

STUDI PERUBAHAN UKURAN PORI ZEOLIT Y BERDASARKAN PENGARUH VARIASI RASIO Si/Al, VARIASI KATION DAN PENAMBAHAN MOLEKUL ORGANIK MENGGUNAKAN METODE MEKANIKA MOLEKULER

STUDY OF SIZE CHANGES ZEOLITE Y PORE BASED ON THE EFFECT OF Si/Al RATIO VARIATION, CATIONS VARIATION AND ADDITION OF ORGANIC MOLECULES USING MOLECULAR MECHANICS METHOD

Dwi Junita Rahman*, Rahmat Gunawan, Daniel Tarigan

Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas
Mulawarman. Jalan Barong Tongkok, Gn. Kelua, Samarinda

*Corresponding author: dwijunita86@gmail.com

ABSTRACT

The structure modeling of zeolite Y with variation of Si/Al, addition of cations and addition of organic molecules calculated by the molecular mechanics method has been investigated. Modeling of zeolite was conducted by creating a framework structure of a unit cell of zeolite Y. Zeolite Y with the lowest optimization energy (Si/Al = 4.3) was chosen to further study the effect of addition of cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) and organic molecules ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$, $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) on pore diameters. The result showed that the impregnation of K^+ and the addition of $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ gave structures with the largest pore diameters, which were 16.0303 and 15.9126 Å, respectively.

Keywords: *Zeolite Y, Molecular Mechanics, Pore Diameters*

PENDAHULUAN

Penggunaan komputer sebagai peralatan kerja laboratorium telah dikembangkan menjadi suatu aspek kajian yang disebut dengan kimia komputasi. Kimia komputasi merupakan eksperimen kimia yang dilakukan dengan menggunakan komputer (*computer experiment*) dimana menggabungkan antara unsur eksperimen dan teori dalam suatu sistem kimia [1].

Pemodelan molekul merupakan salah satu bagian komputasi kimia tentang studi struktur molekul, yang mempelajari tentang struktur, sifat, karakteristik dan kelakuan suatu molekul. Pemodelan molekul dapat digunakan untuk merancang suatu molekul sebelum dibuat di laboratorium sehingga dapat diperoleh molekul yang diinginkan secara efisien, sebagai contoh pemodelan molekul untuk merancang struktur zeolit sebelum dilakukan sintesis zeolit yang dikehendaki [2].

Zeolit merupakan suatu kelompok mineral yang dihasilkan dari proses hidrotermal pada batuan beku basa. Mineral ini biasanya dijumpai mengisi celah-celah ataupun rekahan dari batuan tersebut [3]. Zeolit mempunyai struktur kerangka tiga dimensi terbentuk oleh tetrahedral $[\text{AlO}_4]^{5-}$ dan $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dengan pori-pori di dalamnya terisi ion-ion logam. Biasanya logam-logam alkali atau alkali tanah dan molekul air yang dapat bergerak bebas [1].

Zeolit dapat ditemukan di alam dan dapat disintesis. Zeolit sintetis adalah suatu senyawa kimia yang mempunyai sifat fisik dan kimia yang sama dengan zeolit alam [3]. Sehubungan dengan pemanfaatan zeolit yang lebih luas, membutuhkan struktur zeolit dengan ukuran pori yang besar. Di dalam struktur zeolit, ukuran pori dipengaruhi oleh rasio Si/Al, penambahan kation dan molekul organik. Sehingga perlu diketahui harga rasio Si/Al suatu zeolit yang menghasilkan struktur dengan ukuran pori yang paling besar sebelum dilakukan sintesis [2].

Salah satu contoh zeolit sintesis adalah zeolit Y yang memiliki beberapa fungsi, diantaranya sebagai katalis, adsorben dan bahan pendingin kering.

Penelitian ini dilakukan pada pemodelan zeolit Y dan dilihat perubahan ukuran porinya (*cavity/supercage*) dengan melakukan variasi rasio Si/Al, variasi kation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+}), dan penambahan molekul organik (butanol, pentanol, dan fenol) berdasarkan metode mekanika molekuler.

