

## RADIATION GRAFTING OF STYRENE ONTO PTFE FILM

### Pencangkakan Radiasi Stirena Pada Film PTFE

Yohan\*, Rifaid M. Nur, Lilik Hendrajaya and E. S. Siradj

Metallurgical and Material Department, Faculty of Engineering, University of Indonesia  
Kampus Baru UI Depok 16424, Indonesia

Received 10 February 2006; Accepted 27 February 2006

### ABSTRACT

Radiation grafting of styrene monomer onto poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) film has been investigated. This research is emphasized on the conditioning of PTFE film. It was irradiated by  $\gamma$ -ray radiation at various irradiation dose from 2.5 – 12.5 kGy with dose rate 1.9 kGy/hour. Irradiated copolymer was then grafted by styrene monomer under various conditions. The results showed that degree of grafting increased by increasing irradiation dose, solvent concentration, temperature and time of grafting. The optimum condition of radiation grafting relatively was obtained at irradiation dose of 10 kGy, 2-propanol solvent, styrene concentration of 40 volume%, temperature and time of grafting of 70 °C and 6 hours each.

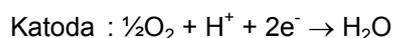
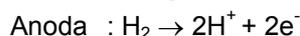
**Keywords:** Radiation grafting, PTFE, Fuel cell..

### PENDAHULUAN

Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah suatu sel elektrokimia yang bekerja dengan cara mengubah energi kimia (reaksi antara hidrogen dan oksigen) menjadi energi listrik. Alat ini dianggap sebagai salah satu sumber energi listrik yang ramah lingkungan mengingat cara kerjanya yang secara keseluruhan tidak menghasilkan bahan-bahan yang membahayakan lingkungan.

Berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan saat ini telah dikenal sel bahan bakar yang bernama *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). PEMFC menggunakan polimer sebagai membran elektrolit dan biasanya sel ini beroperasi pada suhu yang relatif rendah (70-90 °C) dengan kerapatan daya yang cukup tinggi. Karena sifat-sifat inilah maka PEMFC banyak digunakan sebagai sumber daya bagi alat-alat elektronik *portable* dan alat-alat transportasi [1].

Membran polimer merupakan komponen yang sangat penting dalam PEMFC mengingat peran komponen ini dalam memisahkan reaktan dan menjadi sarana transportasi ion hidrogen yang dihasilkan oleh reaksi anoda menuju katoda sehingga reaksi katoda yang menghasilkan energi listrik dapat terjadi. Persamaan reaksi yang terjadi di anoda dan katoda dapat dituliskan sebagai berikut:



Saat ini membran yang digunakan terbuat dari fluoro-polimer, yaitu politetrafluoroetilena (PTFE), dengan rantai cabang mengandung gugus asam sulfonat dan dikenal dengan nama dagang *Nafion*<sup>®</sup>.

Kemampuan *Nafion*<sup>®</sup> untuk memisahkan reaktan dan menghantar proton sudah terbukti efisien. Namun, untuk mengembangkan PEMFC lebih lanjut, penggunaan terhadap bahan ini secara tekno-ekonomi menjadi kendala karena mahal dan secara teknis bahan ini masih kurang sempurna dalam hal menahan gas dan belum dapat mencegah *fuel cross-over* secara baik. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian yang mendasar dan sistematis guna mendapatkan membran alternatif yang di satu sisi mempunyai efisiensi pemisahan yang tinggi dan di sisi lain lebih ekonomis.

Pencangkakan secara radiasi adalah salah satu metode untuk memodifikasi bahan-bahan polimer. Metode ini telah banyak digunakan misalnya untuk menyiapkan membran selektif penukar ion [2], membuat bahan elastomer [3], mengembangkan polimer yang ramah lingkungan [4], dan pengujian proses pembuatan membran penukar ion. Pada teknik ini radiasi seperti sinar- $\gamma$  diperlukan sebagai suatu penginisiasi terjadinya proses polimerisasi. Pencangkakan dilakukan setelah polimer diiradiasi (pencangkakan iradiasi awal) [5,6]. Agar terjadi reaksi kimia antara bagian aktif polimer dan monomer maka pencangkakan metoda iradiasi dilakukan dalam suasana vakum [7] atau jenuh gas nitrogen [8].

Mekanisme reaksi kopolimerisasi meliputi tahap-tahap inisiasi, propagasi, dan terminasi [6]. Pada pencangkakan secara radiasi, inisiasinya adalah radikal yang dihasilkan dari proses iradiasi polimer. Radikal polimer yang terbentuk pada tahap propagasi akan bereaksi dengan monomer. Selanjutnya pada tahap terminasi aktivitas pertumbuhan polimer akan terhenti.

