

**BIODEGRADASI POLIMER HASIL SINTESIS DARI
POLIOKSJETILEN GLIKOL DAN METILEN-4,4'-
DIFENILDIISOSIANAT SEBAGAI SUMBER BELAJAR PADA
PERKULIAHAN KIMIA FISIKA POLIMER**

Eli Rohaeti

Jurdik Kimia FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta

rohaetieli@yahoo.com

ABSTRAK

Perkuliahan Kimia Fisika Polimer umumnya dilaksanakan melalui pembelajaran di dalam kelas tanpa disertai dan didukung dengan metode laboratorium. Dengan demikian materi polimer khususnya penanaman konsep biodegradasi polimer akan menjemukan, tidak menarik untuk dipelajari, serta mudah dilupakan. Kondisi tersebut akan sangat mempengaruhi proses dan hasil pembelajaran biodegradasi polimer. Penggunaan media laboratorium sebagai sumber belajar diharapkan mampu meningkatkan proses dan hasil pembelajaran biodegradasi polimer. Sebagai upaya mengembangkan sumber belajar biodegradasi polimer dapat memanfaatkan bahan kimia yang ada di pasaran, yaitu polioksietilen glikol massa molekul dan metilen-4,4'-difenildiisosiyanat (MDI) sebagai bahan dasar untuk sintesis poliuretan. Pada kajian ini diungkapkan pemanfaatan biodegradasi poliuretan hasil sintesis dari PEG dan MDI sebagai alternatif sumber belajar biodegradasi polimer. Dengan memanfaatkan sumber belajar tersebut diharapkan mahasiswa akan memahami secara nyata pengertian biodegradasi polimer, teknik karakterisasi dalam biodegradasi polimer, serta karakter polimer akibat biodegradasi.

Kata kunci: biodegradasi, laboratorium, pembelajaran, polimer, sumber belajar.

PENDAHULUAN

Kimia polimer sebagai salah satu bagian ilmu terapan dari sains berkaitan dengan cara mencari tahu dan memahami tentang alam semesta secara sistematis serta mengaplikasikan ilmu yang sudah diperolehnya dalam menghadapi dan memenuhi kebutuhan hidup, sehingga dalam pembelajaran kimia khususnya kimia polimer bukan hanya penguasaan kumpulan pengetahuan berupa fakta-fakta, konsep-konsep, dan prinsip-prinsip saja tetapi juga merupakan suatu proses penemuan. Pembelajaran kimia polimer diharapkan dapat menjadi wahana bagi mahasiswa untuk mempelajari diri sendiri dan alam sekitarnya serta mengaplikasikan ilmu kimia polimer tersebut.

Pembelajaran kimia polimer sebagai aplikasi dari pembelajaran sains menekankan pada pemberian pengalaman langsung, sehingga mahasiswa perlu difasilitasi dan dibantu untuk mengembangkan sejumlah keterampilan proses supaya mereka mampu menjelajahi dan memahami alam sekitar. Keterampilan proses tersebut meliputi keterampilan mengamati dengan seluruh indera, mengajukan hipotesis, menggunakan alat dan bahan secara benar dengan selalu mempertimbangkan keselamatan kerja, menggolongkan, menafsirkan data dan mengkomunikasikan hasil temuan secara beragam, menggali dan memilih informasifaktual yang relevan untuk menguji gagasan-gagasan atau memecahkan masalah sehari-hari.

Seorang pengajar dituntut untuk mengembangkan kemampuan profesionalnya dengan melakukan percobaan yang menunjang proses pembelajaran. Pengajar dapat melakukan pembelajaran kimia polimer yang dapat memberikan kesempatan kepada para mahasiswanya untuk mengalami perubahan melalui proses mental berupa pengembangan keterampilan intelektual, sikap ilmiah, dan metode ilmiah.

Umumnya dalam mempelajari materi Kimia Polimer baik itu Kimia Fisika Polimer maupun Kimia Organik Polimer dengan bahasan biodegradasi polimer, pengajar cenderung menyampaikan konsep-konsep yang sudah jadi tanpa melibatkan mahasiswa terhadap permasalahan dan objek langsung yang dipelajari. Padahal sebagaimana diungkapkan oleh Suharsimi Arikunto (1985:25) dalam pelaksanaan pembelajaran yang dipentingkan bukan hasilnya tetapi harus mengetahui proses yang dilakukan. Mahasiswa dituntut memahami bagaimana langkah mengamati, membandingkan, menyusun rencana, menarik kesimpulan, dan bagaimana mengkomunikasikan hasil percobaannya kepada orang lain.

