



Isomerisasi 1-buten menggunakan zeolit alam asal Malang, Jawa Timur, sebagai katalis

Melia Laniwati

Jurusan Teknik Kimia, Fak. Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung 40132; Telp.: (022) 2500989; Fax.: (022)2501438; e-mail : melia@che.itb.ac.id,

Masuk: September 1998; revisi masuk: Juni 1999; diterima: Juni 1999



08 Aug 2005

Sari

Isomerisasi 1-buten dengan katalis zeolit alam asal Malang, Jawa Timur, dilangsungkan dalam reaktor isothermal unggun tetap dengan suhu divariasikan antara 300° dan 550°C. Reaktan berupa 1-buten diproduksi melalui reaksi dehidrasi n-butanol dengan menggunakan katalis alumina aktif pada suhu 400°C. Komponen utama dalam zeolit alam asal Malang ini adalah mordenit. Zeolit alam, baik yang tidak maupun yang telah diprotonasi atau diasamkan, cukup baik dalam mengkatalisis isomerisasi interkonversi 1-buten. Namun, dengan keasaman yang dimilikinya, zeolit alam ini kurang mampu mengisomerisasi 1-buten menjadi isobutilen. Produk utama yang dihasilkan adalah trans-2-buten. Konversi reaksi yang dapat dicapai adalah sekitar 78,8%-84,5%. Pada suhu 500°-550°C konversi dapat mencapai 100%, tetapi yang terjadi bukan isomerisasi melainkan perengkahan.

Kata kunci: buten, isomerisasi, zeolit alam

Abstract

Isomerization of 1-butene on natural zeolite from Malang, East Java, as catalyst

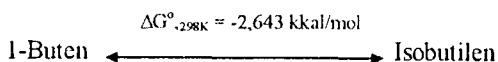
The isomerization of 1-butene with natural zeolite from Malang, East Java, as catalyst was carried out in an isothermal fixed bed reactor. The temperature has been varied from 300° up to 550°C. 1-Butene has been prepared by dehydration of n-butanol on alumina active at 400°C. The main component of natural zeolite from Malang is mordenite. Natural zeolite is an effective catalyst for the interconversion isomerization of 1-butene, but unfortunately its acidity is not enough for skeletal isomerization. The main product is 2-trans-butene. The 1-butene conversion ranged from 78.8% to 84.5%. At the high temperature (500° - 550°C), all reactants would be cracked 100%.

Key words: butene, isomerization, natural zeolite

1 Pendahuluan

Metil-ter-butyl eter (MTBE) adalah bahan yang dicampurkan ke dalam bensin untuk meningkatkan bilangan oktan, sehingga tidaklah heran jika MTBE menjadi zat kimia yang pertumbuhan produksinya melesat tinggi. MTBE disintesis melalui reaksi antara metanol dan isobutilen. Laju pertumbuhan produksi MTBE dunia sekitar 29% per tahun dan laju pertumbuhan produksi isobutilen adalah 27,5% per tahun⁽¹⁾.

Isobutilen dapat disintesis dari 1-buten melalui reaksi isomerisasi kerangka. Reaksi ini dilangsungkan secara termal dan secara katalitik.



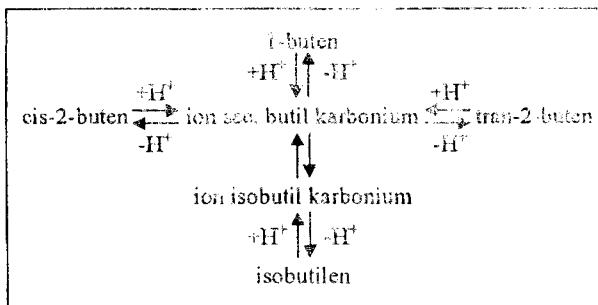
Kondisi reaksi yang diperlukan untuk kelangsungan isomerisasi kerangka relatif lebih keras dibandingkan dengan jenis reaksi isomerisasi interkonversi (isomerisasi pergeseran ikatan rangkap dan isomerisasi cis-trans).

