

PENGARUH PEMBERIAN SILICA FUME TERHADAP KEKUATAN TEKAN GROUT MORTAR DENGAN PENDEKATAN PRACTICAL MIXED DESIGN

*Aulia Rahman¹, Anisah Nur Fajarwati², Indah Ria Riskiyah³, Mochamad Ardie Noegroho⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang

⁴PT Sika Indonesia - Jl. Raya Cibinong - Bekasi, Km. 20, Limusnunggal - Cileungsi, Bogor - Jawa Barat

^{*)} Email: aulia.rahman@polinema.ac.id

ABSTRACT

Ongoing research aims to reduce or replace traditional cement concrete with more environmentally friendly binder materials, with silica fume being a promising candidate due to its high silica content that forms molecular-level bonds in concrete. The initial phase of the study involves using grout mortar, a simpler substance with an identical composition to concrete. A practical mix design approach is employed to evaluate mortar strength at 7 and 28 days, incorporating varying percentages of silica fume (5%, 10%, 15%, and 0% as control). The theoretical compressive strengths are calculated as 33.43 MPa at 7 days and 42.79 MPa at 28 days, closely aligning with the actual test results of 30.2 MPa at 7 days and 47.7 MPa at 28 days. Notably, all silica fume variations consistently exhibit reduced strength at both ages. The closest match to the control specimen is a 5% variation at 7 days, achieving a strength of 29.7 MPa. As anticipated, the lowest strength at the conclusion of the test is observed with the 15% proportion, yielding only 39.2 MPa.

Keyword: grout mortar, silica fume, practical mix design, compressive strength

ABSTRAK

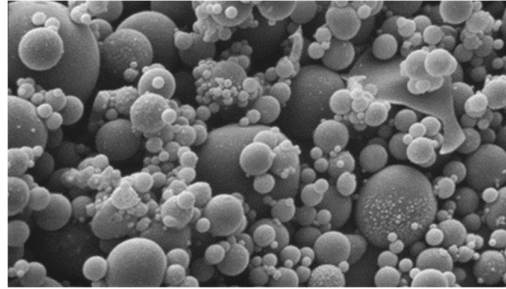
Penelitian yang terus berlangsung bertujuan untuk mengurangi atau menggantikan semen beton konvensional dengan bahan binder beton yang lebih ramah lingkungan, dan silica fume menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan karena kandungan silika yang tinggi membentuk ikatan molekuler pada mortar. Seperti yang disarankan Hatungimana *et al*, bahwa silica fume bisa mengurangi jumlah semen sampai dengan 15%. Sebagai langkah awal dalam penelitian, digunakan grout mortar sebagai substansi yang lebih sederhana namun tetap memiliki komposisi identik dengan beton. Pendekatan desain campuran praktis juga diterapkan untuk menilai kekuatan mortar pada umur 7 dan 28 hari, dengan variasi persentase silica fume sebesar 5%, 10%, 15%, dan 0% sebagai kontrol. Pengujian dilakukan pada sampel mortar berukuran 5 x 5 x 5 cm dengan uji tekan sesuai dengan standar SNI 03-6825-2002. Hasil kuat tekan teoritis menunjukkan angka 33,43 MPa pada umur 7 hari dan 42,79 MPa pada umur 28 hari, mendekati hasil uji aktual yaitu 30,2 MPa pada 7 hari dan 47,7 MPa pada 28 hari. Seluruh variasi silica fume menunjukkan penurunan kekuatan yang konsisten pada kedua umur tersebut. Variasi 5% pada umur 7 hari menjadi yang paling mendekati spesimen kontrol dengan nilai 29,7 MPa. Seperti yang diantisipasi, kekuatan terendah pada akhir pengujian ditemukan pada proporsi 15%, menghasilkan hanya 39,2 MPa.

Kata kunci: grout mortar, silica fume, mix desain praktis, kuat tekan

1. PENDAHULUAN

Aspek lingkungan sering menjadi fokus perhatian seiring dengan kemajuan teknologi, termasuk dalam bidang material seperti beton dan produk turunannya. Salah satu isu yang terus diperbincangkan adalah penggunaan bahan pengganti semen, yang diduga menjadi salah satu penyebab emisi gas rumah kaca. Diskusi ini masih relevan seiring dengan terusnya produksi bahan perekat (binder) beton. Dalam upaya menggantikan semen, pertimbangan perlu diberikan terhadap material hasil sisa dari suatu proses atau substansi lain dengan komposisi yang serupa. Dalam konteks ini, penelitian ini memilih silica fume sebagai pengganti semen, yang merupakan produk sampingan dari produksi paduan silicon untuk mengurangi penggunaan semen dalam campuran berbasis cementitious.