Pada perkuliahan di perguruan tinggi khususnya mata kuliah Kimia Polimer pada bahasan biodegradasi polimer jarang dijumpai pemanfaatan sumber belajar hasil percobaan biodegradasi polimer tersebut, pada umumnya masih terbatas pada sumber belajar berupa buku-buku. Oleh karena itu, para pengajar kimia khususnya kimia polimer harus dapat menggunakan sumber belajar yang terdapat di lapangan atau peristiwa alam untuk meningkatkan pembelajaran. Djohar (1984:2) mengungkapkan bahwa sumber belajar merupakan semua objek yang dapat digunakan untuk memperoleh pengalaman belajar tentang permasalahan tertentu.

Pada kajian ini akan diungkap salah satu objek dan persoalan kimia polimer, yaitu biodegradasi polimer hasil sintesis dari polioksietilen glikol (PEG) dan metilen-4,4'-difenildiisosiyanat (MDI) sebagai sumber belajar pada perkuliahan kimia fisika polimer. Sejauh ini materi kimia polimer khususnya biodegradasi polimer hanya disampaikan dengan metode ceramah, sehingga mahasiswa dapat menjelaskan pengertian biodegradasi polimer, karakteristik polimer, dan beberapa contoh polimer yang dapat dibiodegradasi serta karakter polimer akibat biodegradasi sebagai konsep dan pengertian yang bersifat hapalan.

Pembelajaran kimia polimer untuk bahasan biodegradasi polimer dengan memanfaatkan media laboratorium belum populer dilakukan di beberapa perguruan tinggi. Selain karena keterbatasan fasilitas laboratorium dan dana, juga keterbatasan jumlah jam untuk dilakukan metode laboratorium, umumnya disebabkan oleh pandangan yang salah bahwa bahasan biodegradasi polimer merupakan materi yang tidak penting dibandingkan konsep-konsep kimia lainnya. Kegiatan eksperimen sesungguhnya tidak selalu harus berlangsung di laboratorium dengan menggunakan alat dan bahan yang mahal. Eksperimen dapat dilakukan dengan bahan dan alat yang murah. Pada sintesis dan biodegradasi polimer dari PEG dan MDI, digunakan bahan dan alat yang murah serta peralatan gelas umum yang mudah didapatkan.

Polimer hasil sintesis dari PEG dan MDI dikenal sebagai poliuretan, hal tersebut karena dalam rantai utama polimer hasil sintesis terdapat gugus uretan yang merupakan karakter khas suatu poliuretan (Eli Rohaeti dkk, 2007:1). Poliuretan dapat dijumpai dalam berbagai bentuk seperti bentuk lembaran, busa, perekat, elastomer, dan lain lain, hal tersebut karena poliuretan memiliki berbagai gugus fungsi selain gugus fungsi uretan, seperti gugus allofanat, biuret, urea. (Eli Rohaeti, dkk, 2006:639).

Konsumsi bahan poliuretan khususnya di Indonesia setiap tahunnya mengalami peningkatan, terutama di bidang otomotif poliuretan dapat dijumpai sebagai komponen kendaraan yang meliputi bagian eksterior dan interior misalnya bumper, panel-panel body, tempat duduk, dan lain-lain. Di bidang kedokteran, poliuretan digunakan sebagai bahan pelindung muka, kantung darah, dan tabung. Selain itu poliuretan telah digunakan pula untuk furniture, bangunan dan konstruksi, insulasi tank dan pipa, pabrik pelapis, alat-alat olahraga, serta sebagai bahan pembungkus. Pemakaian poliuretan akan terus

meningkat mengingat keunggulan sifatnya dan pemakaiannya praktis. (Eli Rohaeti dan Senam, 2008)

Masalah yang timbul kemudian akibat peningkatan penggunaan poliuretan adalah makin bertumpuknya limbah poliuretan. Meskipun data limbah yang berasal dari poliuretan belum ada yang melaporkan, namun bila ditinjau dari penggunaan akhir polimer terlihat bahwa penggunaan poliuretan memberikan sumbangan terhadap limbah yang dihasilkan. Apalagi sejumlah penelitian telah dikembangkan untuk membuat bahan polimer yang tahan terhadap proses degradasi di lingkungan. Hal ini apabila tidak segera ditanggulangi akan membahayakan kelestarian lingkungan hidup.

