

PENGGUNAAN RADIASI BERKAS ELEKTRON UNTUK PROSES CURING PADA PEMBUATAN KOMPOSIT Matriks POLIMER

Sugiarto Danu, Marsongko

Puslitbang Teknologi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta.

ABSTRAK

PENGGUNAAN RADIASI BERKAS ELEKTRON UNTUK PROSES CURING PADA PEMBUATAN KOMPOSIT Matriks POLIMER. Matriks pada komposit berfungsi untuk merekat komponen penyusun yang lain dan mendistribusikan beban yang diterima komposit. Salah satu bahan matriks komposit adalah polimer. Proses pengeringan (curing) secara konvensional pada pembuatan komposit jika bahan matriks polimer berbentuk cair adalah dengan penambahan katalisator. Selain cara konvensional, proses curing dapat dilakukan dengan radiasi berkas elektron. Proses curing dengan radiasi berkas elektron mempunyai kecepatan tinggi dibanding cara konvensional. Pada penggunaan radiasi, curing harus berlangsung jika bahan komposit menerima radiasi. Adanya waktu yang cukup untuk pencampuran komponen penyusun dan pencetakan menyebabkan proses ini lebih fleksibel dibandingkan cara konvensional. Hal ini dapat mengurangi jumlah bahan yang terbuang. Perkembangan teknologi akselerator yang lebih efisien sebagai sumber radiasi berkas elektron dan penemuan formulasi bahan polimer yang lebih reaktif terhadap radiasi akan memperluas penggunaan radiasi berkas elektron untuk pembuatan komposit. Makalah ini menguraikan penggunaan radiasi berkas elektron pada pembuatan komposit, yang meliputi akselerator elektron, proses curing, bidang aplikasi, dan potensi di masa depan

Kata kunci : radiasi, berkas elektron, curing, komposit matriks polimer.

ABSTRACT

THE USE OF ELECTRON BEAM RADIATION FOR CURING PROCESS ON THE PREPARATION OF POLYMER MATRIX COMPOSITE. The function of matrix is to bond the other constituents and to distribute the load received in the composite. One of the composite matrix material is polymer. Conventionally, curing process of liquid polymer matrix was conducted by addition of catalyst. In addition of conventional method, curing process can also be carried out by exposed using electron-beam. Electron-beam curing process is faster than that of conventional one. Radiation curing is just started after exposure of composite materials. The sufficient time for mixing and molding of constituents give the process more flexible than conventional method. Its leading to reduced the scrap materials. The development of more efficient accelerator technology and innovation of more reactive of polymer formation toward irradiation lead to the broaden of composite manufacturing application. This paper describes the use of electron-beam radiation for preparation of composite which covers the electron accelerator, curing process, application, and its future prospect.

Key words : radiation, electron-beam, curing, polymer matrix composite.

PENDAHULUAN

Komposit merupakan gabungan beberapa bahan yang berbeda dalam skala makro, baik dalam bentuk maupun komposisi, dan dibuat untuk mendapatkan sifat-sifat khusus. Pada dasarnya, komposit dapat disusun dari dua atau lebih bahan, misalnya logam, bahan organik, atau an-organik. Walaupun kemungkinan kombinasi bahan untuk pembuatan komposit tidak terbatas, tetapi dari segi bentuk tetap terbatas. Bentuk penyusun komposit pada umumnya berupa serat, lamina atau lapisan, bahan pengisi (bentuk butiran), serpih dan matriks.

Matriks berfungsi sebagai perekat komponen yang lain dan mendistribusikan beban yang diterima komposit.⁽¹⁾

Berdasarkan bahan matriks yang dipakai, komposit dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu, komposit matriks logam (*metal matrix composites*), komposit matriks keramik (*ceramic matrix composites*) dan komposit matriks polimer (*polymer matrix composites*). Dari ke tiga jenis komposit tersebut, komposit matriks polimer yang paling banyak dipakai untuk pembuatan suatu produk, dimana polimernya adalah jenis termoset.⁽²⁾

