

Modifikasi Zeolit Alam Menggunakan Besi (Fe) dan Kobalt (Co) untuk Katalis Degradasi Fenol

Marina Adriati^a, Ahmad Suseno^{a*}, Taslimah^a

a Physical Chemistry Laboratory, Chemistry Department, Faculty of Sciences and Mathematics, Diponegoro University, Jalan Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang

b Inorganic Chemistry Laboratory, Chemistry Department, Faculty of Sciences and Mathematics, Diponegoro University, Jalan Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang

* Corresponding author: suseno@live.undip.ac.id

Article Info

Keywords:
zeolites,
modification, Fe
and Co, catalyst,
phenol

Kata kunci:
zeolit, modifikasi,
Fe dan Co, katalis,
fenol

Abstract

Abundance of natural zeolite in Indonesia is large enough to provide various fields of utilization, which one of them is as a catalyst material. The ability of these zeolite catalysts can be improved through the modification of zeolites by metal impregnation. In this study we conducted a modification of natural zeolites through impregnating of iron (Fe) and cobalt (Co) for catalysts oxidation phenol. Modification of natural zeolites was made through acid leaching stage using HF, HCl, and NH₄Cl continued impregnating of metal. Characterization of the products used x-ray diffractometer, surface area analyzer, and catalytic test was carried out on sample. The characterization indicate the mineral composition of the main component of the zeolite is mordenit, total acidity of Fe₂O₃-zeolite catalysts obtained at 2.7 mmol/g and CoO-zeolite catalyst at 2.5 mmol/g, Fe₂O₃-zeolite and CoO-zeolite have specific surface area and total pore volume sequentially, that is 38.3918 m²/g, 16.6569 cm³/g and 28.6209 m²/g, 12.5072 cm³/g and the catalyst can improve the ability of hydrogen peroxide (H₂O₂) in degrading phenols of 16.93% at a dose of 5 mg of catalyst, initial phenol concentration of 100 mg/L, 20 mL volume of phenol, and the contact time of 24 hours.

Abstrak

Kelimpahan zeolit alam di Indonesia cukup besar sehingga memberikan peluang pemanfaatan di berbagai bidang, salah satunya sebagai bahan katalis. Kemampuan katalis zeolit dapat ditingkatkan melalui modifikasi zeolit dengan pengembunan logam. Pada penelitian ini telah dilakukan modifikasi zeolit alam melalui pengembunan besi (Fe) dan kobalt (Co) untuk katalis oksidasi fenol. Modifikasi zeolit alam dilakukan melalui tahap pencucian asam menggunakan HF, HCl, dan NH₄Cl dilanjutkan pengembunan logam. Karakterisasi produk dilakukan menggunakan x-ray difraktometer, surface area analyzer, dan uji katalitik dilakukan terhadap sampel fenol. Hasil karakterisasi menunjukkan komposisi mineral komponen utama penyusun zeolit adalah mordenit, keasaman total katalis Fe₂O₃-zeolit yang diperoleh sebesar 2,7 mmol/g dan katalis CoO-zeolit sebesar 2,5 mmol/g, katalis Fe₂O₃-zeolit dan katalis CoO-zeolit memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori total secara berurutan, yaitu 38,3918 m²/g, 16,6569 cm³/g dan 28,6209 m²/g, 12,5072 cm³/g serta katalis mampu meningkatkan kemampuan hidrogen peroksida (H₂O₂) dalam mendegradasi fenol sebesar 16,93% pada dosis katalis 5 mg, konsentrasi awal fenol 100 mg/L, volume fenol 20 mL, dan waktu kontak 24 jam.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi yang pesat mendorong pertumbuhan industri-industri baru. Meningkatnya jumlah maupun jenis industri akan menimbulkan konsekuensi baru juga, yakni limbah yang dihasilkan. Fenol merupakan salah satu limbah organik berbahaya [1]. Fenol dapat memberikan efek buruk terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, antara lain berupa merusakkan hati dan ginjal pelemahan detak jantung hingga kematian [2].

Usaha mendegradasi fenol dapat dilakukan dengan mengoksidasi fenol menggunakan katalis berbasis zeolit. Saat ini, sesuai konsep *green chemistry* penggunaan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai oksidan dan H_2O sebagai pelarut untuk reaksi oksidasi lebih disukai karena tidak berbahaya serta tidak menghasilkan produk samping selain oksigen dan H_2O .