PROSEDUR PENELITIAN

Teknik Perhitungan Komputasi

Piranti Lunak yang digunakan adalah perangkat lunak Hyperchem 07. Bahan yang

digunakan yaitu model Zeolit Y yang dibuat secara komputasi, kation dan molekul organik yang diteliti adalah (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+}) dan organik (butanol, pentanol, dan fenol).

Pemodelan Struktur Zeolit Y

Pemodelan zeolit Y dilakukan dengan kerangka dasar struktur satu unit sel zeolit Y dibuat dengan menyusun pusat tetrahedral T seluruhnya atom Si (Rasio Si/Al = ~) tanpa adanya pengaruh kation dan molekul air. Kerangka struktur satu unit sel zeolit Y yang terdiri dari sepuluh sangkar sodalit (sangkar) yang dihubungkan dengan jembatan oksigen dalam cincin ganda beranggota enam membentuk pori besar (*cavity/supercage*) yang merupakan sangkar dan membentuk *window* yang merupakan cincin beranggota duabelas. Sangkar sodalit (sangkar) tersusun oleh cincin beranggota empat (SBU 4) dan cincin beranggota enam (SBU 6) dan terdiri dari 24 TO4. Selanjutnya, setelah selesai menggambar struktur zeolit Y dilakukan *Model Build* dilanjutkan dengan melakukan *start log*, kemudian ditulis nama file.log dan disimpan. Kemudian, dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekuler dengan medan gaya MM+, setelah dioptimasi dilakukan *stop log* dan disimpan file dalam bentuk *.hin*. Kemudian dilakukan pengukuran diameter pori, panjang ikatan Si-O dan sudut Si-O-Si.

Pemodelan Struktur Zeolit Y dengan Variasi Rasio Si/Al

Pemodelan struktur zeolit Y dengan variasi Si/Al dilakukan dengan membuka file pemodelan struktur zeolit Y yang sudah dilakukan pada prosedur sebelumnya yang telah disimpan dalam bentuk *.hin*. Kemudian, dilakukan variasi rasio Si/Al dengan mensubstitusi atom Si yang ada dengan menggunakan atom Al. Rasio Si/Al yang digunakan yaitu 2; 2,2; 2,43; 2,69; 3; 3,36; 3,8; 4,3 dan 5. Selanjutnya, dilakukan *Model Build* pada struktur zeolit Y yang sudah di variasi rasionya dan dilanjutkan dengan *start log* dan ditulis nama file.log dan disimpan. Kemudian dilanjutkan dengan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekuler dengan medan gaya MM+, selesai optimasi geometri dilakukan *stop log*, dan file disimpan dalam bentuk *.hin*. Kemudian dilakukan pengukuran diameter pori, panjang ikatan Si-O dan Al-O, serta sudut Si-O-Al Variasi rasio Si/Al dilakukan adalah rasio 2 hingga 5 dan pengukuran dilakukan pada setiap variasi rasio Si/Al yang dilakukan.

Pemodelan Struktur Zeolit Y dengan Variasi Kation

Awalnya dibuka terlebih dahulu file struktur molekul zeolit Y yang telah dibuat dengan perbandingan ratio Si/Al yang memiliki energi terendah. Selanjutnya dilakukan penambahan kation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+}) dengan menyisipkannya diantara rongga pori dari zeolit RHO. Selanjutnya dilakukan *Model Build* yang dilanjutkan dengan *start log* dan ditulis nama file *.log* yang akan disimpan. Kemudian dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekuler dengan medan gaya MM+. Setelah optimasi selesai, dilakukan *stop log* dan file disimpan dalam bentuk *.hin*. Kemudian dilakukan pengukuran diameter pori, panjang ikatan Si-O dan Al-O, sudut Si-O-Al dan jarak kation-Al.

