

KARAKTERISASI BIODEGRADASI POLIMER

Eli Rohaeti

Juridik Kimia FMIPA UNY
Karangmalang Yogyakarta 55281
rohaetieli@yahoo.com

ABSTRAK

Biodegradasi polimer dapat terjadi akibat serangan secara mikrobiologis terhadap material tersebut. Mikroorganisme mempunyai kemampuan memproduksi bermacam-macam enzim yang dapat bereaksi dengan polimer. Fenomena biodegradasi polimer terlihat dari fakta bahwa dalam siklus makanan di alam, secara langsung atau tidak, cepat atau berangsur-angsur, material yang ada akan berkurang jumlahnya, artinya material tersebut sebagian atau seluruhnya digunakan sebagai sumber nutrisi oleh mikroorganisme. Pada kajian ini diungkapkan berbagai teknik karakterisasi dalam biodegradasi polimer. Teknik karakterisasi yang akan dibahas meliputi analisis kuantitatif melalui teknik penimbangan, analisis gugus fungsi dengan Fourier Transform Infra Red, sifat termal melalui teknik Differential Thermal Analysis (DTA), kristalinitas melalui teknik X-Ray Diffraction (XRD), serta pengamatan permukaan dengan teknik Scanning Electron Microscopy (SEM). Berdasarkan hasil analisis kuantitatif selama biodegradasi dapat ditentukan kehilangan massa dan laju kehilangan massa (biodegradabilitas) polimer sehingga dapat diketahui kemudahan biodegradasi dari polimer. Analisis gugus fungsi dengan teknik Fourier Transform Infra Red dapat menunjukkan perubahan gugus fungsi akibat biodegradasi. Analisis sifat termal dapat menunjukkan perubahan sifat termal meliputi perubahan transisi gelas atau temperatur leleh serta temperatur degradasi akibat biodegradasi. Analisis kristalinitas dapat menunjukkan perubahan keteraturan struktur polimer akibat biodegradasi. Pengamatan permukaan dengan alat SEM dapat menunjukkan kerusakan permukaan akibat biodegradasi.

Kata kunci : biodegradasi, karakterisasi, kristalinitas, permukaan, sifat termal.

PENDAHULUAN

Tahun-tahun terakhir ini muncul sejumlah kemajuan penting dalam kimia polimer, seperti adanya polimer yang memiliki kestabilan termal sangat tinggi terutama dipakai dalam aplikasi aerospace berkinerja tinggi. Plastik-plastik teknik yang dirancang untuk menggantikan logam. Polimer ramah lingkungan (dapat dibiodegradasi) telah berhasil disintesis dengan menggunakan komonomer berupa lignoselulosa. Berbagai bahan dari tumbuhan seperti minyak sawit kasar, minyak kedelai, minyak jarak, lignin kraft, kopi, dan sakarida, serta amilosa dapat dibuat menjadi poliuretan ramah lingkungan lewat pencampuran dengan polioksietilen glikol (PEG) atau polioksipropilen glikol dan direaksikan dengan metilena-4,4'-difenildiisosiyanat. Poliuretan yang dibuat dari bahan alam memiliki struktur kimia yang bergantung pada komponen bahan alamnya. Busa poliuretan hasil sintesis dari molase, menunjukkan kemudahan biodegradasi di antara kayu beech (*Fagus sieboldi*) dan kayu cryptomeria (*Cryptomeria japonica*) (Hatakeyama, 1998). Owen (1995) telah berhasil mensintesis poliuretan yang dapat dibiodegradasi dengan cara mereaksikan poli-D,L-asam laktat dengan polimetilen polifenil poliisosiyanat. Kehilangan massa poliuretan terutama disebabkan oleh terbiodegradasinya bagian PEG dan polioliol asam laktat.

Sejalan dengan pemakaian polimer yang terus meningkat mengingat keunggulan sifat dan pemakaiannya cukup praktis ternyata semakin meningkat pula limbah polimer yang dihasilkan terhadap lingkungan. Apalagi sejumlah penelitian telah dikembangkan untuk membuat bahan polimer yang tahan

terhadap proses degradasi di lingkungan, seperti fotodegradasi dan biodegradasi. Hal ini apabila tidak segera ditanggulangi akan membahayakan kelestarian lingkungan hidup. Cara penanggulangan yang dianggap paling bersahabat dengan lingkungan dan tidak menimbulkan masalah baru adalah dengan proses biodegradasi, namun kebanyakan polimer yang digunakan secara besar-besaran pada saat ini tidak terbiodegradasi. Oleh karena itu, penanggulangan limbah secara biodegradasi akan terwujud apabila polimer-polimer baru yang digunakan mudah terbiodegradasi.

