

## PENGARUH ZEOLIT ALAM DAN *BINDER* KAOLIN TERHADAP SIFAT MEKANIS PELET KATALIS

\*Krisna Darmawan<sup>1</sup>, Norman Iskandar<sup>2</sup>, Sulardjaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [krsndrmwn319@gmail.com](mailto:krsndrmwn319@gmail.com)

### Abstrak

Diperkirakan bahwa konsumsi energi global akan meningkat sebanyak 28% dari tahun 2015 hingga 2040 karena pertumbuhan industri yang pesat. Kenaikan kebutuhan energi ini mengakibatkan penurunan sumber daya energi, oleh karena itu, untuk mengatasi masalah ini, salah satu solusinya adalah memperkenalkan biodiesel sebagai sumber energi terbarukan. Katalis diperlukan dalam pembuatan biodiesel dan reaksi yang terjadi dalam proses pembuatan biodiesel relatif lama. Katalis merupakan senyawa yang bila ditambahkan ke dalam suatu reaksi akan mengurangi energi aktivasi dan meningkatkan laju reaksinya. Salah satu bahan baku yang dapat digunakan sebagai katalis yaitu zeolit. Katalis heterogen dalam bentuk pelet dipilih karena memiliki keunggulan dalam aspek stabilitas mekanis, penggunaan yang berulang, dapat dibuat dalam berbagai bentuk yang bervariasi, dan penanganan yang lebih mudah. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat mekanis serta mengetahui pengaruh zeolit alam dan kaolin sebagai pengikat terhadap nilai sifat mekanis pelet katalis menggunakan metode eksperimental. Proses pembuatan katalis pelet zeolit dilakukan menggunakan pengayakan no. 250 *mesh* dengan tekanan kompaksi 1,5 *metric ton*. Hasil pengujian katalis pelet dengan komposisi zeolit 70% + kaolin 30% didapatkan nilai sebesar 1,5062 MPa. Sehingga, dengan adanya penambahan komposisi kaolin sebagai pengikat dalam pembuatan katalis pelet maka semakin tinggi nilai kompresi.

**Kata kunci:** katalis biodiesel; kompresi; pelet; pengikat kaolin; zeolit alam

### Abstract

*It is estimated that global energy consumption will increase by 28% from 2015 to 2040 due to rapid industrial growth. This increase in energy demand results in a decrease in energy resources, therefore, to overcome this problem, one solution is to introduce biodiesel as a renewable energy source. Catalysts are needed in making biodiesel and the reactions that occur in the process of making biodiesel are relatively long. A catalyst is a compound that, when added to a reaction, will reduce the activation energy and increase the reaction rate. One raw material that can be used as a catalyst is zeolite. Heterogeneous catalysts in pellet form were chosen because they have advantages in terms of mechanical stability, repeated use, can be made in various shapes, and are easier to handle. This research was carried out with the aim of determining the mechanical properties and determining the effect of natural zeolite and kaolin as a binder on the mechanical properties of catalyst pellets using experimental methods. The process of making zeolite pellet catalysts is carried out using sieving no. 250 mesh with a compaction pressure of 1.5 metric tons. The test results of pellet catalysts with a composition of zeolite 70% + kaolin 30% obtained a value of 1.5062 MPa. So, by adding kaolin composition as a binder in making pellet catalysts, the compression value will be higher.*

**Keywords:** *biodiesel catalyst; compression; kaolin binder; natural zeolite; pellets*

### 1. Pendahuluan

Total energi yang dikonsumsi secara global diperkirakan meningkat hingga 28% pada tahun 2015 hingga tahun 2040 yang diakibatkan karena tingginya laju pertumbuhan dalam sektor industri [1]. Namun, penggunaan energi yang umum digunakan yaitu masih berbasis dari bahan bakar fosil, minyak bumi, dan gas alam. Dengan meningkatnya kebutuhan energi secara global, energi tersebut akan berkurang seiring berjalannya waktu dikarenakan ketersediaan sumbernya yang terbatas. Karena hal itu, diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satunya yaitu dengan mengembangkan penggunaan sumber energi terbarukan. Salah satu tujuan penggunaan energi terbarukan selain untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil adalah untuk menghasilkan energi yang bersih dan ramah lingkungan [2]. Energi yang berasal dari fosil merupakan energi yang tak terbarukan dan Indonesia termasuk dalam negara yang

mayoritas penggunaan energinya berasal dari bahan bakar fosil, sebagai contoh yaitu batu bara dan minyak bumi. kualitatif