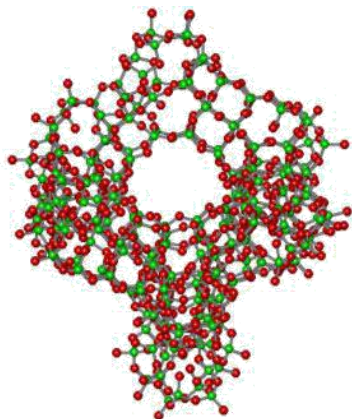
Pemodelan Zeolit Y dengan Penambahan Molekul Organik

Pemodelan zeolit Y dengan penambahan molekul organik dilakukan pada struktur yang paling stabil dengan energi paling minimum. Molekul organik yang digunakan adalah butanol, pentanol, dan fenol. Awalnya adalah dengan membuka file struktur zeolit Y yang memiliki energi yang paling rendah. Kemudian ditambahkan molekul organik tersebut diantara rongga pori dari zeolit Y, setelah dilakukan penambahan molekul organik selanjutnya dilakukan *Model Build* dan dilanjutkan dengan *start log* diberi nama file *.log* dan disimpan. Setelah itu, dilakukan optimasi geometri menggunakan metode mekanika molekuler dengan medan gaya MM+, setelah selesai optimasi dilanjutkan dengan *stop log* dan file disimpan dalam bentuk *.hin*. Kemudian dilanjutkan dengan pengukuran diameter pori, pengukuran panjang ikatan dan pengukuran sudut ikatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemodelan Zeolit Y

Struktur zeolit Y yang dihasilkan terdiri dari 768 atom, dimana terdapat 240 atom Si dan 528 atom O. Struktur zeolit Y di optimasi geometri sehingga didapatkan energi minimum sebesar 1300,488647 Kkal/mol.



Keterangan: ● Silika ● Oksigen

Gambar 1. Pemodelan Struktur Zeolit Y

Tabel 1. Diameter Pori Struktur Zeolit Y

No Atom O	(Å)
342-725	15,6710
564-225	16,0975
284-684	14,4641

Hasil pengukuran diameter pori dari tabel tersebut menunjukkan besar diameter yang bervariasi, karena adanya interaksi fisika yang berbeda-beda antara setiap atom Si dan atom O pada struktur tersebut.

Tabel 2. Panjang Ikatan Si-O dan sudut Si-O-Si Struktur Zeolit Y

No Atom	(Å)
Si-O (724-725)	1,6532
Si-O (726-725)	1,6599
Si-O-Si (724-725-726)	128,045

Hasil Pemodelan Struktur Zeolit Y dengan Variasi Rasio

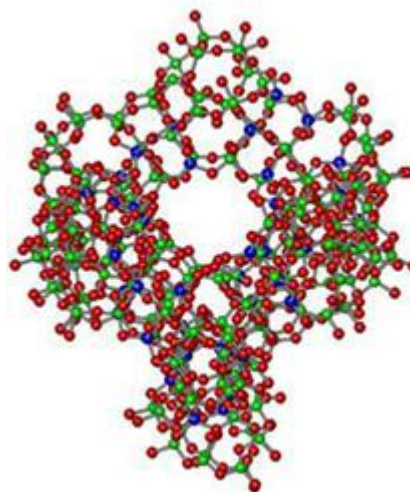
Variasi dilakukan dengan mengubah βn atom Si dengan atom Al dalam sangkar penyusun zeolit Y. Zeolit Y merupakan jenis zeolit silika sedang yang memiliki rasio Si/Al sebesar 2 sampai 5 [4]. Sehingga variasi rasio Si/Al dilakukan pada struktur zeolit Y dengan menggunakan rasio 2 sampai 5, karena sesuai dengan aturan Lowenstein yang melarang adanya ikatan Al-O-Al maka setiap substitusi atom Al yang diperoleh dalam satu struktur zeolit Y dengan rasio sesuai dengan perbandingan jumlah atom Si dan jumlah atom Al masing-masing. Variasi rasio Si/Al yang dilakukan yaitu 5; 4,3; 3,8; 3,36; 3; 2,69; 2,43; 2,2; dan 2.

Tabel 3. Jumlah atom Si, Al dan O Pada Struktur Zeolit Y dengan variasi Rasio Si/Al

Rasio Si/Al	Jumlah Atom		
	Si	Al	O
5	200	40	528
4,3	195	45	528
3,8	190	50	528
3,36	185	55	528
3	180	60	528
2,69	175	65	528
2,43	170	70	528
2,2	165	75	528
2	160	80	528

Tabel 4. Energi Minimum dan Selisih Energi Minimum Hasil Optimasi Geometri Struktur Zeolit Y dengan Variasi Rasio Si/Al.