Untuk mendapatkan poliuretan yang mudah terbiodegradasi dapat dilakukan dengan menggunakan amilosa dan hasil hidrolisisnya. Amilosa dan hasil hidrolisis amilosa masing-masing memiliki gugus hidroksil yang cukup reaktif sehingga dapat berfungsi sebagai sumber poliol yang kompetitif untuk bereaksi dengan senyawa isosianat membentuk poliuretan. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa polimer poliuretan sintetik yang sukar terbiodegradasi apabila mengandung monomer alam atau komponen utamanya berupa bahan alam ternyata dapat terbiodegradasi.

Dengan adanya amilosa dalam sintesis poliuretan ternyata dapat menurunkan derajat kristalinitas produk poliuretan. Dengan kata lain penambahan amilosa dapat meningkatkan jumlah daerah amorf poliuretan. Dengan bertambahnya jumlah amorf diharapkan akses mikroorganisme terhadap poliuretan dalam proses biodegradasi akan meningkat pula.

Polimer alam, seperti halnya lignin dan polisakarida, dapat terdegradasi menjadi molekul-molekul yang lebih sederhana. Produk degradasi ini selanjutnya dapat dipergunakan oleh organisme hidup sebagai sumber energi atau untuk mensintesis senyawa-senyawa baru (termasuk biopolimer) (Schnabel, 1981). Mekanisme umum degradasi polimer menjadi molekul yang sederhana dapat dijelaskan secara kimiawi. Organisme hidup mempunyai kemampuan untuk memproduksi bermacam-macam enzim yang dapat menghancurkan struktur biopolimer. Kerja suatu enzim sebagai katalisator dalam merombak struktur polimer merupakan kerja yang spesifik, artinya suatu enzim tertentu hanya memiliki kemampuan untuk mengkatalisis suatu reaksi kimia tertentu pula.

Biodegradasi material organik, terutama polimer alam seperti selulosa, lignin, atau karet alam, dapat terjadi akibat serangan secara mikrobiologis terhadap material tersebut. Mikroorganisme mempunyai kemampuan memproduksi bermacam-macam enzim yang dapat bereaksi dengan polimer alam. Reaksi enzimatik terhadap polimer merupakan suatu proses kimiawi dimana mikroorganisme memperoleh sumber makanan dari polimer. Fenomena biodegradasi terhadap material organik, termasuk polimer, terlihat dari fakta bahwa dalam siklus makanan di alam, secara langsung atau tidak, cepat atau berangsur-angsur, material yang ada akan berkurang jumlahnya, artinya material inilah yang sebagian atau seluruhnya digunakan sebagai sumber nutrisi oleh mikroorganisme. Studi tentang biodegradasi dapat dilakukan dalam lingkungan yang sesungguhnya; yaitu dipendam dalam tanah, atau dilakukan dengan metode simulasi. Metode simulasi dapat dilakukan dengan menggunakan mikroorganisme campuran atau dengan mikroorganisme tertentu yang telah diketahui jenisnya. Hasil yang ada menunjukkan bahwa laju biodegradasi oleh mikroorganisme campuran umumnya berlangsung lebih cepat, namun sukar untuk memperkirakan mekanisme degradasi yang terjadi. Pada tulisan ini akan dibahas berbagai karakterisasi yang perlu dilakukan untuk menentukan kemudahan biodegradasi dari polimer dan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi, sifat termal, dan kristalinitas akibat biodegradasi serta pengamatan kerusakan permukaan akibat biodegradasi. Kemudahan biodegradasi dapat dilakukan melalui analisis kuantitatif dengan teknik gravimetri. Perubahan gugus fungsi, sifat termal, dan kristalinitas masing-

masing dapat ditentukan melalui teknik Fourier Transform Infra Red (FTIR), Differential Thermal Analysis (DTA), dan X-Ray Diffraction (XRD). Kerusakan permukaan akibat biodegradasi dapat dilakukan dengan teknik *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

PEMBAHASAN

1. Kehilangan Massa dan Degradabilitas Polimer

Metode kuantitatif yang paling sederhana untuk mengkarakterisasi terjadinya biodegradasi suatu polimer adalah dengan menentukan kehilangan massa dan degradabilitas material polimer (Owen, 1995; Hatakeyama, 1995). Kehilangan massa ditentukan dengan cara menimbang massa polimer sebelum dan setelah proses biodegradasi selama selang waktu tertentu. Kehilangan massa sesungguhnya dapat dihitung dengan memasukkan faktor koreksi massa pada massa sampel awal sebelum proses biodegradasi, yang dapat diperoleh dari kontrol negatif. Untuk mengetahui massa sampel awal sesungguhnya sebelum mengalami proses biodegradasi, maka perlu disiapkan suatu kontrol negatif bagi polimer yang akan dibiodegradasi. Kontrol negatif adalah sampel polimer yang diinkubasi selama waktu tertentu tanpa adanya mikroorganisme. Massa sampel polimer sesungguhnya sebelum mengalami proses biodegradasi dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$W_i = W_{is} - (W_{is} \times C) \quad (1)$$

dimana : W_i = massa sampel sesungguhnya sebelum dibiodegradasi

W_{is} = massa sampel awal tanpa faktor koreksi massa

C = faktor koreksi massa, diperoleh dari kontrol negatif yang dapat dihitung dengan persamaan (2).