Isomerisasi buten memerlukan katalis asam. Katalis yang dapat digunakan adalah asam fosfat/alumina⁽²⁾, η -alumina^(3,4), γ -alumina^(5,6), dan zeolit sintetis (ZSM-5^(7,8,9), ZSM-11⁽⁷⁾, ZSM-22⁽¹⁰⁾, ZSM-23^(9,11), ZSM-35 (Ferrierite)⁽⁹⁾, zeolit- β ⁽⁷⁾). Semua katalis zeolit tersebut mempunyai ukuran pori, nisbah kandungan silikon (Si) dan aluminium (Al) dalam kerangka, serta kekuatan asam yang berbeda-beda. Hal ini mengakibatkan aktivitas, selektivitas, dan perolehan isobutilen yang dihasilkan juga berbeda-beda.

Indonesia memiliki potensi zeolit alam dalam jumlah yang cukup besar dan tersebar di 46 lokasi, antara lain

di Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur. Ditinjau dari nilai kapasitas tukar kation (KTK), kualitas zeolit alam Indonesia tergolong baik, terutama zeolit dari Cikalong (Jawa Barat) dan Malang Selatan (Jawa Timur). Namun, potensi yang besar ini belum dimanfaatkan secara optimal dan baru terbatas untuk mengolah limbah industri, suplemen pada makanan ternak, dan pupuk, padahal zeolit alam mempunyai kemampuan mengkatalisis reaksi-reaksi yang perlu dikatalisis oleh asam.

Zeolit alam asal Malang banyak mengandung mineral jenis mordenit (55%-85%). Mordenit tergolong sebagai zeolit yang mempunyai pori yang terbentuk melalui cincin oksigen 12 unit (pori berukuran besar) yang sekelas dengan zeolit Y.



Gambar 1. Skema mekanisme isomerisasi buten dengan katalis η -alumina yang difluorinasi⁽³⁾

Isomerisasi 1-buten menjadi cis-2-buten, trans-2-buten, dan isobuten berlangsung dalam waktu yang bersamaan. Choudhary dan Doraiswamy⁽³⁾ memperkirakan reaksi isomerisasi buten mengikuti mekanisme seperti pada gambar 1. Hasil penelitian Zeng Xing Cheng dan V. Ponec⁽⁶⁾ yang menggunakan katalis γ -alumina menunjukkan bahwa pembentukan isobuten dari 1-buten bisa terjadi melalui dua cara. Cara pertama seperti yang diuraikan oleh Choudhary dan Doraiswamy, yaitu melalui penataan ulang kerangka buten (tepatnya ion butil karbenium) secara langsung (disebut mekanisme mono-molekuler). Untuk kelangsungannya diperlukan pusat asam Lewis. Cara kedua terdiri atas tiga tahap: mula-mula buten berdimerisasi membentuk okten, kemudian okten berisomerisasi kerangka menjadi isookten, dilanjutkan dengan perengkahan. Hasil perengkahan berupa campuran hidrokarbon dari C₁ sampai dengan C₅, (disebut mekanisme bi-molekuler). Proses ini terjadi karena penataan ulang kerangka okten menjadi isookten lebih mudah dari pada penataan ulang kerangka buten menjadi isobuten. Untuk kelangsungannya diperlukan pusat asam Brønsted atau Lewis, namun yang lebih dominan adalah pusat asam Brønsted. Dari hasil penelitiannya, Cheng dan Ponec juga dapat menyimpulkan bahwa pembentukan isobuten dari 1-buten 96% terjadi melalui mekanisme mono-molekuler.

Untuk katalis zeolit, ukuran pori katalis mungkin turut mengarahkan pembentukan isobuten dari 1-buten melalui salah satu mekanisme di atas. Zeolit dengan ukuran pori besar mampu mengakomodasikan molekul buten lebih dari satu, sehingga mudah terjadi dimerisasi buten membentuk okten.

Karena pada penelusuran pustaka tidak didapatkan publikasi penelitian isomerisasi 1-buten yang menggunakan katalis mordenit maupun zeolit alam Indonesia, maka pengujian kemampuan zeolit alam dalam mengkatalisis reaksi isomerisasi 1-buten ini menarik untuk diteliti. Di samping itu, kondisi reaksi yang optimum pun perlu dicari.

