

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

## ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

### Rancang Bangun Mesin Pembusa dengan Variasi Bibit Pembusa

An-Nisa Magnolia<sup>1\*</sup>, Nurcahya Nugraha<sup>2</sup>, Rizal Nazarudin<sup>3</sup>, Ferly Citra Ardiansyah<sup>4</sup><sup>1\*,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

Foaming generator, kepadatan busa, material konstruksi ringan, efisiensi produksi, stabilitas busa.

#### ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan alat pembusa (foam generator) untuk produksi material konstruksi ringan dengan mengoptimalkan rasio campuran air dan foaming agent. Metode pencampuran dilakukan secara pneumatik menggunakan tabung bertekanan dengan sistem kontrol tekanan konstan 50 psi (3,4 bar), di mana udara terkompresi diinjeksikan ke dalam larutan foaming agent melalui nozzle berdiameter 2,0 mm, kemudian campuran dipaksa melewati foam pipe berisi serabut stainless steel wool dengan densitas packing 60% untuk menghasilkan gelembung yang seragam. Variasi penelitian meliputi empat level rasio foaming agent terhadap air: 250 ml, 500 ml, 750 ml, dan 1000 ml per 19000 ml air, dengan parameter kontrol tekanan, suhu ( $28 \pm 2^\circ\text{C}$ ), dan waktu mixing (60 detik) yang dijaga konstan. Metode pengamatan distribusi dan kerapatan gelembung dilakukan secara visual menggunakan kamera mikroskop digital dengan perbesaran 40x pada area  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , dengan mengukur ukuran rata-rata gelembung ( $d_{avg}$ ), jarak antar gelembung ( $\delta$ ), dan jumlah gelembung per satuan luas. Pengujian kuantitatif meliputi densitas busa ( $\rho = m/V$ ), expansion ratio ( $E_r = V_{foam}/V_{initial}$ ), dan debit aliran ( $Q = V/t$ ) sesuai standar ASTM C869-06. Hasil menunjukkan rasio optimal 1000 ml foaming agent per 19000 ml air menghasilkan busa dengan densitas  $95 \text{ kg/m}^3$ , ukuran gelembung 0,47 mm, jarak antar gelembung 0,04 mm,

\*Corresponding author: [annisa.magnolia@eng.unila.ac.id](mailto:annisa.magnolia@eng.unila.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.11198>

Received 14 January 2026; Received in revised form 18 March 2026; Accepted 30 March 2026

Available online 31 March 2026

---

dan stabilitas lebih dari 60 menit. Peningkatan konsentrasi foaming agent berbanding lurus dengan densitas busa dan berbanding terbalik dengan ukuran gelembung, dengan fenomena penurunan jumlah gelembung pada rasio tertinggi akibat crowding effect. Kontribusi utama penelitian ini adalah penentuan rasio optimal berbasis data kuantitatif dan desain foam generator yang dapat direproduksi untuk produksi Cellular Lightweight Concrete yang efisien dan konsisten.

---

## Pendahuluan

Industri konstruksi global saat ini menghadapi tantangan ganda yang saling terkait, yaitu meningkatnya permintaan akan infrastruktur berkualitas dan urgensi pengurangan jejak karbon bangunan[1]. Material konstruksi konvensional seperti beton normal memiliki berat jenis tinggi sekitar  $2400 \text{ kg/m}^3$ , yang memberikan beban struktural besar, konsumsi material baku yang intensif, dan emisi karbon yang signifikan selama produksi semen[2]. Kondisi ini mendorong para peneliti dan praktisi untuk mengembangkan alternatif material yang lebih ringan namun tetap memenuhi persyaratan kekuatan dan keawetan. *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) muncul sebagai solusi yang menjanjikan dengan berat jenis hanya  $300\text{--}1800 \text{ kg/m}^3$ , tergantung pada tingkat porositas yang diinginkan. Material ini mengintegrasikan sistem matriks semen dengan rongga-rongga udara yang tersebar merata, menciptakan struktur berpori yang mengurangi berat secara signifikan tanpa mengorbankan sifat struktural sepenuhnya. Selain keunggulan reduksi berat, CLC menawarkan sifat isolasi termal yang superior dengan koefisien konduktivitas termal berkisar  $0,1$  hingga  $0,5 \text{ W/mK}$ , serta kemampuan isolasi akustik yang bermanfaat untuk aplikasi peredam suara[3]. Produksi CLC bergantung pada kualitas busa yang dihasilkan oleh perangkat yang disebut foam generator, dimana stabilitas dan kepadatan busa secara langsung menentukan kekuatan struktural dan keawetan produk akhir[4].

