

Kajian Permeabilitas, Porositas, Dan Kekuatan Beton Berpori Dengan Natrium Silikat Dan Semen Portland Komposit Sebagai Pengikat

Parea R. Rangan^{1*}, Miswar Tumpu², Mansyur³, Marthen Tangkello⁴

^{1*} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia

² Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sembilan belas November, Kolaka, Indonesia

⁴ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sintuwu Maroso, Poso, Indonesia

ABSTRAK

Dalam bidang beton, banyak penelitian dilakukan untuk meningkatkan kualitas beton, khususnya beton berpori. Beton berpori merupakan jenis beton dengan porositas tinggi yang dapat memengaruhi kekuatan dan daya tembus airnya. Salah satu cara untuk meningkatkan kualitas beton adalah dengan menambahkan bahan tambahan, salah satunya natrium silikat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan natrium silikat terhadap porositas, permeabilitas, dan kekuatan tekan beton berpori. Percobaan dilakukan menggunakan cetakan silinder berukuran 15 cm × 30 cm sesuai dengan standar ACI 522R-2010. Natrium silikat ditambahkan dengan kadar 0% (beton berpori standar), 1%, 1,5%, dan 2% dari berat semen, kemudian sampel dikeringkan selama 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan natrium silikat meningkatkan kekuatan tekan beton dibandingkan beton standar (7,26 MPa), yaitu pada 28 hari: 1% (8,39 MPa), 1,5% (9,71 MPa), dan 2% (9,62 MPa). Porositas rata-rata beton adalah 3,17% untuk beton standar, sedangkan beton dengan natrium silikat 1%, 1,5%, dan 2% masing-masing memiliki porositas 2,73%, 2,85%, dan 2,71%. Permeabilitas rata-rata beton juga menurun dibandingkan beton standar (4,830 mm/detik), dengan nilai untuk 1%, 1,5%, dan 2% natrium silikat masing-masing 4,601 mm/detik, 4,392 mm/detik, dan 4,399 mm/detik.

Keywords: Permeabilitas, Porositas, Kekuatan, Beton Berpori, Semen Portland Komposit

1. PENDAHULUAN

Perkembangan peradaban manusia sangat terkait dengan kemajuan teknologi konstruksi. Pertumbuhan infrastruktur di Indonesia erat kaitannya dengan penggunaan beton sebagai bahan bangunan utama (Rangan et al., 2023). Kemunculan teknologi konstruksi, seperti pemanfaatan beton dalam bangunan, mencerminkan kemajuan teknologi seiring dengan perkembangan peradaban manusia (Rangan et al., 2023; Irianto et al., 2023). Beton umumnya digunakan secara luas dalam konstruksi gedung, namun kini juga semakin diterapkan untuk fungsi yang lain, seperti pelapisan jalan. Sebagai alternatif dari perkerasan fleksibel atau kaku yang biasa digunakan di jalan raya, yang cenderung tidak mampu menyerap air sehingga menimbulkan genangan, digunakan perkerasan beton berpori (Parung et al., 2023).

Belakangan ini, studi tentang beton berpori atau porous concrete semakin menarik perhatian, karena material ini dianggap ramah lingkungan (Maulana et al., 2023). Beton berpori adalah beton yang memiliki tingkat porositas lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, terdiri dari semen, air, agregat kasar, dan aditif tambahan yang diperlukan (ACI Committee, 2010). Pasir dan agregat halus biasanya sedikit atau bahkan tidak digunakan dalam campuran beton berpori. Dibandingkan beton konvensional, beton berpori cenderung lebih ekonomis dan lebih ramah lingkungan (Rangan et al., 2021). Karena nilai FAS-nya lebih rendah dan penggunaan agregat halus minim, beton berpori lebih efisien secara biaya, serta dengan pori yang lebih besar, material ini dapat membantu penyerapan air hujan dan mengurangi limpasan permukaan, sehingga mendukung konservasi air (Tumpu & Mabui, 2022).