Matriks polimer pada pembuatan komposit biasanya merupakan polimer berbentuk cair dengan viskositas rendah sehingga memudahkan pencampuran dengan komponen lain, misalnya serat pada pembuatan komposit berpenguat serat (*fiber-reinforced composite*). Secara konvensional, matriks polimer akan mengalami proses *curing* setelah penambahan katalisator, dan dapat dipercepat dengan pemanasan.⁽³⁾ Selain dengan penambahan katalisator, proses *curing* dapat terjadi dengan bantuan radiasi, yaitu radiasi sinar- γ atau berkas elektron.⁽⁴⁾ Teknologi radiasi menggunakan berkas elektron telah dipakai dalam berbagai bidang industri, misalnya untuk pembuatan produk-produk polimer, sterilisasi, pengawetan makanan, produksi kabel, *heat shrinkable tube*, pre-vulkanisasi komponen karet ban, dan proses pengeringan secara radiasi (*radiation curing*).⁽⁵⁾

Makalah ini menguraikan tentang akselerator elektron, proses *curing*, bidang aplikasi, dan potensi di masa depan penggunaan radiasi berkas elektron pada pembuatan komposit matriks polimer.

AKSELERATOR ELEKTRON

Alat yang menghasilkan radiasi berkas elektron disebut akselerator elektron atau mesin berkas elektron. Pada prinsipnya akselerator elektron sama dengan tabung Braun untuk perangkat televisi. Elektron yang dihasilkan dengan pemanasan katode (filamen) kemudian dipercepat untuk mendapatkan energi tinggi dalam vakum bertekanan 10^{-6} Torr. Elektron yang dipercepat (*accelerated electron*) selanjutnya dilewatkan jendela dari logam tipis yang biasanya terbuat dari lapisan aluminium atau titanium, sebelum dipakai untuk iradiasi suatu bahan.

Ada tiga faktor yang menentukan kemampuan suatu akselerator pada proses *curing*, yaitu : energi berkas elektron, arus berkas elektron dan dosis iradiasi.⁽⁶⁾

Energi berkas elektron menentukan penetrasi elektron pada bahan yang diiradiasi, dinyatakan dalam kilo elektron volt (keV) atau mega elektron volt (MeV). Berdasarkan energinya, akselerator elektron dapat dibagi menjadi tiga golongan, yaitu : energi rendah (50~500 keV), energi sedang (500 keV~5 MeV), dan energi tinggi (>5 MeV). Semakin tinggi energi akselerator elektron, semakin tinggi daya tembus atau penetrasi elektron terhadap bahan.

Arus berkas alat menentukan laju dosis, dan pada umumnya dinyatakan dalam miliampere (mA). Semakin tinggi arus suatu alat, semakin tinggi laju dosis, dan secara keseluruhan akan meningkatkan dosis yang diterima bahan.

Dosis iradiasi merupakan energi yang diserap tiap satuan berat bahan, dinyatakan dalam rad atau Mrad (satuan : rad = *radiation absorbed dose* ; 1 rad = 100 erg/g bahan ; 1 Mrad = 10^3 krad = 10^6 rad ; 1 Gray = 100 rad ; 1 Mrad = 10 kGy).

Dalam praktik, dosis yang diserap suatu bahan dapat dihitung menurut rumus :

$$D = K \times \frac{I}{V}$$

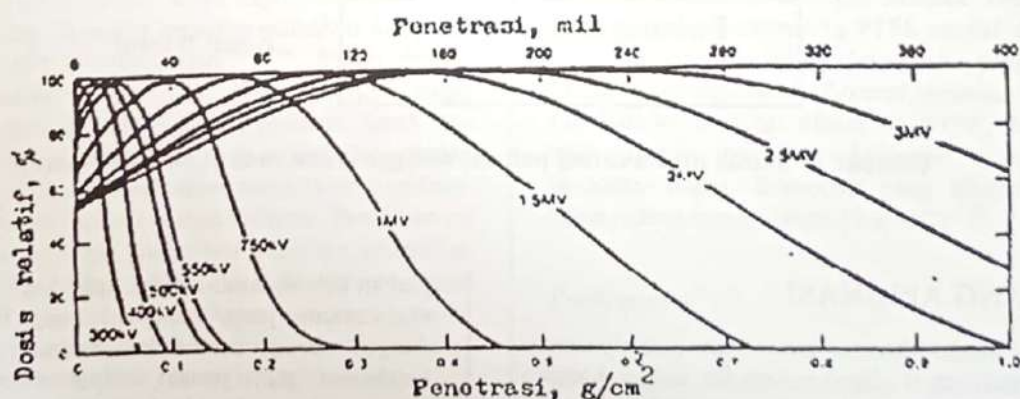
D = Dosis iradiasi, Mrad

K = Konstanta alat (*processor constant*)