Bahan bakar minyak bumi yang digunakan akan semakin berkurang, dan konsumsi bahan bakar minyak bumi yang seiring berjalannya waktu meningkat diikuti dengan pertambahannya penduduk. Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut dikenalkan salah satu pengembangan energi terbarukan yaitu biodiesel. Biodiesel merupakan salah satu cara untuk menggantikan minyak bumi, dalam hal ini yaitu bahan bakar solar. Secara umum biodiesel dan solar mempunyai sifat yang mirip, namun biodiesel dibuat dengan bahan bakar nabati dan memiliki nilai angka *cetane number* yang relatif lebih tinggi yang mempunyai sifat karakteristik kepekaan terhadap ledakan (*detonation*) jika dibandingkan dengan bahan bakar solar, tidak mempunyai kandungan sulfur (atau relatif sangat rendah), dan emisi pembakaran yang dihasilkan relatif lebih ramah lingkungan [3].

Katalis diperlukan dalam pembuatan biodiesel dan reaksi yang terjadi dalam proses pembuatan biodiesel relatif lama. Katalis digunakan dalam proses pembuatannya bertujuan untuk mempercepat reaksi yang terjadi pada pembuatan biodiesel. Salah satu bahan baku yang dapat digunakan sebagai katalis yaitu zeolit. Saat ini material zeolit banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti katalis, adsorben, penukar ion dan masih banyak lagi fungsi lainnya yang dapat memberi pengaruh besar.

Katalis merupakan senyawa yang bila ditambahkan ke dalam suatu reaksi akan mengurangi energi aktivasi dan meningkatkan laju reaksinya. Jumlah dari katalis tidak berubah selama reaksi dikarenakan tidak dikonsumsi sebagai bagian dari proses reaksi. Jika dilihat berdasarkan fasanya, katalis dapat dibedakan menjadi katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen yaitu katalis yang memiliki fasa yang sama dengan reaktan dan produk dari hasil reaksi. Di sisi lain, katalis heterogen yaitu katalis yang memiliki fasa yang berbeda antara fasa reaktan dengan produk dari hasil reaksi [4].

Katalis umumnya mempunyai tiga variasi wujud atau kondisi yaitu cairan, serbuk, dan pelet. Dalam penggunaan katalis dalam wujud serbuk dan cairan yaitu dapat mengalami proses deaktivasi katalis yang kemudian dapat berdampak negatif pada kinerja katalis yang digunakan. Kelemahan yang dialami khusus dari katalis dengan wujud serbuk yaitu jika dicampur dengan wujud cairan, maka katalis akan mudah larut yang mengakibatkan penurunan tekanan, penyumbatan, dan dapat menyebabkan kesulitan dalam proses selanjutnya.

Dengan demikian, penggunaan dari katalis dengan wujud pelet dapat mengatasi permasalahan yang dihadapi pada katalis homogen, yaitu katalis dalam wujud cairan dan serbuk tersebut. Katalis pelet juga memiliki keunggulan dalam aspek stabilitas mekanis, penggunaan yang berulang, dapat dibuat dalam berbagai bentuk yang bervariasi, dan penanganan yang lebih mudah. Kekuatan mekanis dari suatu pelet dapat ditentukan dari proses, metode, dan bahan baku yang digunakan dalam pembuatan pelet tersebut. Kekuatan mekanis untuk zeolit dapat ditentukan pada kekuatan komponen dan metode sintesisnya. Kekuatan mekanis ini merupakan salah satu parameter yang perlu diperhatikan dalam katalis heterogen.