\* Corresponding author.  
Email address : ytiara@ristek.go.id (Yohan)

Pada penelitian ini dikembangkan teknik pencangkakan iradiasi awal menggunakan film PTFE dan monomer stirena. Membran yang akan dihasilkan diharapkan mempunyai sifat daya hantar proton yang lebih tinggi sehingga dapat memperbaiki sifat *fuel crossover* pada *Nafion*<sup>®</sup>. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan diarahkan pada proses pengkondisian film PTFE pada berbagai suhu dan dosis radiasi.

## METODE PENELITIAN

### Bahan

Bahan yang dipakai adalah PTFE dengan ketebalan 50  $\mu\text{m}$  buatan Chukoh Jepang, Stirena, 2-propanol, etanol, toluena, dan kloroform masing-masing buatan Merck, dan gas  $\text{N}_2$  dengan kemurnian tinggi.

### Peralatan

Alat yang digunakan untuk proses pencangkakan dengan teknik radiasi awal adalah gelas cuplikan dan alat vakum gelas yang didisain secara khusus, pompa vakum, *vacuum controller*, penangas air, tabung gas nitrogen dan *flowmeter*, oven, neraca analitik, seperangkat peralatan refluks, dan iradiator panorama serbaguna – BATAN (aktivitas 13,9 kCi pada 15 Februari 2005) dan iradiator karet alam – BATAN (aktivitas 94,1 kCi pada 13 April 2005).

### Prosedur

#### Pengkondisian Film PTFE

Cuplikan film PTFE berukuran 5x6 cm diekstraksi 12 jam dengan etanol lalu dikeringkan dalam oven. Cuplikan divakumkan kemudian dialiri dengan gas nitrogen. Selanjutnya cuplikan diiradiasi dengan sinar- $\gamma$  pada dua kondisi. Kondisi pertama dilakukan di Indonesia (menggunakan iradiator karet alam – BATAN) pada suhu kamar dengan laju dosis 7,24 kGy/jam dan dosis total dari 50 sampai 150 kGy. Kondisi kedua dilakukan di JAERI – Jepang pada suhu  $340\pm 10^\circ\text{C}$  dengan laju dosis 7,5 kGy/jam dan dosis total 60 kGy.

Cuplikan film PTFE yang tidak dikondisikan dan yang dikondisikan masing-masing diberi kode seperti yang terlihat pada Tabel 1.

#### Pembuatan Bahan Membran

Cuplikan film PTFE (Tabel 1) masing-masing ditimbang hingga diperoleh berat konstan, kemudian divakumkan dan dialiri dengan gas nitrogen. Selanjutnya cuplikan diiradiasi dengan sinar- $\gamma$  (menggunakan iradiator panorama serbaguna – BATAN) dengan laju dosis 1,9 kGy/jam dan dosis total dari 2,5 sampai 12,5 kGy. Setelah itu cuplikan yang telah diiradiasi divakumkan kembali dan ditambahkan stirena yang telah dialiri gas nitrogen lalu dicangkakan pada suhu  $70^\circ\text{C}$  selama 4 jam. Hasil optimasi dari percobaan variasi dosis total digunakan untuk mengulangi percobaan

**Tabel 1** Pengkodean Cuplikan Film PTFE

No	Kode cuplikan	Keterangan
1.	PTFE– Blanko	Film PTFE awal, tidak dikondisikan
2.	PTFE– 50/K	Film PTFE dikondisikan pada suhu kamar dengan dosis 50 kGy
3.	PTFE– 75/K	Film PTFE dikondisikan pada suhu kamar dengan dosis 75 kGy
4.	PTFE– 100/K	Film PTFE dikondisikan pada suhu kamar dengan dosis 100 kGy
5.	PTFE– 125/K	Film PTFE dikondisikan pada suhu kamar dengan dosis 125 kGy
6.	PTFE– 150/K	Film PTFE dikondisikan pada suhu kamar dengan dosis 150 kGy
7.	PTFE– 60/340	Film PTFE dikondisikan pada suhu $340\pm 10^\circ\text{C}$ dengan dosis 60 kGy.

dengan variasi jenis dan konsentrasi pelarut, kemudian variasi suhu dan waktu pencangkakan. Cuplikan tercangkakan stirena diekstraksi dengan kloroform dan selanjutnya dikeringkan hingga diperoleh berat konstan. Persen pencangkakan (PP) dihitung dengan menggunakan Persamaan 1.

$$PP = \frac{m_c - m_a}{m_a} \times 100\% \quad (1)$$

di mana  $m_a$  adalah massa film mula-mula dan  $m_c$  adalah massa film tercangkakan.