Zeolit adalah kristal aluminasilikat hidrat dengan struktur kerangka tiga dimensi yang tersusun atas tetrahedral (SiO_4)⁴⁻ dan (AlO_4)⁵⁻ dengan atom oksigen sebagai penghubungnya. Melimpahnya zeolit alam di Indonesia memberikan peluang menggunakannya sebagai bahan katalis. Penelitian hidrokonversi *n-heptane* menggunakan katalis H-ZSM-5 menunjukkan bahwa katalis H-ZSM-5 dapat digunakan untuk reaksi *hydrocracking*.

Kemampuan katalis zeolit dapat pula ditingkatkan melalui pengembanan logam. Niaei *dkk.* [3] menyatakan bahwa modifikasi katalis ZSM-5 menggunakan logam transisi menunjukkan aktivitas katalitik pada reaksi konversi senyawa organik *volatile* menggunakan zeolit berpengembanan logam *copper* (Cu) dan *cobalt* (Co). Pengembanan logam besi (Fe) dalam silika gel dari sekam padi juga telah dilakukan oleh Adam *dkk.* [4] untuk oksidasi fenol. Hasil konversi oksidasi fenol mencapai 95,2% dengan pengembanan logam besi (Fe) sebesar 10% dari berat silika.

Berdasarkan informasi penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka dalam penelitian ini akan dilakukan modifikasi zeolit alam Bayat kabupaten Klaten melalui pengembanan logam besi (Fe) dan kobalt (Co) diharapkan akan meningkatkan jumlah situs asam lewis sehingga semakin meningkatkan kemampuan untuk mendegradasi fenol. Karakterisasi untuk dilakukan dengan menentukan komponen mineral menggunakan *X-RD (X-Ray Diffraction)*, menentukan sifat keasaman total katalis menggunakan metode gravimetri, menentukan porositas katalis menggunakan metode BET (*Brunauer-Emmet-Teller surface area analyzer*) dan uji katalitik terhadap fenol.

2. Metodologi

Alat dan Bahan

Gelas beker, gelas ukur, labu ukur, pengaduk, pipet tetes, botol *vial*, pengayak ukuran 100 *mesh*, oven (ARISTON), eksikator, *hot plate*, pengaduk magnet (*magnetic stirrer*), kertas indikator pH, kertas saring halus dan whatman 42, neraca analitik. *furnace*

(VULCAN), difraktometer sinar-X (Shimadzu 6000), *surface area analyzer* (NOVA 1000 *Gas Sorption Analyzer*), dan spektrofotometer *UV-Visible* (Shimadzu *UV-Vis Spectrophotometre*1601).

Zeolit alam Bayat (lolos ayakan ukuran 100 *mesh*) Zeolit alam Bayat (lolos ayakan ukuran 100 *mesh*), $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (Merck, p.a.), $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (Merck, p.a.), HCl 6 N (Merck, p.a.), HF 1% (Merck, p.a.), NH_4Cl (Merck, p.a.), C_6H_5OH (Merck, p.a.), H_2O_2 (Merck, p.a.), 4- aminoantipirin (Merck, p.a.), NaOH (Merck, p.a.), $K_3Fe(CN)_6$ p.a (Merck, p.a.), gas N_2 , dan akuades.

Preparasi Sampel Zeolit

Zeolit alam Bayat Klaten digerus dan diayak hingga lolos ayakan ukuran 100 *mesh* kemudian dicuci menggunakan akuades. Selanjutnya penyaringan menggunakan kertas saring halus dan dikeringkan dalam oven pada suhu 120°C selama 1 jam. Zeolit tersebut kemudian dihaluskan dengan digerus dan disimpan dalam eksikator sehingga diperoleh sampel zeolit alam.

Aktivasi Zeolit Alam

Sampel zeolit alam yang diperoleh kemudian dilakukan perendaman dalam larutan HF 1% dengan pengadukkan selama 1 jam. Zeolit alam kemudian dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan dengan oven pada suhu 120°C selama 1 jam. Tahap berikutnya zeolit alam digerus hingga halus kembali dan direndam di dalam HCl 6 N selama 4 jam. Kemudian zeolit disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga pH mendekati netral. Selanjutnya zeolit dikeringkan menggunakan oven pada suhu 120°C selama 2 jam. Zeolit tersebut kemudian direndam dalam larutan NH_4Cl 0,1 N selama 24 jam dan disimpan dalam eksikator hingga kering. Zeolit yang telah kering dipanaskan pada *furnace* suhu 400°C selama 4 jam dan disimpan kembali dalam eksikator.