Usaha penanggulangan limbah polimer yang telah dilakukan adalah dengan proses daur ulang, insinerasi (pembakaran), dan ditanam di bawah permukaan tanah. Pada proses daur ulang, limbah polimer harus dikumpulkan dan dipilah-pilah terlebih dahulu sesuai dengan sifat kimianya dan hal inilah yang menjadi salah satu kendala. Di samping itu produk polimer hasil daur ulang mengalami penurunan mutu sehingga sulit untuk dipasarkan juga proses daur ulang bukanlah suatu penyelesaian akhir karena akan menimbulkan limbah polimer baru. Insinerasi memang lebih efektif untuk memusnahkan limbah polimer dan kalor pembakaran yang dihasilkan dapat dipakai sebagai sumber energi, tetapi cara ini selain ongkosnya sangat mahal juga menimbulkan polusi udara yang berbahaya dan mempercepat efek rumah kaca.

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 (Budiman Anwar:2001). Oleh karena itu, penanggulangan limbah secara biodegradasi akan terwujud apabila polimer-polimer baru yang digunakan mudah terbiodegradasi. Penelitian untuk mendapatkan polimer yang mudah terbiodegradasi sudah banyak dilakukan, seperti blending fisik maupun kopolimerisasi antara polimer sintetik (poliolefin) dengan polimer alam, namun hasilnya belum cukup memuaskan karena bagian polimer alam saja yang terbiodegradasi. Kemudian pendekatan yang menjanjikan untuk memperoleh polimer baru yang mudah terbiodegradasi adalah dengan meneliti biopolimer, memodifikasinya atau mencampurnya (blending) dengan polimer alam.

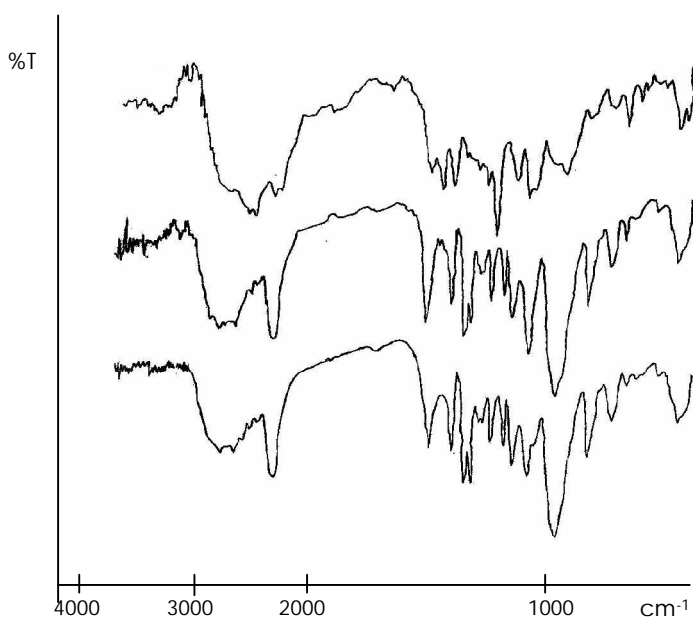
Dengan demikian tujuan dari kajian ini adalah untuk mengkaji pemanfaatan biodegradasi polimer hasil sintesis dari PEG dan MDI sebagai sumber belajar pada perkuliahan kimia fisika polimer. Perkembangan polimer begitu pesat dari tahun ke tahunnya, apabila pembelajaran kimia polimer tidak mengikuti perkembangan zaman, hanya dengan mengandalkan sumber belajar berupa buku teks tentunya akan tertinggal jauh dari negara lain yang sudah mengembangkan polimer ramah lingkungan. Dengan kajian ini diharapkan mahasiswa yang mengikuti perkuliahan kimia fisika polimer lebih dapat mengikuti perkembangan kimia polimer dengan tersedianya sumber belajar hasil eksperimen.

