



THE EFFECT OF RATIO KOH AND ACETIC ACID ON MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED FLY ASH POLYISOCYANURATE FOAM

Ahmad Aulia Ramadhani^{1*}

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi¹, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang²
Koresponden*, Email: ahmadauliaramadhani123@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi rasio penambahan kalium hidroksida (KOH) dan asam asetat terhadap sifat mekanis busa polyisocyanurate (PIR) berpenguat fly ash 31,15%. Metode eksperimental dilakukan dengan desain faktorial 2 x 5 x 5, meliputi 2 level konsentrasi KOH (55% dan 60%), 5 level rasio dominan KOH (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, dan 5:1), dan 5 level rasio dominan asam asetat (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, dan 5:1). Parameter pengujian meliputi kuat tekan, modulus elastisitas, kuat lentur (sumbu kuat dan sumbu lemah), kuat tarik, impact strength, densitas, rasio mengembang, waktu setting, elongation, dan specific strength. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi KOH 55% secara konsisten menghasilkan performa mekanis yang lebih unggul dibandingkan KOH 60%. Variasi terbaik secara keseluruhan diperoleh pada KOH 55% dominan KOH dengan rasio 2:1, yang menghasilkan kuat tekan 23,32 MPa, specific strength 27.830,68 N.m/kg, modulus elastisitas 477,30 MPa, dan densitas 838,08 kg/m³. Kuat lentur sumbu kuat tertinggi (12,14 MPa) diperoleh pada KOH 60% dominan KOH rasio 2:1, sementara impact strength tertinggi (59,206 kJ/mm²) dicapai pada KOH 60% dominan asam asetat rasio 3:1. Rasio optimum per kelompok bervariasi, yaitu 3:1 untuk KOH 60% dominan KOH, 2:1 untuk KOH 60% dominan asam asetat, 2:1 untuk KOH 55% dominan KOH, dan 3:1 untuk KOH 55% dominan asam asetat. Penelitian ini membuktikan bahwa keseimbangan rasio KOH-asam asetat merupakan faktor determinan dalam mengontrol kinetika reaksi dan meningkatkan sifat mekanis busa PIR berpenguat fly ash.

Kata kunci: busa polyisocyanurate; fly ash; kalium hidroksida; asam asetat; sifat mekanis; rasio katalis

Article History

Received: September 2026

Reviewed: September 2026

Published: September 2026

Plagiarism Checker No
237.u873247.fh8374

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under
a [Creative Commons
Attribution-NonCommercial
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**ABSTRACT**

This study aims to analyze the effect of varying the ratio of potassium hydroxide (KOH) and acetic acid on the mechanical properties of fly ash-reinforced polyisocyanurate (PIR) foam containing 31.15% fly ash. An experimental method was employed using a 2 x 5 x 5 factorial design, consisting of 2 levels of KOH concentration (55% and 60%), 5 levels of KOH-dominant ratios (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, and 5:1), and 5 levels of acetic acid-dominant ratios (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, and 5:1). Testing parameters included compressive strength, modulus of elasticity, flexural strength (strong and weak axes), tensile strength, impact strength, density, expansion ratio, setting time, elongation, and specific strength. The results showed that 55% KOH concentration consistently produced superior mechanical performance compared to 60% KOH. The best overall variation was obtained at 55% KOH with KOH dominance at a 2:1 ratio, yielding compressive strength of 23.32 MPa, specific strength of 27,830.68 N.m/kg, modulus of elasticity of 477.30 MPa, and density of 838.08 kg/m³. The highest flexural strength in the strong axis (12.14 MPa) was achieved at 60% KOH with KOH dominance at a 2:1 ratio, while the highest impact strength (59.206 kJ/mm²) was obtained at 60% KOH with acetic acid dominance at a 3:1 ratio. The optimum ratio varied per group. This study proves that the balance of KOH-acetic acid ratio is a determining factor in controlling reaction kinetics and improving the mechanical properties of fly ash-reinforced PIR foam.

Keywords: polyisocyanurate foam; fly ash; potassium hydroxide; acetic acid; mechanical properties; catalyst ratio

1. PENDAHULUAN

Busa polyisocyanurate (PIR) merupakan material seluler rigid berbasis jaringan polimer dengan ikatan silang tiga dimensi yang memiliki keunggulan dalam rasio kekuatan terhadap berat. Kinerja mekanis material ini ditentukan secara fundamental oleh arsitektur selulernya, yang mencakup ukuran sel rata-rata dan distribusinya, fraksi sel tertutup, ketebalan dan integritas dinding sel, serta homogenitas morfologi seluler keseluruhan [1]. Parameter-parameter

tersebut secara kolektif membentuk jalur transfer beban yang mengontrol respons mekanis material terhadap pembebanan tekan, tarik, maupun lentur [2].

