

Pengaruh Konsentrasi Katalis Kalium Karbonat pada Proses Depolimerisasi Limbah Botol Plastik Polietilen Tereftalat (PET)

Rosidatul Mahmudah S. dan Lukman Atmaja, Ph.D

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: lukman.at@chem.its.ac.id

Abstrak–Proses depolimerisasi limbah botol plastik polietilen tereftalat (PET) berhasil dilakukan dengan melalui metode glikolisis dengan pereaksi etilen glikol dan katalis kalium karbonat. Glikolisis dilakukan selama 8 jam pada suhu 196°C. Katalis kalium karbonat divariasi melalui perbandingan mol PET:katalis. Perbandingan mol PET(unit berulang):katalis yang digunakan adalah sebesar 88:1, 78:1, 68:1, 58:1, 48:1, 38:1, 28:1 dan 18:1. Hasil PET yang berhasil terkonversi maksimal menjadi bis(hidroksietil) tereftalat (BHET) dilaporkan pada perbandingan mol PET:katalis 28:1 yaitu sebesar 55,95%. BHET dari perbandingan mol 28:1 tersebut diidentifikasi menggunakan FTIR untuk mengkonfirmasi gugus-gugus OH, C-O dan C=O. Titik leleh BHET sebesar 109,98°C didapatkan melalui analisis DSC/TGA.

Kata Kunci–BHET, Depolimerisasi, Glikolisis, Kalium Karbonat, PET.

I. PENDAHULUAN

SALAH SATU jenis plastik yang luas dipakai selama beberapa dekade ini adalah polietilen tereftalat atau PET. PET merupakan suatu poliester termoplastik linier yang disintesis melalui esterifikasi asam tereftalat (terephthalic acid, TPA) dan etilen glikol (EG) atau dengan transesterifikasi dimetil tereftalat (DMT) dan EG [1]. Dalam beberapa waktu terakhir ini PET merupakan salah satu jenis plastik yang paling cepat pertumbuhan pemakaiannya. Kecepatan pertumbuhan PET disebabkan oleh kebaikan fungsi plastik ini sebagai pengemas bahan yang paling baik untuk air dan botol minuman ringan. Selain itu karena peran fungsinya yang dapat digunakan untuk berbagai jenis aplikasi, misalnya untuk industri video dan audio, lapisan tipis sinar X, botol-botol kemasan sirup, saus, selai ataupun minyak makan [2]. Secara umum keunggulan PET adalah pada sifat-sifat yang baik pada kuat tarik, ketahanan kimia, kejernihan dan stabilitas termal [3].

Penggunaan PET di dunia sebagai kemasan botol-botol minuman mencapai 1,5 juta ton setiap tahunnya [4]. Pada 2010 peningkatan penggunaan PET mencapai 56,0 juta ton[1]. Meningkatnya penggunaan PET menyebabkan jumlah limbah PET meningkat dengan cepat pula. Walaupun plastik jenis poliester ini tidak menimbulkan bahaya yang langsung terhadap lingkungan, yakni dalam hal ia tidak mengeluarkan/membuat timbulnya bahan-bahan yang menyebabkan turunnya kualitas

kehatan manusia, namun plastik ini tidak dapat langsung didegradasi di alam [5].

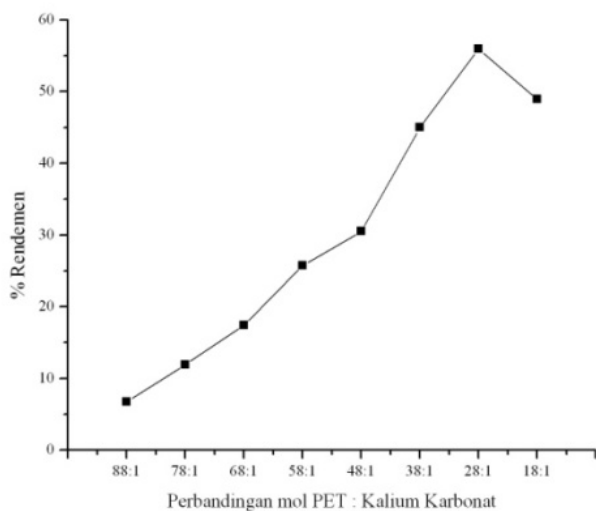
Berbagai upaya dilakukan untuk menanggulangi masalah limbah plastik. Salah satunya dengan mendepolimerisasi plastik menjadi bagian-bagiannya yang memiliki struktur kimia lebih sederhana, yakni menjadi oligomer, dimer dan bahkan kembali menjadi monomer-monomernya yang asli yang tidak lagi mengganggu alam. Untuk PET, alternatif depolimerisasi ini cukup menarik. Depolimerisasi PET juga dapat menguntungkan karena PET-nya dapat digunakan lagi [6].