PEMBAHASAN

1. Sintesis Polimer dari PEG dan MDI

Sintesis poliuretan dilakukan dalam gelas kimia dan dilengkapi dengan pengaduk dan termometer untuk memonitor temperatur pada saat reaksi polimerisasi berlangsung. Polimerisasi diakhiri dengan proses *curing* untuk menyempurnakan reaksi polimerisasi serta kemungkinan terjadi polimer berikatan silang. Keberhasilan polimerisasi dapat diketahui melalui pengamatan pembentukan padatan polimer yang diikuti dengan beberapa teknik karakterisasi. Hasil karakterisasi dengan teknik *Fourier Transform*

Infrared (FTIR) dapat diperoleh spektrum FTIR polimer hasil sintesis. Gambar 1 menunjukkan spektrum FTIR untuk poliuretan hasil sintesis dari PEG200 - MDI, PEG400 - MDI, dan PEG1000 - MDI. Ketiga jenis poliuretan disintesis dengan perbandingan mol MDI terhadap mol PEG sebesar 1,17. Ketiga spektrum menunjukkan pita-pita serapan pada daerah yang hampir sama terutama pada daerah pita serapan karakteristik. Pada 3330 cm^{-1} menunjukkan pita serapan daerah ulur N-H, pada 2900 cm^{-1} menunjukkan adanya ulur -CH, 1720 cm^{-1} menunjukkan pita serapan daerah ulur C=O bebas, pada 1700 cm^{-1} merupakan daerah serapan ulur C=O yang berikatan hidrogen, 1650 cm^{-1} menunjukkan adanya ulur C-O-C, 1596 cm^{-1} menunjukkan adanya cincin aromatik, 1542 cm^{-1} merupakan daerah serapan deformasi N-H, dan 1100 cm^{-1} menunjukkan adanya ulur C-O. Dengan demikian bervariasinya massa molekul monomer yang digunakan tidak mempengaruhi jenis gugus fungsi yang terbentuk.



Gambar 1. Spektrum FTIR poliuretan yang berasal dari PEG200 – MDI (atas), PEG400 – MDI (tengah), dan PEG1000 – MDI (bawah) (Eli Rohaeti, 2004)

Namun, berdasarkan perhitungan besarnya indeks ikatan hidrogen (HBI) menunjukkan bahwa poliuretan yang berasal dari PEG200 - MDI memiliki nilai HBI paling tinggi. Pada Tabel 1 ditunjukkan nilai indeks ikatan hidrogen (HBI) poliuretan hasil sintesis. Dengan demikian penggunaan PEG dengan massa molekul lebih kecil atau bilangan hidroksil lebih tinggi menghasilkan poliuretan dengan ikatan hidrogen lebih banyak.

Tabel 1. Data indeks ikatan hidrogen poliuretan

No	Jenis poliuretan	Indeks ikatan hidrogen
1	PEG200 – MDI	3,00
2	PEG400 – MDI	0,63
3	PEG1000 - MDI	0,90

Berdasarkan termogram *Differential Thermal Analysis* (DTA) diperoleh data temperatur transisi gelas dan terjadinya puncak endoterm yang menunjukkan proses dekomposisi untuk poliuretan yang berasal dari ketiga jenis polioksietilen glikol yang digunakan. Selain itu terlihat pula puncak eksoterm yang menunjukkan terjadinya oksidasi, reaksi kimia, atau ikatan silang. Pada Tabel 2 ditunjukkan data temperatur transisi gelas dan temperatur dekomposisi poliuretan.

Tabel 2. Data temperatur transisi gelas, puncak endoterm, dan puncak eksoterm poliuretan

No	Massa molekul relatif PEG	Temperatur transisi gelas (°C)	Puncak endoterm (°C)	Puncak eksoterm (°C)
1	200	100,39	Tidak terlihat	Tidak terlihat
2	400	89,58	444,87	383,99
3	1000	81,16	415,81	385,00

Dengan semakin meningkatnya massa molekul PEG yang digunakan dalam sintesis poliuretan menunjukkan data temperatur transisi gelas semakin menurun. Poliuretan hasil sintesis dari PEG400 mengalami proses dekomposisi ditunjukkan dengan puncak endoterm pada temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan poliuretan yang berasal dari PEG dengan massa molekul berbeda. Adapun puncak eksoterm untuk poliuretan yang disintesis terjadi pada range temperatur yang tidak jauh berbeda.