2 Percobaan

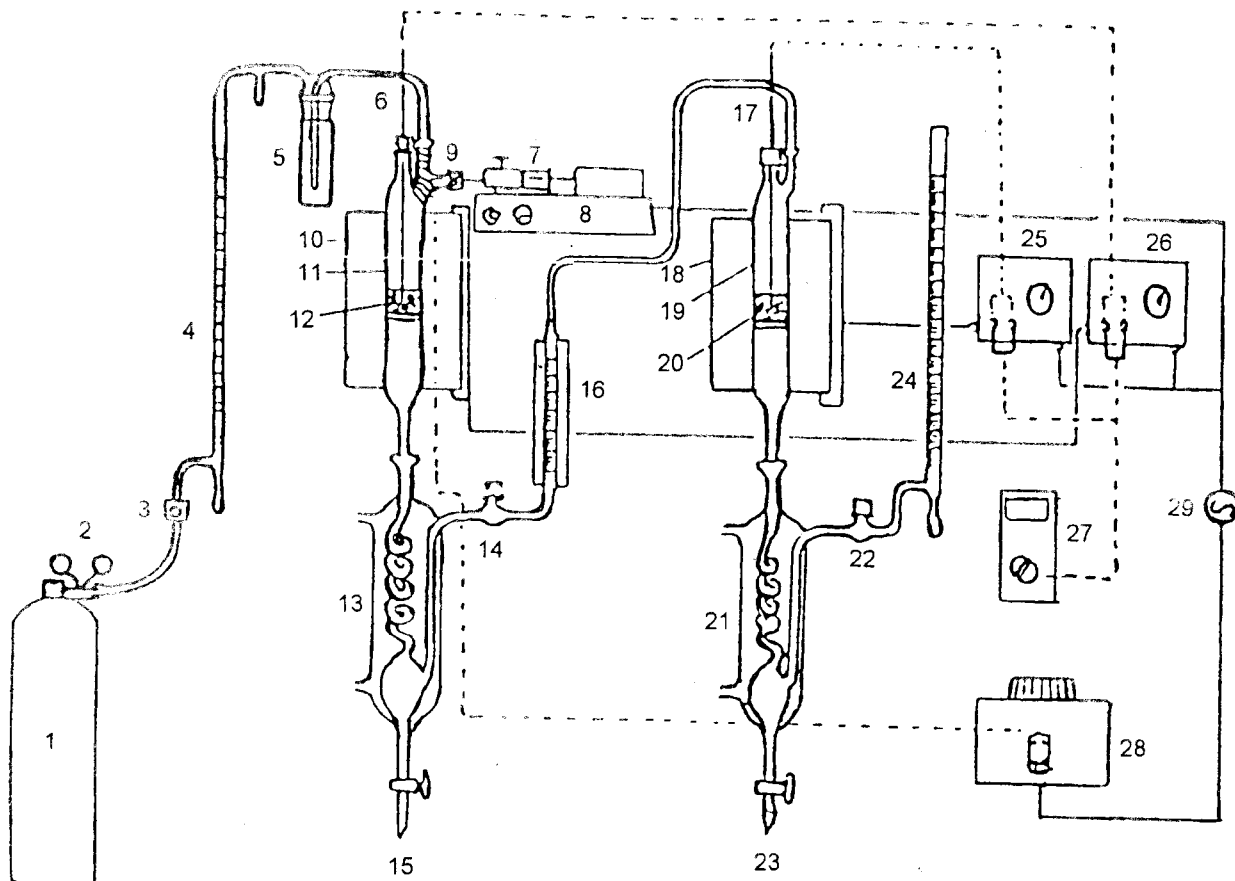
Pada penelitian ini diuji sifat katalitik zeolit alam asal Malang, Jawa Timur, dengan dan tanpa mendapat perlakuan asam sebelum digunakan. Pengasaman dilakukan dengan cara merendam zeolit alam pada larutan HCl 2 N selama 8 jam pada suhu kurang-lebih 80°C. Setelah itu, zeolit disaring, dicuci dengan aqua DM, dan dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C selama 12-15 jam. Kemudian, katalis dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 450°C dalam aliran gas nitrogen. Zeolit alam yang telah dikalsinasi diuji sifat katalitiknya terhadap reaksi isomerisasi 1-buten.

Reaksi isomerisasi 1-buten dilangsungkan secara isothermal di dalam reaktor tegak dengan katalis zeolit alam sebagai unggun tetap. Suhu reaksi divariasikan antara 300-550°C.

1-Buten (reaktan) dihasilkan melalui reaksi dehidrasi n-butanol dengan laju 24 mg/menit dan gas nitrogen sebagai pembawa dengan laju 10 ml/menit. Katalis yang digunakan adalah alumina aktif pada suhu reaksi 400°C. Produk dehidrasi mengandung 1-buten 96,11% dan 2-buten 3,63% (perhitungan % mol/mol tanpa mengikutsertakan gas nitrogen yang bercampur dengan produk tersebut) dengan laju campuran gas produk dan gas pembawa 16 ml/menit.