#### Karakterisasi Bahan Membran

Gugus fungsi film tercangkakan diuji dengan FTIR-410 buatan JASCO dan topografi permukaannya diuji dengan SEM JSM-840A buatan JEOL.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Politetrafluoroetilena (PTFE) adalah salah satu polimer yang tergolong dalam kelompok material yang mengandung fluor atau yang sering disebut sebagai kelompok fluoro-polimer. Seperti halnya jenis-jenis fluoro-polimer lainnya, PTFE mempunyai kestabilan dan konduktivitas yang sangat baik. Pada penelitian ini, PTFE yang digunakan mempunyai ketebalan 50  $\mu\text{m}$  dan persen kristalinitas sebesar 14% [8]. Karena masih studi awal, maka makalah ini hanya akan mendiskusikan pengaruh pengkondisian film PTFE terhadap hasil pencangkakan dengan teknik iradiasi awal. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses kopolimerisasi pencangkakan iradiasi awal juga dipelajari, yaitu dosis total radiasi, jenis dan konsentrasi pelarut, serta suhu dan waktu pencangkakan.

### Pengkondisian Film PTFE

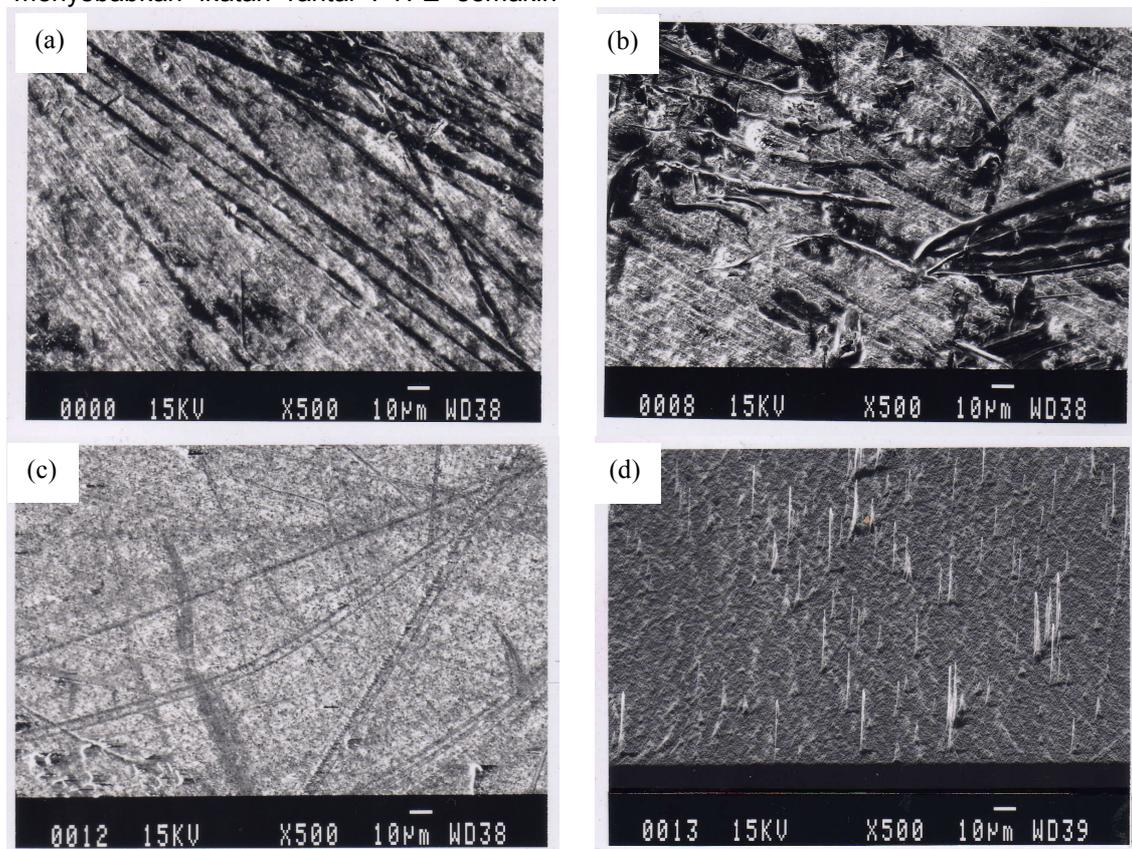
Apabila polimer diiradiasi pada kondisi inert, maka ada dua kemungkinan yang terjadi, yaitu terdegradasi (*chain scissioning*) atau berikatan silang (*cross-linking*). Pada proses degradasi terjadi pemutusan ikatan rantai utama polimer, sedangkan pada pengikatan silang terbentuk ikatan antara molekul polimer [5,9]. Perfluoropolimer diketahui sebagai polimer yang sensitif terhadap radiasi pengion. Bila diiradiasi, maka PTFE akan mengalami degradasi yang permanen. Namun, bila kondisi radiasinya dibuat khusus, maka beberapa perfluoropolimer, seperti PTFE, dapat membentuk ikatan silang [10].

