# Pengaruh Variasi Rasio Air Dan Jenis Gipsum Terhadap Sifat Mekanik Dan Morfologi Cetakan

Addina Wahyu Safitri[1], Ayu Setyaning Sayekti Poesoko[2]
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
e-mail: addina.wahyusafitri96@gmail.com, poesokoayu@gmail.com

***ABSTRACT***

***ABSTRACT***

*Mold quality is one of the factors that determines dimensional accuracy, surface condition, and the success of metal casting. Gypsum is attractive for small-scale casting because it is easy to shape, relatively economical, and has adequate thermal resistance. This study evaluates the effect of water content and gypsum type on the mechanical and morphological characteristics of gypsum molds. Two gypsum types were used, namely fire-resistant gypsum (A) and gypsum board material (B), with water additions of 50, 60, and 70 ml for every 100 g of gypsum powder. Six specimens were produced, dried in an oven at approximately 200 °C for 60 minutes, and then tested by compression at a crosshead speed of 2 mm/min. Microstructural observations were carried out using optical microscopy at 400× and 1000× magnification. The highest compressive strength was obtained by specimen B3 at 2.06 MPa, followed by A3 at 2.05 MPa, while the lowest value was 1.95 MPa for A2 and B2. The B-series specimens also showed much lower strain than the A-series. Microscopic observations indicate that differences in particle distribution, agglomeration, and air voids contribute to the variation in mechanical response. The results provide a practical basis for selecting gypsum-water composition for small-scale casting molds.*

***Keywords: gypsum, mechanical properties, morphology, mold, water ratio***

**ABSTRAK**

**ABSTRAK**

Kualitas cetakan merupakan salah satu faktor yang menentukan ketepatan dimensi, kondisi permukaan, dan keberhasilan proses pengecoran. Gipsum menarik digunakan pada pengecoran skala kecil karena mudah dibentuk, relatif ekonomis, dan mempunyai ketahanan termal yang cukup baik. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh kadar air dan jenis gipsum terhadap sifat mekanik dan morfologi cetakan. Dua jenis gipsum digunakan, yaitu gipsum fire resistant (A) dan material gypsum board (B), dengan penambahan air 50, 60, dan 70 ml untuk setiap 100 g serbuk gipsum. Enam spesimen dibuat, dikeringkan pada oven sekitar 200 °C selama 60 menit, kemudian diuji tekan dengan kecepatan 2 mm/menit. Pengamatan struktur dilakukan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 400× dan 1000×. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada spesimen B3 sebesar 2,06 MPa, kemudian A3 sebesar 2,05 MPa, sedangkan nilai terendah sebesar 1,95 MPa diperoleh pada A2 dan B2. Spesimen kelompok B juga menunjukkan regangan yang jauh lebih kecil dibandingkan kelompok A. Pengamatan mikroskop menunjukkan bahwa perbedaan distribusi partikel, aglomerasi, dan rongga udara ikut memengaruhi respons mekanik. Hasil ini dapat menjadi dasar praktis dalam menentukan kombinasi gipsum dan air untuk pembuatan cetakan pengecoran skala kecil.

**Kata kunci: cetakan, gipsum, morfologi, rasio air, sifat mekanik**

## PENDAHULUAN

Pengecoran logam merupakan salah satu proses manufaktur yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan bentuk yang relatif kompleks dengan tahapan yang meliputi pembuatan pola, pembuatan cetakan, peleburan, penuangan, pembongkaran, dan pembersihan coran [1]. Pada rangkaian proses tersebut, cetakan mempunyai posisi yang penting karena bentuk dan kondisi cetakan akan berpengaruh langsung terhadap ketepatan dimensi serta kualitas permukaan produk akhir. Untuk kebutuhan pengecoran skala kecil, material cetakan perlu mudah disiapkan, mudah dibentuk, dan tetap mempunyai kekuatan yang cukup selama menerima beban dan temperatur proses.

Gipsum merupakan salah satu material yang cukup menarik untuk digunakan sebagai cetakan karena dapat dibentuk dengan relatif mudah, biayanya ekonomis, dan memiliki kemampuan menahan temperatur yang memadai untuk aplikasi tertentu. Penggunaan gipsum juga banyak dikaji pada proses precision casting maupun slip casting karena karakteristik setting dan mikrostrukturnya dapat dikendalikan melalui komposisi dan proses preparasi [2], [3]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio gipsum terhadap air mempunyai kaitan dengan porositas, densitas, dan sifat mekanik produk yang telah mengeras [4], [5].