Pengembanan Logam Besi (Fe)

Pengembanan logam besi (Fe) dilakukan dengan merendam bubuk zeolit yang telah diaktifkan dalam larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ selama 24 jam. Kemudian campuran tersebut di oven pada suhu 120°C dan dikalsinasi pada suhu 550°C selama 5 jam.

Pengembanan Logam Kobalt (Co)

Pengembanan logam kobalt (Co) dilakukan dengan merendam bubuk zeolit yang telah diaktifkan dalam larutan $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ selama 24 jam. Kemudian campuran tersebut di oven pada suhu 120°C dan dikalsinasi pada suhu 550°C selama 5 jam.

Karakterisasi Zeolit Termodifikasi

Karakterisasi zeolit alam setelah pengembanan logam dilakukan dengan menentukan komponen mineral menggunakan *X-RD (X-Ray Diffraction)*, menentukan sifat keasaman total katalis menggunakan metode gravimetri, dan menentukan porositas katalis menggunakan metode BET (*Brunauer-Emmet-Teller surface area analyzer*).

Uji aktivitas Katalitik Katalis

Uji aktivitas katalitik katalis dilakukan dengan menggunakan gelas beker 50 mL untuk tempat proses reaksi. Fenol dengan konsentrasi 100 mg/L sebanyak 20 mL dan hidrogen peroksida (H_2O_2) 30% dimasukkan ke dalam wadah kemudian ditambahkan dengan katalis zeolit termodifikasi sebanyak 5 mg. Perbandingan konsentrasi antara fenol: H_2O_2 yaitu 1:1. Selanjutnya campuran diaduk perlahan-lahan dengan kondisi operasi pada suhu kamar $25^\circ C$ dan pendiaman selama 24 jam. Perlakuan degradasi fenol yang sama juga dilakukan tetapi tanpa menggunakan katalis. Fenol sisa lalu dianalisis menggunakan spektrofotometer *UV-Vis* pada panjang gelombang maksimum. Analisis fenol sisa menggunakan reagen 4-aminoantipirin (4-AAP) 2% dan $K_3Fe(CN)_6$ 8% dalam kondisi basa dengan pH 10 ± 2 .

3. Hasil dan Pembahasan

Preparasi Sampel Zeolit

Preparasi sampel dilakukan dengan penggerusan yang bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan zeolit. Selanjutnya zeolit diayak hingga lolos ayakan 100 *mesh* dan dicuci menggunakan akuades serta dikeringkan pada suhu $120^\circ C$. Pencucian menggunakan akuades bertujuan untuk meminimalisasi komponen-komponen pengotor yang dapat larut dalam air. Pengeringan pada suhu $120^\circ C$ bertujuan untuk menghilangkan molekul air yang terperangkap secara bebas pada zeolit alam.

Aktivasi Zeolit Alam

Zeolit alam pada umumnya memiliki ukuran pori tidak seragam, aktivitas katalitik yang rendah dan mengandung banyak pengotor. Oleh karena itu, sebelum digunakan sebagai pengemban logam, zeolit alam perlu diaktifkan terlebih dahulu. Sampel zeolit yang telah diperoleh selanjutnya diaktifkan dengan perlakuan awal yaitu perendaman ke dalam HF 1% bertujuan untuk melepaskan pengotor SiO_2 dalam bentuk amorf yang berada dalam sampel zeolit. Perendaman dalam HCl bertujuan untuk menghilangkan oksida-oksida bebas dari logam-logam seperti Mg, Al, Fe dan Ca yang ada pada sampel zeolit. Selanjutnya pencucian menggunakan akuades hingga pH mendekati netral. Pengovenan zeolit pada suhu $120^\circ C$ di maksudkan untuk menguapkan molekul air yang terperangkap secara bebas dalam zeolit. Zeolit selanjutnya direndam dalam garam NH_4Cl yang bertujuan untuk mengoptimalkan pertukaran kation. Proses yang terjadi dalam pertukaran kation, diharapkan kation alkali atau alkali tanah yang masih ada pada zeolit disubstitusikan dengan kation NH_4^+ sehingga terbentuk NH_4 -zeolit. Setelah diperoleh NH_4 -zeolit kemudian pemanasan pada suhu $400^\circ C$ selama 4 jam yang bertujuan untuk membentuk H-zeolit disertai dengan penguapan gas NH_3 .