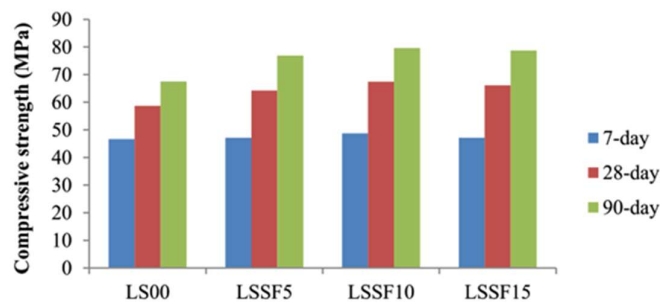
Silica fume, yang dalam ukuran mikroskopis ditunjukkan pada **Gambar 1**, dihasilkan sebagai produk sampingan dalam produksi paduan silicon melalui proses reduksi batuan kwarsa dan batu bara. Bahan tersebut (batuan kwarsa dan batu bara) dicampur di dalam tungku dengan suhu tinggi menggunakan energi panas listrik secara bersamaan.



Gambar 1. Bentuk mikroskopis butiran silica fume [1]

Faktor yang berpengaruh terhadap variasi kandungan silica fume antara lain adalah jenis batu bara dengan kandungan unsur besi, kromium, dan mangan, serta kualitas panas tungku yang digunakan. Reaksi kimia kompleks terjadi setelah suhu mencapai 2000°C dan mengalami reaksi oksidasi dan kondensasi SiO₂. Reaksi-reaksi tersebut menghasilkan karakter silica fume berbentuk butiran dengan tingkat kehalusan tertentu. [7] Diameter silica fume yang dihasilkan berukuran sekitar 30 hingga 300 nm, rata-rata yang dihasilkan tidak lebih dari 100 nm. [5] Hasil proses pembetonan menunjukkan bahwa kalsium hidroksida mampu membuat silica fume reaktif sehingga membentuk senyawa yang stabil, yaitu kalsium hidro silikat. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kepadatan ikatan C-S-H tidak terpengaruh dengan adanya tambahan silica fume, namun berpengaruh pada reaksi kimia tahap pembentukan ikatan C-S-H. [4] partikel silica fume yang halus berpengaruh pada proses hidrasi (kecepatan), yaitu pada tujuh hari pertama proses pengerasan. [10]

Penelitian tentang hubungan antara kandungan silica fume dan kekuatan mortar sudah banyak dilakukan, seperti yang tersaji pada **Gambar 2**, yaitu perbandingan kuat tekan campuran mortar dan silica fume dan umur pengujian.



Gambar 2. Hasil uji kuat pengaruh kadar silica fume terhadap kuat tekan beberapa sampel [2]

Penelitian tentang pengaruh penambahan kadar silica fume ini menggunakan pendekatan dengan cara mengubah proporsi silica fume, yaitu dengan berat semen dalam suatu campuran, dimulai dari 0% (LS00), 5% (LS05), 10% (LS10), hingga 15% (LS15). Dilakukan pengujian kuat tekan untuk setiap sampel pada umur, tujuh, 28, dan 90 hari. Pengujian tersebut menunjukkan hasil perbedaan kekuatan tekan yang tidak signifikan, yaitu proporsi semen dapat dikurangi hingga 15%. [2]

Keputusan untuk menggunakan silica fume didasarkan pada penggunaannya yang sudah umum dalam beberapa pekerjaan konstruksi dan telah resmi diproduksi dan diberi identitas oleh beberapa penyedia jasa kebutuhan konstruksi tingkat nasional. Contohnya, bahan pengganti semen yang lain, rekomendasi persentase penambahan kadar silica fume sebesar 10%, sehingga variasi kadar yang diuji sebesar 5% dan 15% untuk perbandingan yang lain.