Permasalahan yang masih sering muncul pada pembuatan cetakan gipsum secara sederhana adalah pemilihan komposisi air yang tepat. Air yang terlalu banyak dapat meningkatkan terbentuknya rongga setelah proses pengeringan, sedangkan pencampuran yang tidak merata dapat menyebabkan distribusi partikel menjadi tidak

homogen. Kondisi tersebut pada akhirnya dapat memengaruhi kekuatan cetakan dan kestabilannya selama digunakan. Karena itu, pengaruh kadar air perlu dilihat tidak hanya dari nilai kuat tekan, tetapi juga dari bentuk dan kerapatan struktur mikronya [5], [6], [7], [8].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar air dan jenis gipsum terhadap sifat mekanik serta morfologi cetakan. Variasi air yang digunakan adalah 50, 60, dan 70 ml untuk 100 g serbuk gipsum pada dua jenis material. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran komposisi yang lebih sesuai untuk kebutuhan cetakan pada proses pengecoran skala kecil, sekaligus membantu mengurangi percobaan berulang dan penggunaan material yang tidak diperlukan.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Gipsum sebagai material cetakan

Gipsum berbasis kalsium sulfat hidrat memiliki kemampuan mengeras setelah dicampur dengan air. Pada saat proses hidrasi dan setting, terbentuk jaringan kristal yang kemudian menentukan karakter material setelah mengering[5], [6]. Chen et al. menjelaskan bahwa mekanisme hidrasi kalsium sulfat hemihidrat berhubungan dengan pembentukan fase padat selama proses pengerasan, sedangkan Kyono et al. menunjukkan bahwa gipsum juga mengalami perubahan struktur ketika mengalami pemanasan dan dehidrasi [6], [7]. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi sebelum, selama, dan setelah pengerasan perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi struktur akhir cetakan.

### Gipsum dan aplikasi sebagai cetakan

Dalam aplikasi pencetakan, gipsum dipilih karena relatif mudah dibentuk dan dapat menghasilkan permukaan yang cukup detail. Zhang et al. membahas penggunaan gipsum pada precision casting dan menunjukkan bahwa perilaku material terhadap temperatur menjadi salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam aplikasi cetakan [2]. Ochoa et al. juga menunjukkan bahwa variabel preparasi pada plaster mold, seperti kondisi pencampuran dan pembentukan, dapat memengaruhi karakteristik cetakan yang dihasilkan [3]. Oleh karena itu, kualitas cetakan tidak hanya ditentukan oleh jenis gipsum, tetapi juga oleh bagaimana material tersebut dipersiapkan sebelum digunakan.

### Rasio air dan mikrostruktur

Rasio air terhadap serbuk merupakan salah satu parameter yang paling mudah diubah pada proses pembuatan cetakan. Air diperlukan dalam proses hidrasi, tetapi jumlah air yang berlebih dapat menyebabkan terbentuknya ruang kosong setelah proses pengeringan sehingga porositas material meningkat. Palhares et al. menunjukkan bahwa perubahan plaster-to-water ratio dapat memengaruhi sifat fisik dan mekanik produk berbasis gipsum [4]. Hasil penelitian Jayaprakash et al. pada produk gypsum juga menunjukkan bahwa water-powder ratio berkaitan dengan sifat akhir material [5]. Dengan demikian, variasi air perlu diamati tidak hanya dari hasil kekuatan tekan, tetapi juga dari perubahan bentuk dan distribusi partikel yang terbentuk.

### Hubungan mikrostruktur dengan sifat mekanik

Sifat mekanik gipsum sangat berkaitan dengan mikrostruktur yang terbentuk selama proses setting dan pengeringan. Ukuran, bentuk, distribusi partikel, aglomerasi, serta keberadaan rongga dapat memengaruhi kemampuan material dalam menerima beban. Yu dan Brouwers membahas hubungan antara mikrostruktur dan sifat mekanik gipsum, sedangkan Al-Ridha et al. menunjukkan bahwa perubahan komposisi melalui penambahan serat dapat meningkatkan kuat tekan gipsum [9], [10]. Pada material yang memiliki struktur lebih rapat dan ikatan antarpartikel yang lebih baik, transfer beban cenderung berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, rongga dan ketidakteraturan distribusi partikel dapat menjadi lokasi awal terjadinya kerusakan saat material diberi beban.