Produk reaksi dehidrasi dan isomerisasi dianalisis dengan menggunakan kromatografi gas dengan jenis detektor pengionan (*Flame Ionization Detector*) dan kolom berisi Carbopack C / 0,19 % Picric Acid 80/100 mesh. Suhu kolom dipilih 50°C, sedangkan suhu injektor dan detektor 75°C. Gas pembawa adalah nitrogen.

Kedua reaktor beserta peralatan pendukung yang digunakan untuk kelangsungan reaksi disusun seperti tampak pada gambar 2.



Keterangan :

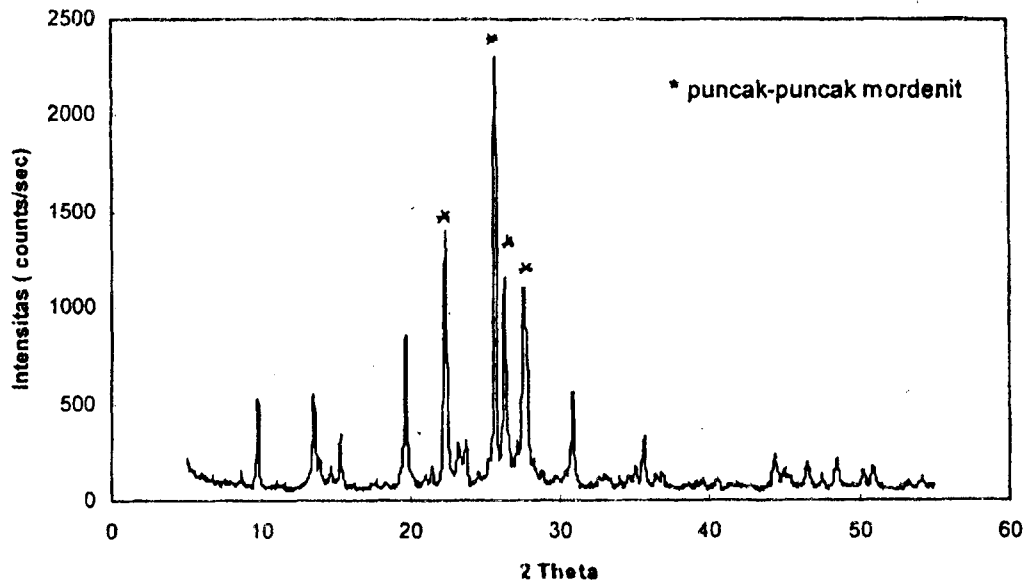
- | | | |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Tabung gas N ₂ | 11. Reaktor dehidrasi | 21. Kondensor |
| 2. Regulator gas | 12. Unggun katalis alumina aktif | 22. Tempat sampling produk gas |
| 3. Needle valve | 13. Kondensor | 23. Produk cair (jika ada) |
| 4. Bubble soap flowmeter | 14. Tempat sampling produk gas | 24. Bubble soap flowmeter |
| 5. Absorber (silica gel) | 15. Produk cair | 25. Pengendali temperatur |
| 6. Termokopel | 16. Rotameter | 26. Pengendali temperatur |
| 7. Syringe (suntikan) | 17. Termokopel | 27. Termometer digital |
| 8. Syringe pump | 18. Tungku pemanas | 28. Regulator AC (variac) |
| 9. Kawat pemanas | 19. Reaktor isomerisasi | 29. Sumber daya AC |
| 10. Tungku pemanas | 20. Unggun katalis (zeolit) | |