Gambar 1 memperlihatkan Perbedaan topografi permukaan antara film PTFE-Blanko dan film PTFE setelah dikondisikan/diiradiasi dengan sinar- $\gamma$  serta film PTFE setelah proses pencangkakan (film PTFE-g-S). Terlihat bahwa permukaan film PTFE-Blanko berada pada kondisi struktur ikatan yang utuh (Gambar 1 (a)). Namun, ketika dikondisikan film PTFE mengalami perubahan. Ternyata iradiasi film PTFE yang dilakukan di bawah kondisi suhu kamar menyebabkan terjadinya pemutusan ikatan. Makin tinggi dosis radiasi yang diberikan menyebabkan ikatan rantai PTFE semakin

rusak. Hal ini dimungkinkan mengingat dengan semakin tingginya dosis radiasi pengaruh radiasi terhadap ikatan polimer semakin besar. Nampak pada Gambar 1 (b) permukaan film PTFE mengalami kerusakan. Tetapi bila iradiasi dilakukan pada kondisi suhu 340°C maka ikatan polimer PTFE tidak mengalami kerusakan, malahan nampak adanya ikatan-ikatan silang (Gambar 1 (c)). Hal ini disebabkan pada suhu 340°C kristalinitas film PTFE yang sebesar 14% mengalami pelelehan yang kemudian disusul dengan pembentukan amorf yang selanjutnya oleh radiasi dapat membentuk ikatan-ikatan silang.

Menurut Sun [10] pembentukan struktur ikatan silang pada PTFE dapat menyebabkan terjadinya penurunan titik leleh, kenaikan suhu transisi gelas dan nilai ZST (*Zero Strength Temperature*). Kondisi ini berpengaruh pada saat terjadinya perubahan struktur ikatan dari molekul linier menjadi struktur jaringan tiga dimensi.

Perubahan struktur ikatan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 berdampak pada Massa molekul relatif ( $M_r$ ) dan kekuatan mekanik masing-masing film. Pada peristiwa degradasi terjadi



**Gambar 1** Pengaruh pengkondisian film PTFE Terhadap Struktur Ikatan Polimer. (a) Film PTFE-Blanko; (b) film PTFE-100/K; (c) film PTFE-60/340; dan (d) film PTFE-g-S.

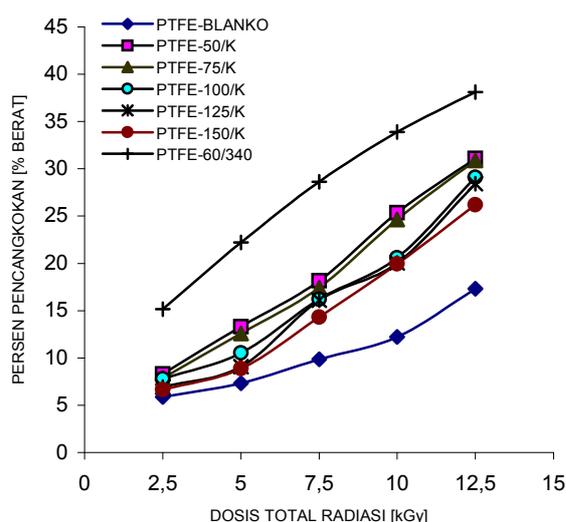
pengurangan  $M_r$  yang berdampak pada penurunan sifat-sifat mekanik. Pada pengikatan silang terjadi penambahan  $M_r$  karena adanya rantai cabang pada polimer. Pertambahan  $M_r$  ternyata sama sekali tidak berdampak pada penambahan kekuatan ikatan, malahan sifat-sifat mekaniknya mengalami sedikit penurunan [10].

Ketika film PTFE, baik yang mula-mula maupun yang telah dikondisikan, dicangkok dengan teknik iradiasi awal ternyata semua topografi permukaannya hampir menyerupai. Gambar 1 (d) adalah contoh topografi permukaan pada film PTFE setelah dikondisikan pada dosis radiasi 60 kGy dan suhu 340 °C. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencangkokan tetap berjalan pada berbagai kondisi film. Namun berapa besar persen pencangkokannya dan berapa besar kekuatan mekaniknya akan didiskusikan dalam makalah ini.

## Proses Pencangkokan dengan Teknik Iradiasi Awal

### Pengaruh Dosis Total Radiasi

Pengaruh dosis total radiasi terhadap persen pencangkokan film PTFE (PTFE-g-S) ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa pada semua kondisi film PTFE ternyata persen pencangkokan PTFE-g-S semakin meningkat dengan semakin besarnya dosis total radiasi yang diberikan. Hal ini dimungkinkan mengingat dengan semakin besarnya dosis radiasi maka jumlah radikal bebas yang akan terbentuk menjadi semakin banyak.



**Gambar 2.** Pengaruh dosis total radiasi terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S (Kondisi percobaan: laju dosis 1,9 kGy/jam, monomer stirena 40% volume, pelarut 2-propanol, waktu pencangkokan 4 jam dan suhu pencangkokan 70 °C).

Akibatnya reaksi kopolimerisasi dengan monomer menjadi semakin tinggi. Pada dosis total 2,5 kGy hingga 10 kGy peningkatan persen pencangkokannya proporsional. Namun setelah 10 kGy peningkatan persen pencangkokannya tidak lagi proporsional.