Telah diketahui bahwa ada beberapa cara untuk mendepolimerisasi PET, yakni, secara mekanik, secara kimiawi dan secara biologi. Metoda depolimerisasi secara biologi tidak dapat digunakan bagi PET karena PET merupakan plastik yang tidak dapat terdegradasi pada kondisi normal akibat tidak adanya organisme yang dapat mengkonsumsi molekul PET yang relatif besar[7] yang paling dapat diterima berdasarkan pada prinsip pertumbuhan berkelanjutan adalah daur ulang secara kimiawi. Dekomposisi PET secara kimiawi dan konversi PET menjadi produk yang dapat dipakai kembali memberi nilai tambah pada pentingnya strategi depolimerisasi bahan ini. Depolimerisasi kimiawi dilakukan untuk membentuk kembali bahan aslinya yaitu monomer [8].

Penelitian mengenai depolimerisasi kimia PET telah banyak dilakukan. Metoda tersebut antara lain alkoholisis, hidrolisis dan glikolisis. Perbedaan dari metoda-metoda tersebut adalah pada agen pendepolimerisasi yang dipakai dan kondisi-kondisi reaksinya[1]. Metoda glikolisis merupakan metoda yang paling banyak digunakan. Metoda ini dianggap paling menguntungkan diantara metoda-metoda yang lain dengan beberapa alasan. Pertama, prosesnya lebih sederhana dan dapat dilakukan secara konvensional [9]. Kedua, proses pemisahan glikol dari pelarut dalam proses depolimerisasi tidak diperlukan [1]. Ketiga, monomer BHET yang dihasilkan dari proses depolimerisasi dapat dicampur dengan BHET yang baru sehingga dapat menghemat biaya produksi PET [8]. Keempat, BHET dapat digunakan sebagai bahan awal dalam proses sintesis PET yang berbasis DMT dan TPA yang dihasilkan dalam proses alkoholisis dan hidrolisis sedangkan DMT dan TPA tidak dapat digunakan sebaliknya [1]. Meskipun demikian, cara glikolisis ini memiliki kelemahan

yaitu BHET yang masih mengandung oligomer tingkat tinggi sulit untuk dimurnikan dengan metoda sederhana[9].

Dalam metoda glikolisis diperlukan katalis. Penelitian mengenai depolimerisasi PET dengan menggunakan metoda glikolisis dengan berbagai macam katalis telah banyak dilakukan. Banyak katalis dikembangkan untuk mempercepat reaksi glikolisis PET, seperti logam asetat, titanium fosfat, padatan *superacid*, oksida logam, sulfat dan lain sebagainya [10]. Diantara semua katalis yang telah diteliti, hasil yang paling baik untuk reaksi glikolisis adalah dengan menggunakan katalis seng asetat [9,11-13]. Katalis tersebut dikenal sebagai katalis yang efektif pada reaksi transesterifikasi [9]. Produk hasil depolimerisasi PET menggunakan katalis seng asetat menghasilkan rendemen yang tinggi yaitu 66% [14], 64% [8] dan 78% [13]. Meskipun katalis ini sangat efektif digunakan dalam glikolisis PET, namun logam seng sendiri mempunyai dampak negatif dan bersifat racun bagi lingkungan [8]. Oleh karena itu, beberapa katalis lain yang lebih ramah lingkungan seperti natrium karbonat, natrium bikarbonat, natrium sulfat dan kalium sulfat digunakan sebagai katalis dalam reaksi glikolisis PET. Dari kelompok katalis tersebut, natrium karbonat dapat digunakan sebagai katalis yang paling efektif untuk menggantikan katalis seng asetat dengan alasan bahwa rendemen hasil produk depolimerisasi untuk natrium karbonat, yaitu 50% [8] dan 64% [14], hampir mendekati seng asetat [8].



Gambar. 1. Grafik perbandingan molPET(unit berulang):katalis kalium karbonat terhadap rendemen.

Katalis kalium karbonat belum pernah digunakan untuk proses daur ulang PET. Pemilihan katalis kalium karbonat ini disebabkan karbonat terbukti paling baik sebagai pengganti katalis seng asetat [8]. Kalium dipilih menggantikan natrium karena kedua unsur ini berada pada golongan yang sama sehingga memiliki sifat yang hampir sama namun memiliki harga yang lebih murah. Selain itu, kalium karbonat termasuk katalis yang lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan seng asetat, maka pada penelitian ini akan diteliti mengenai pengaruh konsentrasi katalisnya pada proses depolimerisasi limbah botol PET di Indonesia. Plastik PET

akan didepolimerisasi pada berbagai variasi konsentrasi untuk mengetahui jumlah optimumnya yang paling efektif.

II. METODOLOGI

A. Bahan dan Peralatan

A.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah polietilen tereftalat (PET) yang berasal dari botol air mineral, etilen glikol dengan kemurnian 99,5% (Merck), aquades dan serbuk katalis kalium karbonat (Merck).