Beberapa proses dilakukan dalam pembuatan katalis zeolit yang awal mulanya dalam bentuk batuan hingga menjadi wujud pelet, mulai dari *crushing*, *meshing*, aktivasi, hingga kompaksi. Agar katalis pelet zeolit yang dihasilkan tidak mudah rusak, maka diperlukan bahan tambahan yaitu bahan pengikat (*binder*). Berbagai macam bahan pengikat yang dapat digunakan sebagai bahan pengikat pelet zeolit. Pada penelitian tugas akhir ini penulis menggunakan metode kompaksi untuk pembuatan katalis pelet dan bahan zeolit alam yang dicampur dengan pengikat kaolin untuk komposisi pelet.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

### 2.1 Pelet

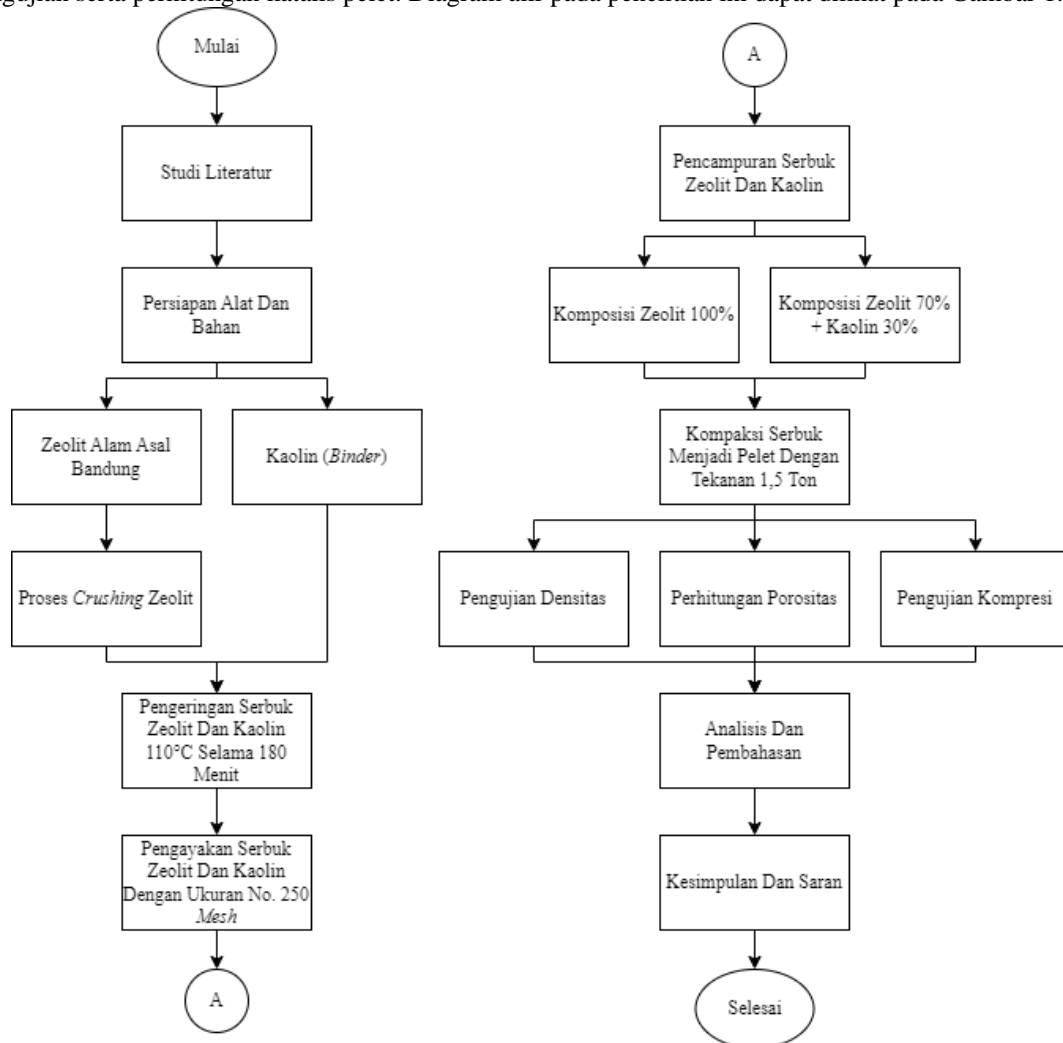
Pelet dapat didefinisikan sebagai bentuk yang relatif kecil sebesar pil, pada umumnya katalis mempunyai bentuk yang beragam selain pelet, yaitu cair dan serbuk. Zeolit berbentuk serbuk dengan ukuran partikel 1-5  $\mu\text{m}$  yang digunakan dalam *fixed bed reactor* atau *adsorption column* akan menyebabkan risiko terjadinya penurunan tekanan dan menyebabkan penyumbatan di reaktor. Oleh karena itu, serbuk zeolit harus dibuat dengan bentuk pelet menggunakan *binder*. Dalam proses pembuatan katalis dalam bentuk pelet, serbuk zeolit dan kaolin dicampur dengan komposisi yang telah ditentukan. Bahan yang telah dibentuk kemudian dikeringkan dan dilakukan kalsinasi pada temperatur yang relatif tinggi untuk mencapai kekuatan mekanis yang diinginkan [5].