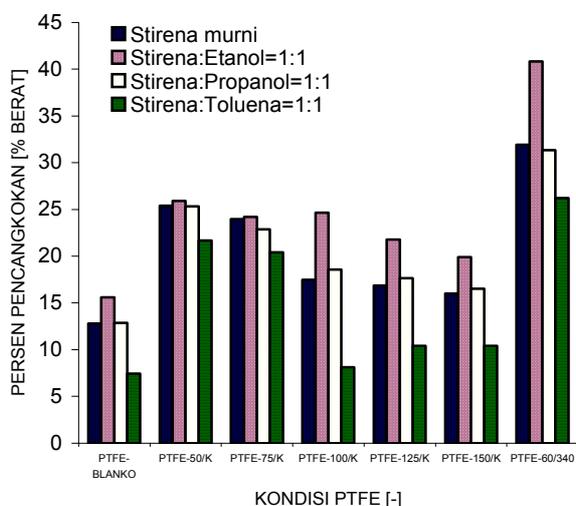
Pengkondisian film PTFE sebelum proses pencangkokan dengan teknik iradiasi awal ternyata berpengaruh pada persen pencangkokan. Pada berbagai dosis total radiasi, seluruh film PTFE yang dikondisikan mempunyai persen pencangkokan yang lebih besar dari film PTFE mula-mula. Hal ini diperkirakan karena adanya pembentukan ikatan silang pada film-film yang terkondisikan. Adanya ikatan silang berpengaruh pada proses kopolimerisasi. Pengkondisian film pada suhu kamar memperlihatkan bahwa semakin besar dosis radiasi semakin berkurang persen pencangkokannya. Hal ini disebabkan dengan semakin besarnya dosis radiasi maka degradasi ikatan menjadi semakin besar.

Namun, pada pengkondisian yang dilakukan tidak pada suhu kamar, yaitu pada suhu 340 °C, diperoleh persen pencangkokan relatif lebih tinggi dibandingkan film-film lainnya. Hal ini terjadi karena pada film terbentuk ikatan silang. Semakin banyak ikatan silang maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya pencangkokan monomer.

Bila dosis total dinaikkan hingga melampaui dosis total 12,5 kGy diperkirakan derajat pencangkokannya pun akan semakin meningkat. Namun kenaikan dosis total di atas 12,5 kGy perlu dihindarkan untuk mencegah kemungkinan terjadinya penurunan sifat-sifat mekanik bahan membran yang dihasilkan [11]. Pencangkokan akan mencapai batas tertentu pada dosis yang lebih tinggi karena adanya rekombinasi antara radikal-radikal bebasnya [12]. Pada polimer semikristalin semacam PTFE, dosis total yang tinggi akan menyebabkan peningkatan kristalinitas. Peningkatan kristalinitas akan menurunkan kecepatan difusi monomer pada film polimer. Dengan demikian, dosis yang terlalu tinggi akan menurunkan efisiensi radikal pada reaksi pencangkokan. Dengan memperhitungkan aspek ekonomi, waktu dan kemungkinan buruk yang dapat terjadi bila dosis total terlalu tinggi maka untuk keperluan preparasi bahan membran PTFE-g-S selanjutnya akan dipakai dosis total 10 kGy.

### Pengaruh Jenis Pelarut

Difusi monomer ke dalam bagian aktif film polimer membutuhkan media pembawa, yaitu pelarut. Oleh karena itu, mobilitas media pelarut dalam membantu proses difusi merupakan salah satu faktor yang sangat penting. Gambar 3 memperlihatkan pengaruh jenis pelarut terhadap persen pencangkokan. Terlihat bahwa pada setiap film PTFE

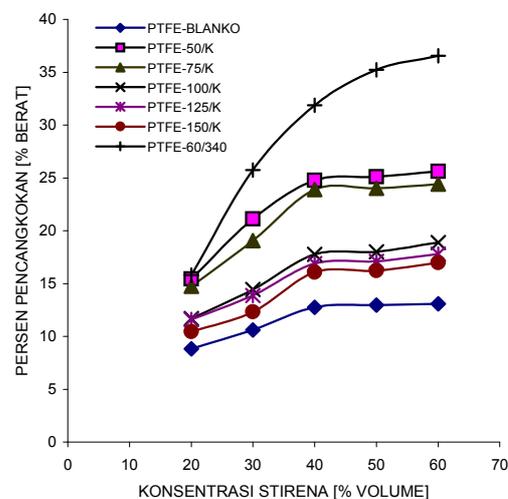


**Gambar 3** Pengaruh jenis pelarut terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S (Kondisi percobaan: laju dosis 1,9 kGy/jam, dosis total 10 kGy, waktu dan suhu pencangkokan masing-masing 4 jam dan 70 °C).