Gambar 2 Rangkaian peralatan sistem reaksi isomerisasi 1-buten

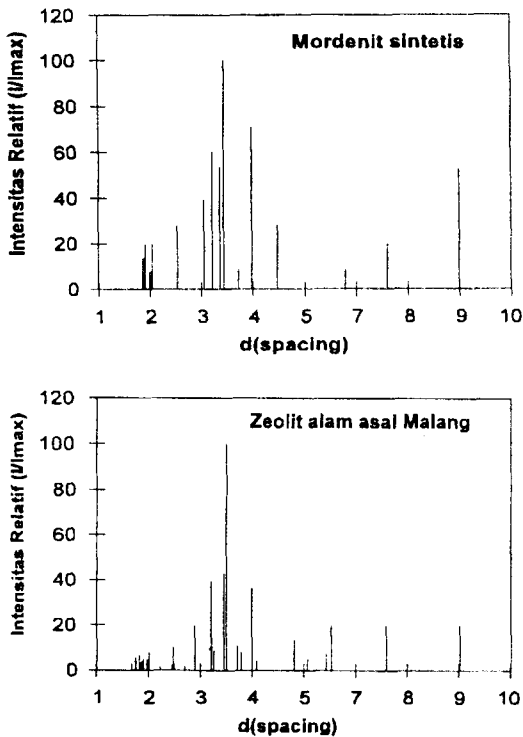
Selain menguji kemampuan zeolit alam dalam mengkatalisis reaksi isomerisasi, dilakukan juga analisis dengan menggunakan difraktometer sinar-X merk Diano tipe 2100 E dan Scanning Electron Microscope merk Jeol JSM 5310 LV (untuk melihat bentuk morfologi), sedangkan luas permukaan BET dianalisis dengan menggunakan Micromeritics Flowsorb II tipe 2300 dari Shimadzu dengan gas nitrogen sebagai adsorbat.

3 Hasil percobaan dan pembahasan

Zeolit alam Malang terdiri atas berbagai jenis senyawa zeolit. Berdasarkan pola difraktogram sinar-X (gambar 3) dapat disimpulkan bahwa komponen utama zeolit alam Malang adalah mordenit. Perbandingan difraktogram antara mordenit sintetis dan zeolit alam dapat dilihat pada gambar 4 dan tabel 1. Data puncak untuk mordenit sintetis diambil dari bank data JCPDS -ICDD NO. 22-1340.



Gambar 3 Spektrum XRD zeolit alam asal Malang, Jawa Timur



Gambar 4 Perbandingan pola nilai d (spacing) untuk zeolit alam Malang dengan mordenit

Nisbah Si/Al zeolit ini adalah 9,38, sehingga keasamannya sedang. Luas permukaan berdasarkan data desorpsi nitrogen adalah 51,8 m²/gram. Bila dibandingkan dengan katalis lain (misalnya ZSM-5 atau alumina aktif), zeolit alam Malang dapat dikatakan mempunyai luas permukaan yang rendah.

Hasil uji katalitik zeolit alam terhadap reaksi isomerisasi 1-buten disajikan dalam tabel 2. Pada percobaan ini diuji juga kinerja zeolit alam yang mendapat perlakuan pengasaman (diprotonasi). Dengan pengasaman, ion penetral zeolit akan dipertukarkan dengan proton (H⁺). Hasil pengujian ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 1 Perbandingan nilai d (spacing) antara mordenit sintetis dengan zeolit alam Malang

(untuk puncak yang mempunyai intensitas relatif >10%)

No	Zeolit alam		Mordenit sintetis (JCPDS-ICDD No. 22-1340)				
	d (Å)	i relatif	d (Å)	i relatif	h	k	l
1.	9,056	20	8,96	50	1	2	0
2.	6,559	21	6,55	20	1	1	1
3.	5,796	12	5,74	10	1	2	1
4.	4,520	35	4,49	30	3	3	0
5.	3,982	60	3,98	70	1	5	0
6.	3,469	100	3,45	100	1	2	2
7.	3,386	47	3,39	50	4	4	0
8.	3,229	45	3,21	60	5	1	1
9.	2,891	21	3,04	40	3	2	2
10.	2,512	11	2,526	30	1	8	0

Tabel 2 Komposisi produk reaksi isomerisasi 1-buten dengan menggunakan katalis zeolit alam Malang.

Komponen Produk	Komposisi gas produk (% mol) pada suhu (°C)					
	310°	350°	400°	450°	500°	660°
Metan	0	0	0	0	48.234	58.510
Hidrokarbon C2	0.023	0	0	0	49.305	41.155
Hidrokarbon C3	0.378	0.823	0.245	0.314	2.425	0.145
Isobutan	0	0	0	0	0	0
1-Buten	19.110	16.301	18.909	20.575	0.024	0.190
n-Butan	0	0	0	0	0	0
Isobuten	2.809	0.633	0	0.101	0	0
Cis-2-Buten	29.146	31.047	32.017	31.321	0	0
Trans-2-Buten	48.533	51.195	48.829	47.689	0	0

Tabel 3 Komposisi produk reaksi isomerisasi 1-buten dengan menggunakan katalis zeolit alam Malang yang telah diprotonasi.