$$C(\%) = \frac{W_{ic} - W_{fc}}{W_{ic}} \times 100\% \quad (2)$$

dimana : W_{ic} = massa sampel sebelum proses biodegradasi

W_{fc} = massa sampel sesudah proses biodegradasi

Persen kehilangan massa sesungguhnya dapat ditentukan dengan persamaan (3).

$$\text{kehilangan massa} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (3)$$

dimana : W_i = massa sampel sesungguhnya sebelum proses biodegradasi

W_f = massa sampel sesudah proses biodegradasi

Degradabilitas dapat menunjukkan kemudahan terdegradasinya suatu bahan polimer, dapat ditentukan dengan cara membagi kehilangan massa terhadap waktu biodegradasi seperti ditunjukkan pada persamaan (4).

$$\text{Degradabilitas} = \text{kehilangan massa} / \text{waktu} \quad (4)$$

Hasil perhitungan kehilangan massa dan degradabilitas poliuretan hasil sintesis dari minyak kedelai (SBO)-PEG400-MDI selama proses biodegradasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kehilangan massa dan degradabilitas poliuretan hasil sintesis dari SBO-PEG400-MDI (Eli Rohaeti dan Senam, 2008)

No	Lama Inkubasi (Hari)	Kehilangan Massa (%)	Degradabilitas (mg/hari)
1	5	1,5800	0,1142
2	10	3,2900	0,0611
3	15	4,9600	0,0400
4	20	6,8600	0,0334
5	25	7,6400	0,0133
6	30	7,6400	0,0000

Kehilangan massa poliuretan meningkat dengan meningkatnya waktu biodegradasi sampai tidak mengalami perubahan (tetap). Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan semakin lamanya biodegradasi semakin banyak bagian molekul poliuretan yang sudah diserang oleh mikroorganisme. Apabila dibandingkan dengan degradabilitas poliuretan menunjukkan degradabilitas menurun dengan semakin meningkatnya lama biodegradasi. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa penurunan laju biodegradasi dapat disebabkan oleh bagian molekul polimer yang dapat diserang oleh mikroorganisme semakin sedikit karena bagian permukaan polimer telah jenuh tertutupi oleh produk biodegradasi. Selain itu, juga dapat disebabkan oleh gugus fungsi yang dapat diserang atau dihidrolisis oleh enzim yang berasal dari mikroorganisme semakin sedikit. Laju biodegradasi optimum pada hari ke-5. Hal tersebut dapat disebabkan oleh karena pada awal biodegradasi masih banyak terkandung gugus fungsi dalam polimer yang dapat berperan sebagai substrat dan menjadi sumber nutrisi bagi mikroorganisme.

2. Analisis Gugus Fungsi Polimer dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared*)

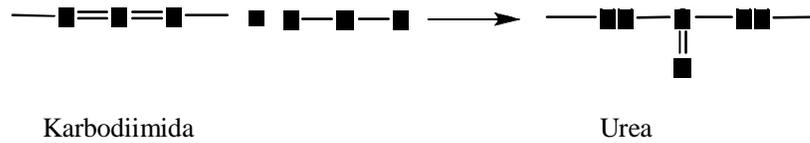
Jika seberkas sinar inframerah dilewatkan pada suatu sampel polimer, maka beberapa frekuensinya diabsorpsi oleh molekul sedangkan frekuensi lainnya ditransmisikan. Transisi yang terlibat pada absorpsi IR berhubungan dengan perubahan vibrasi yang terjadi pada molekul. Jenis ikatan yang ada dalam molekul polimer (C-C, C=C, C-O, C=O) memiliki frekuensi vibrasi yang berbeda. Adanya ikatan tersebut dalam molekul polimer dapat diketahui melalui identifikasi frekuensi karakteristik sebagai puncak absorpsi dalam spektrum IR. (Eli Rohaeti, 2005)

Dengan membandingkan spektrum FTIR dari poliuretan yang tidak dibiodegradasi dengan poliuretan yang dibiodegradasi menunjukkan bahwa untuk poliuretan yang mengalami proses biodegradasi terjadi penghilangan puncak serapan pada daerah bilangan gelombang sekitar 1700 dan 1720 cm^{-1} yang merupakan ciri khas untuk suatu poliuretan dalam hal ini gugus uretan –NHCOO. Hilangnya puncak serapan gugus uretan menjadi petunjuk bahwa gugus fungsi tersebut merupakan sumber nutrisi bagi mikroorganisme.