Salah satu pendekatan yang sering digunakan untuk memodifikasi sifat mekanis busa PIR adalah penambahan filler anorganik seperti fly ash. Temuan literatur menunjukkan fly ash dapat meningkatkan densitas karena menambah massa tanpa pengurangan volume yang signifikan [3], [4]. Pada kadar tertentu, partikel dapat memperkuat dinding sel dan memperbaiki jalur transfer beban sehingga



kuat tekan meningkat [4], [5]. Namun, efeknya tidak selalu positif: kadar berlebihan atau dispersi yang buruk dapat memicu aglomerasi, mengganggu pembentukan sel, memperbesar pori, dan pada akhirnya menurunkan performa mekanik [3], [6].

Selain filler, sistem katalis-kopling memegang peranan determinan dalam mengendalikan kinetika reaksi selama proses foaming. Kalium hidroksida (KOH) berfungsi sebagai katalis trimerisasi basa yang mempromosikan pembentukan cincin isosianurat melalui mekanisme serangan nukleofilik ion hidroksida terhadap gugus karbonil isosianat [7]. Sebaliknya, asam asetat berperan sebagai pengendali kinetika yang memperlambat laju trimerisasi melalui reaksi netralisasi parsial dan pembentukan intermediate asiluretan [8]. Keseimbangan rasio KOH-asam asetat menjadi faktor krusial dalam menentukan kualitas material akhir [9].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh rasio penambahan KOH dan asam asetat terhadap sifat mekanis busa PIR berpenguat fly ash dengan desain eksperimental faktorial $2 \times 5 \times 5$. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemetaan sistematis mengenai rentang rasio katalis-asam/basa dan keterhubungan mekanik-densitas-morfologi yang dilaporkan secara konsisten

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan desain faktorial $2 \times 5 \times 5$, yang terdiri atas 2 level konsentrasi KOH (55% dan 60%), 5 level rasio dominan KOH (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, dan 5:1), serta 5 level rasio dominan asam asetat (1:1, 2:1, 3:1, 4:1, dan 5:1), sehingga total terdapat 20 variasi perlakuan. Setiap perlakuan diulang pada 3 spesimen ($n=3$)

sesuai prinsip replikasi minimum untuk eksperimental desain.

Bahan utama yang digunakan meliputi Unsaturated Polyester (UP), Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI), polioliol, fly ash kelas F sebagai filler sebesar 31,15%, methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) sebagai inisiator, dan cobalt napthenate sebagai akselerator. Komposisi dasar dan kadar fly ash dijaga konstan untuk seluruh variasi, sehingga pengaruh yang dianalisis difokuskan pada perubahan rasio KOH-asam asetat.

Proses pembuatan spesimen dilakukan melalui pencampuran bertahap. Pertama, fly ash dicampurkan ke dalam resin UP dan polioliol, diaduk selama 2 menit hingga homogen. Selanjutnya, MDI ditambahkan dan diaduk 1 menit. Cobalt dan MEKP dimasukkan secara berurutan dengan jeda 5 detik. Pada tahap akhir, larutan KOH dan asam asetat diteteskan secara perlahan menggunakan pipet tetes sesuai rasio perlakuan. Campuran dituangkan ke dalam cetakan, dibiarkan mengembang, kemudian menjalani proses curing dalam oven pada suhu 85°C selama 24 jam.

Tabel 1. Desain Eksperimen Faktorial $2 \times 5 \times 5$

Kelompok	Konsentrasi KOH	Dominasi	Rasio (KOH:Asam Asetat)
1	60%	KOH	1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1
2	60%	Asam Asetat	1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1
3	55%	KOH	1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1
4	55%	Asam Asetat	1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Parameter pengujian yang dilakukan meliputi kuat tekan mengacu pada SNI 03-6825-2002,



kuat tarik mengacu pada ASTM D3039, kuat lentur pada sumbu kuat dan sumbu lemah mengacu pada ASTM D7264 Prosedur A, serta impact strength mengacu pada ASTM D6110. Parameter pendukung yang diukur meliputi densitas, rasio mengembang, waktu setting, elongation, dan specific strength. Analisis data dilakukan secara deskriptif dan regresi untuk menentukan hubungan antara variasi rasio KOH-asam asetat dengan parameter sifat mekanis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan rentang nilai dari 6,96 MPa hingga 23,32 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada KOH 55% dominan KOH dengan rasio 2:1 (23,32 MPa), diikuti oleh KOH 60% dominan KOH rasio 3:1 (21,91 MPa) dan KOH 55% dominan asam asetat rasio 3:1 (20,92 MPa). Konsentrasi KOH 55% secara konsisten menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan KOH 60%, baik pada dominan KOH maupun dominan asam asetat. Dominasi KOH umumnya memberikan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dominasi asam asetat pada konsentrasi yang sama.