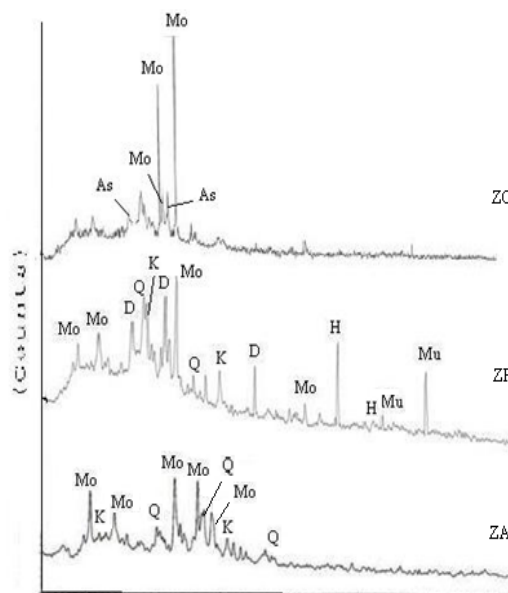
Pengembanan Logam Besi (Fe) dan Kobalt (Co)

Pengembanan logam besi (Fe) dan kobalt (Co) dilakukan dengan merendam zeolit alam hasil aktivasi ke dalam larutan logam prekursor. Pengembanan besi (Fe) dilakukan dengan perendaman zeolit teraktivasi ke

dalam larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ selama 24 jam. Selanjutnya, untuk pengembanan logam kobalt (Co) dilakukan dengan perendaman zeolit teraktivasi ke dalam larutan $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ selama 24 jam. Perendaman selama 24 jam bertujuan agar proses pengembanan logam ke dalam zeolit diharapkan maksimal. Setelah itu, dilakukan pengovenan pada suhu $120^\circ C$ bertujuan untuk menguapkan air yang merupakan pelarut dari logam prekursor. Zeolit yang telah kering tersebut lalu dikalsinasi pada suhu $550^\circ C$ selama 5 jam. Tujuan kalsinasi adalah untuk membentuk oksida logam baik itu besi (Fe) maupun kobalt (Co), menguapkan pengotor-pengotor organik, dan memperbesar permukaan pengemban.

Karakterisasi Menggunakan Difraktometer Sinar-X (X-RD)

Karakterisasi menggunakan difraktometer sinar-X (X-RD) dilakukan untuk mengetahui perubahan pola difraktogram zeolit alam sebelum dan sesudah perlakuan. Difraktogram zeolit hasil perlakuan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Difraktogram zeolit alam, katalis zeolit berpengemban logam besi dan berpengemban logam kobalt

Interpretasi ini menunjukkan bahwa zeolit alam yang telah dilakukan pengembanan logam besi (Fe) mengandung mineral mordenit, mullit, donbassit, kuarsa dan klinoptilolit. Perlakuan pengembanan logam besi (Fe) ke dalam zeolit menghasilkan terbentuknya oksida logam berupa kristal Fe_2O_3 (hematit). Terbentuknya kristal Fe_2O_3 (hematit) ini dibuktikan dengan munculnya puncak difraksi 2θ $57,4784^\circ$; $63,9200^\circ$ dan $80,7816^\circ$. Berdasarkan data JCPDS-ICDD 1997 nomor 33-0664 puncak-puncak tersebut merupakan puncak spesifik dari kristal Fe_2O_3 (hematit).

Difraktogram katalis zeolit berpengemban logam kobalt (Co) di atas menunjukkan puncak dari mordenit dan aluminum silikat. Sedangkan puncak difraksi klinoptilolit dan kuarsa pada zeolit berpengemban

logam kobal (Co) tidak muncul hal ini dimungkinkan karena klinoptilolit dan kuarsa larut dalam asam nitrat encer yang berasal dari larutan logam prekursor $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Berdasarkan data JCPDS-ICDD 1997 nomor 43-1004 puncak difraksi pada sudut 2θ $42,401^\circ$; $36,503^\circ$ dan $61,520^\circ$ merupakan puncak spesifik dari CoO akan tetapi pada difraktogram zeolit pengembangan logam kobal (Co) tidak menunjukkan puncak spesifik dari oksida logam kobal (Co) tersebut. Kemungkinan kristal oksida kobal (CoO) terbentuk namun kristalinitasnya sangat rendah atau mendekati amorf sehingga tidak terbaca puncak difraksinya.