A.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan refluks yang dilengkapi termometer, pengaduk magnetik dan kondensor dan seperangkat peralatan filtrasi serta beberapa peralatan gelas. Peralatan yang digunakan untuk karakterisasi antara lain spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Shimadzu dan Mettler Toledo Star^e TGA/DSC (*Differential Pemindaian Calorimeter* dan *Termogravimetric Analyzer*).

B. Prosedur Kerja

B.1 Preparasi Cuplikan Limbah Botol PET

Preparasi cuplikan limbah botol PET diawali dengan proses pencucian. Limbah botol plastik PET dicuci dengan sabun dan dibilas dengan aquades. Cuplikan yang telah dicuci kemudian dipotong dengan ukuran 3 mm×3 mm sampai 4 mm×4 mm. Tahap selanjutnya cuplikan yang telah dipotong-potong dicuci kembali dengan aquades dan dikeringkan dalam oven selama satu jam.

B.2 Proses Depolimerisasi PET (Glikolisis)

Sebanyak lima gram cuplikan PET yang telah dipreparasi diambil dan dimasukkan ke dalam labu bundar leher tiga yang dilengkapi dengan kondensor refluks, termometer dan pengaduk magnetik. Etilen glikol (EG) kemudian ditambahkan sebanyak 11 ml. Selanjutnya perbandingan mol PET:katalis kalium karbonat dimasukkan dengan beragam variasi. Perbandingan rasio molPET(unit berulang):Katalis kalium karbonat yang digunakan terdapat pada Tabel 1. Reaksi glikolisis selanjutnya dilakukan selama 8 jam dengan suhu 196°C. Gas nitrogen dialirkan ke dalam labu dan kondensor sebelum reaksi glikolisis dimulai.

Setelah reaksi glikolisis selesai, campuran PET, EG dan kalium karbonat di dalamnya, dipindahkan ke dalam penangas es. Tahap awal dari reaksi glikolisis ini menunjukkan bahwa reaktan yang semula berupa campuran heterogen 2 fasa, yaitu padatan (PET) dan larutan (EG dan katalis) yang berubah menjadi campuran homogen 1 fasa, yaitu fasa cair.

Produk yang dihasilkan selanjutnya ditambahkan dengan air destilat panas berlebih sebanyak 70 ml sambil diaduk dengan kuat lalu dengan segera difiltrasi. Produk akan terpisah menjadi fasa padat dan cair. Fasa cair atau filtrat tersebut merupakan campuran etilen glikol, katalis, BHET, dan sedikit oligomer terlarut. Filtrat kemudian dipanaskan sampai didapatkan campuran yang bening, dan selanjutnya disaring kembali. Filtrat hasil filtrasi kedua ini disimpan dalam lemari es pada suhu 5°C selama 16 jam untuk mendapatkan padatan BHET. Hasilnya difiltrasi kembali dan padatan BHET yang didapatkan

selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 30 jam kemudian ditimbang.

B.3 Analisa Produk Hasil Depolimerisasi Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Analisa FTIR dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada senyawa yang dihasilkan dari depolimerisasi dalam hal ini pada reaksi glikolisis.

Differential Pemindaian Calorimetry (DSC)

Analisa DSC dilakukan untuk mengetahui titik leleh dari produk hasil depolimerisasi (BHET). Cuplikan dianalisa pada suhu 20°C sampai 500°C dengan laju pemanasan 10°C/menit.

Termogravimetric Analysis (TGA)

Analisa TGA dilakukan untuk mengetahui massa yang hilang akibat pemanasan suhu tertentu yang digunakan pada saat analisa. Analisa TGA dilakukan bersamaan dengan analisa DSC.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Proses Depolimerisasi Limbah Botol Plastik PET

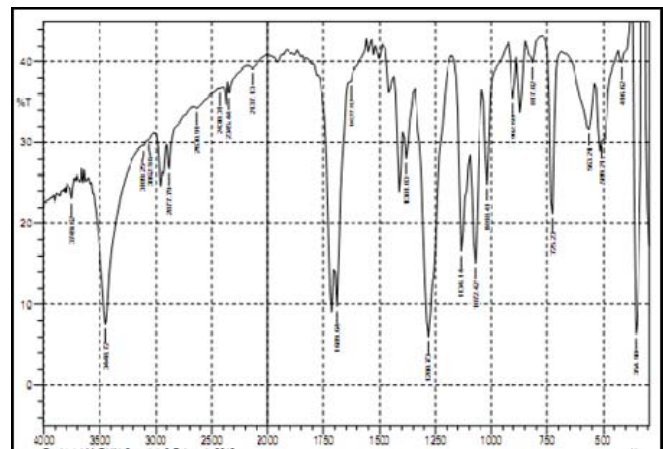
Reaksi glikolisis dilakukan secara tertutup dengan menggunakan proses refluks dalam labu bundar tiga leher berukuran 250 mL lengkap dengan kondensor refluks, termometer dan penyumbat karet. PET yang telah dipreparasi dimasukkan dalam labu bundar tiga leher dan ditambahkan pelarut etilen glikol (EG). Etilen glikol dipilih sebagai pelarut dalam proses glikolisis sebab EG dapat menyebabkan pemutusan ester dalam rantai PET [8]. Selanjutnya ditambahkan katalis kalium karbonat (K_2CO_3) dengan variasi perbandingan mol PET:katalis dengan perbandingan yang telah dijelaskan sebelumnya. Setiap variasi katalis pada penelitian ini dilakukan secara duplo. Pada umumnya reaksi glikolisis menggunakan katalis garam logam asetat seperti seng asetat. Namun logam dari katalis tersebut bersifat racun sehingga memberikan dampak yang buruk terhadap lingkungan [15-18]. Oleh karena itu pada penelitian ini dipilih katalis yang lebih ramah lingkungan seperti kalium karbonat. Katalis kalium karbonat selain merupakan katalis yang ramah lingkungan, katalis ini dapat larut dalam etilen glikol sehingga mempermudah reaksi glikolisis.