Berdasarkan uji sifat mekanik diperoleh data berupa kuat putus (*strength at break*), perpanjangan, dan *Young's modulus* (modulus Young/modulus elastis) poliuretan yang berasal dari ketiga jenis PEG yang digunakan seperti pada Tabel 3. Dengan cara membandingkan data kuat putus terhadap perpanjangan maka dapat diperoleh data modulus *Young*. Data modulus *Young* bersesuaian dengan data kuat putus, yaitu poliuretan hasil sintesis dari PEG massa molekul 200 memberikan data modulus *Young* paling tinggi, diikuti dengan poliuretan hasil sintesis dari PEG massa molekul 1000. Poliuretan hasil sintesis dari PEG dengan massa molekul 400 memberikan data modulus *Young* paling rendah. Berdasarkan kurva *stress-strain*, poliuretan merupakan bahan polimer bersifat elastis, ditunjukkan oleh tidak adanya titik lumer pada saat diuji tarik. (Eli Rohaeti, dkk:2004)

Tabel 3. Data kuat putus, perpanjangan, dan modulus Young poliuretan

No	Massa molekul PEG	Kuat putus (MPa)	Perpanjangan	Modulus Young (kPa)
1	200	6,69	72,58	92,21
2	400	1,06	118,09	8,96
3	1000	2,09	128,31	16,32

Derajat pengembangan digunakan untuk menentukan keberadaan ikatan silang (*cross linking*) yang terdapat dalam poliuretan. Hasil perhitungan derajat pengembangan menunjukkan poliuretan hasil sintesis dari PEG 400 – MDI memiliki derajat pengembangan sebesar 21,111%. Berdasarkan hasil analisis derajat kristalinitas terhadap difraktogram XRD poliuretan dari PEG 400 – MDI menunjukkan bahwa poliuretan hasil sintesis dari PEG 400 – MDI memiliki kristalinitas sebesar 33,799%. (Eli Rohaeti dan Senam, 2008)

2. Biodegradasi Polimer dari PEG dan MDI

Pada tahap biodegradasi poliuretan diinkubasi dalam lumpur aktif dengan media LB padat. Dalam ruang *laminar flow* cairan lumpur aktif dituang ke dalam gelas kimia steril. Poliuretan steril dicelupkan ke dalam lumpur aktif

dan diletakkan ke dalam cawan petri yang berisi medium LB padat serta dibiarkan dalam ruang 37°C. Perubahan massa dan laju kehilangan massa ditentukan dengan teknik penimbangan. Pada Tabel 4 ditunjukkan data kehilangan massa dan laju kehilangan massa (biodegradabilitas) poliuretan yang diinkubasi selama 5, 10, dan 15 hari tanpa dilakukan penggantian media. Poliuretan hasil sintesis dari PEG400 –MDI menghasilkan kehilangan massa total selama 15 hari inkubasi paling besar yaitu 9,30 %. Dengan demikian poliuretan yang berasal dari PEG400 – MDI paling mudah terbiodegradasi, hal ini dapat disebabkan oleh kekuatan ikatan dalam molekul poliuretan yang ditunjukkan oleh indeks HBI. Poliuretan yang berasal dari PEG 400 memiliki indeks HBI paling rendah. Ini berarti dengan adanya jenis ikatan lain selain ikatan kovalen yang konsentrasinya lebih sedikit akan lebih memudahkan akses mikroorganisme menyerang polimer. Akibatnya polimer akan lebih mudah terbiodegradasi.

Tabel 4. Pengaruh variasi Mr PEG terhadap kehilangan massa dan biodegradabilitas poliuretan

No	Mr PEG	Kehilangan massa			Biodegradabilitas (mg/hari)		
		Inkubasi 5 hari	Inkubasi 10 hari	Inkubasi 15 hari	Inkubasi 5 hari	Inkubasi 10 hari	Inkubasi 15 hari
1	200	0,57	0,52	0,36	0,22	0,03	0,01
2	400	8,27	8,48	9,30	0,69	0,30	0,19
3	1000	6,69	7,42	6,68	0,65	0,36	0,21

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. 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. Hal tersebut menjadi petunjuk bahwa setelah semua gugus fungsi habis selanjutnya unit ulang –CH₂CH₂O- yang berasal dari bagian polietilen glikol (PEG) dapat pula diserang oleh mikroorganisme.

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.