I = Arus berkas, mA

V = Kecepatan linear (*line speed*)

Gambar 1 menunjukkan penetrasi akselerator elektron sebagai fungsi ketebalan. bahan. Pada energi yang sama, semakin tinggi densitas suatu bahan, semakin rendah penetrasi elektron. Oleh sebab itu, densitas bahan akan menentukan tebal bahan yang dapat diproses menggunakan akselerator elektron pada energi tertentu. Tebal dan homogenitas dosis yang diterima dapat ditingkatkan dengan iradiasi pada dua sisi bahan.

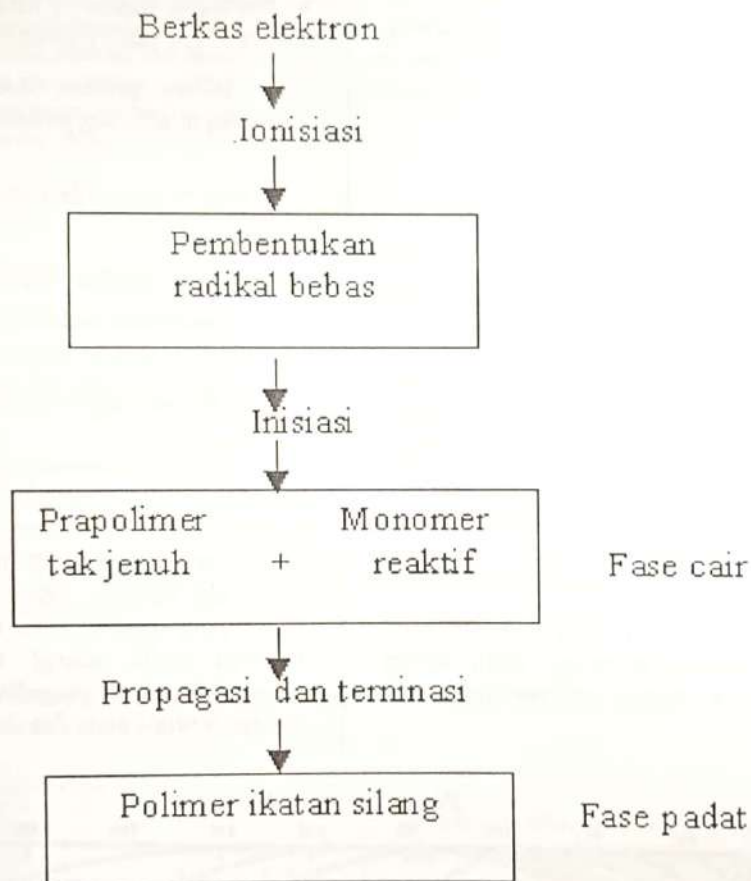


Gambar 1. Hubungan dosis relatif dan penetrasi pada berbagai energi berkas elektron.

MEKANISME *CURING* SECARA RADIASI

Matriks berfungsi untuk merekat komponen lain dan meneruskan beban atau gaya yang diterima komposit. Salah satu matriks yang paling banyak dipakai pada pembuatan komposit adalah resin polimer. Resin polimer pada umumnya terdiri dari campuran pra-polimer atau oligomer, diluen reaktif berupa monomer dan sedikit aditif. Prapolimer atau oligomer adalah polimer yang hanya mempunyai beberapa unit (satuan) ulangan monomer dan mempunyai berat molekul antara beberapa ratus dan beberapa ribu. Jika campuran prapolimer yang mengandung gugus ikatan rangkap (prapolimer tak jenuh) dan monomer reaktif menyerap radiasi