Proses depolimerisasi dilakukan dalam keadaan tertutup bertujuan agar tidak ada massa PET, pelarut etilen glikol maupun katalis kalium karbonat yang hilang. Suhu yang digunakan dalam proses depolimerisasi pada penelitian ini sebesar 196°C, yang merupakan suhu depolimerisasi PET optimum [5, 8]. Reaksi glikolisis dilakukan selama 8 jam terhitung dari suhu optimum telah tercapai. Gas nitrogen dipilih karena gas nitrogen merupakan gas inert yang tidak mempengaruhi hasil reaksi. Selama reaksi berlangsung dilakukan pengadukan menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan konstan.

Secara fisik, proses depolimerisasi dapat diamati pada tiga tahap. Pertama, tahap sebelum suhu optimum tercapai. Terlihat bahwa belum ada perubahan pada PET dan campuran masih menunjukkan bentuk heterogen, dimana fasa padat merupakan PET dan fasa liquid merupakan etilen glikol dan kalium karbonat. Kedua, merupakan proses saat PET telah larut

sebagian. Ketiga, memperlihatkan tahap akhir reaksi glikolisis dimana fasa padat yakni PET sudah larut sempurna dan campuran berbentuk homogen. Pada tahap ini dapat dikatakan bahwa PET telah larut dalam etilen glikol dengan bantuan katalis kalium karbonat. Campuran homogen ini menunjukkan bahwa PET mulai terkonversi menjadi oligomer atau bahkan monomer.

Langkah selanjutnya adalah pemurnian hasil depolimerisasi. Setelah 8 jam reaksi glikolisis berlangsung, produk hasil tersebut dengan cepat didinginkan dalam penangas es. Segera setelah proses pendinginan selesai dilakukan, akuades mendidih berlebih sebanyak kurang lebih 70 mL ditambahkan dengan ke dalam produk hasil reaksi. Proses ini bertujuan untuk memisahkan BHET dengan oligomer (seperti dimer dan trimer). Oleh karena monomer-BHET memiliki titik leleh 109°C [9] sementara dimer-BHET memiliki titik leleh 170°C [1], maka perlakuan tersebut dapat menjamin adanya proses pemisahan yang diinginkan. Selain itu penambahan akuades mendidih juga dapat melarutkan katalis serta kemungkinan oligomer (yaitu dimer dan trimer) yang tidak larut [8]. Selanjutnya dalam keadaan panas hasil tersebut disaring. Dari hasil ekstraksi pertama ini didapatkan filtrat yang mengandung BHET, etilen glikol dan sebagian kecil oligomer yang terlarut dalam air dan residu yang berupa PET yang belum terkonversi.



Gambar. 2. Spektra FTIR BHET hasil glikolisis dengan perbandingan molPET (unit berulang):kalium karbonat 28:1.

Filtrat hasil ekstraksi pertama ini kemudian dipanaskan hingga homogen dan berwarna jernih. Proses ini dimaksudkan karena BHET akan mengkristal kembali seiring menurunnya suhu filtrat. Filtrat kembali disaring setelah homogen, Filtrat hasil ekstraksi kedua ini kemudian disimpan dalam lemari pendingin pada suhu 5°C selama 16 jam. Pendinginan ini bertujuan untuk pembentukan BHET, sebab BHET akan terbentuk pada suhu rendah.

Kristal hasil pendinginan selanjutnya difiltrasi kembali untuk mendapatkan BHET yang merupakan monomer hasil depolimerisasi [8]. Tahap terakhir dari proses depolimerisasi ini adalah pengeringan kristal yang dilakukan pada suhu 60°C selama 30 jam untuk menghilangkan air yang tersisa dan kristal yang terbentuk benar-benar kering serta mempunyai berat konstan.