Tabel 2. Rangkuman Rasio Optimum dan Parameter Mekanis

Kelompok Variasi	Rasio	Kuat Tekan (MPa)	Specific Strength (N.m/kg)	Densitas (kg/m ³)
KOH 60% dom. KOH	3:1	21,91	26.751,68	819,10
KOH 60% dom. AA	2:1	14,98	20.952,06	714,94
KOH 55% dom. KOH	2:1	23,32	27.830,68	838,08
KOH 55% dom. AA	3:1	20,92	23.668,90	883,87

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Modulus elastisitas tekan berkisar antara 60,95 MPa hingga 477,30 MPa, dengan nilai tertinggi pada KOH 55% dominan KOH rasio 2:1 (477,30 MPa). Nilai modulus yang tinggi mengindikasikan kekakuan material terhadap deformasi aksial, yang dipengaruhi oleh integritas dinding sel dan kualitas trimerisasi [10]. Kuat lentur sumbu kuat berkisar antara 1,33 MPa hingga 12,14 MPa, di mana nilai tertinggi dicapai pada KOH 60% dominan KOH rasio 2:1 (12,14 MPa). Kuat lentur sumbu lemah berkisar antara 1,41 MPa hingga 7,18 MPa, dengan nilai tertinggi pada KOH 60% dominan KOH rasio 2:1 (7,18 MPa). Material menunjukkan karakteristik anisotropik, dengan rasio anisotropi lentur terendah (1,33) pada KOH 55% dominan asam asetat rasio 2:1 yang mengindikasikan distribusi sel paling isotropik [11].

Tabel 3. Rangkuman Hasil Pengujian Kuat Lentur Optimum

Kelompok Variasi	Rasio	Lentur Kuat (MPa)	Lentur Lemah (MPa)
KOH 60% dom. KOH	2:1	12,14	7,18
KOH 60% dom. AA	1:1	10,38	6,35
KOH 55% dom. KOH	3:1	6,90	4,23
KOH 55% dom. AA	2:1	8,40	6,33

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Kuat tarik seluruh variasi berkisar antara 0,98 MPa hingga 4,88 MPa. Nilai tertinggi diperoleh pada KOH 60% baik dominan KOH maupun dominan asam asetat pada rasio 1:1 (4,88 MPa). Tren penurunan kuat tarik seiring peningkatan rasio mengindikasikan bahwa kondisi seimbang (rasio 1:1) merupakan kondisi terbaik untuk sifat tarik. Penambahan salah satu komponen secara berlebihan



cenderung mengganggu keseimbangan jaringan polimer, baik melalui pembentukan jaringan isosianurat yang terlalu kaku akibat kelebihan KOH maupun pelambatan reaksi yang berlebihan akibat kelebihan asam asetat [12]. Impact strength berkisar antara 12,022 kJ/mm² hingga 59,206 kJ/mm², dengan nilai tertinggi pada KOH 60% dominan asam asetat rasio 3:1 (59,206 kJ/mm²).

Tabel 4. Rangkuman Hasil Pengujian Kuat Tarik dan Impact Strength

Kelompok Variasi	Rasio	Kuat Tarik (MPa)	Impact (kJ/mm ²)
KOH 60% dom. KOH	1:1	4,88	34,537
KOH 60% dom. AA	3:1	2,34	59,206
KOH 55% dom. KOH	1:1	2,14	45,123
KOH 55% dom. AA	1:1	2,14	42,428

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Analisis regresi menunjukkan pola polinomial pada KOH 60% dominan KOH ($R^2 = 0,6406$) dan KOH 55% dominan asam asetat ($R^2 = 0,5953$), serta pola linear pada KOH 60% dominan asam asetat ($R^2 = 0,7222$) dan KOH 55% dominan KOH ($R^2 = 0,1865$). Model polinomial dengan puncak pada rasio menengah mengindikasikan adanya keseimbangan optimum antara katalis basa dan asam asetat pada rasio tertentu. Puncak tersebut berkaitan dengan laju reaksi

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa: (1) Variasi rasio molar KOH:asam asetat memberikan pengaruh nyata terhadap sifat mekanis busa PIR berpenguat fly ash. Konsentrasi KOH 55% secara konsisten

trimerisasi yang optimal, di mana pembentukan cincin isosianurat berlangsung pada kecepatan yang memungkinkan pengembangan busa dan penguncian struktur sel terjadi secara sinkron [13].

Tabel 5. Hasil Analisis Regresi Pengujian Kuat Tekan

Kelompok	Persamaan Regresi	R^2	Pola
KOH 60% dom. KOH	$y = -1,829x^2 + 9,813x + 4,762$	0,6406	Polinomial
KOH 60% dom. AA	$y = -1,564x + 15,806$	0,7222	Linear
KOH 55% dom. KOH	$y = -1,136x + 19,904$	0,1865	Linear
KOH 55% dom. AA	$y = -1,408x^2 + 6,524x + 9,886$	0,5953	Polinomial

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2026.