energi tinggi, misalnya radiasi berkas elektron atau sinar- γ , maka akan terjadi proses pengeringan (*curing*). *Curing* terjadi karena adanya perubahan molekul-molekul yang relatif kecil dan semula berfase cair, menjadi molekul-molekul besar berfase padat, melalui reaksi polimerisasi radikal atau polimerisasi kationik. Reaksi polimerisasi radikal menghasilkan polimer ikatan silang berfase padat, melalui tiga tahap reaksi, yaitu reaksi inisiasi (pembentukan radikal), propagasi (perambatan), dan terminasi (penghentian). Polimer ikatan silang inilah yang dipakai sebagai matriks yang berfungsi sebagai perekat pada pembuatan komposit. Proses *curing* menggunakan radiasi berkas elektron dapat digambarkan dengan skema seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema proses *curing* polimer menggunakan radiasi berkas elektron.

BIDANG APLIKASI

Berdasarkan komponen penyusunnya, komposit dapat digolongkan ke dalam komposit partikel (partikel/butiran dalam matriks), komposit serat (serat dalam matriks) dan komposit lamina

(bahan bentuk lamina dalam matriks).⁽⁷⁾ Pada dasarnya, semua jenis komposit yang bisa diproses dengan *curing* secara konvensional (penggunaan katalisator dan panas), dapat diproses dengan menggunakan radiasi berkas elektron.

Penggunaan radiasi berkas elektron untuk proses *curing* pada pembuatan komposit mempunyai beberapa keunggulan dibanding proses termal, yaitu menghemat waktu proses, meningkatkan kualitas dan penampilan, mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan, serta mengurangi biaya produksi.⁽⁸⁾ Proses *curing* tidak akan berlangsung sebelum iradiasi dilakukan. Dengan demikian, keterbatasan waktu pada proses pembuatan (pencampuran dan pencetakan) dapat diatasi, sehingga dapat mengurangi jumlah bahan yang tidak terpakai lagi atau terbuang.

Beberapa penelitian, pengembangan dan aplikasi radiasi berkas elektron pada pembuatan komposit diantaranya adalah sebagai berikut.

Komposit Kayu Polimer (Wood Polymer Composite)

Salah satu usaha/proses untuk meningkatkan kekuatan dan keawetan kayu adalah dengan memasukkan bahan kimia ke dalam kayu. Bahan kimia tersebut dapat berupa bahan kimia anorganik atau organik. Pada umumnya, bahan kimia organik tersebut adalah suatu resin polimer. Produk kayu yang dihasilkan merupakan komposit, dan biasa disebut komposit kayu plastik (*wood plastic composite*) atau komposit kayu polimer (*wood polymer composite*). Pada dasarnya komposit kayu polimer dibuat dengan menambahkan suatu bahan polimer ke dalam pori-pori kayu. Proses *curing* dapat dilakukan dengan metode konvensional (penambahan katalisator) dan metode konvensional (radiasi sinar- γ ^{60}Co atau berkas elektron). Tujuan pembuatan komposit tersebut adalah untuk meningkatkan sifat fisik/mekanik serta keawetan kayu. Oleh sebab itu, kayu yang diproses pada umumnya mempunyai kelas kuat dan kelas awet rendah. Beberapa penelitian penggunaan radiasi sinar- γ ^{60}Co telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas kayu karet, rotan, dan bambu. Dari penelitian tersebut dihasilkan kayu yang lebih kuat, tidak mudah diserang serangga pemakan kayu dan serangga perusak yang lain.^(9,10,11) Selain dengan radiasi sinar- γ , komposit kayu polimer dapat diproses dengan radiasi berkas elektron. Salah satu penelitian yang telah dilakukan adalah peningkatan sifat fisik/mekanik kayu karet menggunakan polimer stirena dengan radiasi berkas elektron. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengatasi beberapa kelemahan kayu karet, yaitu, dalam keadaan kering mudah diserang serangga bubuk kayu dan rayap tanah, sedangkan dalam keadaan basah (habis tebang) mudah diserang *blue stain* sehingga warna kayu menjadi kebiruan. Dengan menggunakan akselerator

elektron energi 2 MeV dan dosis iradiasi 50 kGy, dapat dihasilkan kayu karet yang mempunyai sifat fisik/mekanik (modulus elastisitas, modulus patah, keteguhan tekan sejajar serat) dan ketahanan terhadap serangga perusak kayu lebih baik dibanding kayu aslinya.⁽¹²⁾ Penelitian, pengembangan, dan pengkajian penggunaan teknologi radiasi untuk meningkatkan mutu kayu perlu diintensifkan. Hal ini disebabkan semakin berkurangnya produksi kayu berkualitas tinggi untuk memenuhi kebutuhan industri perkayuan.⁽¹³⁾