Proses depolimerisasi plastik PET menggunakan metode glikolisis terjadi karena reaksi substitusi nukleofilik pada gugus

hidroksil yang terdapat pada etilen glikol yang menyerang gugus karbonil yang dimiliki ester (pada rantai polimer PET). Gugus karbonil terlebih dahulu diaktifkan oleh kation pada katalis, dalam penelitian ini logam kalium. Logam kalium akan berikatan dengan oksigen pada karbonil sehingga karbon menjadi karbokation. Keadaan intermediet ini ditandai dengan terbentuknya kompleks yang dibentuk oleh koordinasi antara gugus karbonil pada ester dengan logam kalium. Koordinasi yang terbentuk menurunkan kerapatanelektron dari atom karbonil. Selain itu koordinasi tersebut akan memfasilitasi serangan nukleofil dari gugus hidroksil pada karbon yang terpolarisasi sehingga menyebabkan pemutusan rantai polimer PET dan pembentukan monomer BHET. Proses PET yang mengalami degradasi ini akan terjadi bertahap menjadi oligomer, kemudian dimer dan terakhir monomer BHET [8].

B. Perhitungan Rendemen

Pengaruh perbandingan mol konsentrasi antara PET dan katalis kalium karbonat terhadap hasil glikolisis dilaporkan pada Tabel 1. Presentase rendemen dari proses depolimerisasi limbah botol PET oleh etilen glikol menggunakan katalis kalium karbonat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$\% \text{rendemen} = \frac{W_{\text{BHET}}}{W_{\text{PET}}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

dimana W_{BHET} merupakan berat BHET hasil proses depolimerisasi dan W_{PET} merupakan berat awal dari PET yang digunakan. Sementara itu, grafik pengaruh perbandingan mol PET dengan katalis kalium karbonat terhadap rendemen ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1.

Massa Produk Hasil Glikolisis PET dengan Berbagai Variasi Perbandingan Mol Konsentrasi Antara Katalis dengan PET

Perbandingan mol PET:K ₂ CO ₃	Hasil Glikolisis (gram)		
	Glikolisis I	Glikolisis II	Massa produk rata-rata
18 : 1	2,44	2,48	2,46
28 : 1	2,80	2,84	2,82
38 : 1	2,22	2,30	2,26
48 : 1	1,53	1,55	1,54
58 : 1	1,26	1,34	1,30
68 : 1	0,84	0,92	0,88
78 : 1	0,57	0,63	0,60
88 : 1	0,30	0,38	0,34

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa semakin besar perbandingan mol PET terhadap katalis kalium karbonat, maka semakin meningkat pula hasil glikolisis yang diperoleh. Akan tetapi pada saat katalis kalium karbonat diberikan dalam jumlah yang lebih banyak seperti pada perbandingan mol 18:1 hasil yang didapatkan justru menurun. Penurunan hasil glikolisis yang terjadi ini dikarenakan efektivitas penggunaan katalis kalium karbonat berada pada perbandingan mol 28:1. Apabila glikolisis dilakukan dengan perbandingan yang lebih besar dari 28:1 maka hasilnya tidak akan lebih besar. Hal ini berhubungan dengan selektivitas katalis, yaitu kemampuan katalis mempercepat suatu reaksi antara beberapa reaksi yang terjadi sehingga produk yang diinginkan dapat diperoleh dengan produk sampingan seminimal

mungkin [19]. Pada rendemen monomer BHET dengan perbandingan mol PET(unit ulang):katalis sebesar 28:1 produk yang diinginkan mencapai jumlah paling banyak dengan produk sampingan berupa dimer dan oligomer yang paling sedikit dibanding dengan variasi lainnya. Selain itu berhubungan pula dengan sisi aktif dari katalis tersebut yang membuktikan bahwa besar penggunaan jumlah katalis belum tentu makin bagus hasil yang diperoleh [20]. Hal ini terbukti dari hasil perbandingan mol 18:1 yang lebih kecil dari perbandingan mol PET(unit ulang):katalis 28:1. Penambahan konsentrasi katalis kalium karbonat yang lebih besar membuat hasil yang didapatkan tidak meningkat terlalu tajam bahkan cenderung menurun setelah perbandingan paling efektif didapatkan yakni pada perbandingan mol PET(unit ulang):katalis 28:1, sehingga dapat dikatakan bahwa perbandingan mol PET(unit ulang):katalis kalium karbonat dengan perbandingan 28:1 merupakan hasil maksimal dengan nilai sebesar 55,95%.