Busa yang digunakan untuk CLC adalah sistem dispersi koloidal yang terdiri dari fase gas berupa udara yang terdispersi dalam fase cair kontinu berupa larutan *foaming agent*. Secara alami, gelembung udara dalam air tidak stabil dan akan cepat pecah. *Foaming agent* berperan sebagai surfaktan yang menstabilkan gelembung dengan menurunkan tegangan permukaan air dari  $72,8 \text{ mN/m}$  menjadi  $30\text{--}40 \text{ mN/m}$ [5]. Molekul *foaming agent* memiliki dua sisi: gugus hidrofilik yang menarik air dan gugus hidrofobik yang menolak air, memungkinkan molekul ini berorientasi di permukaan gelembung dan membentuk lapisan pelindung. Stabilitas gelembung individual dijelaskan oleh persamaan tekanan Laplace:  $\Delta P = 4\gamma/d$ , dimana  $\Delta P$  adalah perbedaan tekanan antara bagian dalam dan luar gelembung,  $\gamma$  adalah tegangan permukaan, dan  $d$  adalah diameter gelembung[6]. Persamaan ini menunjukkan bahwa gelembung kecil memiliki tekanan internal lebih tinggi dan cenderung tidak stabil, sehingga kehadiran *foaming agent* yang mengurangi  $\gamma$  sangat penting untuk stabilitas. Ketebalan film cair antar gelembung juga menentukan stabilitas busa secara keseluruhan, dimana film yang tipis rentan pecah sedangkan film yang tebal memberikan stabilitas lebih baik[7]. Pengembangan *foam generator* telah dilakukan oleh berbagai pihak, namun ketersediaan perangkat yang memenuhi persyaratan teknis masih terbatas dan menyebabkan gap penelitian yang signifikan. *Foam generator* adalah tabung bertekanan

yang menghasilkan busa berongga atau berisi udara. *foam generator* berisi cairan pembusa (*foaming agent*) yang dicampurkan dengan air dan menampung tekanan [8].

Pengembangan foam generator telah dilakukan oleh berbagai pihak, namun ketersediaan perangkat yang memenuhi persyaratan teknis masih terbatas dan menyebabkan gap penelitian yang signifikan. Foam generator komersial skala industri umumnya memiliki kompleksitas tinggi dengan sistem injeksi presisi dan kontrol otomatis yang menjadikan harga perangkat sangat mahal dan aksesibilitasnya terbatas untuk usaha kecil, laboratorium penelitian, atau aplikasi di daerah dengan infrastruktur terbatas. Di sisi lain, foam generator sederhana yang tersedia di pasaran atau dibuat secara mandiri seringkali gagal menghasilkan busa dengan kualitas yang konsisten dan terukur. foam generator sederhana tanpa sistem kontrol tekanan yang presisi menghasilkan busa dengan variasi densitas yang mencapai 30% antar batch. Variasi sebesar ini tidak dapat diterima untuk produksi CLC yang memerlukan prediktabilitas sifat mekanis. Keterbatasan utama meliputi tiga aspek: stabilitas proses yang rendah akibat fluktuasi tekanan, tidak adanya kontrol densitas yang jelas, dan sulitnya reproduksi kondisi proses yang identik. Selain keterbatasan perangkat, terdapat gap penelitian fundamental terkait optimasi komposisi bahan baku busa. *Foaming agent* merupakan komponen kritis yang menentukan kualitas busa, namun penggunaannya melibatkan rasio pencampuran dengan air yang belum dioptimalkan secara eksperimental. Densitas busa sebagai parameter kualitas utama dihitung dengan persamaan sederhana  $\rho_{\text{foam}} = m/V$ , dimana  $m$  adalah massa busa dan  $V$  adalah volume yang ditematinya. Porositas busa  $\phi$  yang merepresentasikan fraksi volume udara dapat dihitung dengan  $\phi = (1 - \rho_{\text{foam}}/\rho_{\text{liquid}}) \times 100\%$ , dimana  $\rho_{\text{liquid}}$  mendekati  $1000 \text{ kg/m}^3$  untuk larutan encer. Karakteristik geometri mikro gelembung seperti ukuran rata-rata  $d_{\text{avg}} = (\sum d_i)/n$  dan jarak antar gelembung  $\delta = (L_{\text{total}} - \sum d_i)/(n-1)$  juga menentukan kualitas busa dan

berkorelasi dengan kekuatan mekanis material akhir[9]. Penelitian sebelumnya banyak membandingkan jenis *foaming agent* namun tidak mengoptimalkan rasio pencampurannya. Penelitian lain menguji kecepatan pengadukan namun menggunakan rasio yang tetap. Ketidakjelasan ini membuat praktisi bekerja dalam ketidakpastian: penggunaan *foaming agent* terlalu sedikit menghasilkan busa tidak stabil dengan gelembung besar, sementara penggunaan berlebihan meningkatkan biaya tanpa peningkatan kualitas yang proporsional[10].