Beton berpori memiliki karakteristik porositas tinggi yang memungkinkan air dari hujan atau sumber lain meresap, mengurangi aliran permukaan dan meningkatkan muka air tanah (Rangan et al., 2021). Porositas tinggi dicapai melalui rongga yang saling terhubung. Biasanya, hanya sedikit pasta semen yang digunakan untuk melapisi permukaan agregat kasar agar keterhubungan pori tetap terjaga, dan agregat halus digunakan sangat minim atau tidak sama sekali (R.A. Rodden, 2004; N. Bouzouba & B. Fournier, 2003; L. Scrivener et al., 1999). Beton berpori biasanya diterapkan pada area parkir, lintasan pejalan kaki, dan zebra cross (Tamai et al., 2004). Salah satu standar terkait beton berpori adalah ACI 522R-2010, yang menetapkan rasio air terhadap semen antara 0,27 hingga 0,34, lebih rendah dibandingkan beton konvensional (Shu et al., 2011).

Kualitas beton dapat ditingkatkan dengan menambahkan bahan tambahan. Saat ini, salah satu bahan yang sedang diteliti adalah sodium silikat atau waterglass (Mansyur et al., 2021). Sodium silikat diproduksi melalui proses kimia dan dapat digunakan sebagai campuran semen untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan material, termasuk memberikan perlindungan terhadap panas (Pasra et al., 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa

penambahan sodium silikat dapat meningkatkan kekuatan kubus beton hingga 72–92% (Kawashima et al., 2004). Arusmalem Ginting (2015) membandingkan kekuatan tekan dan porositas beton berpori yang menggunakan agregat kasar dengan gradasi seragam dan gradasi kontinu. Dalam penelitian ini, agregat kasar digradasi secara konsisten. Rasio berat agregat terhadap semen adalah 4–5, dengan faktor air-semen (FAS) 0,27, serta penambahan SicaCim Concrete Additive sebanyak 7,5 ml per kg semen. Hasil pengujian setelah 28 hari menunjukkan kekuatan tekan maksimum 8,92 MPa untuk gradasi seragam dan 14,04 MPa untuk gradasi kontinu. Porositas maksimum untuk gradasi seragam tercatat 87,68 ltr/s/m² dan gradasi kontinu 37,86 ltr/s/m², dengan berat volume beton berpori gradasi seragam lebih rendah dibanding gradasi kontinu (Hieryco Manalip et al., 2019). Berdasarkan penelitian sebelumnya, jelas bahwa ukuran dan distribusi agregat memengaruhi permeabilitas dan kekuatan tekan beton berpori. Semakin seragam ukuran agregat, semakin tinggi nilai permeabilitas karena pori-pori lebih luas dan lebih banyak. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan sodium silikat terhadap porositas, permeabilitas, dan kekuatan tekan beton berpori.

2. MATERIAL DAN METODE

Agregat

Hasil pengujian laboratorium terhadap karakteristik agregat kasar ditampilkan pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, diketahui bahwa kadar lumpur agregat kasar (stone crusher) dari Lampan sebesar 1,83%, yang masih berada dalam rentang yang disyaratkan oleh SNI, yaitu antara 0,2% hingga 2%. Selain itu, berat jenis agregat dalam kondisi padat adalah 1,43 gr/cm³, sedangkan dalam kondisi gembur sebesar 1,26 gr/cm³, keduanya masih memenuhi kriteria SNI yang berada pada kisaran 1,2–1,9 gr/cm³. Nilai berat jenis (bulk specific gravity), berat jenis jenuh permukaan kering (SSD specific gravity), berat jenis semu (apparent specific gravity), serta daya serap air (absorption) juga sesuai dengan ketentuan dalam standar SNI. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian laboratorium terhadap agregat kasar telah memenuhi nilai-nilai yang ditetapkan oleh SNI, sehingga layak digunakan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 1. Sifat fisik agregat kasar

No	Jenis pengujian	Hasil pengujian	Spesifikasi (SNI)	Keterangan
1	Kadar lumpur	1,83%	0,2% - 2,0%	Memenuhi
2	Berat volume:			
	Kondisi padat	1,26	1,2 – 1,9	Memenuhi
	Kondisi gembur	1,43	1,2 – 1,9	Memenuhi
3	Kadar air	1,97%	0,5% - 5,0%	Memenuhi
4	Berat jenis (bulk specific gravity)	2,47	1,6 – 3,1	Memenuhi
5	Berat jenis jenuh permukaan kering (SSD)	2,52	1,6 – 3,2	Memenuhi
6	Berat jenis semu (apparent specific gravity)	2,60	1,6 – 3,3	Memenuhi
7	Daya serap air (absorption)	2,00%	0,2% - 5,0%	Memenuhi
8	Keausan dengan mesin Los Angeles	17,08%	15% - 40%	Memenuhi