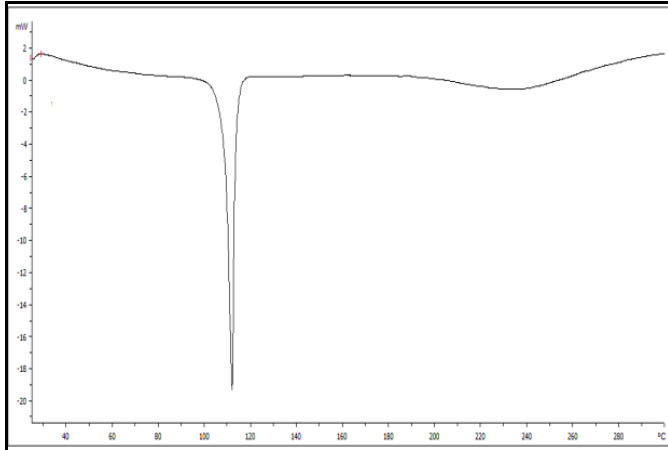
C. Analisis menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR)

Analisis dengan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi gugus-gugus fungsi yang terdapat pada produk hasil daur ulang, yakni bis(hidroksietil) tereftalat (BHET). BHET memiliki gugus fungsi khas yang terdiri dari gugus hidroksil (OH), dan gugus karbonil (CO).

Spektra FTIR hasil depolimerisasi perbandingan mol PET(unit ulang):K₂CO₃ sebesar 28:1 yang merupakan hasil maksimal pada proses depolimerisasi ditampilkan pada Gambar 2. Pada spektra FTIR tersebut, puncak serapan beberapa panjang gelombang yang merupakan khas senyawa BHET terlihat cukup jelas. Diantaranya, puncak serapan daerah karbonil yang menunjukkan adanya gugus C=O muncul pada bilangan gelombang 1689,64 cm⁻¹. Gugus C-O ditunjukkan pada bilangan gelombang 1280,73 cm⁻¹ adanya spektra tersebut juga menunjukkan bending C-O alkohol pada bilangan gelombang 1072,42 cm⁻¹. Selain itu, puncak serapan gugus OH pada monomer BHET muncul bilangan gelombang 3448,72 cm⁻¹ dimana hal ini juga diperkuat dengan adanya bending OH pada bilangan gelombang 1134,14 cm⁻¹. Adanya CH sp², yang ada pada senyawa BHET ditunjukkan pada 3062,96 cm⁻¹ dan CH sp³ ditunjukkan pada 2962,66–2877,79 cm⁻¹. Keberadaan senyawa aromatis ditunjukkan dengan adanya puncak rendah *overtone*, yang merupakan ciri khas senyawa ini, pada daerah antara 2000–1800 cm⁻¹. Selain itu adanya *stretching* CH pada cincin aromatis terlihat pada bilangan gelombang 1435,03–1381,03 cm⁻¹. Selanjutnya *out of plane* (OOP) bending senyawa aromatis muncul pada 725,23 cm⁻¹ dan dari adanya satu puncak yang muncul pada bilangan gelombang 725,23 cm⁻¹ menunjukkan jika cincin aromatis tersebut merupakan para disubstitusi.

Spektra yang telah dijelaskan di atas menunjukkan kemiripan dengan spektra BHET yang dilaporkan Pingale dan Shukla [14]. Hasil Analisis FTIR tersebut menunjukkan jika senyawa hasil glikolisis ini adalah BHET. Bukti yang ditunjukkan adalah adanya senyawa ester yang mengandung gugus C=O dan C–O. Selain itu, adanya senyawa aromatis

para disubstitusi dan senyawa alkohol juga menunjukkan gugus-gugus fungsi khas yang dimiliki BHET.



Gambar. 3. Pemindaian DSC hasil depolimerisasi limbah botol plastik PET.

D. Analisis Termal

D.1 Analisis menggunakan Differential Pemindaian Calorimetry (DSC)

Analisis DSC pada penelitian ini dilakukan menggunakan TGA/DSCStar[®]System Mettler Toledo. Laju pemanasan yang digunakan dinyatakan oleh sumbu “x” dan besarnya adalah 10°C/min dengan rentang suhu pemanasan antara 20–500°C. Sementara itu, aliran panas (Wg) yang setara dengan perubahan entalpi (Js) yang diterima atau dilepas cuplikan dinyatakan oleh sumbu “y”. Analisis DSC dilakukan pada BHET dengan perbandingan mol PET (unit ulang):K₂CO₃ sebesar 28:1. Perbandingan tersebut dipilih karena merupakan perbandingan dengan persen hasil paling banyak. Pemindaian DSC hasil proses depolimerisasi dilaporkan pada Gambar 3.