Foam generator bekerja berdasarkan prinsip pneumatik dengan dua tahap pembentukan gelembung. Tahap pertama adalah injeksi udara terkompresi ke dalam larutan *foaming agent* yang menciptakan turbulensi dan gelembung kasar. Efisiensi tahap ini dapat dianalisis dengan bilangan Weber  $We = \rho_{\text{air}} \times v^2 \times d_{\text{orifice}}/\gamma$ , yang membandingkan gaya inersia dengan gaya tegangan permukaan. Tahap kedua adalah pemaksaan campuran melewati celah sempit berupa serabut logam yang memecah gelembung besar menjadi kecil dan seragam melalui mekanisme shear-induced breakup. Ukuran gelembung keluaran dapat diprediksi dengan  $d_{\text{final}} \approx (\gamma/(\mu \times \dot{\gamma}))^{0.6}$ , dimana  $\mu$  adalah viskositas larutan dan  $\dot{\gamma}$  adalah shear rate. Debit aliran busa  $Q = V/t$  menentukan kapasitas produksi dan bergantung pada tekanan operasional serta resistensi hidraulik sistem. Rasio *foaming agent* terhadap air  $R_{f/a} = V_{\text{foaming agent}}/V_{\text{water}}$  menentukan konsentrasi surfaktan  $C_{fa}$  yang secara langsung mempengaruhi tegangan permukaan, viskositas, dan stabilitas busa[11]. Expansion ratio  $E_r = V_{\text{foam}}/(V_{\text{foaming agent}} + V_{\text{water}})$  menunjukkan efisiensi konversi, namun terdapat trade-off dengan stabilitas karena busa dengan expansion ratio terlalu tinggi memiliki dinding sel yang tipis dan rentan.

Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun foam generator dengan sistem kontrol tekanan yang stabil, menguji secara eksperimental pengaruh variasi rasio *foaming agent* terhadap air terhadap karakteristik busa yang dihasilkan, serta

menentukan rasio optimal berdasarkan kriteria kepadatan maksimum, homogenitas struktur, dan stabilitas yang memadai untuk aplikasi CLC. Kontribusi utama penelitian ini adalah penentuan rasio optimal berbasis data kuantitatif serta mekanisme pembentukan busa yang dapat direproduksi, yang memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi produksi CLC yang lebih terjangkau dan konsisten[12], [13].

Berdasarkan identifikasi gap penelitian tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan secara eksplisit dalam tiga fokus utama. Pertama, penelitian ini bertujuan menentukan rasio optimal *foaming agent* terhadap air yang menghasilkan kepadatan busa maksimum untuk produksi CLC. Kedua, penelitian ini menganalisis pengaruh variasi rasio terhadap ukuran gelembung, jarak antar gelembung, dan stabilitas busa yang dihasilkan. Ketiga, penelitian ini mengimplementasikan karakteristik busa optimal dalam rancang bangun foam generator yang efisien, terkontrol, dan dapat direproduksi. Sesuai dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun foam generator dengan sistem kontrol tekanan yang stabil, menguji secara eksperimental pengaruh variasi rasio *foaming agent* terhadap karakteristik busa, serta menentukan rasio optimal berdasarkan kriteria kepadatan maksimum dan stabilitas yang memadai. Kontribusi utama penelitian ini adalah penentuan rasio optimal berbasis data kuantitatif dan mekanisme pembentukan busa yang dapat direproduksi, memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi produksi CLC yang lebih terjangkau dan konsisten[14].

## Metode Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun mesin *foam* generator, serta menguji pengaruh perbandingan air dan cairan *foaming agent* terhadap kepadatan *foam* yang dihasilkan dan implikasinya terhadap mutu material konstruksi. Komponen pada tabung terdapat pada gambar 1. Tabung ini

dilengkapi beberapa bagian seperti *safety valve*, *air regulator*, *spray gun*, *high pressure propane*, dan *valve male*.

Penelitian diawali dengan studi literatur mengenai prinsip kerja bahan konstruksi material ringan dan karakteristik *foaming agent*, dilanjutkan dengan proses perancangan teknis mesin *foam agent* menggunakan *software* desain teknik seperti gambar 2. Penelitian ini merancang dan membangun foam generator bertekanan dengan spesifikasi teknis yang terukur dan terkontrol. Tabung utama terbuat dari bahan stainless steel SS304 dengan kapasitas 20 liter dan tekanan kerja aman 44–58 psi (3,0–4,0 bar), dengan tekanan maksimum yang diizinkan 72 psi (5,0 bar) sesuai standar safety factor ASME. Tabung dilengkapi safety valve yang disetel melepas pada tekanan 60 psi (4,1 bar) untuk mencegah overpressure. Sistem kompresor yang digunakan memiliki kapasitas 1 HP (0,75 kW) dengan output tekanan maksimum 8 bar (116 psi) dan flow rate 100 liter per menit, yang dihubungkan ke tabung melalui regulator tekanan presisi dengan range kontrol 0–10 bar dan akurasi  $\pm 0,1$  bar.

Sistem injeksi udara menggunakan *nozzle* kuningan dengan diameter *orifice* 2,0 mm yang terpasang pada bagian bawah tabung, menghasilkan jet udara berkecepatan tinggi untuk menciptakan turbulensi optimal. *Nozzle* ini terhubung ke kompresor melalui selang tekanan tinggi dengan rating 10 bar. Pada keluaran tabung, dipasang spray gun komersial dengan orifice 3,5 mm yang berfungsi sebagai katup kontrol aliran dan distributor campuran ke foam pipe. Foam pipe berdiameter 50 mm dan panjang 300 mm, diisi dengan media penyaring berupa serabut stainless steel wool grade medium dengan densitas packing 60%, yang berfungsi sebagai generator gelembung sekunder. Kapasitas daya tampung tabung maksimal adalah 20 Liter.