Kekuatan mekanis adalah parameter untuk katalis pelet. Kegagalan dikarenakan kekuatan mekanis yang rendah dalam *fixed bed converter* dapat menyebabkan distribusi aliran gas yang tidak merata dan penurunan tekanan yang relatif besar melalui *catalyst bed*, sehingga menghasilkan efisiensi katalisis yang relatif rendah [6]. Katalis dengan bentuk pelet memiliki ketahanan dalam reaksi yang lebih baik dibandingkan dengan katalis dalam bentuk serbuk. Katalis dengan bentuk cair dan serbuk relatif sulit untuk dipisahkan dari produk reaksi. Katalis pelet memiliki waktu reaksi yang lebih lama jika dibandingkan dengan katalis dalam bentuk serbuk, sehingga katalis dengan bentuk pelet dianggap lebih efisien jika dibandingkan katalis dengan bentuk serbuk.

Katalis dengan bentuk trilobit lebih rentan terhadap tekanan mekanis daripada katalis dengan bentuk silinder dan katalis dengan diameter yang lebih kecil lebih mudah menghasilkan peningkatan penurunan tekanan. Hal ini dikarenakan lebih banyak serpihan partikel dan serbuk yang dihasilkan dalam rentang pembebanan tekan yang sama untuk spesimen

dengan ukuran yang lebih kecil atau bentuk trilobit. Alasan utama kegagalan mekanis adalah karena fraktur yang relatif rapuh dari pelet [7].

Penelitian pengaruh zeolit alam dan *binder* kaolin terhadap sifat mekanis pelet katalis mencakup semua kegiatan yang akan dilakukan untuk menyelesaikan masalah atau melakukan proses analisis. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen di laboratorium yang terdiri dari tiga tahap, yaitu tahap persiapan, tahap pembuatan katalis pelet dan tahap pengujian serta perhitungan katalis pelet. Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

## 2.2 Tahap Persiapan

Mencari dan mempelajari sumber informasi materi teori maupun praktik mengenai penelitian yang akan dilakukan yang dapat berasal dari literatur media cetak dan media *online*. Melakukan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan yang berguna untuk menunjang kelangsungan penelitian. Pada penelitian ini persiapan yang utama yaitu bahan zeolit alam dan kaolin sebagai *binder* untuk pembuatan katalis pelet. Zeolit dapat didefinisikan sebagai kristal aluminosilikat berpori ukuran mikro dengan struktur pori yang terhubung secara tiga dimensi [8]. Kemurnian zeolit tertinggi, laju pertukaran ion kalsium tertinggi, dan hasil pengayakan terbaik diperoleh ketika 30% *binder* (kaolin) digunakan [9].

## 2.3 Tahap Pelaksanaan

Proses *crushing* dilakukan untuk menghancurkan material batuan zeolit sehingga memiliki ukuran partikel yang relatif lebih kecil. Ukuran partikel yang akan digunakan untuk pembuatan katalis pelet zeolit memiliki ukuran mikro. Proses *crushing* dilakukan menggunakan alat *grinder* dengan waktu 2-3 menit hingga batuan telah hancur menjadi serbuk zeolit. Proses pengeringan dilakukan untuk menghilangkan kandungan air ( $H_2O$ ) yang terdapat pada serbuk zeolit. Penguapan kandungan air pada serbuk zeolit bertujuan supaya tidak terjadi kegagalan atau efek samping dari kandungan air pada serbuk zeolit saat pembuatan menjadi katalis pelet. Proses pengayakan dilakukan untuk mendapatkan ukuran serbuk zeolit yang diinginkan. Pada penelitian ini ukuran pengayakan yang digunakan adalah ukuran no. 250 *mesh* (62 mikron) [10]. Proses *mixing* atau pencampuran serbuk zeolit dengan kaolin sebagai *binder*. Pencampuran ini dilakukan dengan menggunakan alat *magnetic stirrer*, dengan komposisi serbuk zeolit 70% dengan kaolin 30%. Proses *mixing*

dilaksanakan selama 5 menit dengan kecepatan putaran *magnetic stirrer* 500 RPM dan dilakukan pada temperatur ruangan. Proses pencetakan katalis dari serbuk hingga menjadi bentuk pelet menggunakan pencetak (*dies*) dengan diameter 5 mm dengan metode kompaksi. Pencetak (*dies*) terbuat dari material baja ST-90. Kompaksi dilakukan dengan alat *hydraulic press*, dengan tekanan kompaksi 1,5 *metric tons* [10].