Bahan Tahan Radiasi

Politetrafluoro etilen (PTFE) merupakan bahan polimer yang sudah dikenal mempunyai sifat tahan terhadap suhu tinggi, sifat yang sangat baik untuk isolasi listrik dan kestabilan yang tinggi terhadap hampir semua bahan kimia pelarut, dibandingkan polimer hidrokarbon yang lain. Walaupun demikian, PTFE mempunyai kelemahan, yaitu sangat peka terhadap radiasi pengion. Radiasi pengion menyebabkan penurunan sifat fisik/mekanik, baik iradiasi pada dosis yang sangat rendah dalam udara, maupun radiasi dalam vakum sekalipun. Oleh karena itu, penggunaannya menjadi terbatas dalam lingkungan medan radiasi. Di dalam fasilitas iradiasi diperlukan peralatan atau bahan-bahan yang tahan terhadap radiasi. Ketahanan PTFE terhadap radiasi dapat ditingkatkan dengan pembentukan ikatan silang menggunakan radiasi berkas elektron pada kondisi meleleh.⁽¹⁴⁾ Salah satu penelitian yang bertujuan untuk pembuatan bahan yang mempunyai sifat fisik/mekanik tinggi, serta tahan terhadap radiasi adalah pembuatan komposit PTFE dengan proses *curing* menggunakan berkas elektron. Penelitian dilakukan dengan penambahan serat karbon pada resin PTFE, kemudian diiradiasi berkas elektron menghasilkan matriks PTFE berikatan silang. Pada dosis 500 kGy, komposit berikatan silang mempunyai *flexural strength* dan *flexural modulus* masing-masing 370 MPa dan 64 GPa. Nilai *flexural strength* tersebut besarnya 21 kali lebih tinggi dibanding PTFE sendiri, dan 9 kali lebih tinggi dibanding komposit yang belum berikatan silang. Nilai *flexural modulus* kira-kira 110 kali lebih tinggi dibanding PTFE, dan 6 kali lebih tinggi dibanding komposit yang belum berikatan silang. Komposit yang dihasilkan juga tahan radiasi sampai dosis 11,8 MGy.⁽¹⁵⁾

Perkapalan

Salah satu pengembangan hasil penelitian penggunaan radiasi berkas elektron adalah pembuatan komposit untuk bagian-bagian kapal.⁽¹⁶⁾

Bagian-bagian kapal yang dapat diproses misalnya, komponen badan kapal bagian bawah dan samping, penyangga arah longitudinal, dan bagian-bagian yang kompleks dari suatu kapal. Komponen penyusun komposit yang dipergunakan adalah resin vinil ester, serat gelas (*fiber glass*), serat Kevlar (*Kevlar fiber*) dan busa PVC, menggunakan akselerator elektron energi 9,5 MeV dengan lebar scan 120 cm. Aplikasi berkas elektron untuk proses *curing* pada industri pembuatan kapal memberikan beberapa keunggulan dalam hal biaya produksi, kecepatan proses, dan fleksibilitas. Dengan mengatur proses *curing*, dapat dihasilkan suatu komposit dengan sifat mekanik sama dengan yang dihasilkan secara konvensional, dan adanya peningkatan dimensi bahan (misalnya : kerataan dan pengurangan rongga) yang disebabkan oleh pengurangan tegangan sisa (*residual stress*). Proses *curing* dengan BE berlangsung pada suhu kamar, sehingga tidak diperlukan peralatan yang kemampuannya dipengaruhi faktor suhu.

