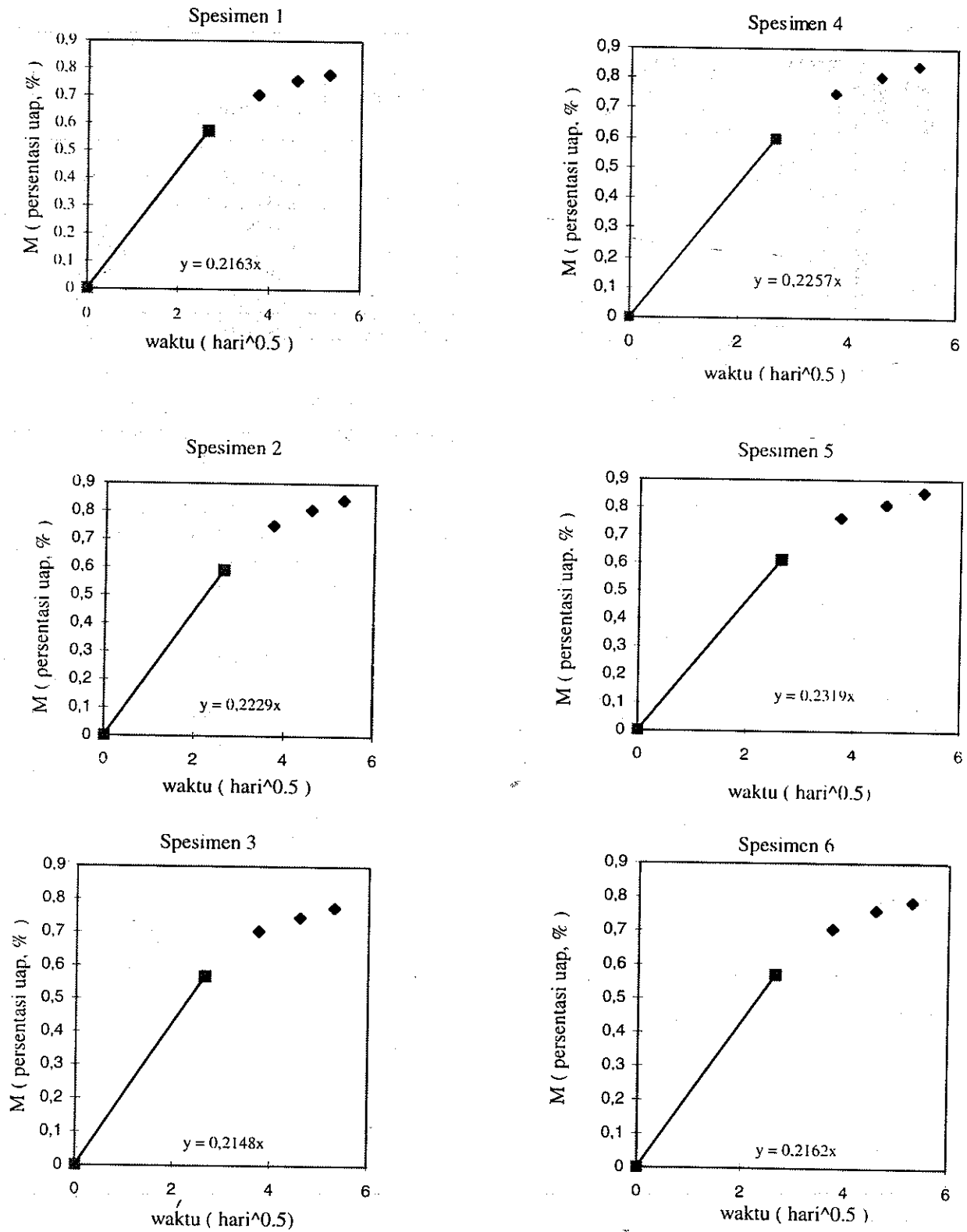
Dari harga-harga D_x dan M_m , dan Persamaan (9) dapat dibuat kurva M teoritis terhadap t . Hasilnya diberikan pula pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan bahwa kurva teoritis sangat sesuai dengan hasil percobaan. Ini menunjukkan bahwa pola penyerapan uap air pada bahan carbon/epoxy bersifat Fickian.