## 2.4 Tahap Pengujian

Pengujian kompresi dilakukan menggunakan alat *universal testing machines* untuk mengetahui kekuatan mekanis katalis pelet saat diberi tekanan. Pengujian kompresi terhadap kekuatan penghancuran partikel digunakan untuk menilai ketahanan suatu pelet terhadap fraktur. Spesimen dikompresi di antara dua pelat, salah satu pelat diam dan pelat lainnya bergerak ke bawah dalam arah aksial dengan laju pembebanan tekan kuasi-statis 0,5 mm/menit, menggunakan mesin pengujian mekanis [11]. Keretakan pelet terlihat jelas ketika terjadi penurunan beban secara tiba-tiba dan kekuatan hancur didefinisikan sebagai gaya maksimum yang diukur sebelum terjadi retak dibagi dengan luas penampang [12]. Hasil dari pengujian ini yaitu grafik yang menunjukkan gaya terhadap perpindahan dan grafik tegangan terhadap regangan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Hasil Pengukuran Fisik

Pengukuran fisik dilakukan untuk mengetahui spesifikasi katalis pelet yang telah dihasilkan. Pengukuran fisik geometri untuk spesimen katalis pelet yang dilakukan pada penelitian ini meliputi diameter dan tinggi, hal ini bertujuan untuk menentukan dimensi dan volume aktual dari setiap spesimen uji. Pelaksanaan pengukuran fisik geometri ini menggunakan alat ukur berupa *vernier caliper* dengan akurasi ketelitian 0,02 mm serta perhitungan matematis. Berikut merupakan penjelasan pelaksanaan pengukuran katalis pelet zeolit alam dengan kaolin sebagai *binder*.

**Tabel 1** Pengukuran Fisik Pelet Dengan Komposisi Zeolit 70% + Kaolin 30%

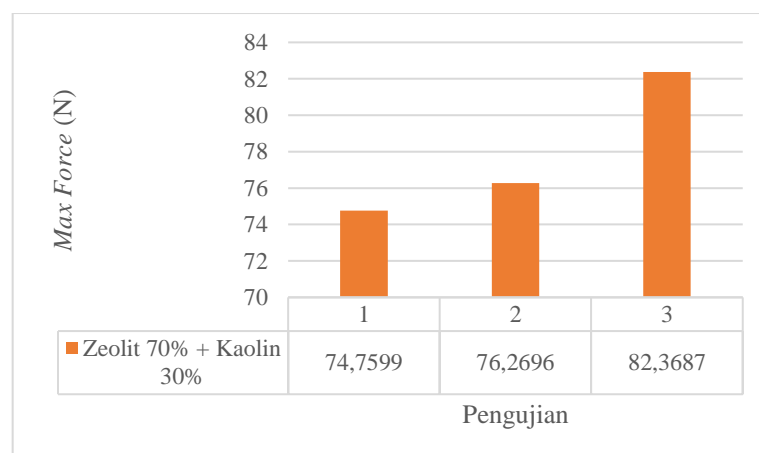
Ukuran Serbuk ( <i>mesh</i> )	Komposisi Kaolin	Tekanan Kompaksi (Ton)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (gr)
250	0%	1,5	5,20	6,28	133,37	0,13	0,2057
			5,20	6,30	133,79	0,13	0,2124
			5,20	6,44	136,77	0,14	0,2162
			5,20	6,44	136,77	0,14	0,2131
			5,20	6,30	133,79	0,13	0,2100
		Rata-rata	5,20	6,35	134,90	0,13	0,2115

### 3.2 Hasil Pengujian Kompresi

Pengujian kompresi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai ketahanan pelet mampu menerima beban. Karena katalis pelet memerlukan kekuatan tekan yang cukup untuk mempertahankan bentuknya saat mengalami tekanan atau benturan selama proses pengemasan dan pengiriman, hasil pengujian menunjukkan kekuatan tekan maksimum yang dapat diterima oleh katalis pelet terhadap beban yang diberikan. Pengujian kompresi dilakukan menggunakan 3 spesimen untuk mengetahui nilai setiap variasi dan didapatkan nilai rata-ratanya.