ternyata pelarut etanol memberikan persen pencangkokan yang lebih tinggi dibandingkan pelarut lainnya. Setelah itu pelarut 2-propanol, dan terakhir pelarut toluena. Berarti kemampuan etanol dalam membawa stirena ke bagian aktif film PTFE jauh lebih tinggi dibandingkan dua pelarut lainnya. Hal ini dimungkinkan bila memperhatikan  $M_r$  dari masing-masing pelarut. Semakin ringan suatu material maka pergerakan material tersebut akan semakin cepat pula. Dibandingkan dengan 2-propanol ( $M_r=60$ ) dan toluena ( $M_r=92$ ), maka etanol ( $M_r=46$ ) mempunyai mobilitas yang lebih tinggi kemudian disusul dengan 2-propanol. Meskipun demikian pada variasi percobaan berikutnya pelarut yang akan digunakan adalah 2-propanol. Hal ini disebabkan pada studi awal terhadap sifat-sifat mekanik ternyata pemakaian pelarut ini memberikan sifat-sifat mekanik film hasil pencangkokan yang lebih baik dibandingkan pemakaian kedua pelarut lainnya.

#### Pengaruh Konsentrasi Monomer

Salah satu aspek kinetika dan fenomena transfer yang paling berperan dalam metode pencangkokan dengan inisiasi radiasi adalah konsentrasi monomer. Pengaruh konsentrasi monomer terhadap persen pencangkokan diperlihatkan pada Gambar 4. Tampak dengan jelas bahwa pada setiap film PTFE, persen pencangkokan meningkat dengan semakin tingginya konsentrasi monomer. Konsentrasi monomer memberi pengaruh pada persen pencangkokan karena berkaitan dengan difusibilitas monomer atau kemampuan monomer berdifusi ke dalam matriks film PTFE. Difusibilitas monomer akan meningkat dengan meningkatnya konsentrasi monomer. Persen pencangkokan terus naik sampai puncaknya pada



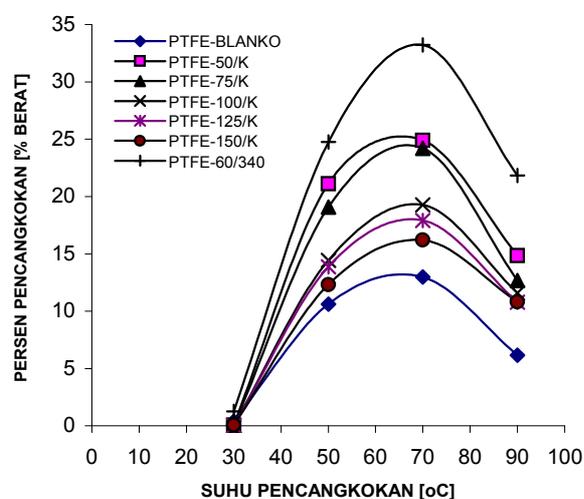
**Gambar 4** Pengaruh konsentrasi pelarut terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S (Kondisi percobaan: laju dosis 1,9 kGy/jam, dosis total 10 kGy, waktu dan suhu pencangkokan masing-masing 4 jam dan 70 °C).

konsentrasi stirena 40% volume. Pada konsentrasi di atas 40% volume terjadi persen pencangkokan yang relatif konstan. Hal ini disebabkan adanya pengaruh viskositas dan meningkatnya laju homopolimerisasi.

Homopolimerisasi adalah peristiwa polimerisasi monomer dengan monomer sejenisnya. Tingginya kadar homopolimer sangat berpengaruh pada konsentrasi monomer dan terhadap kemampuan monomer untuk menembus matriks film polimer. Perbedaan konsentrasi memberikan perbedaan hasil pencangkokan. Konsentrasi monomer sangat tergantung pada berbagai faktor, di antaranya jenis pelarut monomer, bahan polimer induk, dan dosis total.

#### Pengaruh Suhu Pencangkokan

Aspek lain yang berkaitan erat dengan kinetika proses pencangkokan adalah suhu pencangkokan. Suhu pencangkokan memberikan pengaruh secara bersamaan terhadap kelarutan dan daya difusi, laju atau kecepatan propagasi, dan kecepatan terminasi rantai yang merupakan kontrol pada proses difusi monomer. Hal itu menunjukkan bahwa laju pencangkokan dapat meningkat atau menurun tergantung pada dua parameter pertama. Sementara parameter ketiga menjadi tahap pengontrol laju pencangkokan. Dengan demikian, semakin tinggi suhu maka kecepatan terminasi akan semakin meningkat [6]. Pada penelitian ini dipelajari variasi suhu pencangkokan dari 30 °C sampai 90 °C. Sebagaimana terlihat pada Gambar 5, persen pencangkokan meningkat dari suhu 30 °C hingga 70 °C namun menurun drastis pada suhu 90 °C.