Antara spektrum FTIR poliuretan yang diinkubasi dalam lumpur aktif dengan yang diinkubasi dalam *P.aeruginosa* menunjukkan pola yang mirip yaitu hilangnya puncak serapan gugus fungsi uretan (Eli Rohaeti dkk, 2005). Ini menjadi petunjuk bahwa untuk kedua jenis mikroorganisme yang dipilih, gugus fungsi uretan merupakan sumber nutrisi bagi keduanya. Namun apabila ditinjau dari data kehilangan massa poliuretan yang diinkubasi dalam lumpur aktif dengan yang diinkubasi dalam *P. aeruginosa* menunjukkan bahwa untuk poliuretan yang diinkubasi dalam lumpur aktif menghasilkan data kehilangan massa total lebih tinggi daripada poliuretan yang diinkubasi dalam *P.aeruginosa*. Kedua data tersebut menjadi petunjuk bahwa setelah semua gugus fungsi habis dimakan mikroorganisme selanjutnya unit ulang –CH₂CH₂O- yang berasal dari bagian polietilen glikol (PEG) dapat pula menjadi sumber nutrisi bagi mikroorganisme.

Spektrum FTIR poliuretan dari PEG 400 dan MDI setelah biodegradasi menunjukkan serapan hampir sama dengan serapan sebelum biodegradasi namun terjadi sedikit perubahan intensitas serapan. Serapan –NH di daerah 3000 cm^{-1} - 3500 cm^{-1} mengalami penurunan intensitas dan serapan –C-O uretan di daerah 1020,37 cm^{-1} berkurang sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah gugus uretan dalam poliuretan sedikit berkurang. Serapan –N=C=N-/karbodiimida di daerah 2130,14 cm^{-1} berkurang dibandingkan dengan sebelum biodegradasi, serapan –N=C=O di daerah 2234,63 cm^{-1} tetap ada dengan intensitas kecil, serapan CO₂ di daerah 2359,95 cm^{-1} bertambah setelah biodegradasi (Eli Rohaeti dan Senam, 2008). Gugus –N=C=N- dapat bereaksi

dengan air dari udara maupun media melalui reaksi hidrolisis menjadi gugus urea seperti pada Gambar 1.



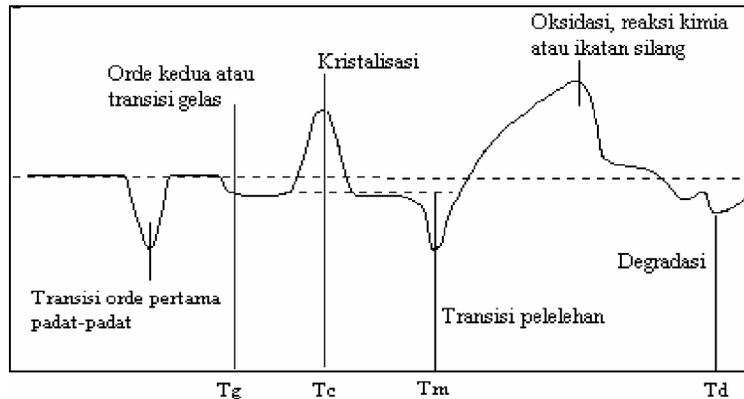
Gambar 1. Reaksi gugus karbodiimida dengan air menjadi gugus urea

Adanya gugus urea menambah kerapatan di permukaan poliuretan, sehingga CO_2 semakin tertahan di dalam poliuretan dan hanya sedikit yang lepas ke udara. Selain itu penguraian gugus uretan di dalam poliuretan menyebabkan penambahan CO_2 di dalam poliuretan. Kenyataan ini menyebabkan serapan CO_2 dari poliuretan bertambah. Penambahan serapan CO_2 bisa disebabkan juga pada saat analisis sampel dengan spektrofotometer FTIR masih terdapat gas CO_2 yang dihasilkan dari reaksi gugus-gugus isosianat dari MDI yang berlebih di permukaan sampel poliuretan.