**Tabel 2** Analisis Gaya Maksimum Pengujian Kompresi

Ukuran Serbuk ( <i>mesh</i> )	Komposisi Kaolin	Tekanan Kompaksi (Ton)	<i>Max Force</i> (N)			Rata-rata
			1	2	3	
250	30%	1,5	74,7599	76,2696	82,3687	77,7994



**Gambar 2** Grafik Perbandingan Gaya Maksimum Terhadap Variasi Komposisi

Setelah mendapatkan nilai gaya maksimum (*max force*) pada katalis pelet. Selanjutnya, dilakukan perhitungan *tensile stress* dengan dua gaya terkonsentrasi yang dikenakan pada arah radial silinder menggunakan Persamaan 1.

$$f_t = \frac{2F}{\pi dh} \quad (1)$$

Keterangan:

$f_t$  = kekuatan *tensile* tidak langsung

$F$  = *applied load*

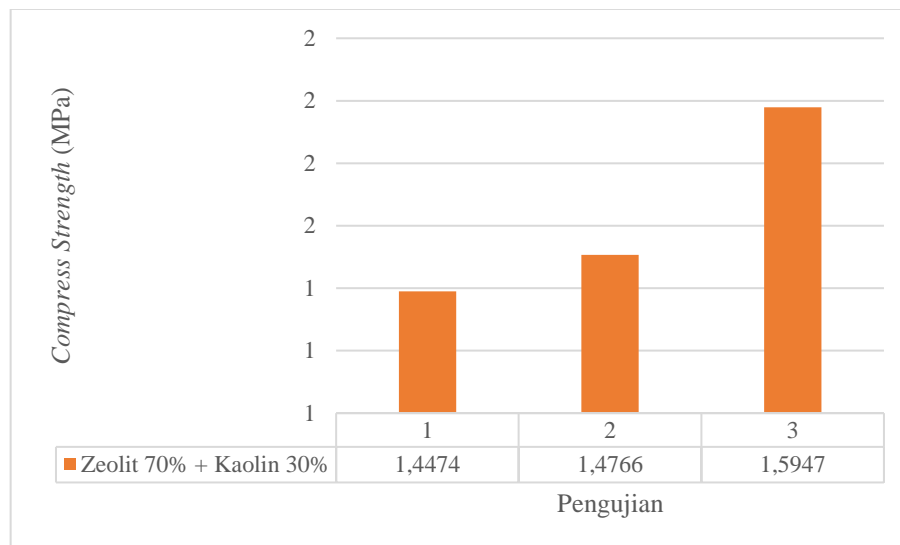
$\pi$  = bilangan pi ( $\approx 3,14$ )

$d$  = diameter

$h$  = *height/tinggi*

**Tabel 3** Analisis Kekuatan Tekan Pengujian Kompresi

Ukuran Serbuk ( <i>mesh</i> )	Komposisi Kaolin	Tekanan Kompaksi (Ton)	Compress Strength (MPa)			Rata- rata
250	30%	1,5	1,4474	1,4766	1,5947	1,5062



**Gambar 4** Grafik Perbandingan Kekuatan Tekan Terhadap Variasi Komposisi

Dari data tersebut menunjukkan bahwa dengan meningkatkan jumlah *binder* dalam campuran, maka nilai gaya maksimum dan kekuatan tekan pelet akan semakin tinggi [13]. Tingkat temperatur dan tekanan yang optimal sangat penting untuk memicu *binder* yang terdapat dalam pelet dan untuk meningkatkan kontak molekuler antara partikel pembentuk pelet dengan meningkatkan kekuatan kohesi dan adhesi [14].