Bidang-Bidang Lain

Beberapa kemajuan dalam penelitian dan pengembangan penggunaan radiasi berkas elektron telah dipakai untuk pembuatan bahan komposit dengan kinerja tinggi (*high performance composites*) dari resin epoksi. Meskipun penetrasi akselerator elektron dengan energi 10 MeV sekitar 2,5 cm pada penggunaan komposit berpenguat serat grafit, tetapi sinar-X yang dihasilkan berkas elektron menyebabkan penetrasi dapat mencapai 20 cm.⁽¹⁷⁾ Dengan radiasi berkas elektron, waktu yang dibutuhkan untuk proses *curing* dapat dipercepat, menekan biaya produksi dan memenuhi persyaratan yang diperlukan sebagai komposit dengan kinerja tinggi. Perkembangan hasil penelitian ini memungkinkan penggunaan senyawa epoksi secara luas untuk pembuatan suatu produk atau bagian-bagian produk dari komposit dengan periode pengeringan yang cepat, tanpa memerlukan suhu tinggi, peralatan yang mahal dan bahan kimia yang sifatnya toksik. Metode ini cocok untuk diterapkan dalam industri otomotif, perkapalan dan peralatan olah raga. Selain itu, telah dikembangkan pula pembuatan komposit berpenguat serat karbon untuk perbaikan struktur suatu bahan menggunakan radiasi berkas elektron. Komposit tersebut terutama dipakai untuk peralatan yang berkaitan dengan program ruang angkasa yang biasanya dibuat dari senyawa epoksi menggunakan proses termal. Pada proses termal, dibutuhkan waktu lama, dan umumnya menghasilkan emisi gas yang sifatnya toksik, serta dapat menyebabkan adanya tegangan sisa (*residual stress*) pada produk.⁽¹⁸⁾

POTENSI DI MASA DEPAN

Kesadaran manusia terhadap lingkungan telah melahirkan norma-norma baru dalam teknologi proses dan informasi. Norma-norma baru tersebut menuntut dimasukkannya faktor lingkungan sejak awal dalam perencanaan suatu proyek. Kelayakan suatu proyek tidak lagi hanya ditinjau dari segi teknik dan ekonomi saja, tetapi juga kelayakan lingkungannya. Oleh sebab itu, faktor lingkungan harus diperhatikan sejak awal pada setiap tahap perencanaan suatu proses produksi dalam industri. Pemilihan/pemanfaatan teknologi seharusnya berwawasan lingkungan, yaitu teknologi yang praktis tidak mencemari lingkungan dan biasa dikenal dengan *Clean Production*.⁽¹⁹⁾

Teknologi penggunaan radiasi berkas elektron untuk proses *curing* pada pembuatan komposit mempunyai keunggulan karena merupakan teknologi yang bersih dan efisien. Beberapa penelitian untuk pembuatan produk tertentu menunjukkan bahwa biaya produksi lebih kompetitif dibanding proses termal. Oleh sebab itu potensi penggunaan dimasa mendatang akan berkembang dengan adanya beberapa faktor yang menunjang, yaitu :

1. Pengembangan akselerator elektron yang lebih kompak dan ekonomis.
2. Pengembangan proses yang lebih efisien untuk mengurangi biaya produksi.
3. Inovasi bahan polimer yang lebih reaktif terhadap radiasi pada proses *curing*.
4. Kesadaran dan tuntutan dalam industri terhadap penggunaan proses yang berwawasan lingkungan.

KESIMPULAN

Proses *curing* dalam pembuatan komposit menggunakan radiasi berkas elektron mempunyai beberapa keunggulan, yaitu : cepat, tidak memerlukan suhu tinggi, proses lebih fleksibel, dan ramah lingkungan, dibanding proses konvensional menggunakan katalisator dan panas. Kelemahan penggunaan radiasi berkas elektron adalah keterbatasan penetrasi terhadap bahan komposit.

Radiasi berkas elektron dapat digunakan untuk berbagai bidang, misalnya untuk pembuatan bahan tahan radiasi, bagian-bagian kapal, peralatan olah raga, peralatan untuk angkasa luar, dan meningkatkan kualitas kayu.