Komponen Produk	Komposisi gas produk (% mol) pada suhu (°C)					
	310°	350°	400°	450°	500°	550°
Melan	0	0	0	0	56.293	64.880
Hidrokarbon C2	0.180	0.227	0	0	42.924	35.120
Hidrokarbon C3	0.633	0.591	0.646	1.434	0.782	0
Isobutan	0.088	0	0	1.491	0	0
1-Buten	15.022	17.154	17.642	18.927	0	0
n-Butan	0.646	0	0.424	0.173	0	0
Isobuten	0.199	0.099	0.494	0.627	0	0
Cis-2-Buten	30.708	29.933	32.487	31.996	0	0
Trans-2-Buten	52.524	51.996	48.307	45.352	0	0

Dari kedua tabel tersebut tampak bahwa zeolit alam, baik yang belum diprotonasi maupun yang telah diprotonasi, dapat digunakan untuk meng-isomerisasi senyawa 1-buten. Jenis reaksi isomerisasi yang terjadi (sebagian besar) adalah isomerisasi interkonversi (isomerisasi pergeseran ikatan rangkap dan cis-trans), bukan isomerisasi kerangka. Reaksi isomerisasi berlangsung dengan baik pada suhu reaksi 300° sampai 450° C. Di atas suhu tersebut reaksi yang dominan adalah reaksi perengkahan. Hal ini tampak dari komposisi produk yang terbentuk, yaitu senyawa C₁, C₂, dan C₃. Selektivitas isobuten tertinggi yang dapat dicapai adalah 3,47 % pada penggunaan zeolit alam dengan suhu reaksi 310°C, dan selektivitas trans-2-buten tertinggi mencapai 61,81% pada penggunaan zeolit alam diprotonasi dengan suhu reaksi 310°C.

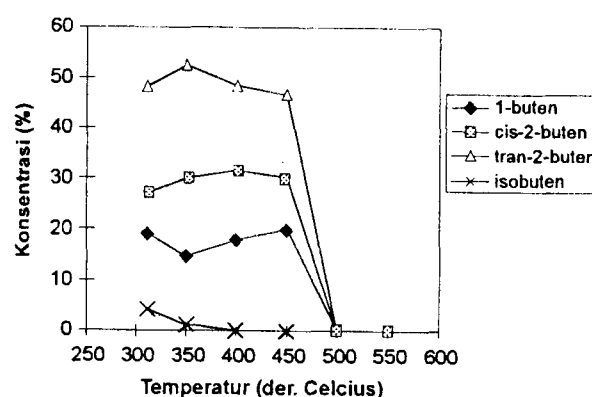


Gambar 5 Scanning electron microscope image dari zeolit alam asal Malang

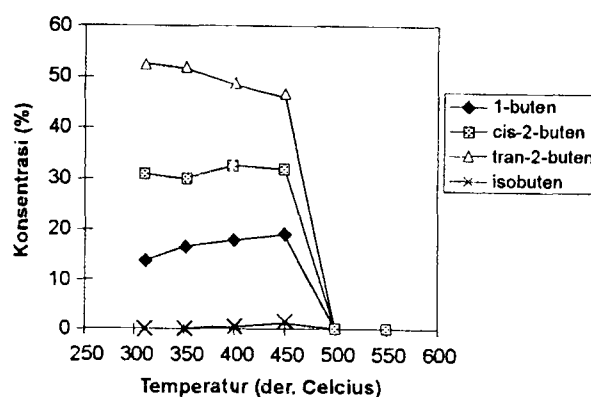
Pada suhu reaksi 300° sampai 450° C juga terbentuk senyawa C₂ dan C₃, namun dalam jumlah kecil. Terbentuknya senyawa C₂ dan C₃ pada kondisi ini lebih disebabkan oleh pembentukan produk reaksi melalui mekanisme bi-molekuler, yaitu dua buah molekul n-buten

bergabung sehingga terbentuk senyawa n-okten yang dilanjutkan dengan perengkahan (pemutusan ikatan) sehingga terbentuk C₂, C₃, dan senyawa jenuh C₄ yang juga disertai pembentukan coke (C) yang menempel pada katalis. Hal ini didukung oleh data, yaitu adanya senyawa C₄ jenuh (n-butan dan isobutan) dalam produk reaksi.