Uji Sifat Asam

Keasaman padatan yang ditentukan dalam penelitian ini adalah keasaman total. Keasaman total diperoleh melalui pengukuran jumlah milimol basa amoniak dari fasa gas yang diadsorpsi oleh permukaan padatan ekuivalen dengan jumlah asam pada permukaan padatan yang menyerap basa tersebut. Uji keasaman ini dilakukan untuk mengetahui banyaknya situs asam total dalam katalis.

Tabel 1: Total situs asam katalis

Sampel katalis	Selisih massa (g)	Total situs asam (mmol/g)
Zeolit aktif	0,0036	0,4
Fe_2O_3 -zeolit	0,0231	2,7
CoO-zeolit	0,0216	2,5

Hasil karakterisasi keasaman padatan menunjukkan peningkatan keasaman katalis total dibandingkan dengan zeolit aktif. Total situs asam katalis Fe_2O_3 -zeolit meningkat sebesar 2,3 mmol/g dan CoO-zeolit sebesar 2,1 mmol/g. Meningkatnya keasaman total katalis karena adanya perlakuan kalsinasi dan pengembangan logam pada zeolit. Kalsinasi pada suhu tinggi dengan gas nitrogen dapat menghilangkan pengotor yang menutupi pori-pori zeolit sehingga pori zeolit menjadi lebih terbuka dan permukaan padatan katalis semakin bersih. Selanjutnya, perlakuan pengembangan logam besi (Fe) dan kobal (Co) pada zeolit juga menyebabkan meningkatnya keasaman total padatan katalis. Sispersi logam aktif ke permukaan pengembangan memperluas permukaan katalis dan memperbanyak situs aktif katalis. Meningkatnya keasaman total katalis akibat pengembangan logam dikarenakan logam besi (Fe) dan kobal (Co) merupakan unsur golongan transisi yang menyediakan orbital *d* yang belum terisi penuh oleh elektron.

Karakterisasi Menggunakan Metode BET (Brunauer-Emmet-Teller) Surface Area Analyzer

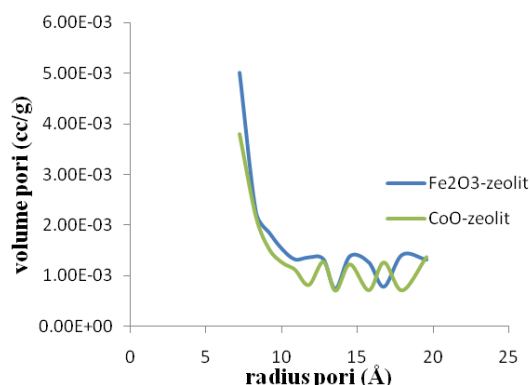
Metode BET (*Brunauer-Emmet-Teller surface area analyzer*) digunakan untuk menentukan ukuran pori, volume pori, dan luas permukaan katalis. Pada penelitian ini yang dikarakterisasi menggunakan metode BET (*Brunauer-Emmet-Teller surface area analyzer*) adalah katalis Fe_2O_3 -zeolit dan katalis CoO-zeolit. Analisis ini bertujuan untuk membandingkan porositas dari kedua katalis tersebut. Klasifikasi ukuran pori menurut IUPAC dalam Weitkamp dan Puppe [5] yaitu, mikropori ($d_p \leq 2$

nm), mesopori ($2 \text{ nm} < d_p \leq 50 \text{ nm}$), dan makropori ($d_p > 50 \text{ nm}$).

Tabel 2: Hasil nilai radius pori rata-rata, luas permukaan spesifik, dan volume total pori sampel katalis Fe_2O_3 -zeolit serta CoO-zeolit

Sampel katalis	Radius Pori Rata-Rata (Å)	Luas Permukaan Spesifik (m^2/g)	Volume Total Pori (cm^3/g)
Fe_2O_3 -zeolit	13,403	38,3918	16,6569
CoO-zeolit	13,500	28,6209	12,5072

Data pada Table 2 terlihat bahwa ukuran pori katalis Fe_2O_3 -zeolit dan CoO-zeolit termasuk dalam mikropori ($d_p \leq 2 \text{ nm}$). Katalis CoO-zeolit memiliki volume total pori dan luas permukaan spesifik yang lebih rendah dibandingkan katalis Fe_2O_3 -zeolit, hal ini dimungkinkan proses kalsinasi yang terjadi belum maksimal. Selain itu, rendahnya luas permukaan spesifik dan volume pori total katalis CoO-zeolit dimungkinkan karena terjadi penumpukkan oksida kobal (Co) pada pori zeolit sehingga menutupi pori-pori zeolit.