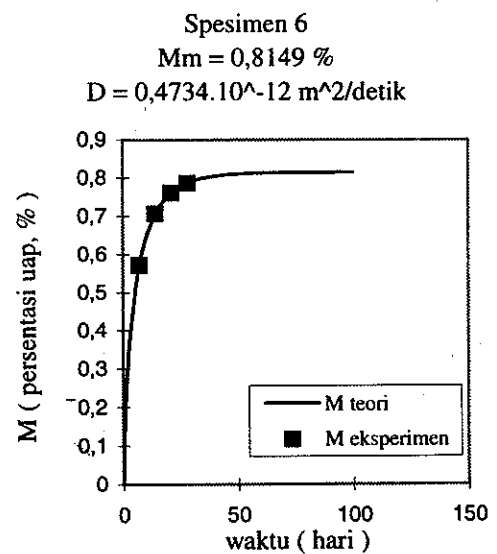
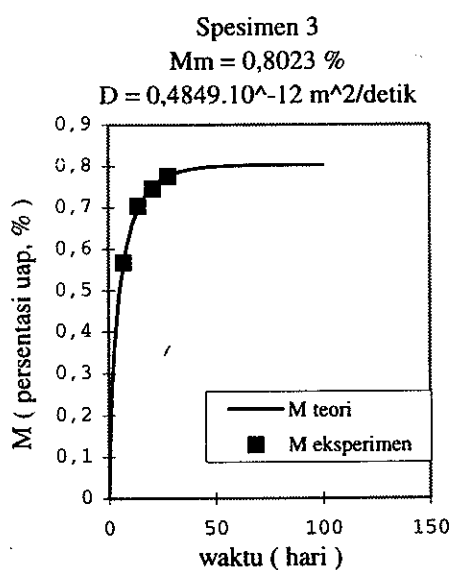
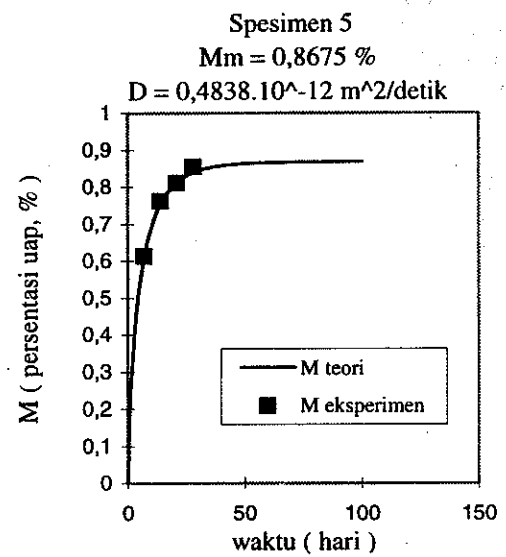
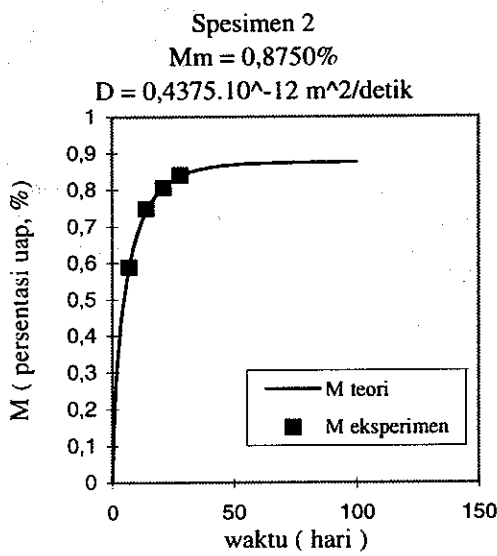
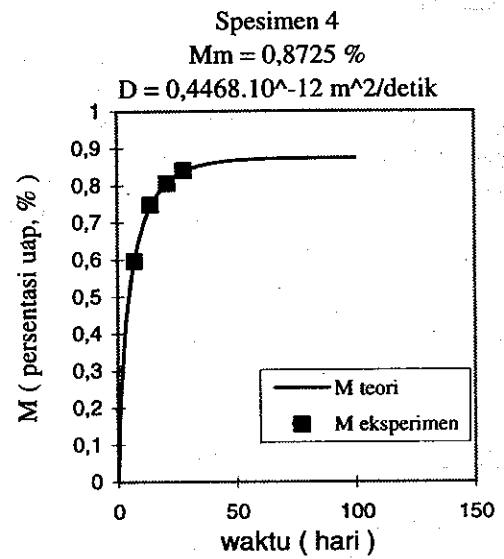
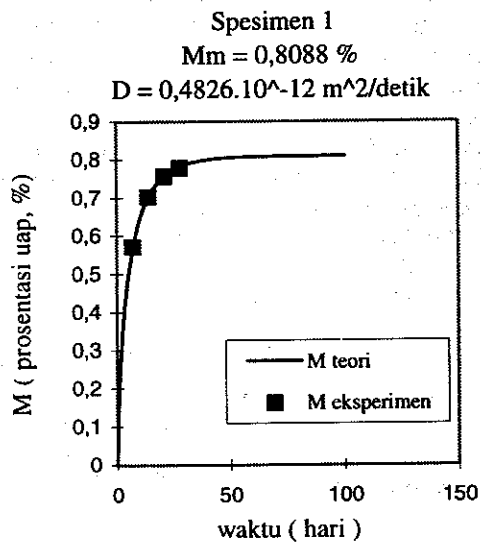
Gambar 5 menunjukkan hubungan antara G dan besaran tak berdimensi $D_x t / h^2$ (Persamaan 10). Kurva ini dapat dipakai untuk sembarang ketebalan spesimen, bila D_x dianggap konstan. Terlihat pada kurva tersebut, terdapat kesamaan antara G analitik dengan hasil percobaan. Sekali lagi ini menunjukkan bahwa penyerapan uap air pada bahan komposit bersifat Fickian.