Rumus Struktur	Rasio Si/Al	Energi Total (Kkal/mol)	Selisih Energi Minimum (Kkal/mol)
Si240O528	~	1300,4886	~
Al40Si200O528	5	3051,3723	1751, 8837
Al45Si195O528	4,3	1849,1970	548,7084
Al50Si190O528	3,8	1931,8029	631,3143
Al55Si185O528	3,36	2039,9135	739,4249
Al60Si180O528	3	1990,4364	689,9478
Al65Si175O528	2,69	2067,3938	766,9052
Al70Si170O528	2,43	2128,6558	828,1669
Al75Si165O528	2,2	2104,9809	804,4923
Al80Si160O528	2	2528,3647	1227,8761

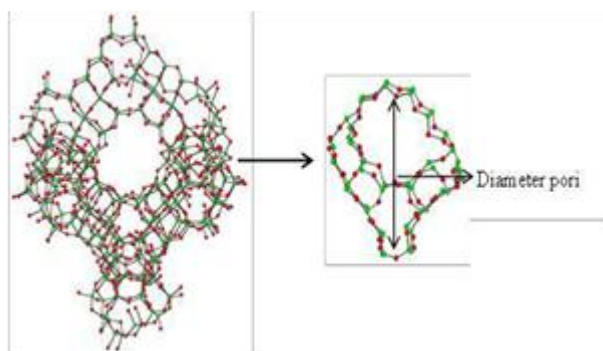


Keterangan: ● : Silika ● : Oksigen
● : Alumunium

Gambar 2. Struktur Zeolit Y Rasio Si/Al = 4,3

Dari tabel 4 tersebut terlihat bahwa pada rasio 4,3 memiliki energi minimum yang terendah

dibandingkan rasio lainnya, energi minimum yang dihasilkan sebesar 1849,1970 Kkal/mol sedangkan energi minimum tertinggi berada pada rasio 5 memiliki energi minimum sebesar 3051,3723 Kkal/mol, hal ini kemungkinan dapat disebabkan ada beberapa sudut pada struktur rasio Si/Al 5 membesar atau mengecil pada saat optimasi sehingga struktur zeolit Y pada rasio Si/Al 5 cenderung tidak stabil dan menghasilkan energi minimum tertinggi dibandingkan rasio lainnya. Energi minimum dipengaruhi oleh struktur molekul dimana perhitungan pada struktur molekul terbaik memiliki energi minimum terendah.



Gambar 3. Proses pengukuran diameter pori pada Zeolit Y.

Tabel 5. Diameter Pori (*Cavity/Supercage*) Struktur Zeolit Y dengan Variasi Rasio Si/Al

Rumus Struktur	Rasio Si/Al	P1 (Atom O342-725) (\AA)	P2 (Atom O564-225) (\AA)	P3 (Atom O284-684) (\AA)
240 Si O	~	15,6710 \AA	16,0975 \AA	14,4641 \AA
Al40Si200O528	5	12,7092	18,0005	14,8012
Al45Si195O528	4,3	15,0889	15,8853	15,5479
Al50Si190O528	3,8	15,3864	15,0711	14,9516
Al55Si185O528	3,36	15,6696	15,1977	14,9614
Al60Si180O528	3	14,7416	14,9588	15,0464
Al65Si175O528	2,69	14,8820	14,9103	15,2122
Al70Si170O528	2,43	15,9908	15,2685	14,9353
Al75Si165O528	2,2	16,1192	15,3453	15,7283
Al80Si160O528	2	15,5292	13,6648	15,8899

Berdasarkan tabel tersebut perbedaan ukuran diameter pori yang signifikan pada pori rasio Si/Al 5, kemungkinan disebabkan karena energi pada struktur tersebut menghasilkan energi minimum tertinggi sehingga strukturnya cenderung tidak stabil dan mempengaruhi hasil pengukuran pori, ukuran pori pada rasio Si/Al 5, menghasilkan diameter pori terpendek dan diameter pori terpanjang dibandingkan dengan diameter pori pada rasio lainnya.