Gambar 2. Grafik pola hubungan volume pori katalis Fe_2O_3 -zeolit dan CoO-zeolit terhadap radius pori

Uji aktivitas Katalitik Katalis

Uji aktivitas katalitik katalis Fe_2O_3 -zeolit dan CoO-zeolit dilakukan terhadap sampel fenol. Oksidasi fenol dilakukan dengan memasukkan katalis sebanyak 5 mg ke dalam fenol 100 mg/L dan ditambahkan dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) 30%. Perbandingan konsentrasi fenol: H_2O_2 yang digunakan yaitu 1:1. Hidrogen peroksida (H_2O_2) ini berfungsi sebagai agen pengoksidasi. Aktivitas katalitik katalis terlihat dengan membandingkan proses oksidasi tanpa menggunakan katalis dan proses oksidasi yang menggunakan katalis selama 24 jam seperti yang terlihat dalam Tabel 4.

Tabel 3: Aktivitas Katalitik Katalis

Sampel	Konsentrasi Fenol Sisa
Fenol + H_2O_2	16,93 mg/L
Fenol + H_2O_2 + katalis Fe_2O_3 -zeolit	0 mg/L
Fenol + H_2O_2 + katalis CoO-zeolit	0 mg/L

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa oksidasi fenol tanpa katalis menghasilkan fenol sisa sebesar 16,93 mg/L dengan kemampuan oksidasi sebesar 83,07%. Sedangkan, pada proses oksidasi fenol menggunakan katalis tidak ada fenol sisa baik itu yang menggunakan katalis Fe_2O_3 -zeolit maupun CoO -zeolit, dengan demikian kemampuan degradasi fenol menggunakan katalis meningkat dibandingkan tanpa menggunakan katalis menjadi 100%. Penggunaan katalis Fe_2O_3 -zeolit dan katalis CoO -zeolit mampu meningkatkan efektivitas reaksi degradasi fenol dengan H_2O_2 . Katalis Fe_2O_3 -zeolit dan CoO -zeolit bekerja dengan menyediakan situs asam baik itu asam Bronsted maupun asam Lewis.

4. Kesimpulan

Telah diperoleh katalis Fe_2O_3 -zeolit dan CoO -zeolit melalui pengembunan logam besi (Fe) dan kobal (Co) pada zeolit alam. Komposisi mineral komponen utama penyusun zeolit adalah mordenit, keasaman total katalis Fe_2O_3 -zeolit yang diperoleh sebesar 2,7 mmol/g dan katalis CoO -zeolit sebesar 2,5 mmol/g, katalis Fe_2O_3 -zeolit dan katalis CoO -zeolit memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori total secara berurutan, yaitu 38,3918 m^2/g , 16,6569 cm^3/g dan 28,6209 m^2/g , 12,5072 cm^3/g . Katalis yang dibuat mampu meningkatkan kemampuan hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam mendegradasi fenol sebesar 16,93% pada dosis katalis 5 mg, konsentrasi awal fenol 100 mg/L, volume fenol 20 mL, dan waktu kontak 24 jam.

5. Daftar Pustaka

- [1] Rey-May Liou, Shih-Hsiung Chen, CuO impregnated activated carbon for catalytic wet peroxide oxidation of phenol, *Journal of Hazardous Materials*, 172, 1, (2009) 498-506
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.012>
- [2] R Arbianti, Pengolahan Limbah Organik (Fenol) Dan Logam Berat ($\text{Cr}6+$ Atau $\text{Pt}4+$) Secara Simultan Dengan Fotokatalis Tio_2 , Zno-tio_2 , Dan Cds-tio_2 1. Pendahuluan, *Makara Journal of Technology*, 9, 2, (2005)
- [3] Aligholi Niaei, Dariush Salari, Seyed Ali Hosseini, Study of catalytic activities of nanostructure copper and cobalt supported ZSM-5 catalysts for conversion of volatile organic compounds, *Turkish Journal of Chemistry*, 34, 1, (2010) 15-26
- [4] Farook Adam, Jeyashelly Andas, Ismail Ab Rahman, A study on the oxidation of phenol by heterogeneous iron silica catalyst, *Chemical Engineering Journal*, 165, 2, (2010) 658-667
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.054>
- [5] Jens Weitkamp, Lothar Puppe, Catalysis and Zeolites: Fundamentals and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 1999.