### Pengaruh temperatur dan proses pengeringan

Selain rasio air, proses pengeringan juga menjadi bagian penting karena air yang tersisa di dalam cetakan akan memengaruhi kondisi akhir material. Penelitian mengenai gypsum pada temperatur tinggi menunjukkan bahwa pemanasan dapat memicu perubahan struktur dan sifat material akibat proses dehidrasi[7], [8]. Du et al. juga memperlihatkan bahwa material gipsum dengan perlakuan tahan panas mempunyai perilaku mekanik dan deformasi yang berkaitan dengan kondisi temperatur [8]. Dalam penelitian ini, proses pengeringan dilakukan setelah cetakan mengeras untuk mengurangi kandungan air yang tersisa. Tahapan tersebut menjadi penting karena kondisi setelah pengeringan selanjutnya berpengaruh terhadap pengujian kekuatan tekan dan pengamatan mikrostruktur.

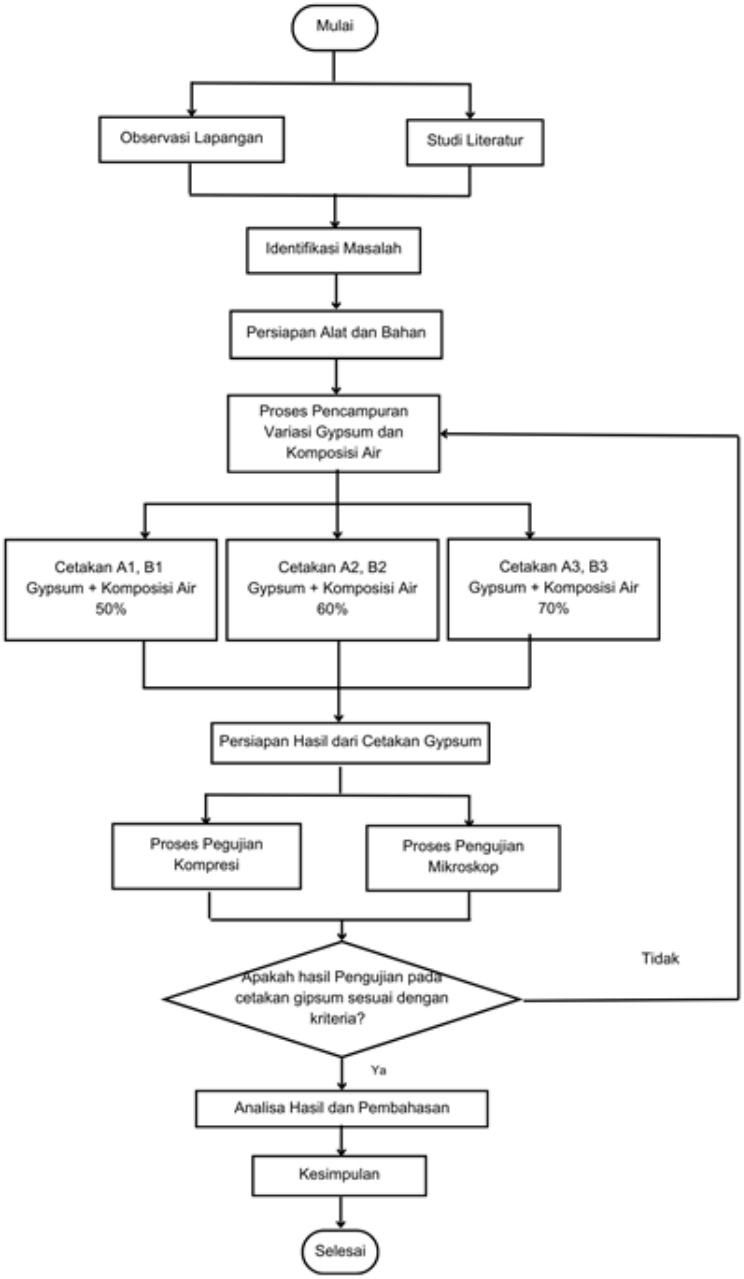
*ISSN 2775-5630*

**Posisi penelitian**

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat dilihat bahwa rasio air, proses preparasi, proses pengeringan, dan karakteristik material mempunyai keterkaitan terhadap struktur serta sifat mekanik gipsum. Namun, dari sumber yang digunakan, pembahasan mengenai perbandingan dua jenis gipsum dengan variasi kadar air yang sama pada pembuatan cetakan sederhana masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua jenis gipsum pada tiga variasi air, yaitu 50, 60, dan 70 ml untuk 100 g serbuk, kemudian menghubungkan hasil uji kompresi dengan pengamatan morfologi menggunakan mikroskop optik. Pendekatan ini digunakan agar pengaruh variasi komposisi dapat dilihat secara lebih langsung dari sisi kekuatan dan struktur cetakannya.