3. Analisis Sifat Termal Polimer dengan DTA (*Differential Thermal Analysis*)

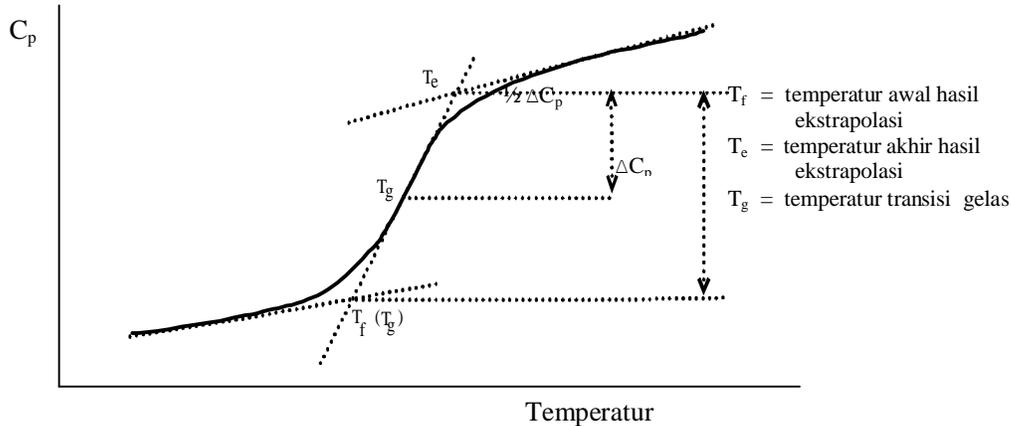
DTA merupakan teknik analisis termal dengan menganalisis perbedaan temperatur (ΔT) antara sampel dan bahan pembanding terhadap waktu atau temperatur sampel selama pemanasan (Eli Rohaeti, 2005). Teknik ini umumnya digunakan untuk mengetahui temperatur transisi gelas, T_g , temperatur leleh, T_m , serta temperatur dekomposisi, T_d . Secara skematik termogram DTA untuk polimer semikristalin ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Termogram DTA untuk polimer semikristalin



Temperatur transisi gelas dapat ditentukan dari Gambar 2 dengan menggunakan metode yang diperlihatkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3, temperatur transisi gelas ditunjukkan oleh titik pada $\frac{1}{2} \Delta C_p$ hasil ekstrapolasi dari kurva T_g . Namun untuk kebanyakan aplikasi, temperatur awal hasil ekstrapolasi (T_f) lebih berarti sehingga dinyatakan sebagai T_g menggantikan titik pada $\frac{1}{2} \Delta C_p$ hasil ekstrapolasi dari kurva T_g .

Temperatur transisi gelas merupakan kisaran temperatur yang sempit, dibawah temperatur tersebut polimer bersifat *glassy* dan diatasnya bersifat *rubbery*. Polimer dapat bersifat *glassy* atau *rubbery* tergantung pada keadaan di atas atau di bawah temperatur transisi gelas. Pada umumnya temperatur transisi gelas polimer tergantung pada volume bebas polimer, gaya tarik antar molekul, mobilitas internal rantai, dan kekakuan rantai polimer.



Gambar 3. Penentuan temperatur transisi gelas

Dengan membandingkan termogram antara poliuretan yang tidak dibiodegradasi dengan yang dibiodegradasi menunjukkan bahwa poliuretan yang mengalami proses biodegradasi memiliki temperatur transisi gelas dan temperatur dekomposisi dibandingkan dengan poliuretan yang tidak dibiodegradasi. Hal ini menjadi petunjuk bahwa setelah proses biodegradasi poliuretan mengalami perubahan struktur.

4. Analisis Kristalinitas Polimer dengan Teknik XRD (*X-Ray Diffraction*)

Metode difraksi sinar-X adalah salah satu cara untuk mempelajari keteraturan atom atau molekul dalam suatu struktur tertentu. Jika struktur atom atau molekul tertata secara teratur membentuk kisi, maka radiasi elektromagnetik pada kondisi eksperimen tertentu akan mengalami penguatan. Pengetahuan tentang kondisi eksperimen itu dapat memberikan informasi yang sangat berharga tentang penataan atom atau molekul dalam suatu struktur.

Sinar-X dapat terbentuk bilamana suatu logam sasaran ditembak dengan berkas elektron berenergi tinggi. Dalam eksperimen digunakan sinar-X yang monokromatis. Kristal akan memberikan hamburan yang kuat jika arah bidang kristal terhadap berkas sinar-X (sudut θ) memenuhi persamaan Bragg, seperti ditunjukkan dalam persamaan (5).

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (5)$$

dimana : d = jarak antar bidang dalam kristal

θ = sudut deviasi

n = orde (0,1,2,3,.....)