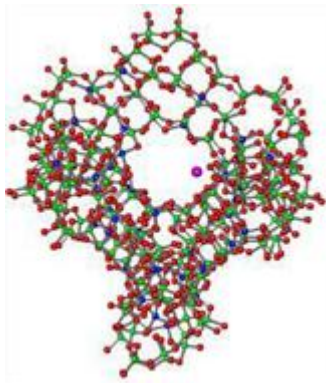
Tabel 6. Panjang Ikatan Al-O, Panjang Ikatan Si-O dan Sudut Si-O-Al dengan Variasi Rasio Si/Al

Rumus Struktur	Rasio Si/Al	Al-O (\AA)	Si-O (\AA)	Si-O-Al ($^{\circ}$)
Al40Si200O528	5	1,8737	1,6674	125,202
Al45Si195O528	4,3	1,8528	1,6526	111,878
Al50Si190O528	3,8	1,8543	1,6512	111,169
Al55Si185O528	3,36	1,8527	1,6592	114,184
Al60Si180O528	3	1,8611	1,6375	110,620
Al65Si175O528	2,69	1,8659	1,6412	108,451
Al70Si170O528	2,43	1,8608	1,6566	112,014
Al75Si165O528	2,2	1,8544	1,6517	113,207
Al80Si160O528	2	1,8380	1,6733	117,874

Berdasarkan tabel diatas adanya atom Al dalam kerangka struktur zeolit berpengaruh terhadap panjang ikatan antara atom Si-O-Al, terjadi perubahan panjang ikatan antara Si-O dengan Al-O dimana rata-rata panjang ikatan Si-O adalah 1,6 \AA sedangkan rata-rata panjang ikatan Al-O adalah 1,8 sehingga atom Si yang tersubstitusi dengan atom Al, menyebabkan panjang ikatan TO4 semakin panjang dan menyebabkan perubahan diameter pori (*cavity/supercage*) serta perubahan sudut dari struktur zeolit Y.

Hasil Pemodelan Struktur Zeolit Y dengan Variasi Kation

Pemodelan zeolit dilakukan menggunakan zeolit Y yang memiliki rasio Si/Al = 4,3 karena struktur ini merupakan struktur yang paling stabil dengan energi paling minimum. Struktur zeolit dengan rasio Si/Al = 4,3 kemudian ditambahkan dengan kation, kation yang digunakan adalah kation alkali (Na⁺, K⁺) dan kation alkali tanah (Mg²⁺, Ca²⁺).



Keterangan: ● : Silika ● : Alumunium
● : Oksigen ● : Kation

Gambar 4. Struktur Zeolit Y Rasio Si/Al 4,3 Dengan Kation

Tabel 7. Energi Minimum Hasil Optimasi Geometri Struktur Zeolit Y dengan Variasi Kation

Rumus Struktur	Kation	Energi Minimum (Kkal/mol)	Selisih Energi Minimum (Kkal/mol)
Al ₄₅ Si ₁₉₅ O ₅₂₈	-	1849,1970	-
Na Al ₄₅ Si ₁₉₅ O ₅₂₈	Na ⁺	1775,5352	-73,6618
K Al ₄₅ Si ₁₉₅ O ₅₂₈	K ⁺	1694,0131	-155,1839
Mg Al ₄₅ Si ₁₉₅ O ₅₂₈	Mg ²⁺	1785,2626	-63,6618
Ca Al ₄₅ Si ₁₉₅ O ₅₂₈	Ca ²⁺	1713,0178	-136,1792

Pada tabel 7 menunjukkan bahwa struktur zeolit Y rasio Si/Al = 4,3 dengan penambahan kation K⁺ memiliki energi minimum sebesar 1694,0131 Kkal/mol. Sedangkan dengan penambahan kation Mg²⁺ memiliki energi minimum tertinggi yakni sebesar 1785,2626 Kkal/mol. Perbedaan yang ditimbulkan pada energi minimum ini disebabkan oleh adanya pengaruh peletakan masing-masing kation pada struktur zeolit Y yang dapat menghasilkan sebuah interaksi fisika pada kation di dalam kerangka zeolit Y, kation dianggap berinteraksi secara langsung dengan atom Al karena yang menyebabkan muatan negatif adalah atom Al [5].