Gambar 1. Bagian Komponen Tabung

Proses produksi busa dikontrol dengan parameter yang tetap dan terukur untuk memastikan reproduksibilitas. Tekanan operasional dijaga konstan pada 50 psi (3,4 bar) selama seluruh pengujian, diatur melalui air regulator dengan pengunci tekanan. Tekanan ini dipilih berdasarkan kajian literatur dan pengujian pendahuluan sebagai titik optimal antara efisiensi pembentukan gelembung dan stabilitas proses. Temperatur lingkungan pengujian dikontrol pada  $28 \pm 2^\circ\text{C}$  dengan kelembaban relatif  $65 \pm 5\%$ , yang dicatat menggunakan thermohyrometer digital setiap kali pengujian. Temperatur larutan *foaming agent* diukur sebelum proses dan dijaga pada  $25\text{--}30^\circ\text{C}$  untuk memastikan konsistensi viskositas.

Waktu mixing udara-larutan dijaga konstan pada 60 detik untuk setiap batch, diukur menggunakan stopwatch digital. Rasio *foaming agent* terhadap air divariasikan pada empat level: 250 ml, 500 ml, 750 ml, dan 1000 ml per 19000 ml air, sesuai Tabel 1. Volume air tetap 19000 ml untuk semua variasi, menggunakan air bersih dengan pH netral 6,5–7,5. *Foaming agent* yang digunakan adalah jenis sintesis protein-modified dengan spesifikasi pabrik yang memenuhi ASTM C869[15], dengan masa simpan dan kondisi penyimpanan sesuai rekomendasi produsen.

- Menyiapkan alat alat seperti mesin kompresor dan mesin *foam agent*
- Menyiapkan air dan *foam agent*

- Masukan terlebih dahulu air
- Lalu masukan foam
- Air dan *foam agent* 1420 dimasukan melalui corong. masukan sesuai yang dibutuhkan
- Lalu pasang selang kompresor ke mesin *foam agent*

- Air dan *foam* akan bercampur dengan menggunakan tekanan dari kompresor
- Buka *safety valve* yang mengarah pada pipa *spray gun*

- Busa akan keluar dari *spray gun*
- Busa siap akan digunakan untuk bahan bata ringan

Gambar 2. Rancangan sistem kerja mesin pembuat busa

Hal utama yang dilakukan adalah melakukan design untuk mesin pembusa seperti beberapa komponen yaitu bagian tabung dan pipa *foam*.



Gambar 3. Tabung mesin pembusa



Gambar 4. Sistem kerja mesin pembusa

Sistem kerja mesin pembusa seperti gambar 3 dan 4. saat tabung mendapatkan tekanan, maka air dan *foaming agent* tercampur dan membentuk busa. Lalu busa di teruskan melalui pipa foam pada gambar 4. pipa foam dibuat berongga pada bagian dalam pipa foam berisi ruang yang lebih berongga untuk meningkatkan kepadatan busa yang dihasilkan. Ketika udara terkompresi dan bibit pembusa masuk keduanya bercampur dan melewati ruang berpori yang terisi oleh serabut logam. Serabut logam inilah yang memberikan ruang lebih kecil agar busa yang dihasilkan lebih padat. Analisis dilakukan untuk mengetahui sejauh mana peningkatan jumlah *foaming agent* dapat meningkatkan kepadatan dan kerapatan *foam*. Hasil menunjukkan bahwa perbandingan air dan *foaming agent* sangat berpengaruh terhadap kepadatan *foam*. Semakin besar volume *foaming agent* yang ditambahkan terhadap jumlah air yang tetap, maka semakin tinggi kepadatan buih yang terbentuk, ditunjukkan dengan ukuran buih yang lebih kecil dan jumlah buih yang lebih banyak dalam satuan volume.



Gambar 5. pipa foam

Desain mesin kemudian direalisasikan dalam bentuk fisik melalui proses pembuatan dan fabrikasi komponen-komponen utama sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Setiap komponen mesin dibuat dengan menggabungkan setiap bagian untuk memastikan saling terhubung dengan sempurna.

Pengujian dilaksanakan mengacu pada standar ASTM C869-06 "*Standard Specification for Foaming agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete*" dengan modifikasi untuk skala peralatan yang digunakan. Prosedur dimulai dengan kalibrasi sistem: tabung dibersihkan, dikeringkan, dan diuji kebocoran menggunakan tekanan 10% di atas tekanan kerja maksimum selama 10 menit. Larutan *foaming agent* dan air dicampur dalam tabung, kemudian ditutup rapat dan diisi tekanan udara hingga mencapai setpoint 50 psi.

Pengujian stabilitas foam (foam stability test) dilakukan dengan mengumpulkan busa dalam wadah berukuran 10 liter dan mengamati waktu kolaps atau separasi cairan selama 60 menit. Pengujian densitas foam (foam density test) dilakukan dengan mengisi busa ke dalam wadah silinder berukuran 1 liter (1000 ml) hingga penuh tanpa padatan, menimbang massanya menggunakan timbangan digital dengan resolusi 0,1 gram, dan menghitung densitas menggunakan rumus  $\rho = m/V$ . Pengukuran dilakukan tiga kali untuk setiap variasi dan diambil rata-rata.