## METODE

Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium. Variabel bebas berupa kadar air dalam campuran gipsum, sedangkan variabel terikat berupa kekuatan tekan dan karakteristik morfologi mikrostruktur. Variabel yang dikendalikan meliputi massa serbuk gipsum, jenis material, metode pencampuran, waktu pengadukan, proses penuangan, serta kondisi pengeringan.




Gambar 1. Alur penelitian pembuatan dan pengujian cetakan gipsum.

Dua jenis serbuk digunakan. Gypsum A merupakan tipe fire resistant dengan bahan dasar $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ yang dilengkapi mineral/fiber, sedangkan Gypsum B merupakan material gypsum board berbasis $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Masing-masing jenis ditimbang 100 g untuk setiap spesimen. Air ditambahkan sebanyak 50, 60, dan 70 ml sehingga diperoleh enam variasi spesimen seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel 1. Cetakan spesimen berukuran 6 cm × 7 cm × 3 cm.

Tabel 1. Variasi komposisi spesimen cetakan gipsum.

| Spesimen | Massa gipsum (g) | Air (ml) | Rasio air/gipsum |
|---|---|---|---|
| A1 | 100 | 50 | 1:2 |
| A2 | 100 | 60 | 1:1,67 |
| A3 | 100 | 70 | 1:1,43 |
| B1 | 100 | 50 | 1:2 |
| B2 | 100 | 60 | 1:1,67 |
| B3 | 100 | 70 | 1:1,43 |

Serbuk gipsum dan air dicampur menggunakan bor/mixer dengan kecepatan konstan. Pengadukan dilakukan secara cepat dan merata untuk menghindari solidifikasi sebelum campuran dituangkan. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam cetakan dan dibiarkan mengeras pada suhu ruang. Setelah dilepas dari cetakan, seluruh spesimen dikeringkan menggunakan oven manual selama 60 menit dengan suhu sekitar 200 °C. Setelah pengeringan, spesimen didinginkan pada suhu ruang dan ditimbang kembali.

Tabel 2. Massa cetakan sebelum dan sesudah pengeringan.

| Spesimen | Massa sebelum oven (g) | Massa setelah oven (g) |
|---|---|---|
| A1 | 150 | 120 |
| A2 | 170 | 130 |
| A3 | 200 | 150 |
| B1 | 130 | 110 |
| B2 | 160 | 120 |
| B3 | 180 | 140 |

Pengujian kompresi dilakukan menggunakan Universal Testing Machine di Laboratorium Teknik Mesin ITS dengan kecepatan pembebanan 2 mm/menit. Parameter yang dicatat meliputi maximum load, strength, dan strain. Setelah itu dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 400× dan 1000× untuk melihat bentuk partikel, distribusi, aglomerasi, serta rongga pada permukaan spesimen. Data mekanik dan hasil pengamatan mikrostruktur kemudian dibandingkan antarvariasi untuk melihat kecenderungan hubungan antara komposisi air, jenis gipsum, dan performa cetakan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik hasil cetakan




Gambar 2. Hasil cetakan enam variasi spesimen gipsum.

Secara visual, keenam spesimen dapat dilepas dari cetakan setelah proses pengerasan. Perbedaan paling mudah terlihat adalah warna material. Gypsum A cenderung berwarna abu-abu muda dan sedikit lebih kusam, sedangkan

Gypsum B tampak lebih putih dan cerah. Perbedaan ini sejalan dengan jenis bahan yang digunakan dan tidak secara langsung menunjukkan nilai kekuatan, sehingga pengujian mekanik tetap diperlukan untuk membandingkan performanya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