λ = panjang gelombang

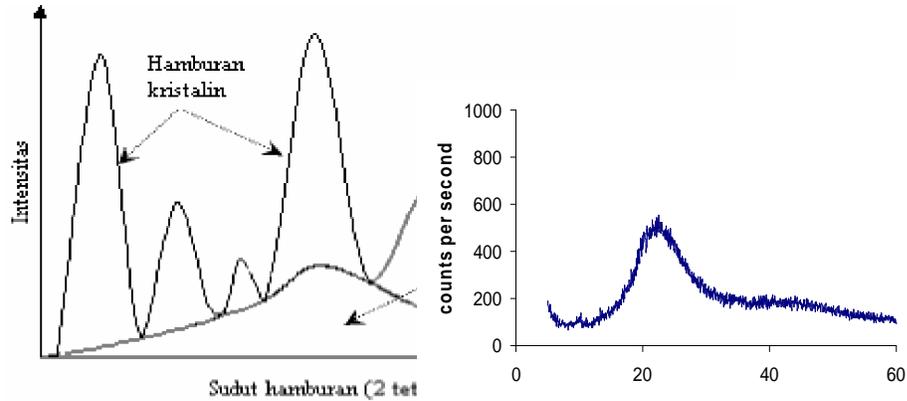
Difraksi sinar-X dapat memberikan informasi tentang struktur polimer, termasuk tentang keadaan amorf dan kristalin polimer. Polimer dapat mengandung daerah kristalin yang secara acak bercampur dengan daerah amorf. Difraktogram sinar-X polimer kristalin menghasilkan puncak-puncak yang tajam, sedangkan polimer amorf cenderung menghasilkan puncak yang melebar. Pola hamburan sinar-X juga dapat memberikan informasi tentang konfigurasi rantai dalam kristalit, perkiraan ukuran kristalit, dan perbandingan daerah kristalin dengan daerah amorf (derajat kristalinitas) dalam sampel polimer (Eli Rohaeti dan Senam, 2008).

Pada umumnya bahan polimer bersifat semikristalin, yang berarti memiliki bagian amorf maupun bagian kristalin. Baik bagian amorf maupun bagian kristalin dapat menunjukkan intensitas hamburan yang spesifik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

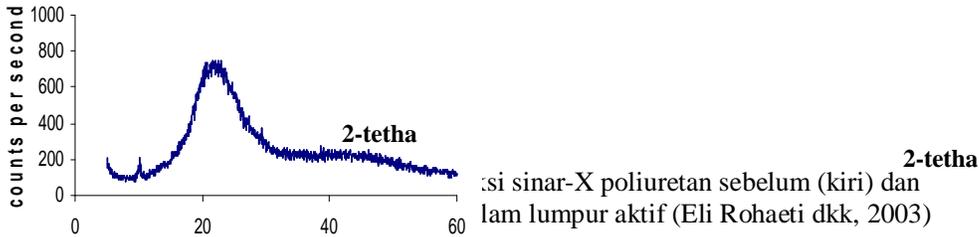
Penentuan derajat kristalinitas dengan difraksi sinar-X dapat dilakukan atas dasar asumsi bahwa daerah kristalin dan amorf terdapat dalam substansi yang sama dan memberikan kekuatan hamburan yang ekuivalen. Derajat kristalinitas (X_c) ditentukan menggunakan persamaan (5).

$$X_c(\%) = \frac{\text{Luas daerah kristalin}}{\text{Luas daerah (kristalin + amorf)}} \times 100\% \quad (5)$$

Gambar 4. Difraktogram polimer semikristalin
 Pada Gambar 5 terlihat difraktogram difraksi sinar-X untuk poliuretan



berasal dari 15% amilosa – PEG400 – MDI telah mengalami proses biodegradasi dalam lumpur aktif dengan media LB cair penggantian media tiap 2 hari.



Hasil penentuan derajat kristalinitas menunjukkan bahwa poliuretan yang mengalami proses biodegradasi memiliki derajat kristalinitas lebih rendah dibandingkan dengan poliuretan yang tidak dibiodegradasi. Hal ini berarti proses biodegradasi dapat menurunkan derajat kristalinitas poliuretan. Keadaan tersebut dapat menjadi petunjuk bahwa akses mikroorganisme terhadap molekul polimer poliuretan terutama terjadi pada daerah/bagian amorf dari molekul poliuretan. Dengan demikian akses mikroorganisme lebih mudah terjadi pada bagian amorf dibandingkan pada bagian kristalin Hal ini karena bagian amorf dari molekul polimer merupakan bagian yang kurang teratur sedangkan bagian kristalin merupakan bagian yang lebih teratur. Dalam proses biodegradasi, mikroorganisme lebih mudah menyerang bagian yang kurang teratur atau bagian amorf daripada menyerang bagian kristalin akibatnya terjadi penambahan jumlah bagian amorf atau penurunan derajat kristalinitas molekul poliuretan.

Berdasarkan difraktogram XRD poliuretan dari PEG 400 – MDI (Eli Rohaeti dan Senam, 2008) sebelum biodegradasi memiliki derajat kristalinitas sebesar 33,799 % dan sesudah biodegradasi menjadi 31,506 %. Dengan kata lain proses biodegradasi dapat menurunkan derajat kristalinitas. Penurunan

derajat kristalinitas tidak hanya disebabkan oleh terjadinya penurunan intensitas pada daerah kristalin tetapi juga pada daerah amorf. Pernyataan tersebut didukung oleh data hasil perhitungan perubahan intensitas daerah kristalin dan amorf diperoleh bahwa terjadi penurunan intensitas daerah kristalin dan amorf sesudah biodegradasi.