Potensi dimasa mendatang akan meningkat dengan adanya faktor-faktor yang menunjang, yaitu perkembangan teknologi akselerator elektron, bahan polimer dan proses yang lebih efisien, serta kesadaran terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. SCHWARTZ, M., *Composite Materials Handbook*, 2 nd. Ed. Mc Graw Hill, Inc. New York, 1992.
2. SISWOSUWARNO, M., *Perkembangan Material dan Struktur Komposit : Masalah, Tantangan dan Peluang*, Prosiding Seminar Sehari 70 Tahun Noer Mandsjoeriah Surdia, ITB-Bandung, 3, 2003.
3. MALLICK, P. K., *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker Inc. New York, 1993.
4. HOLMAN, R., and OLDRING, P., *UV & EB Curing Formulation for Printing Inks*, Coating and Paints, SITA Technology, 1988.
5. SUZUKI, M., *Introduction to Industrial Electron Accelerators*, Proc. of The Workshop on The Utilization of Electron Beams, Japan Atomic Energy Research Institute, 24, 1993.
6. MURATA., *Electron-Beam Curing (EBC) of Coatings*, Special Reports for UNDP on Regional RCA Project for Asia Pacific on Industrial Applications of Isotopes and Radiation Technology, Part II, IAEA, Vienna, 385, 1990.
7. JONES, R.M. M., *Mechanics of Composites Materials*, Mc Graw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1975.
8. SAUNDERS, C., LOPATA, V., BARNARD, J., and STEPANIK, T., *Electron Beam Curing-Taking Good Ideas to the Manufacturing Floor*, Radiat. Phys. And Chem. 57, 441 - 445, 2000.
9. UTAMA, M., dan AINUDIN., *Sifat Lapisan, Melamin dan Silabecor Pada Bambu Betung (Dendrocalamus Asper Backer) Yang Dipolimerisasi Radiasi*, Prosiding Simposium Nasional Polimer, HPI. Jakarta, 10, 1995.
10. UTAMA, M., dan SIMANJUNTAK, K., *Impregnasi Polimerisasi Radiasi Metil Metakrilat Ke Dalam Rotan*, Jurnal Nusantara Kimia, 1 No.2, 103, 1966.
11. HABIB, N., ISMANTO, A., dan UTAMA, M., *Pengaruh Struktur Monomer Pada Hasil Impregnasi Polimerisasi Radiasi Kayu Karet (Hevea Brasiliensis Muell. Agr)*, Risalah Pertemuan Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, PAIR-BATAN, Jakarta, 81, 1996.
12. UTAMA, M., *Impregnasi Polimerisasi Radiasi Stirena Ke Dalam Kayu Karet. Hevea Brasiliensis Muell Agr.) Dengan Menggunakan Berkas Elektron*, Proceedings Seminar Nasional-I, Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia (MAPEKI), 311, 1988.
13. ANONYMOUS., *Indonesia : Pushing Ahead, Furniture, Design, and Manufacturing*, Asia, October, 46, 2000.
14. OSHIMA, A., IKEDA, S., SEGUCHI, T., and TABATA, Y., *Improvement of Radiation Resistance for Polytetrafluoroethylene (PTFE) by Radiation Crosslinking*, Radiat. Phys. Chem. 49, 279 - 284, 1997.
15. OSHIMA, A., UDAGAWA, A., MORITA, Y., *Radiation Processing For Carbon Fiber-Reinforced Polytetrafluoroethylene Composite Materials*, Radiat. Phys. Chem. 60, 95-100, 2001.
16. LOPATA, V. J., SAUNDERS, C. B., SINGH, A., JANKE, C. J., WRENN, G. E., and HAVENS, S. J., *Electron-Beam-Curable Epoxy Resins for the Manufacture of High-Performance Composites*, 56, 405-415, 1999.
17. CHAPPAS, W. J., DEVNEY, B.G., OLDING, R.P., MCLAUGHLIN, W.L., *EB Curing of Maritime Composite Structures*, Radiat.Phys. and Chem. 56, 417 - 427, 1999.
18. SINGH, A., *Electron Processing with Low and High Energy Electrons Recent Developments and Emerging Trends*, Proc. of RadTech Asia '95 Symposium and Workshop, Chulalongkorn Univ., Bangkok, 133, 1995.
19. THALIB, S., *Tuntutan Lingkungan Terhadap Teknologi Proses dan Informasi Di Masa Depan*, NEED, Lingkungan - Manajemen - Ilmiah, 1 1, 1, 1999.