Pada suhu di atas 450°C, senyawa 1-buten tidak sempat mengalami isomerisasi tetapi langsung mengalami perengkahan sehingga produk reaksinya berupa senyawa C₁ dan C₂. Kurva komposisi senyawa-senyawa buten dalam produk pada berbagai suhu reaksi disajikan dalam gambar 6.



(a)



(b)

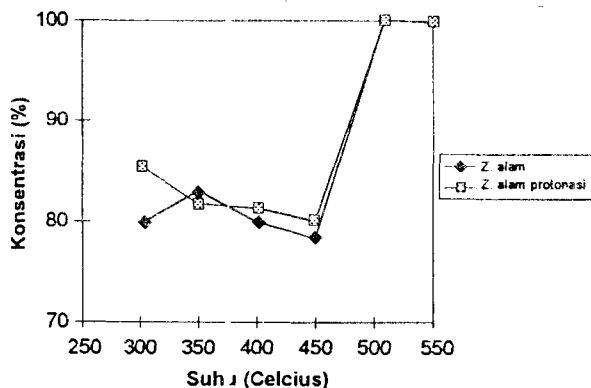
Gambar 6 Konsentrasi senyawa-senyawa buten dalam produk reaksi isomerisasi 1-buten dengan menggunakan katalis zeolit alam Malang (a) dan zeolit alam Malang yang telah diprotonasi (b)

Kedua kurva pada gambar 6 mempunyai bentuk yang hampir sama. Senyawa trans-2-buten merupakan senyawa terbanyak dalam aliran produk, sedangkan yang kedua terbanyak adalah cis-2-buten. Ini

menunjukkan bahwa trans-2-buten merupakan senyawa yang paling mudah dibentuk pada reaksi isomerisasi ini. Konsentrasi isobuten sangatlah kecil, menunjukkan bahwa katalis yang digunakan, baik zeolit yang tidak maupun yang mendapat perlakuan asam, masih terlalu rendah keasamannya, sehingga sulit untuk mengarahkan reaksi ke pembentukan isobutilen. Hal ini terjadi karena untuk berlangsungnya reaksi isomerisasi kerangka diperlukan katalis dengan keasaman yang lebih tinggi dari pada jenis isomerisasi interkonversi.

Untuk suhu reaksi isomerisasi 300°- 450° C, komponen utama dalam aliran produk adalah senyawa buten, khususnya 1-buten, cis-2-buten, dan trans-2-buten. Ketiga senyawa ini tidak atau belum berada dalam keadaan kesetimbangan. Perbandingan komposisi produk dengan data kesetimbangan dapat dilihat pada tabel 4.

Konversi isomerisasi 1-buten dengan menggunakan katalis zeolit alam ternyata cukup tinggi, yaitu di atas 78,8%. Konversi tertinggi dicapai pada suhu 500° dan 550°C, namun reaktan atau 1-buten tidak terkonversi menjadi senyawa buten lainnya, melainkan mengalami perengkahan membentuk senyawa C₁, C₂, dan C₃. Pada kondisi di mana sebagian buten mengalami isomerisasi, (pada suhu 300° - 450°C), konversi reaksi yang dapat dicapai adalah 78,8% sampai 84,5%. Harga konversi reaksi pada berbagai suhu disajikan dalam gambar 7.



Gambar 7 Konversi isomerisasi 1-buten pada berbagai suhu

Tabel 4 Perbandingan konsentrasi senyawa buten pada berbagai suhu

Suhu (°C)	Zeolit alam			Zeolit alam protonasi			Kesetimbangan		
	1-but	cis-2-but	trans-2-but	1-but	cis-2-but	trans-2-but	1-but	cis-2-but	trans-2-but
300	-	-	-	-	-	-	19,6	29,2	51,2
310	19,7	30,1	50,1	15,3	31,2	53,5	-	-	-
350	16,6	31,5	51,9	17,3	30,2	52,5	22,7	28,9	48,5
400	19,0	32,1	48,9	17,9	33,0	49,1	25,8	28,4	45,8
450	20,7	31,4	47,9	19,7	33,2	47,1	28,7	27,8	43,6