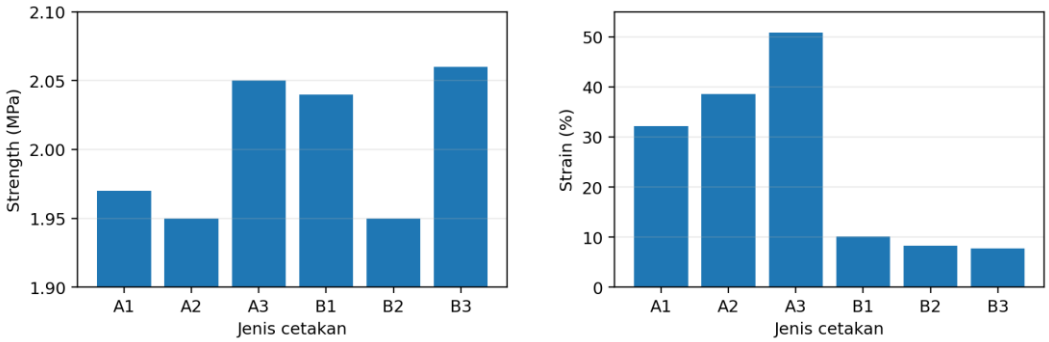
### Hasil pengujian kompresi

Pengujian kompresi dilakukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing spesimen dalam menerima beban tekan. Hasil pengujian terhadap enam spesimen ditampilkan pada Tabel 3. Parameter yang diamati meliputi *maximum load*, *strength*, dan *strain*

Tabel 3. Hasil pengujian kompresi pada enam spesimen.

| Spesimen | Max load (N) | Strength (MPa) | Strain (%) |
|---|---|---|---|
| A1 | 9124 | 1,97 | 32,20 |
| A2 | 9041 | 1,95 | 38,60 |
| A3 | 9500 | 2,05 | 50,84 |
| B1 | 9457 | 2,04 | 10,12 |
| B2 | 9019 | 1,95 | 8,30 |
| B3 | 9501 | 2,06 | 7,80 |

Berdasarkan Tabel 3, nilai *strength* yang diperoleh berada pada rentang 1,95–2,06 MPa. Nilai tertinggi diperoleh pada spesimen B3 sebesar 2,06 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada spesimen A2 dan B2 sebesar 1,95 MPa. Perbandingan nilai *strength* dan *strain* pada seluruh spesimen kemudian disajikan pada Gambar 3.

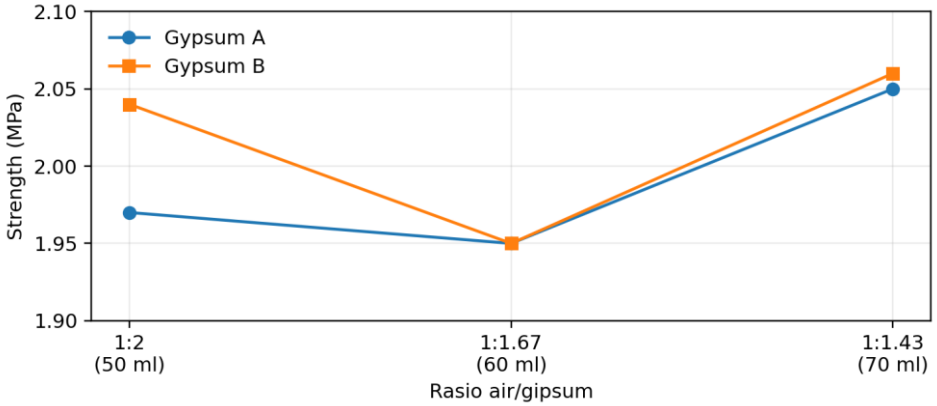



Gambar 3. Perbandingan strength dan strain pada enam variasi cetakan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa max load berada pada rentang 9019-9501 N. Nilai tertinggi diperoleh pada B3 sebesar 9501 N, sedangkan nilai terendah terdapat pada B2 sebesar 9019 N. Pola yang sama terlihat pada nilai strength, yaitu B3 menjadi spesimen dengan nilai tertinggi sebesar 2,06 MPa. Nilai berikutnya adalah A3 sebesar 2,05 MPa dan B1 sebesar 2,04 MPa, sedangkan nilai terendah 1,95 MPa diperoleh pada A2 dan B2.