#### 4. Kesimpulan

Hasil pengujian kompresi yang telah dilakukan terhadap katalis pelet zeolit alam dengan komposisi zeolit 70% + kaolin 30%, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil pengukuran fisik katalis pelet didapatkan nilai volume dengan komposisi zeolit 70% + kaolin 30% tertinggi sebesar 136,34 mm<sup>3</sup>, yang terkecil sebesar 131,33 mm<sup>3</sup> dan nilai massa rata-rata sebesar 0,2352 gr.
2. Hasil pengujian kompresi dengan komposisi zeolit 70% + kaolin 30% mendapatkan nilai gaya maksimum rata-rata sebesar 77,7994 N dan nilai kekuatan tekan rata-rata sebesar 1,5062 MPa. Sehingga dari pengujian ini didapatkan bahwa semakin besar penambahan komposisi dari kaolin maka semakin tinggi kekuatan mekanis dari katalis pelet.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Zhao, P. *et al.* (2015) 'Cryogenic power generation system recovering LNG's cryogenic energy and generating power for energy and CO2 emission savings', *Energy*, 35(1), pp. 2–15. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544280901048> %5Cn<http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.030> %5Cn<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.02.015> %5Cn[http://dx.doi.org/10.1016/S1004-9541\(11\)60006-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1004-9541(11)60006-2) %5Cn<http://solarenergyengineering.a>.
- [2] Azhar, M. and Satriawan, D. A. (2018) 'Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional', *Administrative Law and Governance Journal*, 1(4), pp. 398–412. doi: 10.14710/alj.v1i4.398-412.

- [3] Fitriana, N. *et al.* (2018) 'Synthesis of K<sub>2</sub>O/Zeolite catalysts by KOH impregnation for biodiesel production from waste frying oil', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1), pp. 1–8. doi: 10.1088/1757-899X/334/1/012011.
- [4] Halimah, D. (2018) 'Sintesis Karbon Tersulfonasi dari Cangkang Kemiri Sebagai Katalis pada Hidrolisis Selulosa Tanaman Alang-Alang ( *Imperata cylindrica* ) Menjadi Glukosa', *Universitas Sumatera Utara*, p. 35.
- [5] Chen, N. Y. *et al.* (2015) 'Impacts of Binder-Zeolite Interactions on the Structure and Surface Properties of NaY-SiO<sub>2</sub> Extrudates', *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 54(34), pp. 8456–8468. doi: 10.1021/acs.iecr.5b01369.
- [6] Li, Y. *et al.* (2000) 'Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts', *Powder Technology*, 113(1–2), pp. 176–184. doi: 10.1016/S0032-5910(00)00231-X.
- [7] Wu, D. *et al.* (2003) 'Effect of the mechanical failure of catalyst pellets on the pressure drop of a reactor', 58, pp. 3995–4004. doi: 10.1016/S0009-2509(03)00286-0.
- [8] Lee, H. (2005) 'A new Strategy for Synthesizing Zeolites and Zeolite-like Materials', *Tesis*, 2005, pp. 1–128.
- [9] Shams, K. and Mirmohammadi, S. J. (2007) 'Preparation of 5A zeolite monolith granular extrudates using kaolin : Investigation of the effect of binder on sieving / adsorption properties using a mixture of linear and branched paraffin hydrocarbons', 106, pp. 268–277. doi: 10.1016/j.micromeso.2007.03.007.
- [10] Iskandar, N. *et al.* (2023) 'Effect of Calcination on Mechanical Strength Characteristics of Pellet Catalysts from Bandung Natural Zeolite Materials', 020034(May), pp. 2059–2064.
- [11] Zakeri, M. *et al.* (2017) 'Interaction between Weibull parameters and mechanical strength reliability of industrial-scale water gas shift catalysts', *Particuology*, 32, pp. 160–166. doi: 10.1016/j.partic.2016.08.006.
- [12] Samimi, A. *et al.* (2015) 'Experimental and statistical assessments of the mechanical strength reliability of gamma alumina catalyst supports', *Particuology*, 21, pp. 74–81. doi: 10.1016/j.partic.2014.10.002.
- [13] R.Ugal, J. ., Mustafa, M. and A.Abdulhadi, A. (2008) 'Preparation of Zeolite Type 13X from Locally Available Raw Materials', *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 9(1), pp. 51–56. doi: 10.31699/ijcpe.2008.1.8.
- [14] Siyal, A. A. *et al.* (2023) 'Characterization and quality analysis of biomass pellets prepared from furfural residue, sawdust, corn stalk and sewage sludge', *Fuel Processing Technology*, 241(September 2022), p. 107620. doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107620.