Struktur zeolit Y rasio Si/Al 4,3 dengan penambahan kation K⁺ merupakan struktur yang paling stabil karena memiliki energi minimum terendah dibandingkan dengan energi kation lainnya. Energi minimum pada penambahan kation berbeda-beda pada struktur zeolit Y saat dilakukan optimasi geometri. Energi minimum yang dihasilkan pada setiap penambahan kation berdasarkan pada perubahan posisi dari kation pada saat teroptimasi dimana posisi kation dan jarak antara setiap atomnya berbeda-beda sehingga menghasilkan energi minimum yang berbeda.

Perbedaan energi disebabkan oleh pengaruh peletakan ion-ion dalam struktur zeolit dan juga interaksi fisika antara inti kation terhadap struktur zeolit. Hal ini juga berhubungan dengan karakteristik masing-masing kation, antara lain adalah ukuran kation [1]. Perubahan energi minimum yang terjadi pada penambahan kation tidak dapat ditinjau berdasarkan jari-jari atau karakteristik setiap unsur alkali/alkali tanah menurut susunan atau urutannya dalam sistem periodik, karena pada penelitian ini arah dan posisi yang ditambahkan berbeda-beda. Perbedaan arah dan posisi kation pada struktur zeolit Y menyebabkan perubahan energi yang berbeda pada hasil perhitungan energi minimum dengan penambahan kation. Selanjutnya dilakukan pengukuran diameter pori, panjang ikatan, dan sudut ikatan.

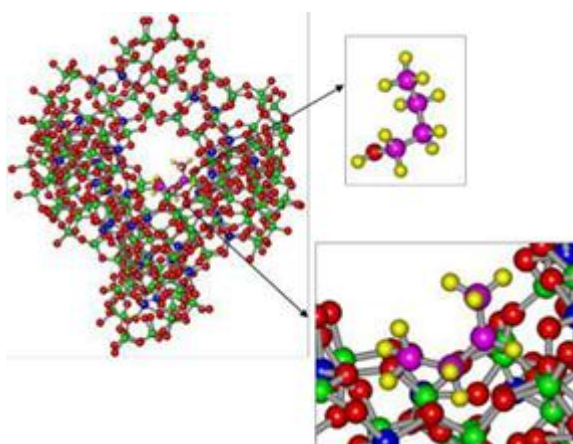
Tabel 8. Diameter Pori (*cavity/supercage*) pada Variasi Kation

Rumus Struktur	Kation	Atom O342-725 ()	Atom O564-225 ()	Atom O284-684 ()

Al45Si195O528	-	15,0889	15,8853	15,5479
NaAl45Si195O528	Na ⁺	15,3306	15,9756	15,5055
KAl45Si195O528	K ⁺	15,4683	16,0303	15,3852
MgAl45Si195O528	Mg ²⁺	15,3810	15,9229	15,4812
CaAl45Si195O528	Ca ²⁺	15,4728	15,9205	15,5154

Berdasarkan pengukuran diameter pori (*cavity/supercage*) dengan penambahan kation alkali dan alkali tanah dapat diketahui bahwa diameter pori dengan penambahan kation K⁺ menunjukkan ukuran diameter pori terbesar dibandingkan dengan penambahan kation lain yang ditambahkan pada struktur zeolit Y. Hal ini terjadi karena adanya ion K⁺ menyebabkan pelebaran sudut T-O-T paling besar sehingga membentuk pori (*cavity/supercage*) yang paling besar. Sehingga kation K⁺ memiliki pengaruh terbesar terhadap perubahan ukuran pori zeolit Y.

Hasil Pemodelan dengan Penambahan Molekul Organik



Gambar 5. Pemodelan Struktur Zeolit Y dengan Penambahan Molekul Organik

Pemodelan zeolit Y dengan penambahan molekul organik yang digunakan yaitu zeolit Y dengan variasi rasio Si/Al = 4,3 karena merupakan struktur yang stabil dengan energi minimum yang

rendah, molekul organik yang digunakan adalah C₄H₉OH, C₅H₁₁OH, C₆H₅OH yang kemudian dioptimasi hingga diperoleh bentuk molekul yang paling stabil.