Setelah proses biodegradasi masing-masing bagian kristalin dan amorf mengalami penurunan intensitas. Hal ini menjadi bukti bahwa bagian amorf dan kristalin diserang dan diuraikan oleh enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme. Poliuretan dari PEG 400 - MDI mengalami penurunan intensitas paling banyak pada daerah amorf. Dengan demikian enzim lebih banyak membiodegradasi bagian amorf daripada kristalin, hal tersebut dapat disebabkan bagian amorf lebih banyak mengandung gugus-gugus fungsi yang dapat berperan sebagai substrat daripada bagian kristalin.

5. Pengamatan Permukaan Polimer dengan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

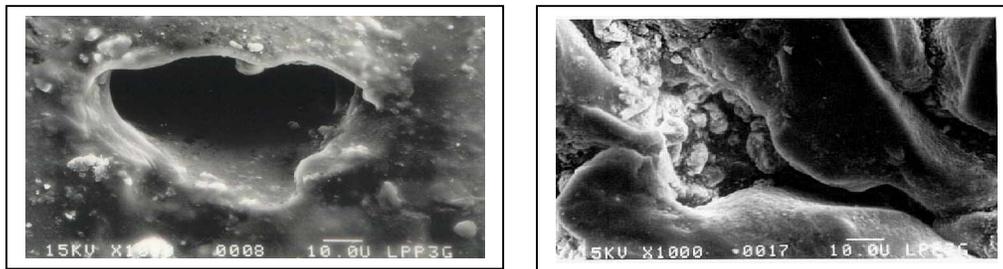
SEM (*Scanning Electron Microscopy*) merupakan suatu metode untuk membentuk bayangan daerah mikroskopis permukaan sampel. Suatu berkas elektron berdiameter antara 5 hingga 10 nm dilewatkan sepanjang spesimen sehingga terjadi interaksi antara berkas elektron dengan spesimen menghasilkan beberapa fenomena berupa pemantulan elektron berenergi tinggi, pembentukan elektron sekunder berenergi rendah, penyerapan elektron, pembentukan sinar-X, atau pembentukan sinar tampak (*cathodoluminescence*). Setiap sinyal yang terjadi dapat dimonitor oleh suatu detektor.

Alat SEM terdiri atas bagian-bagian, yaitu sumber elektron (*electron gun*) berupa filamen kawat wolfram, alat untuk mencacah (*scanner*) titik-titik sepanjang spesimen berupa sistem lensa elektromagnetik dan foil pencacah elektromagnetik, seperangkat lensa elektromagnetik untuk memfokuskan elektron dari sumber menjadi titik kecil di atas spesimen, sistem detektor, serta sistem layar.

Jika seberkas elektron ditembakkan pada permukaan suatu spesimen, maka sebagian dari elektron itu akan dipantulkan kembali dan sebagian lagi akan diteruskan. Jika permukaan spesimen tidak rata, misalnya ada lekukan, lipatan, retakan, atau lubang-lubang, maka tiap-tiap bagian di permukaan itu akan memantulkan elektron dengan jumlah dan arah yang berbeda. Jika elektron-elektron yang dipantulkan oleh masing-masing bagian permukaan itu ditangkap oleh detektor dan diteruskan ke sistem layar, maka akan diperoleh gambar yang sesuai dengan keadaan permukaan spesimen. Jadi gambar yang diperoleh merupakan bayangan dari pantulan elektron. Bila digunakan potensial pemercepat yang relatif rendah akan diperoleh gambar yang jelas.

Bahan yang akan dikarakterisasi dengan teknik SEM tentulah bahan yang harus dapat berinteraksi dengan elektron. Suatu bahan dapat berinteraksi dengan elektron bila bahan tersebut bersifat konduktor. Untuk bahan yang tidak bersifat konduktor, maka karakterisasi dengan teknik SEM dapat dilakukan bila bahan tersebut dilapisi terlebih dahulu dengan bahan konduktor (misalnya emas, perak) dengan tebal sekitar 100 – 500 angstrom (Vaughan, 1993). Pelapisan bahan dapat dilakukan dengan menempatkan spesimen dalam *evaporator* dengan kevakuman yang tinggi. Bahan pelapis dipanaskan sehingga menguap dan selanjutnya uap akan melapisi permukaan spesimen.