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui eksperimen laboratorium. Beton berpori dibuat dari campuran semen, agregat, air, dan natrium silikat yang berfungsi sebagai bahan pengganti sebagian semen. Setelah peralatan dan bahan disiapkan, dilakukan pemeriksaan dan pengujian material, kemudian disiapkan benda uji untuk pengujian lebih lanjut. Jika hasil pemeriksaan awal belum memenuhi standar, dilakukan pemeriksaan ulang secara lebih mendalam; namun jika telah sesuai, proses dilanjutkan dengan perancangan campuran (mix design).

Dalam penelitian ini, natrium silikat ditambahkan ke dalam campuran semen dengan variasi 0%, 1%, 1,5%, dan 2% dari berat semen. Setelah benda uji berbentuk silinder berukuran 15 cm × 30 cm dicetak dan cukup mengeras untuk dilepaskan dari cetakan, benda uji direndam dalam air. Pengujian dilakukan setelah perendaman selama 3, 7, dan 28 hari terhadap total 48 sampel beton berpori. Setelah direndam, benda uji dikeringkan selama satu hari sebelum dilakukan pengujian kuat tekan. Nilai kuat tekan diperoleh melalui pengolahan data hasil uji laboratorium.

Pendekatan penelitian ini bersifat eksperimental, menggunakan berbagai benda uji dengan klasifikasi berbeda yang diuji di laboratorium melalui prosedur eksperimental. Data sekunder juga digunakan karena sebagian besar pengujian material memanfaatkan bahan dari sumber yang sama. Rancangan benda uji dan jumlah keseluruhan sampel yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Desain pengujian dan jumlah benda uji

No.	Penambahan natrium silikat	Umur beton (hari)	Jumlah sampel
1.	0%	3	3
		7	3
		14	3
		28	3
Total			12
2.	1,0%	3	3
		7	3
		14	3
		28	3
Total			12
3.	1,5%	3	3
		7	3
		14	3
		28	3
Total			12
4.	2,0%	3	3
		7	3
		14	3
		28	3
Total			12
Jumlah seluruh sampel			48 sampel

Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan beton merupakan besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur ketika diberikan gaya tekan oleh mesin pengujian. Parameter ini menjadi indikator paling penting dalam menilai mutu beton dibandingkan dengan sifat-sifat lainnya. Untuk menentukan kuat tekan beton, diperlukan komposisi bahan penyusun yang tepat, meliputi semen, agregat halus, agregat kasar, serta air. Semakin kecil rasio air terhadap semen, umumnya semakin tinggi pula kuat tekan beton yang dihasilkan. Jumlah air yang digunakan harus sesuai dengan kebutuhan reaksi kimia proses hidrasi semen, karena kelebihan air memang dapat meningkatkan kemudahan pengerjaan (workability), namun justru menurunkan kekuatan beton. Hubungan antara gaya tekan dan luas penampang benda uji yang menghasilkan kuat tekan dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 (SNI 1974:2011).

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

di mana:

$f'c$ = kuat tekan beton (MPa)

P = gaya tekan aksial maksimum yang diterima benda uji (N)

A = luas penampang lintang benda uji (mm²)



Gambar 1. Alat pengujian kuat tekan

Pengujian Porositas

Porositas merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kekuatan beton, karena menggambarkan persentase rongga atau jumlah pori yang terdapat di dalam struktur beton. Beton membentuk pori-pori yang dikenal sebagai kapiler beton, yaitu rongga kecil yang saling berdekatan dan umumnya berisi air atau udara. Kehadiran rongga ini sering disebabkan oleh terbentuknya gelembung udara selama atau setelah proses pencampuran dan pencetakan beton. Penambahan air yang melebihi kebutuhan reaksi kimia hidrasi semen memang dapat mempermudah pengerjaan campuran, tetapi juga berpotensi meningkatkan jumlah pori dalam beton sehingga menurunkan kekuatannya. Nilai akhir porositas beton berpori setelah dilakukan pengujian dalam air dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$P = \left(\frac{W_b - W_k}{v_b} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_{\text{water}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