Yang menarik dari data tersebut, pengaruh kadar air tidak membentuk pola linear yang sederhana. Pada kelompok A, kenaikan air dari 50 menjadi 60 ml menurunkan strength dari 1,97 menjadi 1,95 MPa, tetapi pada 70 ml strength kembali meningkat menjadi 2,05 MPa. Pada kelompok B, pola yang sama juga terlihat, yaitu 2,04 MPa pada 50 ml, turun menjadi 1,95 MPa pada 60 ml, kemudian naik menjadi 2,06 MPa pada 70 ml. Artinya, berdasarkan enam data pengujian ini belum tepat untuk menyatakan bahwa penambahan air selalu menurunkan kekuatan. Variasi kadar air memengaruhi hasil, tetapi responsnya juga dipengaruhi oleh jenis gipsum dan kondisi proses pencampuran serta pengeringan.

*ISSN 2775-5630*



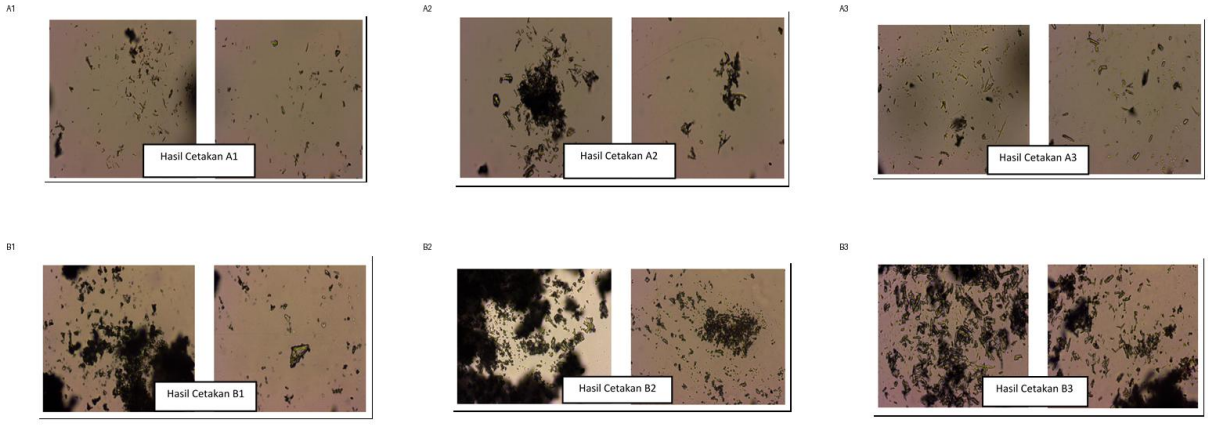

Gambar 4. Hubungan rasio air/gipsum terhadap strength pada Gypsum A dan B.

Perbedaan yang lebih jelas justru terlihat pada strain. Kelompok A memiliki strain 32,20-50,84%, sedangkan kelompok B hanya 7,80-10,12%. Pada kondisi beban yang sebanding, strain yang lebih kecil pada kelompok B menunjukkan bahwa deformasinya lebih terbatas dibandingkan kelompok A. Dengan demikian, jenis gipsum memberikan pengaruh yang cukup kuat terhadap respons deformasi, tidak hanya melalui nilai strength tetapi juga melalui karakter struktur yang terbentuk.

Nilai strength yang diperoleh pada penelitian ini masih relatif rendah dibandingkan dengan nilai acuan yang digunakan pada material gipsum. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh skala dan cara preparasi spesimen, terutama pencampuran yang dilakukan secara manual, keseragaman distribusi air, waktu pengadukan, serta kondisi pengeringan. Penelitian tentang gipsum dan plaster menunjukkan bahwa variasi preparasi dapat memberikan perubahan nyata pada mikrostruktur dan sifat mekaniknya [3], [4], [5]. Karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai gambaran hubungan antarvariabel pada kondisi eksperimen yang digunakan.

**Morfologi mikrostruktur**

Pengamatan menggunakan mikroskop optik dilakukan pada perbesaran 400× dan 1000×. Tujuannya adalah melihat perubahan bentuk partikel, distribusi partikel, aglomerasi, dan rongga yang terbentuk setelah proses pengeringan. Pengamatan ini penting karena dua spesimen dengan strength yang hampir sama dapat mempunyai pola deformasi yang berbeda akibat perbedaan struktur internal.

