



Kajian *Setting Time* dan Permeabilitas pada Beton Variasi Limbah Granit Sebagai Substitusi Parsial Agregat Kasar

Fauzy Kurnain ^{*1}, Wibowo ², Endah Safitri ³

^{1,2,3} Universitas Sebelas Maret, Indonesia

Email : fauzykurnain02@gmail.com wibowo68@staff.uns.ac.id
endahsafitri@staff.uns.ac.id

Abstract. Currently, infrastructure development is a priority of the Indonesian government which aims to improve the quality of life of the community and equitable distribution of infrastructure development. The need for concrete material as a construction material also increases in line with the increase in infrastructure development. The use of recycled aggregate materials, especially granite waste, is a promising option in sustainable infrastructure development. This study was conducted with the aim of knowing the effect of partial substitution of coarse aggregates using granite waste variations on the binding time and permeability of concrete. Experimental method was chosen in this research. The levels of granite waste used were 0%; 15%; 30%; and 45% by weight of coarse aggregate or gravel. The test specimens used for the concrete bond time study were fresh concrete poured into cube molds measuring 20 cm x 20 cm x 20 cm with a minimum height of 15 cm. Testing concrete bond time using a penetrometer tool. The test specimen for concrete permeability is a cube measuring 15 cm x 15 cm x 15 cm, totaling 12 pieces and tested with a Permeability Test Apparatus (Water Permeability Apparatus). The results showed that partial substitution of coarse aggregate with granite waste variation did not affect the setting time of concrete up to a certain level. Based on the results of the research conducted, the initial setting time and final setting time values of 0%, 15%, 30%, and 45% granite content variations fluctuate and the coefficient of determination (R^2) value in linear regression is only 0.5 and 0.3. Partial replacement of coarse aggregate with granite waste has an effect on the impermeability of concrete which meets the requirements for medium aggressive impermeable concrete. Water pressure of 5 kg/cm² for 72 hours applied to the concrete partial replacement of coarse aggregate with granite waste variation resulted in permeability coefficient values of 4.11×10^{-12} cm/s; 3.48×10^{-12} cm/s; 2.17×10^{-12} cm/s; and 3.25×10^{-12} cm/s. The minimum coefficient value of concrete with partial substitution of coarse aggregate with granite waste is obtained at 30% by weight of coarse aggregate. Granite, whose specific gravity is greater than gravel, produces denser and more water-resistant concrete.

Keywords: Aggregate Recycle Concrete, Permeability, Setting Time

Abstrak. Saat ini, pembangunan infrastruktur menjadi prioritas pemerintah Indonesia yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat dan pemerataan pembangunan infrastruktur. Kebutuhan material beton sebagai bahan konstruksi juga meningkat selaras dengan peningkatan pembangunan infrastruktur. Penggunaan material agregat daur ulang khususnya limbah granit menjadi pilihan yang menjanjikan dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui pengaruh substitusi parsial agregat kasar menggunakan variasi limbah granit terhadap waktu ikat dan permeabilitas beton. Eksperimental adalah metode yang dipilih pada penelitian ini. Kadar limbah granit yang digunakan adalah 0%; 15%; 30%; dan 45% dari berat agregat kasar atau kerikil. Benda uji yang digunakan untuk penelitian waktu ikat beton adalah beton segar yang dituangkan kedalam cetakan kubus ukuran 20 cm x 20 cm x 20 cm dengan ketinggian minimal 15 cm. Pengujian waktu ikat beton menggunakan alat penetrometer. Benda uji untuk permeabilitas beton yaitu kubus berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm berjumlah 12 buah dan diuji dengan Alat Uji Permeabilitas (*Water Permeability Apparatus*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi parsial agregat kasar dengan variasi limbah granit tidak mempengaruhi waktu ikat (*setting time*) beton sampai kadar tertentu. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan nilai *initial setting time* dan *final setting time* variasi kadar granit 0%, 15%, 30%, dan 45% fluktuatif dan nilai koefisien determinasi (R^2) pada regresi linear hanya bernilai 0,5 dan 0,3. Penggantian parsial agregat kasar dengan limbah granit berpengaruh terhadap kedap air beton yang mana benda uji ini memenuhi ketentuan untuk beton kedap air agresif sedang. Tekanan air sebesar 5 kg/cm² selama 72 jam yang diberikan kepada beton penggantian parsial agregat kasar dengan variasi limbah granit menghasilkan nilai koefisien permeabilitas $4,11 \times 10^{-12}$ cm/s; $3,48 \times 10^{-12}$ cm/s; $2,17 \times 10^{-12}$ cm/s; dan $3,25 \times 10^{-12}$ cm/s. Nilai koefisien minimum beton substitusi parsial agregat kasar dengan limbah granit ini didapatkan pada kadar 30% dari berat agregat kasar. Granit yang berat jenisnya lebih besar dari batu kerikil menghasilkan beton yang lebih padat dan kedap air.