Pada Gambar 6 ditunjukkan morfologi permukaan poliuretan yang berasal dari 15% amilosa – PEG400 – MDI telah mengalami proses biodegradasi dalam *P.aeruginosa* dan lumpur aktif dengan media LB cair penggantian media tiap 2 hari. (Eli Rohaeti dkk, 2002, 2003)



Gambar 6. Pengaruh biodegradasi dengan *P.aeruginosa* (kiri) dan dengan lumpur aktif (kanan) terhadap morfologi permukaan poliuretan pada perbesaran 1000x

Morfologi permukaan poliuretan berasal dari 15% amilosa – PEG400 – MDI dan telah mengalami proses biodegradasi dalam lumpur aktif dengan media LB cair penggantian media tiap 2 hari menghasilkan lubang-lubang permukaan akibat proses biodegradasi yang menunjukkan kerusakan permukaan begitu pula poliuretan yang diinkubasi dalam *P.aeruginosa*. Hasil SEM tersebut dapat pula menjadi bukti pendukung bahwa mikroorganisme dalam lumpur aktif dan *P.aeruginosa* dapat membiodegradasi poliuretan.

PENUTUP

Berdasarkan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- ü Kemudahan biodegradasi polimer dapat diketahui melalui penentuan kehilangan massa dan degradabilitas selama biodegradasi
- ü Perubahan gugus fungsi dalam polimer akibat biodegradasi dapat ditentukan melalui teknik FTIR dan perubahan sifat termal dalam polimer akibat biodegradasi dapat diketahui melalui teknik DTA
- ü Penyerangan mikroorganisme ke dalam daerah kristalin atau amorf dalam biodegradasi polimer dapat diketahui melalui uji kristalinitas dengan teknik XRD
- ü Kerusakan permukaan polimer akibat biodegradasi dapat ditentukan melalui pengamatan permukaan dengan teknik SEM

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Depdiknas atas dana penelitian yang diberikan sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Pekerjaan Penelitian No. 018/SP2H/PP/DP2M/III/2008 juga kepada para mahasiswa yang terlibat dan telah membantu kelancaran penelitian sintesis dan biodegradasi poliuretan.

DAFTAR PUSTAKA

- Eli Rohaeti, N.M.Surdia, C.L.Radiman, E.Ratnaningsih (2002), Biodegradasi poliuretan hasil sintesis dari amilosa - PEG400 - MDI menggunakan lumpur aktif, *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, Bandung, 311-317.
- Eli Rohaeti, N.M.Surdia, C.L.Radiman, E.Ratnaningsih (2002), Sintesis poliuretan dari amilosa - PEG400 - MDI dan biodegradasinya menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*, *Prosiding Seminar Kimia Bersama UKM-ITB kelima*, Melaka Malaysia, 329-336.

- Eli Rohaeti, N.M.Surdia, C.L.Radiman, E.Ratnaningsih (2003), Pengaruh variasi komposisi amilosa terhadap kemudahan biodegradasi poliuretan, *Jurnal Matematika & Sains*, **Volume 8 No.4**, 157-161.
- Eli Rohaeti, N.M.Surdia, C.L.Radiman, E.Ratnaningsih (2004), Pengaruh dua macam perlakuan mikroorganisme terhadap kemudahan degradasi poliuretan hasil sintesis dari monomer Polietilen Glikol berat molekul 400 dengan Metilen-4,4'-difenildiisosiyanat, *Proc.ITB Sains & Tek.*, **Volume 36A No.1**, 1-
- Eli Rohaeti (2005), Kajian tentang sintesis poliuretan dan karakterisasinya, *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA*, FMIPA UNY, Yogyakarta, K1 – K9.
- Eli Rohaeti dan Senam (2008), Efek minyak nabati pada biodegradasi poliuretan hasil sintesis dari polietilenglikol 400 dan metilen-4,4'-difenildiisosiyanat, *Laporan Penelitian*, Dikti Depdiknas, Jakarta.
- Hatakeyama, H., S. Hirose, T. Hatakeyama, K. Nakamura, K. Kobashigawa, N. Morohoshi (1995), Biodegradable Polyurethanes from Plant Component, *J. Pure Applied Chemistry*, **A32(4)**, 743 – 750.
- Hatakeyama, H. (1998), *Biodegradable Polyurethanes from Natural Resources*, Fukui Institute, Japan.
- Nicholson, J. W. (1997), Polymers and the Environment, dalam *The Chemistry of Polymers*, 2nd ed., The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 173.
- Owen, S., M. Masaoka, R. Kawamura, and N. Sakota (1995), Biodegradation of Poly-D,L-Lactic Acid Polyurethanes, dalam *Degradable Polymers, Recycling, and Plastics Waste Management*, editor : Ann-Christine Albertsson and Samuel J. Huang, Marcel Dekker Inc., New York, 81-85.
- Schnabel, W. (1981), Biodegradation, dalam *Polymer Degradation, Principles and Practical Applications*, Macmillan Publishing Co, Inc., New York, 154 – 176.