Dalam pengujian ini, mortar dipilih sebagai campuran yang lebih sederhana dari beton. Untuk memperkirakan kekuatan tekan mortar yang digunakan menggunakan metode pendekatan desain campuran. Hal ini karena mempertimbangkan beberapa data berat isi dan berat jenis dengan perhitungan yang sederhana. Pada penelitian sebelumnya, telah disarankan bahwa metode desain campuran tertentu dapat digunakan untuk pengujian kuat tekan dengan penambahan silica fume. Tujuan adanya rasio pasir dan semen (s/c) dalam persamaan yang pertama, yakni untuk umur tujuh hari dan persamaan kedua untuk umur 28 hari dapat digunakan untuk menghitung perkiraan kekuatan tekan ($f'm$). [8]

$$f'm = -9.09 \left(\frac{s}{c}\right)^2 + 9.461 \left(\frac{s}{c}\right) + 31.03 \quad (1)$$

$$f'm = -8.932 \left(\frac{s}{c}\right)^2 + 10.27 \left(\frac{s}{c}\right) + 39.84 \quad (2)$$

Pertimbangan lain dalam pelaksanaan penelitian ini adalah daya tampung laboratorium material, yaitu tempat dilakukan pengujian. Material mortar dinilai lebih gampang diproduksi dan dapat dijangkau dari pada material beton. Terkait mutu dan campurannya, dibuktikan dari penelitian yang telah dilakukan. Sedangkan, tujuan penelitian ini sendiri adalah mencari kadar silica fume paling optimal yang memberikan kuat tekan terbaik.

2. METODE PENELITIAN

Di dalam penelitian tentang ‘Pengaruh Kadar Pemberian Silica Fume terhadap Kekuatan Tekan Grout Mortar dengan Pendekatan Practical Mixed Design” menggunakan alat dan bahan yang telah tersedia di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Politeknik Negeri Malang. Seperti yang ditampilkan pada **Gambar 3a**, alat dan bahan yang digunakan di antaranya adalah: air, silica fume, semen Portland, agregat halus, satu set cetakan mortar logam ukuran 5x5x5 cm, satu set bejana, satu set mesin pengaduk, satu set neraca, satu set ayakan, dan *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian yang dilakukan, yaitu uji kuat tekan mortar semen Portland berdasar pada SNI 03-6825-2002, dengan menggunakan UTM seperti yang terlihat pada **Gambar 3b**.



Gambar 3. a) Cetakan mortar logam, b) Pengujian kuat tekan mortar dengan mesin UTM

Pada penelitian ini, rasio konstan pasir dan semen ditentukan sebesar 0,6, dengan volume semen lebih banyak daripada pasir. Rasio kandungan air dengan semen ditentukan sebesar 0,5. Rasio ini berlaku untuk semua variasi sampel uji. Penambahan kadar silica fume (SF) dilakukan secara berurutan dimulai dari 5%, 10%, dan yang terakhir sebesar 15% dalam takaran berat. Waktu pengujian sampel adalah umur tujuh hari dan 14 hari. Sedangkan, detail komposisi setiap sampel disajikan pada **Tabel 1**, yang ditakar dalam satuan berat (gram), dengan jumlah total 5 sampel per perlakuan. Setelah sampel dicetak, dilakukan *curing* dengan merendamnya dalam air sampai hari pengujian.

Dilakukan juga penelitian pendahuluan untuk menguji sifat fisik material penyusun mortar tersebut. Didapatkan nilai sebagai berikut, berat isi semen 1124,06 kg/m³, berat isi pasir 1658,01 kg/m³, dan berat isi air 1000 kg/m³. Sedangkan untuk nilai berat jenis semen, pasir, dan air berturut-turut adalah 2,99, 2,51, dan 1.

Tabel 1. Konfigurasi sampel uji

| Sampel | Umur (hari) | Semen (gr) | Pasir (gr) | Air (gr) | SF (gr) |
|--------|-------------|------------|------------|----------|---------|
| 0% | 7 | 693.50 | 613.75 | 348.78 | 0.00 |
| | 28 | 693.50 | 613.75 | 348.78 | 0.00 |
| 5% | 7 | 658.83 | 613.75 | 348.78 | 34.68 |
| | 28 | 658.83 | 613.75 | 348.78 | 34.68 |
| 10% | 7 | 624.15 | 613.75 | 348.78 | 69.35 |
| | 28 | 624.15 | 613.75 | 348.78 | 69.35 |
| 15% | 7 | 589.48 | 613.75 | 348.78 | 104.03 |
| | 28 | 589.48 | 613.75 | 348.78 | 104.03 |