P = Porositas (%)
 W_b = Massa benda uji dalam kondisi basah setelah perendaman (gram)
 W_k = Massa benda uji dalam kondisi kering (gram)
 V_b = Volume benda uji (cm³)
 ρ_{air} = Massa jenis air (gram/cm³)

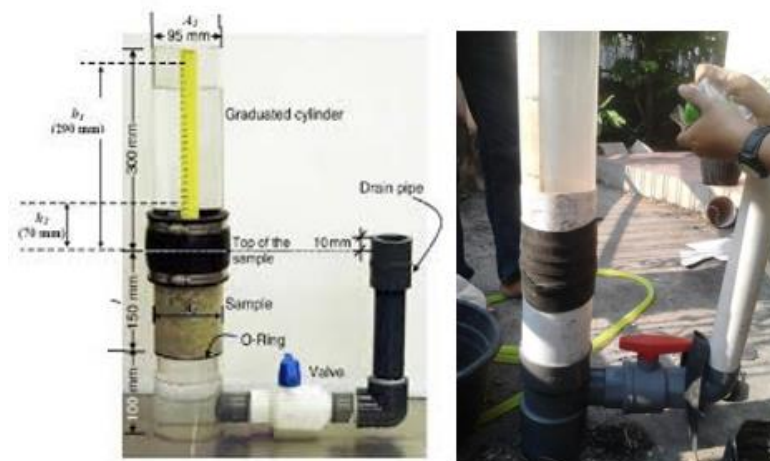
Pengujian Permeabilitas

Kemampuan pori-pori beton ringan untuk dilalui air disebut permeabilitas beton. Ketika pasta semen mengeras, struktur yang terbentuk terdiri atas partikel-partikel yang saling terikat melalui permukaannya, namun jumlah volume totalnya umumnya lebih kecil dibandingkan jumlah volume partikel penyusunnya. Air menjadi komponen utama dalam proses aliran dan tetap dapat bergerak meskipun memiliki viskositas yang tinggi (Neville, 1996). Untuk mengukur dan mengevaluasi tingkat permeabilitas beton, diperlukan serangkaian uji laboratorium. Salah satu metode pengujian yang umum digunakan adalah uji aliran (flow test), yaitu pengujian yang menilai kemampuan air untuk menembus sampel beton. Nilai porositas berpengaruh langsung terhadap tingkat permeabilitas beton. Dalam penelitian ini, nilai permeabilitas beton ditentukan menggunakan persamaan NRMCA (2004).

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \times \left[\log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad (3)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

k = koefisien permeabilitas air (cm/detik)
 a = luas penampang tabung (cm²)
 L = tebal benda uji (cm)
 A = luas penampang benda uji (cm²)
 t = waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan permukaan air dari
 h_1 = tinggi batas atas air pada tabung (cm)
 h_2 = tinggi batas bawah air pada tabung (cm)



Gambar 1. Alat pengujian permeabilitas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan Campuran Beton Berpori

Menurut pendekatan ACI 522R-2010, kuat tekan beton berpori umumnya berada pada kisaran 2,8 MPa hingga 28 MPa, dengan nilai rata-rata yang direkomendasikan sebesar 10 MPa (ACI 522R-2010, hal. 14). Pada penelitian ini, beton berpori dibuat tanpa menggunakan bahan halus, khususnya pasir, untuk menonjolkan karakteristik porositas alami dari campuran. Komposisi rancangan campuran (mix design) untuk satu silinder beton dengan volume 0,0053 m³ ditampilkan pada Tabel 3, sedangkan Tabel 4 menunjukkan perbandingan natrium silikat yang digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton.