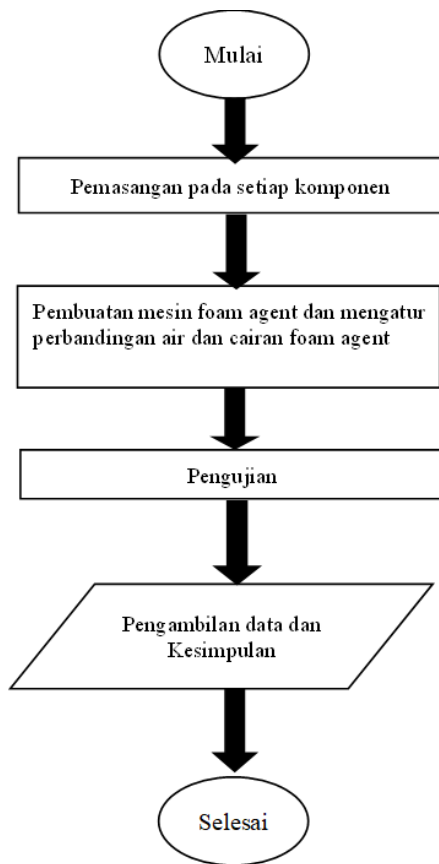
Pengujian expansion ratio dilakukan dengan mencatat volume awal larutan ( $V_{initial} = V_{water} + V_{foaming\_agent}$ ) dan volume busa yang dihasilkan ( $V_{foam}$ ), kemudian menghitung  $E_r = V_{foam}/V_{initial}$ . Volume busa diukur dengan mengumpulkan seluruh output selama waktu tertentu dalam wadah berukuran 20 liter yang memiliki skala volume. Debit aliran ( $Q$ ) dihitung dengan  $Q = V_{foam}/t$ , dimana  $t$  adalah waktu pengumpulan yang dicatat menggunakan stopwatch digital dengan akurasi 0,01 detik. Adapun rancangan perbandingan air dan foam seperti tabel 1. variasi komposisi air dan foam bertujuan untuk mengamati bagaimana rasio ini memengaruhi ukuran, distribusi, dan kerapatan gelembung *foam* (buih) yang dihasilkan. Kualitas *foam* diamati secara visual dan mikroskopis dengan menghitung jumlah buih, ukuran rata-rata, serta jarak antar buih pada skala tertentu.

Tabel 1. Rancangan perbandingan air dan foam

stabilitas yang memadai (tidak kolaps dalam 30 menit). Validasi hasil dilakukan dengan pengulangan pengujian pada hari berbeda

No	Air (ml)	Foam (ml)
1	20000	250
2	20000	500
3	20000	750
4	20000	1000

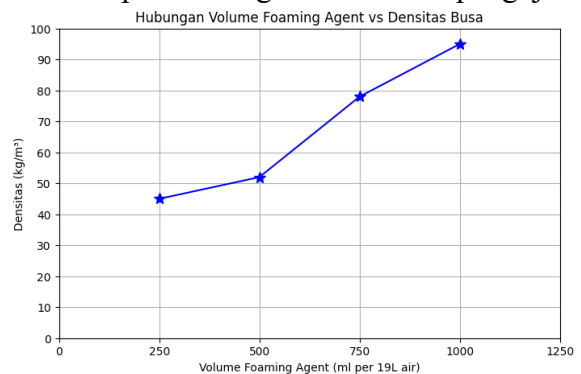
untuk memastikan reproduisibilitas data.



Gambar 6. Alur Pengujian

### Hasil dan Pembahasan

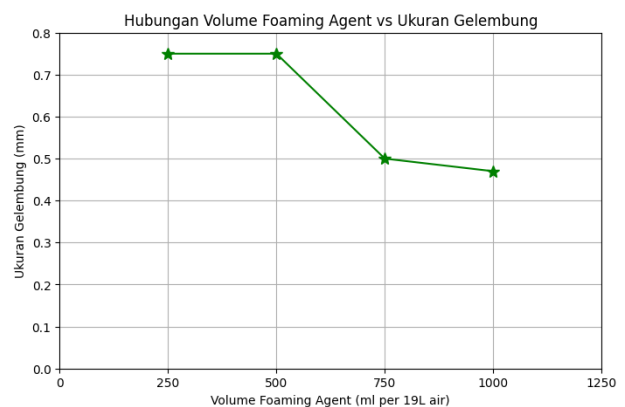
Pengujian terhadap empat variasi rasio *foaming agent* menghasilkan data yang menunjukkan tren jelas antara konsentrasi surfaktan dan karakteristik busa. Berikut adalah representasi grafik dari data pengujian



Gambar 7. Hubungan Volume Foam Agent dan Densitas Busa

Proses kerja mesin *foam agent* dalam gambar 6 dimulai dengan pencampuran air dan cairan *foaming agent* dalam takaran tertentu yang dimasukkan ke dalam tabung tekanan. Udara dari kompresor disalurkan dan dikendalikan melalui air regulator dan *safety valve* sehingga mampu mencampur air dan *foaming agent* menjadi busa. Busa ini kemudian dialirkan melalui *spray gun* dan ditampung untuk digunakan dalam campuran material konstruksi ringan.