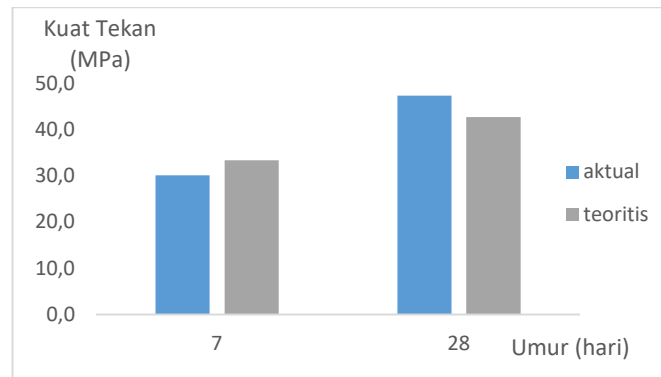
Silica fume yang digunakan mengandung silika oksida (SiO₂) mencapai 92,5 %, air (H₂O) sebesar 0,6 %, *lost of ignition* (LOI) sebesar 2,73 %, dan berat jenis sebesar 628 kg/m³. Adapun jika diamati secara fisik silica fume berwarna lebih gelap daripada semen, seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Perbandingan kondisi fisik semen Portland (kiri) dan silica fume (kanan)

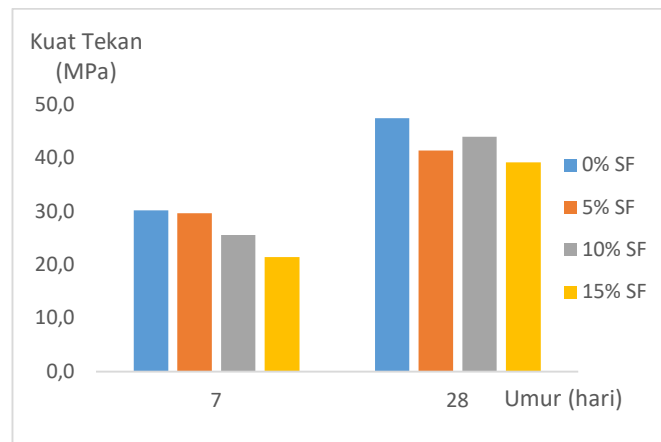
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan nilai perbandingan antara pasir dan semen (s/c) adalah 0,6. Perbandingan air dan semen (w/c) adalah 0,5. Seperti yang tersaji pada Gambar 5, hasil persamaan I dan II diperoleh kuat tekan (f'_m) rencana sebesar 33,43 MPa pada tujuh hari dan sebesar 42,79 MPa pada 28 hari. Hasil ini adalah nilai teoritis yang bisa divalidasi dengan uji langsung variasi silica fume 0%.



Gambar 5. Grafik perbedaan kuat tekan teoritis dan aktual

Pengujian aktual diperoleh rata-rata nilai kuat tekan sebesar 30,2 MPa pada umur tujuh hari dan sebesar 47,4 MPa pada umur 28 hari. Perbedaan kedua nilai ini hanya sebesar 3,23 MPa lebih besar pada umur tujuh hari dan sebesar 4,61 MPa lebih kecil pada umur 28 hari. Perbedaan nilai yang tidak terlalu signifikan ini menunjukkan bahwa hasil pengujian grout mortar mendekati aktual dengan konsep perhitungan practical mix design. Sedangkan pada Gambar 6, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemberian silica fume menunjukkan hasil tren menurun, yaitu pada penambahan 5%, 10 %, dan 15%.



Gambar 6. Grafik perkembangan kuat tekan tiap sampel

Variasi 0% SF memperoleh nilai kuat tekan tertinggi, yaitu pada umur tujuh hari dan 28 hari. Perilaku serupa juga ditunjukkan oleh variasi 10% dan 15% SF. Kedua variasi tersebut mengalami penurunan kekuatan pada pengujian hari ketujuh, yaitu kadar 10% SF sebesar 25,6 MPa dan kadar 15% SF sebesar 21,5 MPa. Perilaku yang sama juga ditunjukkan pada umur pengujian 28 hari. Hasil yang diperoleh untuk kadar 10% SF sebesar 44,0 MPa dan variasi kadar 15% SF hanya sebesar 39,3 MPa, maka sampel tersebut memiliki kekuatan terendah dari keseluruhan sampel yang diuji. Variasi 5% SF mendekati nilai kontrol pada umur 7 hari, dengan kekuatan 29,7 MPa, dan terjadi penurunan kekuatan pada umur 28 hari, yaitu sebesar 41,4 MPa. Hasil tersebut semakin menunjukkan bahwa adanya perbedaan nilai teoritis saat proporsi semen diganti silica fume dengan metode desain campuran praktis grout mortar.