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 maksimum lebih kecil dibandingkan dengan poliuretan yang tidak dibiodegradasi. (Eli Rohaeti:2004) Hal ini menjadi petunjuk bahwa setelah proses biodegradasi terjadi perubahan struktur polimer. Morfologi permukaan poliuretan yang 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 lebih besar dibandingkan dengan poliuretan yang diinkubasi dalam *P.aeruginosa*. Hasil SEM tersebut dapat pula menjadi bukti bahwa lumpur aktif lebih efektif dibandingkan dengan *P.aeruginosa* dalam membiodegradasi poliuretan. (Eli Rohaeti, dkk:2003)

3. Biodegradasi Polimer Hasil Sintesis Sebagai Sumber Belajar

Salah-satu komponen yang menunjang kegiatan pembelajaran adalah adanya sumber belajar. Sumber belajar adalah rujukan, objek, dan bahan yang digunakan untuk kegiatan pembelajaran. Sumber belajar berperan dalam menyalurkan stimulus dan informasi kepada peserta didik. Sumber belajar dapat berupa media cetak, media elektronik, nara sumber serta lingkungan fisik, alam, sosial, dan budaya.

Dalam pengembangannya sumber belajar dapat dikategorikan menjadi sumber belajar sengaja dirancang untuk membantu pembelajaran, seperti buku, brosur, film, video dan sumber belajar yang dimanfaatkan atau tidak dirancang untuk tujuan kegiatan pembelajaran seperti pabrik, museum, Badan tenaga Atom Nasional (BATAN). Selain itu, sumber belajar dapat diklasifikasikan menjadi sumber belajar tercetak, non-cetak, sumber belajar berbentuk fasilitas seperti laboratorium, perpustakaan, dan studio, serta sumber belajar berupa kegiatan meliputi observasi, wawancara, kerja kelompok, dan simulasi.

Dalam pemilihan sumber belajar perlu diperhatikan beberapa kriteria seperti dikemukakan oleh Sudjana dan Rivai (2003:21-25). Kriteria tersebut meliputi kriteria umum dan kriteria berdasarkan tujuan. Kriteria umum merupakan ukuran kasar dalam memilih berbagai sumber belajar. Kriteria umum meliputi ekonomis, praktis, sederhana, mudah memperolehnya, serta komponen-komponennya sesuai dengan tujuan. Beberapa kriteria berdasarkan tujuan meliputi sumber belajar untuk memotivasi, untuk pembelajaran, untuk penelitian, untuk memecahkan masalah, serta untuk presentasi.

Eli Rohaeti (2004:30-32) memanfaatkan objek berupa proses dan produk hasil percobaan sebagai sumber belajar kimia material di SMA. Pemanfaatan sumber belajar kimia material di SMA berupa sintesis poliuretan dari Polipropilen Glikol (PPG) dan Polimetilena Polifenilena Isosianat (PAPI) meliputi struktur proses dan produk percobaan yang menggambarkan alur pikir dari perencanaan sampai proses pemanfaatan percobaan sebagai sumber belajar. Namun demikian, perlu diketahui seberapa besar hasil percobaan tersebut berpotensi sebagai sumber belajar sehingga sumber belajar yang telah diperoleh nantinya dapat digunakan untuk belajar bagi subjek belajar.

Selanjutnya agar sumber belajar yang telah diperoleh dapat digunakan untuk belajar para mahasiswa maka perlu diketahui seberapa besar hasil percobaan tersebut berpotensi sebagai sumber belajar. Untuk tujuan tersebut perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut, yaitu: kejelasan potensi, kesesuaian

dengan tujuan pembelajaran, kejelasan sasaran, kejelasan pedoman eksplorasi, kejelasan informasi yang diungkap, dan kejelasan perolehan yang diharapkan.

Belajar kimia perlu adanya objek dan permasalahan. Potensi suatu objek untuk dimanfaatkan sebagai sumber belajar ditentukan oleh ketersediaan objek dan permasalahan yang diungkap. Biodegradasi polimer hasil sintesis dari PEG dan MDI menggunakan bahan dan peralatan laboratorium yang sangat sederhana dan murah. Dengan demikian biodegradasi polimer memiliki potensi yang jelas untuk digunakan sebagai sumber belajar. Kesesuaian dengan tujuan pembelajaran meliputi kesesuaian dengan kompetensi kimia polimer, kompetensi dasar, dan indikator pencapaian hasil belajar. Memperhatikan proses dan hasil percobaan biodegradasi polimer hasil sintesis, maka hasil percobaan memiliki kesesuaian dengan tujuan pembelajaran khususnya konsep biodegradasi polimer.