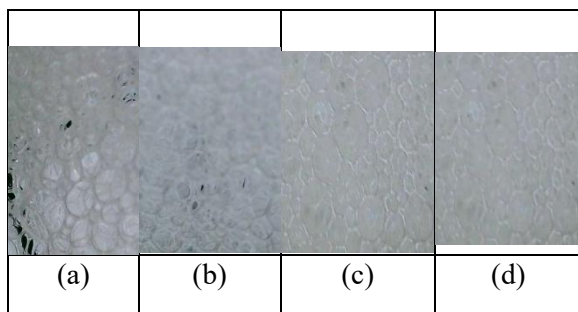
Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif dan komparatif. Parameter densitas, expansion ratio, debit aliran, ukuran gelembung, dan jarak antar gelembung untuk setiap variasi rasio dibandingkan untuk mengidentifikasi tren dan menentukan kondisi optimal. Kriteria optimal ditetapkan berdasarkan kombinasi densitas maksimum, ukuran gelembung minimum dan seragam, jarak antar gelembung minimum, serta



Gambar 8. Hubungan Volume *Foaming agent* dengan Ukuran Gelembung

Data pada gambar 7 dan gambar 8 menunjukkan densitas busa meningkat seiring penambahan *foaming agent*, dari 45 kg/m<sup>3</sup> pada rasio 250 ml menjadi 95 kg/m<sup>3</sup> pada rasio 1000 ml. Peningkatan ini berkorelasi dengan penurunan ukuran gelembung dari 0,75 mm menjadi 0,47 mm. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme tegangan permukaan dan nukleasi gelembung.

Peningkatan konsentrasi surfaktan menurunkan tegangan permukaan  $\gamma$  sesuai persamaan Szyszkowski, yang pada gilirannya menurunkan energi aktivasi untuk pembentukan gelembung baru. Dengan energi yang lebih rendah, jumlah situs nukleasi meningkat, menghasilkan lebih banyak gelembung dengan ukuran lebih kecil pada volume udara yang sama. Gelembung yang lebih kecil memiliki rasio volume permukaan yang lebih tinggi, memungkinkan lebih banyak udara terperangkap dalam volume cairan yang sama, sehingga densitas busa meningkat.



Gambar 9. Hasil Uji dengan perbandingan air : *foam agent* (a) 19:0.25 l, (b) 19 : 0.5 l, (c) 19 : 0.75 l, dan (d) 19 : 1 l.

Setelah dilakukan perancangan mesin pembusa da mengatur variasi komposisi perbandingannya. Dilakukan pengujian untuk melihat kepadatan busa dengan kamera mikroskop digital kemudian di amati dan menghitung jumlah bulir pada kolom berukuran 1mm x 1mm seperti gambar 9. mm dan jumlah buih mencapai 120 per 3 mm<sup>2</sup>. Kondisi ini menunjukkan bahwa kepadatan busa berada pada tingkat optimal untuk produksi bata ringan, karena buih yang lebih kecil dan rapat dapat memberikan daya ikat yang baik serta Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan volume *foaming agent* berbanding lurus

dengan penurunan ukuran buih dan peningkatan jumlah buih per satuan area, hingga mencapai titik optimum. Misalnya, pada rasio 1000 ml *foam* terhadap 19.000 ml air, ukuran buih mengecil menjadi 0,47 mm dengan jarak antar buih 0,04 mm dan jumlah buih mencapai 120 per 3 mm<sup>2</sup>. Kondisi ini Tabel 2 menunjukkan bahwa kepadatan busa berada pada tingkat optimal untuk produksi bata ringan, karena buih yang lebih kecil dan rapat dapat memberikan daya ikat yang baik serta mengisi rongga campuran secara merata, sehingga menghasilkan struktur yang lebih solid.

Sebagai contoh gambar 3, pada perbandingan 19 : 1 l, dihasilkan buih dengan jari-jari rata-rata 0,47 mm dan jarak antar buih hanya 0,04 mm, serta jumlah buih mencapai 120 unit dalam kotak 3 mm. Busa dengan kepadatan tinggi ini sangat ideal untuk aplikasi CLC karena mampu membentuk rongga udara yang stabil dalam campuran beton, sehingga menghasilkan beton ringan dengan kekuatan tekan yang memadai dan bobot yang rendah. Debit aliran *foam* juga dihitung menggunakan rumus debit = volume/waktu, di mana volume yang dikeluarkan sebesar 27 liter dalam waktu 32 detik, menghasilkan debit sebesar 0,8 liter/detik.

Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya menghasilkan desain alat *foam* generator yang efektif dan efisien, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami hubungan antara rasio air dan *foaming agent* terhadap kepadatan busa, yang secara langsung mempengaruhi kualitas beton ringan. Temuan ini sangat penting sebagai acuan untuk produksi material konstruksi skala kecil hingga industri, dengan mengutamakan efisiensi material dan mutu hasil produk.