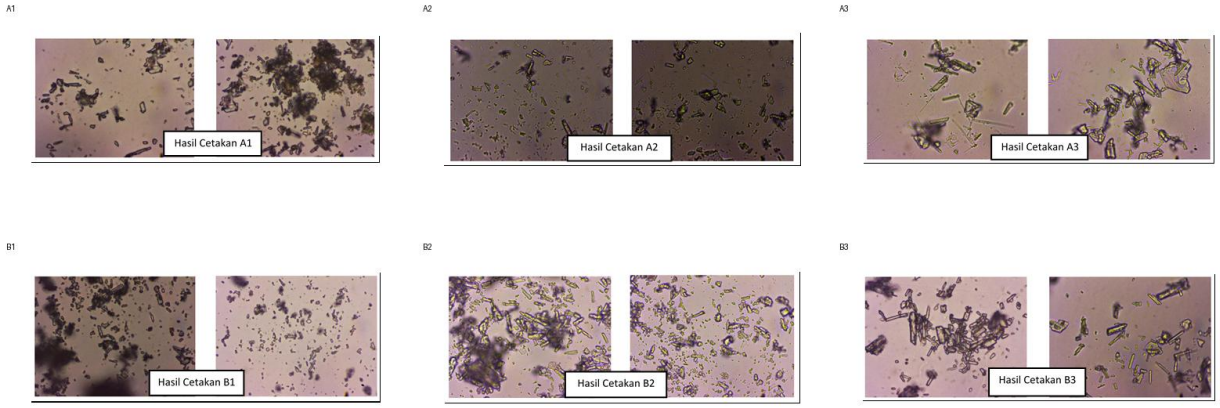



Gambar 5. Hasil pengamatan mikroskop optik pada perbesaran 400×: A1-A3 (atas) dan B1-B3 (bawah).

Pada perbesaran 400×, sampel A1 memperlihatkan partikel berbentuk seperti jarum yang tersebar relatif merata dan saling berdekatan. Struktur terlihat lebih homogen dibandingkan A2 dan A3. Pada A2 tampak distribusi partikel yang lebih acak, aglomerasi, serta rongga udara yang lebih jelas. A3 menunjukkan partikel yang tumbuh lebih terpisah dan rongga yang terlihat lebih banyak. Pada kelompok B, B1 memperlihatkan fragmen partikel berbentuk jarum dengan distribusi lebih padat dan merata. B2 menunjukkan rongga dan aglomerasi yang lebih jelas, sedangkan B3 memperlihatkan partikel jarum yang lebih pendek dan tersebar dengan beberapa rongga di antara partikel.

Hasil pengamatan tersebut membantu menjelaskan mengapa strain kelompok B jauh lebih rendah daripada kelompok A. B1, misalnya, menunjukkan distribusi yang lebih rapat dan struktur yang lebih seragam sehingga deformasi saat pengujian juga relatif kecil. Pada B3, meskipun pengamatan menunjukkan adanya rongga, nilai strength yang diperoleh justru menjadi yang paling tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan mikrostruktur

dan sifat mekanik dalam penelitian ini tidak hanya ditentukan oleh jumlah rongga secara visual, tetapi juga oleh bentuk partikel, keterhubungan antarpartikel, dan kondisi spesimen secara keseluruhan.




Gambar 6. Hasil pengamatan mikroskop optik pada perbesaran 1000×: A1-A3 (atas) dan B1-B3 (bawah).

Pada perbesaran 1000×, A1 menunjukkan partikel prismatik dan tajam dengan ukuran relatif homogen serta rongga yang sedikit. A2 memperlihatkan kombinasi partikel prismatik pendek dan bentuk jarum tidak beraturan dengan celah kosong yang lebih banyak. A3 menunjukkan partikel memanjang yang sebagian mengalami patahan dan distribusi yang lebih tidak merata. Pada B1, partikel tampak tajam dan prismatik, batas antarpartikel lebih jelas, dan struktur terlihat lebih rapat. B2 memperlihatkan ukuran partikel yang lebih bervariasi dan beberapa partikel saling tumpang tindih tanpa membentuk ikatan yang seragam. B3 menunjukkan partikel jarum dan prismatik pendek yang tersebar luas, dengan beberapa ujung partikel yang kurang sempurna serta rongga antarpartikel.