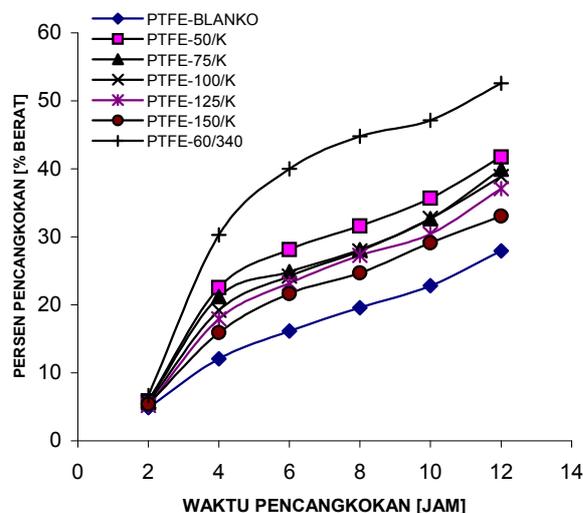
**Gambar 5.** Pengaruh suhu pencangkokan terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S (Kondisi percobaan: laju dosis 1,9 kGy/jam, dosis total 10 kGy, pelarut 2-propanol, monomer stirena 40% volume, dan waktu pencangkokan 4 jam).

Kenaikan persen pencangkokan dari 30 °C ke 70 °C disebabkan pada suhu yang tinggi (akibat pemanasan), radikal bebas polimer akan bergerak lebih cepat sehingga reaksi rekombinasi antara radikal akan lebih cepat pula. Di samping itu, antara radikal polimer dan monomer terjadi reaksi aditif yang membentuk kopolimer cangkok yang cepat pula. Di antara peristiwa itu akan terjadi kompetisi.

Penurunan persen pencangkokan pada suhu 90 °C dimungkinkan mengingat pada suhu 90 °C terjadi rantai-rantai cabang polimer secara cepat pada tahap propagasi, tetapi kemudian cabang-cabang itu terjebak dalam medium viskos karena proses terminasi yang terlalu cepat juga. Bila terjadi difusi udara pada suhu 90 °C maka terjadi gugus-gugus hidroperoksil yang meningkatkan homopolimerisasi dan pada suhu ini bagian-bagian polimer yang bersifat kristalin meleleh dalam medium reaksi.

#### **Pengaruh Waktu Pencangkokan**

Keleluasaan radikal bebas untuk bereaksi dengan monomer dan difusi monomer ke film polimer PTFE sangat dipengaruhi oleh waktu. Pengaruh waktu pencangkokan terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S diperlihatkan pada Gambar 6. Terlihat bahwa pada berbagai kondisi film PTFE, maka persen pencangkokan meningkat dengan semakin bertambahnya waktu pencangkokan. Pada waktu 6 jam pertama, terjadi kenaikan laju kopolimerisasi cangkok pada masing-masing suhu yang lebih besar dibandingkan pada jam-jam berikutnya. Hal ini disebabkan radikal bebas masih lebih banyak dan lebih leluasa untuk bereaksi dengan monomer. Kecepatan



**Gambar 6** Pengaruh waktu pencangkokan terhadap persen pencangkokan PTFE-g-S (Kondisi percobaan: laju dosis 1,9 kGy/jam, dosis total 10 kGy, pelarut 2-propanol, monomer stirena 40% volume, dan suhu pencangkokan 70 °C).

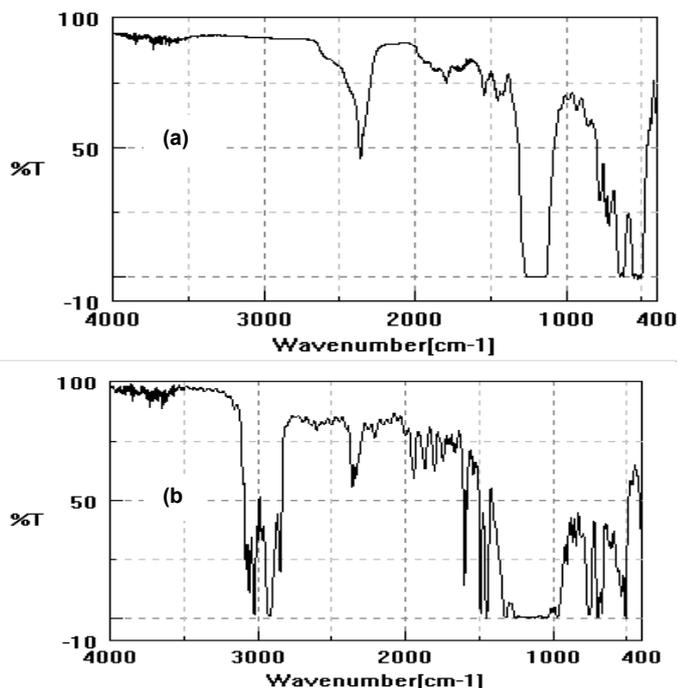
reaksi propagasi pada jam-jam ini sangat tinggi, sementara laju pembentukan homopolimer masih kecil. Namun pada jam-jam berikutnya terlihat persen pencangkokan tidak sebesar pertambahan sebelumnya. Hal ini dapat dimengerti mengingat jumlah radikal bebas yang semakin mengecil berakibat pada menurunnya laju propagasi.