Gambar 5 Fungsi G terhadap $t^* = D_x t / h^2$



Gambar 3 Hasil percobaan penambahan berat bahan komposit dalam lingkungan uap ($T = 72^{\circ} C$, $RH = 85\%$) dan penentuan kemiringan awal untuk tiap-tiap spesimen



Gambar 4 Kurva M (teori dan eksperimen) terhadap waktu
 $(T=72^\circ\text{C}, \text{RH}=85\%)$

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penyerapan uap air pada bahan komposit mengikuti hukum Fick. Pada kondisi lingkungan dengan suhu 72° C dan kelembaban relatif 85 %, bahan komposit yang diteliti memiliki koefisien difusivitas massa sebesar $0,4682 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{detik}$ dan kandungan uap maksimum 0,84016 %

Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan kondisi lingkungan lain dan penurunan sifat-sifat mekanik akibat pengaruh lingkungan tersebut.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Analisa percobaan ini dibiayai dengan proyek RUT-5 dengan nomor kontrak 178/SP/RUT/BPPT/IV/97 tertanggal 17 April 1997. Penulis mengucapkan terimakasih kepada BPPT, DRN, Kantor Menristek dan PT.IPTN, yang membantu penelitian ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Jost, W : " *Diffusion in Solids, Liquid, Gases* ", New York, Applied Science Publisher, 1960.

2. Crank, J : " *The Mathematic of Diffusion* ", Oxford University Pers, London , 1975.
3. Springer, G.S. : " *Moisture Absorption in Fiber-Resin Composite* ", in *Developments in Reinforced Plastics-2*, ed. G. Pritchard, Applied Science Publisher, London, 1982.
4. Springer, G.S. : " *Environmental Effects on Epoxy Matrix Composite* ", in *Composite material-Testing and Design (Fifth Conference) ASTM-STP 674*, S.W Tsai, Ed, American Society for Testing and Materials, 1979.
5. Shen, C-H ; Springer, G.S : " *Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials* ", *Journal of Composite Materials*, vol. 10, January 1976, pp.2 -.
6. Shirrel, C.D. : " *Diffusion of Water Vapor in Graphite / Epoxy Composite* ", in *Advanced Composite Materials Environmental Effects, ASTM STP-658*, J.R. Vinson, Ed. American Society for Testing and Materials, 1978.
7. Clark, G. ; Saunders, D.S. ; van Blaricum, T.J. and Richmond, M : " *Moisture Absorption in Composite/Epoxy Laminats* ", *Composites Science and Technology*, vol. 39, 1990, pp. 355-375.
8. Mc Kague, Jr , E.L; Reynolds, J.D ; Halkin, J.E. : " *Swelling and Glass-Transition Relation for Epoxy Matrix Material in Humid Environments* ", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 22 , 1978. pp. 1643-1654.