Dalam pemanfaatan sumber belajar, yang dimaksud kejelasan sasaran adalah sasaran terhadap subjek belajar atau untuk siapakah sumber belajar tersebut. Memperhatikan hasil percobaan, sasaran peruntukan yang sesuai adalah serendah-rendahnya untuk mahasiswa yang mengambil mata kuliah Kimia Polimer baik mata kuliah Kimia Fisika Polimer maupun Kimia Organik Polimer atau Teknologi Pemrosesan Polimer, hal tersebut dilihat dari kegiatan-kegiatan yang terjadi selama percobaan.

Hasil percobaan dapat dijadikan sumber belajar bila memiliki kejelasan pedoman eksplorasi. Kejelasan yang dimaksud meliputi proses percobaan sebagai hasil percobaan dalam pemanfaatannya sebagai sumber belajar. Hasil percobaan dalam bentuk proses yaitu perumusan masalah, perumusan tujuan, penyusunan prosedur kerja, pelaksanaan kerja, organisasi dan analisis data, pembahsan dan penarikan kesimpulan.

Setelah diketahui hasil percobaan tersebut berpotensi untuk digunakan sebagai sumber belajar maka langkah selanjutnya dilakukan seleksi. Seleksi didasarkan pada materi pembelajaran, tingkat perkembangan mental dan kemampuan awal mahasiswa, tujuan pembelajaran, alokasi waktu, sarana dan sumber belajar.

PENUTUP

Berdasarkan kajian yang dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Pemanfaatan hasil percobaan sebagai sumber belajar meliputi struktur proses dan produk percobaan.
- b. Hasil percobaan dapat dimanfaatkan sebagai sumber belajar dengan terpenuhinya kejelasan potensi, kesesuaian dengan tujuan pembelajaran, kejelasan sasaran, kejelasan pedoman eksplorasi, kejelasan informasi yang diungkap, serta kejelasan perolehan yang diharapkan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih 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

- Budiman Anwar (2001), Biodegradasi Poli- β -Hidroksibutirat (PHB) Hasil Sintesis Secara Kimia dan Kopolimernya dengan Menggunakan Lumpur Aktif, *Tesis*, Dept. Kimia ITB, Bandung, 1 – 2, 17.

- Djohar (1984). Usaha Peningkatan Daya Guna dan Hasil Guna, Pemanfaatan Sumber Belajar, *Makalah Lokakarya PPM*, Yogyakarta
- Eli Rohaeti, N.M. Surdia, Cynthia 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, Cynthia L.Radiman, E.Ratnaningsih (2004), Pengaruh Dua Macam Perlakuan Mikroorganisme terhadap Kemudahan Degradasi Poliuretan Hasil Sintesis dari Monomer Polietilen Glikol 400 dengan Metilen-4,4'-difenildiisiosianat, *Proc.ITB Sains & Tek.*, Volume 36A No.1, 1-9
- Eli Rohaeti (2004), Pemanfaatan Amilosa dari Pati Tapioka dalam Sintesis Poliuretan, *Disertasi*, ITB, Bandung
- Eli Rohaeti (2005), Kajian Pemanfaatan Bahan Alam dalam Upaya Mensintesis Poliuretan yang Ramah Lingkungan, *Prosiding Seminar Nasional Kimia II Jurusan Ilmu Kimia FMIPA UII*, 131 – 136
- Eli Rohaeti, Suharto, Susila K, Suharto (2006), Synthesis of Polyurethane Elastomer from Vegetable oil and Methylene-4,4'-Diphenyldiisocyanate (MDI) as Surface Coating for Rollers, *Proceeding of International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS)*, Bandung-Indonesia, 639-642
- Eli Rohaeti (2007), The Synthesis of Polyurethane from Hydroxylated Crude Palm Oil and Methylene-4,4'-Diphenyldiisocyanate (MDI), *Proceeding of International on Chemical Sciences (ICCS-2007)*, Yogyakarta-Indonesia
- Eli Rohaeti dan Senam (2008), Efek Minyak Nabati pada Biodegradasi Poliuretan Hasil Sintesis dari PEG 400 dan MDI, *Laporan Penelitian*, Dikti Depdiknas, Jakarta
- Suharsimi Arikunto (1985). Pendekatan Keterampilan Proses, *Cakrawala Pendidikan*, No. 2 Vol. IV, IKIP Yogyakarta
- Nana Sudjana dan Ahmad Rivai (2003). *Strategi Belajar Mengajar Kimia*, Malang: Universitas Negeri Malang