Tabel 3. Desain campuran

No.	Bahan	Berat (kg)
1	Agregat kasar	9,29
2	Semen Portland komposit	1,70
3	Air	0,61 (610 ml)
Faktor koreksi		1,2

Tabel 4. Rasio penambahan natrium silikat sebagai pengganti semen

Natrium silikat (kg)		
1,0%	1,5%	2,0%
0,017	0,025	0,034

Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari dengan penambahan natrium silikat sebesar 0,0%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0% ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan tabel tersebut, beton berpori dengan penambahan 1% natrium silikat mengalami peningkatan kuat tekan dibandingkan dengan beton tanpa perlakuan tambahan. Namun, pada umur 28 hari, beton berpori dengan variasi natrium silikat menunjukkan hasil yang bervariasi, di mana nilai rata-ratanya sebesar 7,26 MPa tergolong dalam kategori normal dan pada beberapa sampel tidak menunjukkan peningkatan signifikan. Setelah penambahan 1,5% natrium silikat, kuat tekan rata-rata beton meningkat dari 8,39 MPa menjadi 9,71 MPa. Sebaliknya, ketika kadar natrium silikat dinaikkan menjadi 2%, kuat tekan menurun menjadi 9,62 MPa, yang menunjukkan adanya penurunan kekerasan tekan material. Peningkatan kuat tekan tertinggi terjadi pada penambahan 1,5% natrium silikat, yaitu sebesar 25,24% dibandingkan dengan beton normal pada pengujian umur 28 hari. Sementara itu, penambahan 2% natrium silikat justru menurunkan kuat tekan maksimum sebesar 0,967%, yang menandakan bahwa komposisi optimal untuk peningkatan kuat tekan berada pada kadar 1,5%.

Tabel 5. Hasil uji kuat tekan beton poros dengan penambahan natrium silikat

Nomor benda uji	Natrium silikat (%)	Umur beton (hari)	Kuat tekan (MPa)	Rata-rata kuat tekan (MPa)
1	0,0	3	4,52	4,15
2			3,68	
3			4,24	
1		7	6,22	6,13
2			6,79	
3			5,66	
1		14	7,07	6,51
2			6,51	
3			5,66	
1		28	7,36	7,27
2			6,79	
3			7,64	
1	1,0	3	4,52	5,19
2			4,81	
3			6,22	
1		7	7,64	6,32
2			6,51	
3			4,81	
1		14	7,07	8,02
2			7,64	
3			9,34	
1		28	8,49	8,39
2			7,92	
3			8,77	
1	1,5	3	6,79	6,60
2			7,36	
3			5,66	
1		7	6,79	7,64
2			8,49	
3			7,64	
1		14	8,20	8,87
2			8,49	
3			9,90	
1		28	9,34	9,71
2			9,90	
3			9,90	
1	2,0	3	6,79	5,66
2			5,37	
3			4,81	
1		7	5,94	6,22
2			7,07	
3			5,66	
1		14	9,34	8,68
2			8,77	
3			7,92	
1		28	10,19	9,62
2			9,05	
3			9,62	

Porositas

Berdasarkan perhitungan porositas menggunakan Persamaan (2), hasil pengujian porositas ditunjukkan pada Tabel 6. Pengujian porositas dilakukan pada benda uji beton berumur 28 hari. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada tabel tersebut, beton normal tanpa penambahan natrium silikat memiliki rata-rata porositas sebesar 3,177%, yang menunjukkan tingkat porositas beton pada kondisi umum atau tanpa bahan tambahan. Sebaliknya, penambahan 1% natrium silikat menghasilkan rata-rata porositas sebesar 2,730%, penambahan 1,5% natrium silikat menghasilkan rata-

rata porositas sebesar 2,856%, sedangkan penambahan 2% natrium silikat menghasilkan rata-rata porositas sebesar 2,718%. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa penambahan natrium silikat secara umum dapat menurunkan tingkat porositas beton dibandingkan dengan beton normal, meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan antar variasi kadar penambahan.

Tabel 6. Hasil uji porositas beton berpori dengan penambahan natrium silikat umur 28 hari

Nomor benda uji	Natrium silikat (%)	Umur beton (hari)	Porositas (%)	Rata-rata porositas (%)
1	0,0	28	3,038	3,177
2			3,699	
3			2,793	
1	1,0		2,680	2,730
2			2,661	
3			2,850	
1	1,5		3,189	2,856
2			2,642	
3			2,736	
1	2,0		2,510	2,717
2			3,038	
3			2,604	