Tabel 2. Hasil Pengujian dengan variasi perbandingan air dan *foam*

No	Air (ml)	Foam (ml)	Ukuran Buih (mm)	Jarak Antar Buih (mm)	Jumlah Buih /3mm <sup>2</sup>
1	19.000	250	0.75	0.26	99

No	Air (ml)	Foam (ml)	Ukuran Buih (mm)	Jarak Antar Buih (mm)	Jumlah Buih /3mm <sup>2</sup>
2	19.000	500	0.75	0.24	155
3	19.000	750	0.50	0.20	156

No	Air (ml)	Foam (ml)	Ukuran Buih (mm)	Jarak Antar Buih (mm)	Jumlah Buih /3mm <sup>2</sup>
4	19.000	1000	0.47	0.04	120

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan volume *foaming agent* berbanding lurus dengan penurunan ukuran buih dan peningkatan jumlah buih per satuan area, hingga mencapai titik optimum. Misalnya, pada rasio 1000 ml *foam* terhadap 19.000 ml air, ukuran buih mengecil menjadi 0,47 mm dengan jarak antar buih 0,04 mm. Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan temuan [16] yang melaporkan densitas busa optimal berkisar 80–100 kg/m<sup>3</sup> untuk aplikasi CLC struktural. Rasio optimal 1000 ml per 19L air (setara dengan konsentrasi 5% v/v) berada dalam rentang rekomendasi ASTM C869 (4–6% untuk *foaming agent* sintesis protein-modified).

Penelitian mereka menunjukkan plateau performa pada konsentrasi 3–4%, sementara penelitian ini menunjukkan peningkatan monoton hingga 5%. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh variasi tekanan operasional; penelitian ini menggunakan 3,4 bar yang lebih tinggi dari 2,0 bar pada penelitian mereka, memungkinkan pemanfaatan konsentrasi lebih tinggi tanpa penurunan expansion ratio yang drastis. Debit aliran 0,84 L/s yang diperoleh lebih tinggi dari 0,5 L/s pada foam generator sederhana sejenis mengindikasikan efisiensi desain foam pipe dengan media penyaring. Expansion ratio 16,7 pada rasio optimal masih dalam rentang efisien (15–25) menurut ASTM C869, memastikan keseimbangan antara yield dan stabilitas.

Analisis bilangan Weber untuk sistem ini menghasilkan nilai  $We \approx 2500$  pada tekanan operasional 50 psi dengan nozzle 2,0 mm. Nilai ini jauh di atas kritikal  $We > 100$  untuk breakup mode jet, menjelaskan efisiensi pembentukan gelembung awal. Tahap kedua melalui foam pipe dengan shear rate  $\dot{\gamma} \approx 500 \text{ s}^{-1}$  memecah gelembung besar menjadi ukuran final sesuai prediksi  $d_{\text{final}} \approx 0,5$

mm, yang sesuai dengan hasil pengukuran 0,47–0,50 mm pada rasio tinggi.

Stabilitas busa diuji dengan metode kolaps time. Busa dengan rasio 250 ml mengalami separasi fase dalam 15 menit, ditandai dengan munculnya lapisan cairan di bagian bawah. Busa dengan rasio 1000 ml mempertahankan struktur selama lebih dari 60 menit tanpa separasi signifikan. Peningkatan stabilitas ini berkorelasi dengan peningkatan viskoelastisitas film cair akibat konsentrasi surfaktan yang lebih tinggi, yang menghambat proses drainage melalui Plateau border.

## Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji foam generator dengan sistem kontrol tekanan yang stabil, serta menentukan rasio optimal *foaming agent* terhadap air untuk produksi busa berkualitas tinggi. Berdasarkan hasil pengujian terhadap empat variasi rasio, diperoleh kesimpulan bahwa rasio optimal *foaming agent* terhadap air adalah 1000 ml per 19000 ml atau setara dengan konsentrasi 5% volume. Pada rasio ini, busa yang dihasilkan memiliki densitas 95 kg/m<sup>3</sup>, ukuran gelembung rata-rata 0,47 mm, dan jarak antar gelembung 0,04 mm yang merupakan kondisi optimal untuk aplikasi Cellular Lightweight Concrete. Peningkatan konsentrasi *foaming agent* dari 250 ml menjadi 1000 ml menunjukkan tren peningkatan densitas busa dari 45 kg/m<sup>3</sup> menjadi 95 kg/m<sup>3</sup> atau kenaikan sebesar 111%, yang berkorelasi dengan penurunan ukuran gelembung sebesar 37% dan peningkatan stabilitas dari 15 menit menjadi lebih dari 60 menit tanpa separasi fase. Fenomena penurunan jumlah gelembung pada rasio 1000 ml dari 156 menjadi 120 per 3 mm<sup>2</sup> dapat dijelaskan melalui mekanisme

crowding effect dan pendekatan batas packing density teoritis pada struktur busa yang sangat padat.