Secara umum, hasil mikroskop memperlihatkan bahwa setiap variasi menghasilkan karakter mikrostruktur yang berbeda. Perbedaan tersebut mendukung hasil uji kompresi bahwa jenis gipsum dan rasio air tidak bekerja secara terpisah. Kondisi material, proses pencampuran, dan proses pengeringan bersama-sama menentukan struktur yang terbentuk, kemudian struktur tersebut memengaruhi respons mekanik ketika spesimen diberi beban. Hasil ini sejalan dengan kajian yang menyatakan bahwa perubahan mikrostruktur gipsum dan proses setting dapat memengaruhi kekuatan serta perilaku deformasinya[6], [9], [10].

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian kompresi dan pengamatan mikroskop optik pada enam variasi cetakan gipsum, dapat disimpulkan bahwa variasi rasio air dan jenis gipsum memengaruhi sifat mekanik dan morfologi hasil cetakan. Nilai strength tertinggi diperoleh pada spesimen B3 dengan 2,06 MPa, sedangkan nilai terendah sebesar 1,95 MPa terdapat pada A2 dan B2. Berdasarkan data yang diperoleh, hubungan kadar air terhadap strength tidak menunjukkan pola linear, sehingga pengaruh rasio air perlu dilihat bersama dengan jenis gipsum dan kondisi proses pembuatan. Perbedaan strain juga cukup jelas, karena kelompok B berada pada 7,80-10,12%, jauh lebih rendah dibandingkan kelompok A yang berada pada 32,20-50,84%. Pengamatan mikroskop menunjukkan perbedaan distribusi partikel, aglomerasi, dan rongga antarvariasi yang ikut menjelaskan perbedaan respons mekanik. Dengan demikian, optimasi cetakan gipsum tidak cukup hanya berdasarkan jumlah air, tetapi perlu mempertimbangkan jenis bahan dan konsistensi proses pencampuran serta pengeringan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, serta pihak Laboratorium Teknik Mesin ITS yang telah mendukung proses pengujian dan penyediaan data penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] N. A. R. Pane, “Proses Pengecoran dan Manufaktur Logam.”
[2] Y. Zhang, J. Zhang, Y. Miao, and S. Duan, “Study on the Thermal Expansion Performance of Gypsum in the Application of Precision Casting,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 330, no. 4, p. 042003, Oct. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/330/4/042003.

[3] R. E. Ochoa, C. A. Gutiérrez, J. C. Rendón, and J. L. Rodríguez, "Effect of preparation variables of plaster molds for slip casting of sanitary ware," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 56, no. 6, pp. 263–272, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.bsecv.2017.06.001.

[4] L. B. Palhares, D. F. Galvão, and P. R. P. de Paiva, "Effects of plaster to water ratio on physical and mechanical properties of ceramic pieces produced by the slip casting process," *Cerâmica*, vol. 68, no. 386, pp. 143–151, Jun. 2022, doi: 10.1590/0366-69132022683863221.

[5] K. Jayaprakash *et al.*, "Impact of Water Quality and Water Powder Ratio on the Properties of Type 4 - Die Stones (Gypsum Products) used in Dentistry," *International Journal of Health and Rehabilitation Sciences (IJHRS)*, vol. 3, no. 2, p. 75, 2014, doi: 10.5455/ijhrs.000000056.

[6] X. Chen, Q. Wu, J. Gao, and Y. Tang, "Hydration characteristics and mechanism analysis of β-calcium sulfate hemihydrate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 296, p. 123714, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123714.

[7] A. KYONO, R. IKEDA, S. TAKAGI, and W. NISHIYASU, "Structural evolution of gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) during thermal dehydration," *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, vol. 117, no. 1, p. 220811, 2022, doi: 10.2465/jmps.220811.

[8] Z. Du, W. She, W. Zuo, J. Hong, Y. Zhang, and C. Miao, "Foamed gypsum composite with heat-resistant admixture under high temperature: Mechanical, thermal and deformation performances," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 108, p. 103549, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103549.

[9] A. Al-Ridha, A. Saeed, M. Abdul, D. Sahib, A. Zaier, and M. Sabah, "The influence of chopped copper fibre (CF) on the improvement of pure gypsum by compressive strength," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 20, no. 2, pp. 546–551, 2022, doi: 10.5937/jaes0-33435.

[10] Q. Yu and H. J. H. Brouwers, "Gypsum: an investigation of microstructure and mechanical properties," in *Proceedings of the 8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, G. Fischer, M. Geiker, O. Hededal, L. M. Ottosen, and H. Stang, Eds., Kgs. Lyngby, Denmark: DTU Byg, Jun. 2010.