Tabel 9. Energi Minimum Struktur Zeolit Y Rasio Si/Al = 4,3 dengan Penambahan Molekul Organik

Rumus Struktur	Molekul Organik	Energi Minimum (Kkal/mol)	Diameter pori zeolit Y (Å)
Al45Si195O528	-	1849,1970	15,8853
C ₄ H ₉ OH Al45Si195O528	C ₄ H ₉ OH	1706,5193	15,9126
C ₅ H ₁₁ OH Al45Si195O528	C ₅ H ₁₁ OH	1773,9518	15,9053
C ₆ H ₅ OH Al45Si195O528	C ₆ H ₅ OH	1769,9042	15,9118

Tabel diatas menunjukkan bahwa struktur zeolit Y rasio Si/Al = 4,3 dengan penambahan molekul organik C₄H₉OH (butanol) memiliki energi minimum terendah sebesar 1706,5193 Kkal/mol, sedangkan struktur dengan penambahan molekul organik

C₅H₁₁OH (pentanol) memiliki energi minimum tertinggi, yaitu 1773,9518 Kkal/mol. Perbedaan energi minimum ini disebabkan adanya pergeseran atau perpindahan dari masing-masing molekul organik tersebut pada saat dioptimasi. Pergeseran atau perpindahan dari molekul organik tersebut terjadi karena mencari posisi yang paling stabil dalam struktur zeolit. Perbedaan energi minimum ini dapat dilihat dari pergerakan masing-masing molekul organik tersebut, dimana molekul organik C₄H₉OH (butanol) lebih banyak berinteraksi dengan atom-atom penyusun struktur zeolit Y dibandingkan dengan molekul organik C₅H₁₁OH (pentanol) dan C₆H₅OH (fenol), sehingga molekul organik

C₄H₉OH (butanol) memiliki energi minimum terendah dengan kestabilan terbaik.

Dari tabel 9 dapat dilihat bahwa ukuran diameter pori zeolit jika dibandingkan antara struktur zeolit Y sebelum dan sesudah ditambahkan molekul organik, memiliki perbedaan yang cukup besar. Struktur zeolit Y setelah ditambahkan molekul organik diameternya lebih besar, yaitu sekitar 15,9053 Å - 15,9126 Å dari struktur zeolit Y tanpa penambahan molekul organik dengan diameter sebesar 15,8853 Å.

KESIMPULAN

Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada pemodelan struktur zeolit Y rasio Si/Al yang memiliki energi minimum terendah adalah struktur dengan rasio Si/Al = 4,3 dengan energi minimum sebesar 1849,1970 Kkal/mol.
2. Kation K⁺ adalah kation yang memiliki pengaruh terbesar pada ukuran diameter pori (*cavity/supercage*) zeolit Y.
3. Molekul organik yang memiliki pengaruh terbesar pada perubahan ukuran diameter pori (*cavity/supercage*) zeolit Y adalah C₄H₉OH (butanol).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhlisin, Z. M., Kasmui, Woro, S. 2008. *Kajian Pengaruh Variasi Rasio Si/Al dan Variasi Kation Terhadap Perubahan Ukuran Pori Zeolit Y Menggunakan Metode Mekanika Molekuler*. Semarang: FMIPA UNNES.

- [2] Endrias, H., Kasmui, Prasetya, A. T. 2013. *Pengaruh Rasio Si/Al, Kation dan Template Organik terhadap Ukuran Rongga Zeolit ZSM-5*. Vol 2 No. 1. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- [3] Saputra, R. 2006. *Pemanfaatan Zeolit Sintesis Sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Industri*. Artikel 1 IV Halaman 18-20. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- [4] Payra, P., Dutta, P. K. 2011. *Handbook of Zeolite Science and Technology Zeolites*. U.S.A: The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [5] Sugiyanti, N, Kasmui, Subiyanto, H. S. 2008. *Perubahan Ukuran Rongga Pada Modifikasi Molekul Zeolit ZSM-5 dengan Variasi Rasio Si/Al dan Variasi Kation Menggunakan Metode Mekanika Molekuler*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.