#### **Karakterisasi Film Tercangkok**

##### **Spektrum Serapan Sinar Inframerah**

Spektrum serapan inframerah film PTFE sebelum dan sesudah pencangkokan diperlihatkan pada Gambar 7. Mengingat bahwa pada semua spektrum film PTFE dan PTFE-g-S mempunyai posisi serapan yang sama, maka yang diperlihatkan pada gambar hanyalah salah satunya saja. Hal ini menunjukkan bahwa pengkondisian film PTFE akan tetap memberikan spektrum inframerah yang sama. Juga terlihat bahwa proses pencangkokan tidak mengubah puncak serapan di daerah *finger print* film mula-mula. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencangkokan tidak sampai mengubah struktur asli dari film PTFE.

Film PTFE mula-mula (sebelum pencangkokan) memiliki sedikit serapan dengan puncak yang kuat. Pita serapan yang kuat terlihat pada 2350 dan 1675  $\text{cm}^{-1}$  yang merupakan vibrasi ulur gugus metilen  $-\text{CH}_2-$ . Selain itu terlihat pula pita serapan vibrasi tekuk  $-\text{CH}_2-$  pada bilangan gelombang 1475  $\text{cm}^{-1}$ , pita serapan yang sangat kuat dari gugus fungsi  $-\text{CF}_2-$  pada bilangan gelombang 1000-1300  $\text{cm}^{-1}$  dan pita-pita serapan pada daerah *finger print*.



**Gambar 7** Spektrum serapan inframerah. (a) Film PTFE sebelum pencangkakan dan (b) Film PTFE setelah pencangkakan (PTFE-g-S).

Pita-pita serapan ini muncul kembali pada film PTFE-g-S. Karena tercangkok stirena maka pada film PTFE-g-S muncul pita-pita serapan baru (tambahan) dari gugus-gugus fungsi senyawa stirena, seperti pita serapan vibrasi tekuk  $=C=C=$  pada bilangan gelombang 2900 dan 3050  $\text{cm}^{-1}$ . Juga nampak pita serapan vibrasi tekuk  $-C=C-$  aromatik pada bilangan gelombang 1475 – 1675  $\text{cm}^{-1}$ .

## KESIMPULAN

1. Persentase pencangkakan semakin meningkat dengan semakin bertambahnya dosis total, konsentrasi pelarut, dan suhu serta waktu pencangkakan.
2. Kondisi optimum pencangkakan dengan laju dosis 1,9 kGy/jam diperoleh pada pemakaian dosis total 10 kGy, pelarut 2-propanol, suhu pencangkakan 70 °C, dan waktu pencangkakan 6 jam.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Negara Riset dan Teknologi untuk beasiswa S-3 dan kepada BATAN dan JAERI atas fasilitas iradiasinya sehingga penelitian ini bisa berjalan dengan baik, serta kepada Dr. Agung Basuki, Nusin Samosir, B.Sc., dan Maskur, SST. atas bantuan pengukuran cuplikan dengan alat SEM dan FTIR.

## DAFTAR PUSTAKA

1. William, M. C., 2000, *Fuel Cell Handbook*, Fifth Edition. U.S. Department of Energy. Morgantown, West Virginia, 352 pp.
2. Hegazy, E. A., Abd El-Rehim, H. A., and Shawky, H. A., 2000, *Radiation Physics and Chemistry*, 57, 85-95.
3. Machi, S., Matsuda, O., Ito, M., Tabata, Y., and Okamoto, J., 1997, *Radiation Physics and Chemistry*, 9, 403-417.
4. Hoffman, A., 1991, *MRS Bull*, XVI, 9, 42-46.
5. Charlesby, A., 1960, *Atomic Radiation and Polymers*, Pergamon Press, London, 556 pp.
6. Nasef, M. M. and Hegazy, E.A., 2004, *Progr in Polym Sci.*, 29, 499-561.
7. Subianto, Y.S., Makuuchi, K., and Ishigaki, I., 1987, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 152, 159-168.
8. Walsby, N., Sundholm, F., Kallio, T., and Sundholm, G., 2001, *J Polym Sci part A: Polym Chem*, 39, 3008-3017.
9. Chapiro, A., 1962, *Radiation Chemistry of Polymer*, Interscience Publishers, London, 712 pp.
10. Sun J., Zhang Y., Zhong X., and Zhang W., 1993, *Radiation Phys Chem*, 42, 139-142.
11. Utama, M., 1986, *Majalah BATAN*, XVII, 2, 1-16.
12. Hegazy, A., Taher, N.H., Rabie, A., Dessauki, M.A. and Okamoto, J., 1981, *J App Polym Sci*, 26, 3872-3883.