Desain foam generator dengan tekanan operasional konstan 50 psi, nozzle injeksi 2,0 mm, dan foam pipe berisi serabut stainless steel wool dengan densitas packing 60% terbukti mampu menghasilkan busa berkualitas konsisten dengan debit aliran 0,84 liter per detik dan expansion ratio 16,7, yang memenuhi kriteria standar ASTM C869 untuk produksi CLC skala laboratorium hingga pilot. Hasil penelitian ini telah divalidasi dengan menunjukkan kesesuaian dengan temuan [16] mengenai rentang densitas optimal untuk CLC struktural, serta berada dalam rekomendasi konsentrasi *foaming agent* menurut ASTM C869.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu dipertimbangkan, yaitu pengujian dilakukan pada kondisi suhu terkontrol  $28\pm 2^{\circ}\text{C}$  sehingga variasi suhu ekstrem belum dievaluasi, karakterisasi difokuskan pada sifat busa tanpa meliputi pengujian sifat mekanis CLC akhir yang dihasilkan, jenis *foaming agent* terbatas pada sintesis protein-modified sehingga perlu penelitian lanjutan untuk jenis lain seperti biosurfaktan, dan stabilitas busa diuji hingga 60 menit sehingga performa jangka panjang belum diketahui. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi produksi CLC yang lebih terjangkau dan konsisten, dengan potensi aplikasi untuk industri konstruksi skala kecil hingga menengah.

## Referensi

- [1] R. Hadi and S. Abed, *Effect of fibers types on strength of lightweight foamed concrete*, vol. 1076. 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1076/1/012099.
- [2] S. P. S, V. S. G. Rajagopal, and N. A. A, "Investigation of concrete durability enhancement using supplementary cementitious materials," *MethodsX*, vol. 15, p. 103527, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103527>.
- [3] S. N. Jonnala, D. Gogoi, S. Devi, M. Kumar, and C. Kumar, "A comprehensive study of building materials and bricks for residential construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 425, p. 135931, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135931>.
- [4] D. Deni and A. Saepudin, "Analisa Volume Air Hasil Pemampatan Udara Kompresor Torak Puma Pk-50-160a Terhadap Waktu Loading," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 3, no. 1, pp. 11–15, Mar. 2020, doi: 10.30596/rmme.v3i1.4523.
- [5] A. S. Abdulazeez and A. A. Sani, "Properties of foam concrete: a review," *Discover Concrete and Cement*, vol. 2, no. 1, p. 4, Feb. 2026, doi: 10.1007/s44416-026-00042-y.
- [6] D. Zhao, K. Li, Y. Li, X. Chen, J. Fan, and J. Zhu, "Self-healing behaviour of fly ash/slag-based engineered geopolymer composites under external alkaline environments," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03361, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03361>.
- [7] A. M. Mohamed, B. A. Tayeh, S. S. Majeed, Y. I. A. Aisheh, and M. N. A. Salih, "Ultra-light foamed concrete mechanical properties and thermal insulation perspective: A comprehensive review," *Journal of*

- CO2 Utilization*, vol. 83, p. 102827, 2024, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102827>.
- [8] R. Rodhia, S. K. Sahdeo, and B. Kumar, "Optimizing *foaming agent* concentration and recycled fine aggregate content to enhance mechanical and durable properties of foam concrete mixes," *Journal of Building Engineering*, vol. 97, p. 110801, 2024, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110801>.
- [9] C. wei, X. Liu, Z. Zhang, and P. Wu, "Utilization of solid wastes for aerated concrete preparation: Mechanical properties and microstructural analysis," *Journal of Building Engineering*, vol. 82, p. 108235, 2024, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.108235>.
- [10] R. Hamada and A. Hameed, "Influence of *Foaming agent* Type on The Behavior of Foamed Concrete," *Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 39, pp. 80–88, Mar. 2021, doi:  
[10.30684/etj.v39i1B.1805](https://doi.org/10.30684/etj.v39i1B.1805).
- [11] R. Galoul, K. Boumchedda, and F. Mebtouche, "Optimizing foam concrete performance using mixed foaming method: impact of mixing speed, mixing duration, and foam dosage," *South Florida Journal of Development*, vol. 5, no. 12, p. e4847, Dec. 2024, doi:  
[10.46932/sfjdv5n12-065](https://doi.org/10.46932/sfjdv5n12-065).
- [12] R. Karimah, "PENGARUH PENGGUNAAN FOAM AGENT TERHADAP KUAT TEKAN DAN KOEFISIEN PERMEABILITAS PADA BETON," *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 15, p. 50, Mar. 2017, doi:  
[10.22219/jmts.v15i1.4492](https://doi.org/10.22219/jmts.v15i1.4492).
- [13] M. Sultan Firdaus, F. Noor Abdi, and T. P. Sharly Arifin, "PENGARUH PENAMBAHAN FOAM AGENT TERHADAP KUAT TEKAN BETON RINGAN STRUKTURAL AGREGAT BATU APUNG," Nov. 2022.
- [14] D. Arita, A. Kurniawandy, and H. Taufik, "Tinjauan Kuat Tekan Bata Ringan Menggunakan Bahan Tambah *Foaming agent*," *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [15] ASTM C869, "Standard Specification for *Foaming agents* Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete 1," 2006. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [16] D. Falliano, L. Restuccia, and E. Gugliandolo, "A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, p. 121101, 2021, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121101>.