Permeabilitas

Berdasarkan hasil penelitian uji permeabilitas beton berpori menggunakan benda uji silinder, nilai permeabilitas beton diperoleh melalui Persamaan (3) dan ditunjukkan pada Tabel 7. Pengujian permeabilitas dilakukan pada beton berumur 28 hari. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada tabel tersebut, beton berpori tanpa penambahan natrium silikat (0%) memiliki rata-rata permeabilitas sebesar 4,830 mm/detik. Sementara itu, beton dengan penambahan 1% natrium silikat menunjukkan rata-rata permeabilitas sebesar 4,601 mm/detik, penambahan 1,5% natrium silikat menghasilkan rata-rata permeabilitas sebesar 4,392 mm/detik, dan penambahan 2% natrium silikat kembali menunjukkan rata-rata permeabilitas sebesar 4,830 mm/detik. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan natrium silikat hingga kadar tertentu dapat menurunkan permeabilitas beton berpori, meskipun pada kadar yang lebih tinggi (2%) terjadi kecenderungan peningkatan kembali nilai permeabilitas.

Tabel 7. Hasil uji permeabilitas beton berpori dengan penambahan natrium silikat umur 28 hari

Nomor benda uji	Natrium silikat (%)	Umur beton (hari)	Permeabilitas (mm/sec.)	Rata-rata permeabilitas (mm/sec.)
1	0,0	28	5,034	4,830
2			4,867	
3			4,589	
1	1,0		4,228	4,602
2			4,448	
3			5,129	
1	1,5		4,037	4,392
2			4,217	
3			4,921	
1	2,0		4,321	4,399
2			4,637	
3			4,238	

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai kelayakan natrium silikat sebagai bahan substitusi parsial semen pada beton berpori sebagai berikut:

1. Kuat Tekan Beton Berpori. Setelah 28 hari, beton berpori dengan gradasi seragam menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 7,26 MPa. Penambahan 1% natrium silikat sebagai pengganti sebagian semen meningkatkan kuat tekan menjadi 8,39 MPa, dan meningkat lebih lanjut menjadi 9,71 MPa pada penambahan 1,5% natrium silikat. Namun, ketika kadar natrium silikat dinaikkan menjadi 2%, kuat tekan mengalami penurunan menjadi 9,62 MPa. Dengan demikian, komposisi optimum natrium silikat adalah 1,5%, yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 9,71 MPa, masih berada dalam kisaran kuat tekan beton berpori yang direkomendasikan oleh ACI 522R-

2010 (2,8 MPa–28 MPa). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar natrium silikat secara berlebihan justru menurunkan kekuatan beton berpori.

2. Porositas dan Permeabilitas Beton Berpori. Pada umur 28 hari, beton berpori normal memiliki porositas rata-rata sebesar 3,177% dan permeabilitas sebesar 4,830 mm/detik. Penambahan 1,5% natrium silikat menurunkan porositas menjadi 2,730% dan menghasilkan permeabilitas sebesar 4,601 mm/detik, yang menunjukkan peningkatan kerapatan beton. Nilai maksimum rata-rata permeabilitas pada beton berpori dengan gradasi seragam adalah 5,471 mm/detik. Hasil pengujian ini memenuhi standar ACI 522R-2010, di mana rentang nilai permeabilitas beton berpori berkisar antara 1,4 hingga 12,2 mm/detik, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan natrium silikat dalam kadar optimal mampu menurunkan porositas dan meningkatkan kualitas beton berpori.