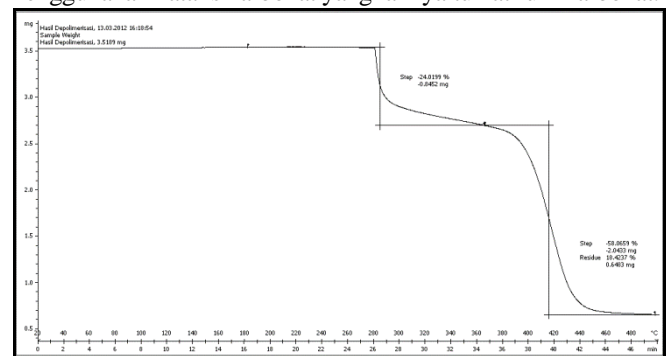
Analisis DSC terhadap material polimer pada umumnya digunakan untuk mengetahui persen kristalinitas, laju kristalisasi, kinetika reaksi polimerisasi, degradasi polimer, dan pengaruh komposisi pada temperatur transisi *glass* (T_g) serta penentuan kapasitas panas dan titik leleh [21]. Analisis DSC pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui titik leleh BHET hasil depolimerisasi. Puncak endotermik yang tajam, pada suhu 109,98°C, ditunjukkan pada Gambar 3. Keberadaan puncak endotermik ini mengindikasikan titik leleh senyawa BHET yaitu sebesar 109°C [14], 110°C [22], [8] dan 111°C [10]. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa hasil depolimerisasi pada penelitian ini mengandung monomer BHET. Hal ini diperjelas oleh Wang [5] yang menyebutkan bahwa dimer dari BHET menunjukkan titik leleh pada suhu 171°C dan PET pada suhu 240°C.

D.2 Analisis menggunakan Termogravimetric Analysis (TGA)

Analisis TGA dilakukan bersama-sama dengan Analisis DSC menggunakan alat TGA/DSC Star[®]System Mettler Toledo. Seperti halnya DSC, laju pemanasan dinyatakan oleh sumbu “x” pada kurva termal TGA. Sedangkan pengurangan massa cuplikan akibat pemanasan ditunjukkan oleh sumbu “y”. Analisis TGA dilakukan untuk mengetahui tingkat stabilitas termal suatu material. Berat cuplikan pada proses ini diukur secara berkelanjutan dalam suhu yang telah ditentukan. Kurva TGA untuk hasil depolimerisasi ditunjukkan pada Gambar 4.

Setidaknya terdapat dua dekomposisi termal yang nyata yang ada pada gambar tersebut. Pertama, pengurangan berat sekitar 24% dimulai pada suhu sekitar 270–280°C. Hal ini berhubungan dengan dekomposisi termal BHET. Kedua, pengurangan berat sekitar 58% dimulai pada suhu sekitar 390–420°C dikarenakan dekomposisi termal PET sebagai hasil depolimerisasi kembali monomer-monomer BHET selama proses analisis [16]. Pada laporan yang dibuat oleh Wang [5] pengurangan berat BHET pertama terjadi pada suhu antara 200–220°C, dalam hal ini terjadi pergeseran suhu yang lebih tinggi oleh karena dimungkinkan adanya bentuk-bentuk dimer yang terdapat pada cuplikan hasil depolimerisasi, tetapi pada jumlah yang sedikit dan secara eksak tidak diketahui. Hal ini dibuktikan dengan hasil DSC pada penelitian Wang [5] dimana menunjukkan secara eksak bahwa hasil depolimerisasi adalah BHET. Pengurangan berat kedua pada suhu sekitar 400–420°C sama seperti hasil depolimerisasi pada penelitian ini.

Cuplikan BHET hasil depolimerisasi pada penelitian ini berhasil mengkonversi PET sebanyak 55,95%. Besar konversi PET ini tidak jauh berbeda apabila dibandingkan dengan hasil yang dilaporkan Fonseca [8] yaitu sebanyak 50% tetapi menggunakan katalis karbonat yang lain yaitu natrium karbonat.



Gambar. 4. Kurva Termal TGA Hasil Depolimerisasi Limbah Botol Plastik PET.

IV. KESIMPULAN

Katalis kalium karbonat dapat digunakan untuk mendepolimerisasi limbah botol plastik air mineral dengan bahan dasar PET menggunakan metode glikolisis dan dengan pereaksi etilen glikol. Metode glikolisis ini dilakukan pada suhu 196°C selama 8 jam. Konsentrasi katalis kalium karbonat pada penelitian memberikan pengaruh pada rendemen monomer (BHET) yang dihasilkan pada proses depolimerisasi. Semakin besar konsentrasi katalis yang digunakan dalam batas tertentu maka semakin banyak BHET yang dihasilkan dan konsentrasi optimum yang diperoleh. Pada penelitian ini konsentrasi optimum katalis berada pada perbandingan mol PET (unit berulang):katalis kalium karbonat sebesar 28:1. Produk rendemen depolimerisasi sebanyak 55,95%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Lukman Atmaja, Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu, arahan, pemahaman dan segala diskusi serta semua ilmu yang bermanfaat selama penyusunan tugas akhir.