Dalam mengkonversi ataupun mengisomerisasi 1-buten, zeolit alam yang diprotonasi dengan yang tidak

diprotonasi tidak memberikan perbedaan yang signifikan. Hal ini mungkin ada kaitannya dengan jumlah pusat asam katalis. Hasil analisis keasaman menggunakan metode titrasi asam basa menunjukkan bahwa keasaman zeolit alam ekuivalen dengan 2,05 mmol H⁺/gram katalis dan zeolit alam yang diprotonasi 2,11 mmol H⁺/gram katalis. Jumlah pusat asam Brønsted dan Lewis (nisbah pusat asam Brønsted terhadap Lewis) belum diteliti. Dugaan sementara, isomerisasi 1-buten menjadi senyawa-senyawa buten lainnya sebagian besar mengikuti mekanisme mono-molekuler (seperti yang dihasilkan oleh Cheng dan Ponoc). Hal yang mendukung pernyataan ini adalah dijumpainya senyawa C₁, C₂, C₃, isobutan, dan n-butan dalam jumlah total kurang dari 4%. Namun, untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas tentang mekanisme reaksi isomerisasi ini diperlukan penelitian lanjut yang lebih teliti.

4 Kesimpulan

Komponen utama penyusun zeolit alam asal Malang, Jawa Timur, adalah mordenit. Zeolit alam asal Malang ini dapat dan cukup baik untuk mengkatalisis reaksi isomerisasi 1-buten menjadi senyawa 2-buten. Dengan keasaman yang dimilikinya, zeolit alam belum mampu mengisomerisasi 1-buten menjadi isobuten. Bila ratio Si/Al zeolit alam ditingkatkan, mungkin zeolit alam ini akan dapat mengisomerisasi 1-buten menjadi isobuten. Suhu yang baik untuk isomerisasi 1-buten menjadi 2-buten adalah di bawah 450°C, karena di atas suhu tersebut reaksi perengkahan akan lebih dominan. Konversi 1-buten pada suhu reaksi 300°-450°C adalah sekitar 78,8%-84,5%, dengan produk utama trans-2-buten. Pada suhu 500°-550°C, konversi dapat mencapai 100%, namun produk reaksi adalah C₁, C₂, dan C₃.

5 Ucapan terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh DIK - ITB untuk tahun anggaran 1997/1998. Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan Edy Hardjo, ST dan Dendy Adityawarman, ST atas bantuan mereka dalam penelitian ini.

6 Daftar pustaka

1. Charles H. Vervalin (news editor), Isobutylene Leads C₄ Hydrocarbon Growth, *Hydrocarbon Processing*, Januari, 33, (1993).
2. F.Earl Royals, *Advanced Organic Chemistry*, Prentice-Hall, (1954), 230; 312 - 313.

3. Vasant R. Choudhary dan L.K Doraiswamy, Model for the Isomerization n-Butene to Isobutene, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 14(3), 227 - 235, (1975).
4. V.R. Choudhary dan L.K. Doraiswamy, Isomerization of n-Buten to Isobutene : I. Selection of Catalyst by Group Screening, *Journal of Catalysis*, vol. 23, 51 - 60. (1971).
5. Janine Szabo, *et al*, Isomerization of n-Butene to Isobutene Catalyzed by Fluorinated Alumina, *Appl. Catalysis A. General*, vol. 96, 319-330, (1993).
6. Zheng Xing Cheng dan Vladimir Ponec, Selective Isomerization of Butene to Isobutene, *Journal of Catalysis*, vol.148, 607-616, (1994).
7. Daniel Bianchi dkk., Kinetics Studies of the Isomerization of n-Butenes over Boroalumino-silicate Zeolites, *Journal of Catalysis*, vol. 145, 551 - 560 , (1994).
8. Melia Laniwati dan Edy Hardjo, Isomerisasi 1-Buten dengan Menggunakan Katalis ZSM-5, *Proceeding Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia*, ITS-Surabaya, D7, (1997).
9. O'Young Chin-Lin *et al*, Note : Skeletal Isomerization of 1-Butene on 10 Member Ring Zeolite Catalysts, *Journal. of Catalysis*, vol. 151, 467 - 469, (1995).
10. Mark W. Simon, *et al*, Synthesis and Characterization of ZSM-22 Zeolite and Their Catalytic Behavior in 1-Butene Isomerization Reactions, *Journal of Catalysis*, vol. 147, 484-493, (1995).
11. Wen Qing Xu *et al*, Selective Conversion of n-Butene to Isobutylene at Extremely High Space Velocities on ZSM-23 Zeolites, *Journal of Catalysis*, vol. 150, 34-45, (1994).
12. Subagjo, G Handi A. dan Melia L., Dehydration of n-Butanol on Y Zeolite, *The Asahi Glass Foundation Seminar, Proceedings ITB : vol. 28(2) Supplement*, 36 -43, (1996)