Secara keseluruhan, formulasi optimum adalah KOH 55% dominan KOH rasio 2:1 karena unggul pada kuat tekan (23,32 MPa), specific strength (27.830,68 N.m/kg), dan modulus elastisitas (477,30 MPa). Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi KOH yang lebih rendah (55%) dengan dominasi KOH pada rasio menengah memberikan kinetika reaksi trimerisasi yang lebih terkendali dan menghasilkan struktur seluler yang lebih terintegrasi. Konsentrasi KOH 60% cenderung menyebabkan reaksi yang terlalu cepat dan tidak terkendali, sehingga menghasilkan struktur sel yang kurang optimal [14].

menghasilkan performa mekanis yang lebih unggul dibandingkan konsentrasi KOH 60%. Kelompok KOH 55% dominan KOH rasio 2:1 menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi sebesar 23,32 MPa dengan specific strength 27.830,68 N.m/kg, modulus elastisitas 477,30 MPa, dan densitas 838,08 kg/m³. (2) Rasio optimum yang menghasilkan performa sifat mekanis terbaik bervariasi untuk setiap



kelompok perlakuan, yaitu 3:1 untuk KOH 60% dominan KOH, 2:1 untuk KOH 60% dominan asam asetat, 2:1 untuk KOH 55% dominan KOH, dan 3:1 untuk KOH 55% dominan asam asetat. (3) Penelitian ini membuktikan bahwa

keseimbangan rasio KOH-asam asetat merupakan faktor determinan dalam mengontrol kinetika reaksi dan meningkatkan sifat mekanis busa PIR berpenguat fly ash.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Kirpluks et al., "Modeling Key Characteristics of Rigid Polyisocyanurate Foams to Improve Sandwich Panel Production Process," *Materials*, vol. 18, no. 4, p. 881, 2025.
- [2] H. H. Al-Moameri, "Standardized Assessment of Compressive Behavior in Rigid Polyurethane Foams," *Asean Journal of Science and Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 129-148, 2025.
- [3] M. Kuźnia et al., "Fly Ash as an Eco-Friendly Filler for Rigid Polyurethane Foams Modification," *Materials*, vol. 14, no. 21, p. 6604, 2021.
- [4] M. Kuźnia et al., "Comparative Study on Selected Properties of Modified Polyurethane Foam With Fly Ash," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 17, p. 9725, 2022.
- [5] S. Zhang et al., "The Influence of Fly Ash on the Foaming Behavior and Flame Retardancy of Polyurethane Grouting Materials," *Polymers*, vol. 14, no. 6, p. 1113, 2022.
- [6] H. Bradai et al., "Synthesis and Characterization of Wood Rigid Polyurethane Composites," *Materials*, vol. 15, no. 12, p. 4316, 2022.
- [7] M. Siebert et al., "Mechanistic Investigation Into the Acetate-Initiated Catalytic Trimerization of Aliphatic Isocyanates," *J. Org. Chem.*, vol. 85, no. 13, pp. 8553-8562, 2020.
- [8] J. Reignier, F. Méchin, and A. Sarbu, "How Increasing Amounts of Trimerization Catalyst Impact the Formation of Poly(urethane-Isocyanurate) Rigid Foams," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 63, no. 48, pp. 20824-20839, 2024.
- [9] Y. Yao et al., "Rigid Polyurethane Foam Derived From Renewable Sources: Research Progress and Future Prospects," *Molecules*, vol. 30, no. 3, p. 678, 2025.
- [10] J. Paciorek-Sadowska et al., "Rigid Polyurethane-polyisocyanurate Foams Modified With Grain Fraction of Fly Ashes," *J. Cell. Plast.*, vol. 56, no. 1, pp. 53-72, 2019.
- [11] A. Strąkowska, S. Członka, and A. Kairytė, "Rigid Polyurethane Foams Reinforced With POSS-Impregnated Sugar Beet Pulp Filler," *Materials*, vol. 13, no. 23, p. 5493, 2020.
- [12] B. Merillas et al., "Transparent Polyisocyanurate-Polyurethane-Based Aerogels," *ACS Appl. Polym. Mater.*, vol. 3, no. 9, pp. 4607-4615, 2021.
- [13] A. Olszewski et al., "Effect of Bio-Polyol Molecular Weight on the Structure and Properties of PUR-PIR Foams," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, 2024.
- [14] G. Cheng et al., "Microstructure and Performances of Rigid Polyurethane Foam Prepared Using Double-effect Baking Powder as a Foaming Agent," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 9, pp. 4456-4468, 2024.