2. Laboratorium Kimia Material dan Energi Jurusan Kimia FMIPA-ITS Surabaya.
3. Laboratorium Polimer PT. Chandra Asri Petrochemical, Tbk. atas ilmu tentang plastik yang sangat berharga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imran, M., Kim B., Han M., Cho B. dan Kim D., 2010. Sub And Supercritical Glycolysis Of Polyethylene Terephthalate (PET) Into The Monomer Bis(2-Hydroxyethyl) Terephthalate (BHET), *Polymer Degradation and Stability*, **95**, 1686-1693.
- [2] Welle, Frank, 2011. Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview, *Resource conservation and recycling*, **55**, 865– 875
- [3] Caldicott, R.J., 1999. The Basic Soft Stretch Blow Molding PET Containers. *Plastic Eng*, **35**, 35–38.
- [4] Suh, D.J., O.O. Park dan K.H. Yoon, 2000. The Properties Of Unsaturated Polyester Based On The Glycolyzed Poly(Ethylene Terephthalate) With Various Glycol Compositions, *Polymer*, **41**, 461-466.
- [5] Wang, Hui; Yanqing Liu, Zengxi Li, Xiangping Zhang, Suojiang Zhang dan Yanqiang Zhang, 2009. Glycolysis of Poly(ethyleneterephthalate) Catalyzed By Ionic Liquids, *European Polymer Journal*, **45**, 1535-1544.
- [6] Al-Salem, S.M., Lettieri P. danBaeyens J., 2009. Recycling And Recovery Routesofplastic Solid Waste (PSW). *Waste Management*, **29**, 2625-2643.
- [7] Awaja, Firas dan Dumitru Pavel, 2005. Recycling of PET, *European Polymer Journal*, **41**, 1453–1477.
- [8] Fonseca, R. Lopez., I.DuqueIngunza, B.de.Rivas, S.Arnaiz, dan J.I. Gutierrez Ortiz, 2010. Chemical Recycling Of Post-Consumer PET Waste By Glikolysis In The Presence Of Metal Salt. *Polimer Degradation and Stability*, **95**, 1022-1028.
- [9] Ghaemy, M. dan Mossaddegh K., 2005. Depolymerisation of Poly(Ethylene Terephthalate) Fibre Wastes Using Ethylene Glycol. *Polymer Degradation and Stability*, **90**, 570-576.
- [10] Yue, Q.F., C.X., Wang, L.N. Zhang, Y. Ni, Y.X. Jin, 2011. Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts, *Polymer Degradation and Stability*, **96**, 399-403.
- [11] Baliga, S., dan Wong WT., 1989, Depolymerization of Poly(Ethylene Terephthalate) Recycled From Post- Consumer Soft-Drink Bottles, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, **27**, 2071-2082.
- [12] Kao, C.Y, Cheng W.H. dan Wan B.Z., 1997. Investigation Of Catalytic Glycolysis of Polyethylene Terephthalate by Differential Pemindaian Calorimetry. *ThermochimActa*, **292**, 95-104.
- [13] Sánchez, A.C. dan Collinson, S.R., 2011. The Selective Recycling of Mixed Plastic Waste of Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate by Control of Process Conditions. *European Polymer Journal*, **47**, 1970-1976.
- [14] Pingale, N.D. dan S.R. Shukla, 2008. Microwave Assited Ecofriendly Recycling Of Poly (Ethylene Terephthalate) Bottle Waste. *European Polymer Journal*, **44**, 4151-4156.
- [15] Campanelli JR, Kamal MR, Cooper DG, 1994. Kinetics of Glycolysis of Poly(Ethylene Terephthalate) Melts. *Journal Appl Polym Sci*, **54**, 1731-1740.
- [16] Chen, CH., 2003. Study of glycolysis of poly (ethylene terephthalate) recycled From post consumer soft-drink bottles. III. Further investigation. *Journal Appl Polym Sci*, **87**, 2004–2010.
- [17] Goje, A.S. dan Mishra S. , 2003. Chemical Kinetics, Simulation, And Thermodynamics Of Glycolytic Depolymerisation Of Poly(Ethylene Terephthalate) Waste With Catalyst Optimization For Recycling Of Value Added Monomeric Products. *Macromol Mater Eng*, **288**, 326-336
- [18] Shukla, S.R. dan R.S. Pai, 2005. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) on Dye Loaded Groundnut Shells and Sawdust, *Separation Purification Technology*, **43**, 1.
- [19] Handoko, DSP., 2003. Aktivitas Katalis CR Zeolit melalui Modifikasi Zeolit Alam. *Jurnal Ilmu Dasar*, **Vol. 4**, No.2, Hlm. 70-76
- [20] Levenspiel, Octave, 1999. *Chemical Reaction Engineering* John Willey and Sons, USA.
- [21] Robinson, J.W., E.M. Skelly dan M. George., 2005. Undergraduate Instrumental Analysis, edisi keenam, Taylor & Francis e-library, 1028-1032.
- [22] Viana, Mateus E., Andre Riul, Gizilene M. Carvalho, Adley F. Rubira, Edvani C. Muniz., 2011. Chemical Recycling of PET by Catalyzed Glycolysis: Kinetics of The Heterogeneous Reaction. *Chemical Engineering Journal*. **173**, 210-219.