DAFTAR PUSTAKA

- .L. Scrivener, D. Damidot, C. Famy, Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (also known as DEF) and implications for avoidance of field problems, *Cement Concrete Aggregates* 21 (1999) 93–101.
- ACI Commite. (2010). ACI 522R-10, Report on Pervious Concrete, USA: American Concrete Institute.
- Arusmalem Ginting, 2015. Comparison of Compressive Strength and Prosity of Porous Concrete Using Uniform Graded Coarse Aggregates with Continuous Gradations, Department of Civil Engineering, University of Janabadra, Yogyakarta.
- Irianto., Tumpu M., Mabui D. S., Rochmawaty R., and Sila A. A. 2023. Potential of Pyrolyzing Mixed Polyethylene Terephthalate and Polypropylene Plastic Wastes for Utilization in Asphalt Binder. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, Vol. 47, No. 3, June, 2023, pp. 133-140
- Kawashima M, Kinugawa N, Mitsui M, Kanemura K, Zhang R. Experiment of reed planting by using porous concrete mats. In: *Proceedings of the JCI symposium on design, construction and recent applications of porous concrete*, Japan Concrete Institute, Tokyo; April 2004. p. 161–2.
- Mansyur, Amiruddin A.A., Parung H., Tjaronge M.W. and Tumpu M. 2021. Utilization of Sea Water to Production of Concrete in Terms of Mechanical Behavior. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 921 (2021) 012068. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/921/1/012068/meta>.
- Maulana A., Tumpu M., Indriani I. P., Utama I. 2023. Flood Sedimentology for Future Floods Mitigation in North Luwu, Sulawesi, Indonesia. *Civil Engoneering Journal*. Vol. 9, No. 04, April, 2023.
- Monica Fransisca Khonando Hieryco Manalip, Steenie E. Wallah. *Journal of static Civil Engineering* Vol. 7 No. March 3, 2019 (351-358) ISSN: 237-6732. Compressive Strength and Permeability of Porous Concrete with Variations in Aggregate Size, Department of Civil Engineering, Sam Ratulangi University, Manado.
- N. Bouzoubâa, B. Fournier, Current situation of SCMs in Canada, *Materials Technology Laboratory*, Report MTL 2003-4(TR), MTL/CANMET, 2003, 28p.
- National Standardization Agency, 2011. SNI 1974:2011; How to Test Concrete Compressive Strength with Cylindrical Test Objects.
- Neville A. M. 1996. *Properties of Concrete*. 4 th Ed., ELBS, Addison Wesley Longman Ltd., Harlow, England, ISBN 0582 279380.
- Parea R. Rangan, M. Tumpu, Mansyur, James Thoengsal, "A Preliminary Study of Alkali-Activated Pozzolan Materials Produced with Sodium Hydroxide Activator," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 375-382, 2023. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I7P236>.
- Parung H., Tumpu M., Tjaronge M. W., Amiruddin A. A., Walenna M. A., and Mansyur. 2023. Crack Pattern of Lightweight Concrete under Compression and Tensile Test. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, Feb. 2023, Vol. 47 Issue 1, p35-41.
- Pasra M., Tjaronge M. W., Caronge M. A., Djamaluddin A. R., Lapian F. E. P., Tumpu M. 2022. Influence of Tensile Load on Bonding Strength of Asphalt Concrete Containing Modified Buton Asphalt and Polyethylene Terephthalate Waste: A Case Study of Indonesian Roads. *International Journal of Engineering Transactions C: Aspects*, 2022, 35(9), pp. 1779–1786.
- R.A. Rodden, D.A. Lange, feasibility of shrinkage reducing admixtures for concrete runway pavements, technical note N° 4, The Center of Excellence for Airport Technology (CEAT), 2004, 6p.
- Rangan P. R., Tumpu M., Mansyur, Mabui D. S. 2023. Assessment of Fly Ash-Rice Straw Ash-Laterite Soil Based Geopolymer Mortar Durability. *Civil Engineering Journal*, Vol. 9, No. 06, June, 2023.
- Rangan P.R., Irmawaty R., Tjaronge M.W., Amiruddin A.A., Bakri B. and Tumpu M. 2021. The Effect of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Mortar Made Rice Straw Ash, Fly Ash and Laterite Soil. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 921 (2021) 012009. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/921/1/012009/meta>.
- Rangan P.R., Tumpu M., Caroles L., and Mansyur. 2021. Compressive strength of high-strength concrete with cornice adhesive as a partial replacement for cement. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 871 (2021)

012064. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/871/1/012006/meta>.
- Shu X, Huang B, Wu H, Dong Q, Burdette EG. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. *Constr Build Mater* 2011;25(8):3187–92.
- Tamai M, Mizuguchi H, Hatanaka S, Katahira H, Nakazawa T, Yanagibashi K, Kunieda M. Design, construction and recent applications of porous concrete in Japan. In: *Proceedings of the JCI symposium on design, construction and recent applications of porous concrete*, Japan Concrete Institute, Tokyo; April 2004. p. 1–10.
- Tumpu M. and Mabui D.S. 2022. Effect of Hydrated Lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) to Compressive Strength of Geopolymer Concrete. *AIP Conference Proceedings* 2391, 070011 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0086702>.
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0086702>.