Penurunan kekuatan tekan pada sampel dengan komposisi silica fume yang lebih banyak dapat mengindikasikan adanya perubahan kebutuhan air dan kelembaban campuran. [3] Daya serap air oleh semen dan silica fume berbeda, ketika proporsi semen terus dikurangi, kelembaban campuran pun mengalami perubahan, salah satu faktor penyebab penurunan kekuatan tekan. [9] Kekuatan tekan sampel dengan kadar SF 5% mendekati variabel kontrol yang sejalan dengan sifat kimia silica fume dan mampu membentuk kalsium silikat hidrat pada umur pengujian awal. [6] Dengan hasil kuat tekan pada sampel 5% SF yang mendekati variabel kontrol (0% SF), maka campuran ini dapat diimplementasikan pada sela-sela pasangan batu bata yang memerlukan penambahan mortar, karena *workability* atau kelecakan pada komposisi ini sangat memungkinkan material diinjeksikan pada bagian-bagian tersebut. Sedangkan penurunan kekuatan pada variasi sampel lainnya bisa ditingkatkan dengan pemakaian zat aditif lain bersifat kimia yang bisa mengubah rasio silica per alumina campuran.

4. KESIMPULAN

Metode desain campuran praktis memperkirakan bahwa hasil uji pemberian kadar silica fume terhadap kuat tekan grout mortar mencapai 33,43 MPa pada umur tujuh hari dan 42,79 MPa saat umur 28 hari. Hasil yang hampir mendekati uji aktual, yaitu 30,2 MPa pada 7 hari dan 47,4 MPa pada 28 hari. Nilai tersebut terus menunjukkan penurunan seiring adanya peningkatan kandungan silica fume di campuran, baik saat pengujian umur tujuh hari maupun 28 hari. 29,7 Mpa adalah nilai kuat tekan yang nyaris mendekati variasi kontrol, yaitu didapat dari sampel dengan kadar 5% SF pada umur tujuh hari. 39,2 Mpa adalah besaran hasil nilai terendah praktis yang ditemukan SF dengan kadar 15% pada umur 28 hari.

Adanya penurunan kuat tekan disebabkan oleh perbedaan daya serap air antara semen portland dan silica fume. Akibatnya, terjadi perubahan kelembaban dan berpengaruh pada penurunan kuat tekan. Namun, hasil nilai kuat tekan yang mendekati variasi SF berkadar 5% saat awal pengujian dipengaruhi oleh adanya proses kimia saat proses hidrasi pembentukan kalsium silikat hidrat. Hal ini, memerlukan analisis kimia lebih dalam sehingga dapat dipahami dengan lebih baik.

Karena pada komposisi 5% SF kekuatannya tidak berbeda jauh dengan sampel kontrol (0%), maka silica fume dapat direkomendasikan sebagai bahan alternatif untuk mengurangi kadar semen pada mortar konvensional, yang lebih ramah lingkungan dan memiliki kandungan kimia identik dengan semen Portland yaitu silica, yang bisa membentuk ikatan pada tahapan molekuler. Adapun untuk bahan pengganti semen sepenuhnya tidaklah direkomendasikan, karena hasil pengujian menunjukkan kekuatan yang terus turun seiring bertambahnya prosentase silica fume (10% SF dan 15% SF), dan angka prosentase yang disarankan untuk menghasilkan kekuatan terbaik adalah 5%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gruszczyński, M., & Lenart, M. (2020). Durability of mortars modified with the addition of amorphous aluminum silicate and silica fume. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 102526.
- [2] Hatungimana, D., Taşköprü, C., İçhedef, M., Saç, M. M., & Yazıcı, Ş. (2019). Compressive strength, water absorption, water sorptivity and surface radon exhalation rate of silica fume and fly ash based mortar. *Journal of Building Engineering*, 23, 369-376.
- [3] Johari, M. M., Brooks, J. J., Kabir, S., & Rivard, P. (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2639-2648.
- [4] Muller, A. C. A., Scrivener, K. L., Skibsted, J., Gajewicz, A. M., & McDonald, P. J. (2015). Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research*, 74, 116-125.
- [5] Neville, A. (2012). *Properties of Concrete 5th edition* (Harlow).

- [6] Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89(3), 768-774.
- [7] Ramezaniapour, A. A. (2014). Cement replacement materials. *Springer geochemistry/mineralogy*, DOI, 10, 978-3.
- [8] Satyarno, I., Solehudin, A. P., Meyarto, C., Hadiyatmoko, D., Muhammad, P., & Afnan, R. (2014). Practical method for mix design of cement-based grout. *Procedia Engineering*, 95, 356-365.
- [9] Sezer, G. İ. (2012). Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 613-618.
- [10] Tobón, J. I., Payá, J. J., Borrachero, M. V., & Restrepo, O. J. (2012). Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 36, 736-742.