Kata Kunci: Beton Recycle Agregat, Permeabilitas, *Setting Time*

1. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan zaman, pembangunan infrastruktur di Indonesia terus meningkat. Pembangunan infrastruktur merupakan prioritas utama pemerintah Indonesia saat ini. Infrastruktur dapat menjadi penggerak perekonomian serta berdampak terhadap peningkatan kualitas hidup dan kesejahteraan masyarakat, seperti peningkatan nilai konsumsi, terbukanya lapangan pekerjaan, dan pemerataan pembangunan. Material beton sebagai bahan konstruksi utama juga meningkat selaras dengan peningkatan pembangunan infrastruktur.

Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam pembuatan beton. Saat ini, penggunaan beton agregat daur ulang menjadi pilihan yang menjanjikan dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Selain itu, material agregat daur ulang dari sisa bongkaran dan limbah industri konstruksi dan beton merupakan material yang cukup baik sebagai bahan konstruksi bangunan karena telah banyak diteliti dan dikembangkan dari segi daya tahan dan kekuatannya.

Di sisi lain, ada masalah lingkungan seperti sejumlah besar bahan limbah yang tidak digunakan atau diproses ulang, dan sejumlah besar limbah granit sejauh ini hanya dibuang sebagai timbunan. Oleh karena itu, limbah granit digunakan untuk mengurangi jumlah kerikil yang digunakan dalam campuran beton. Penggunaan komposisi material limbah granit sebagai pengganti agregat kasar harus sesuai dengan persyaratan kerikil, seperti keras dan tidak berpori, tidak mengandung lumpur, dan tidak mengandung zat organik.

Permeabilitas beton merupakan kemampuan beton dalam membiarkan air atau zat cair menembus ke dalam struktur beton. Hal ini bersifat merugikan karena air atau zat cair dapat membawa zat reaktif yang dapat merusak beton. Faktor-faktor yang memengaruhi permeabilitas beton yaitu, faktor air semen yang terlalu tinggi, kualitas campuran beton yang dipengaruhi oleh kualitas material dan proses pemadatan, serta kondisi permukaan beton.

Waktu terjadinya reaksi kimia pada beton setelah penambahan air yang menghasilkan peningkatan kekakuan campuran secara bertahap adalah waktu ikat (*setting time*) beton. Peningkatan kebutuhan beton segar dengan waktu ikat beton yang lebih lama diperlukan untuk kebutuhan proses distribusi beton segar dan beberapa jenis konstruksi tertentu, seperti pada konstruksi dengan struktur penulangan yang rapat atau pengecoran dengan volume yang besar. Waktu ikat yang lebih lama pada beton segar ini dibutuhkan untuk mencegah terjadinya *cold joint* atau mengerasnya beton segar saat masih proses

penuangan atau pemadatan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian teknologi beton terus berlanjut seiring dengan permintaan akan beton yang kuat. Salah satunya adalah beton yang ramah lingkungan dan hemat biaya. Inovasi dalam hal ini adalah pemanfaatan limbah pecahan keramik granit alam sebagai pengganti sebagian agregat kasar. Hal ini didukung dengan memanfaatkan limbah industri produk keramik granit alam, salah satunya di kota Surakarta. Limbah keramik granit alam memiliki tingkat abrasi yang rendah dan berat jenis yang tinggi, sehingga memungkinkan limbah granit digunakan sebagai pengganti sebagian agregat kasar. Limbah granit juga memiliki sifat keras dan tidak berpori, bebas lumpur, dan tidak mengandung zat organik (Albefanido dkk, 2023)

Beton merupakan salah satu material dasar konstruksi yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen portland atau hidrolis, dan air yang dicampur sampai homogen sehingga membentuk massa padat, kuat, dan stabil. Pembuatan beton dapat menggunakan bahan tambah ataupun tidak untuk mengubah beberapa sifatnya sesuai kebutuhan. Umumnya beton mempunyai berat isi antar 2.200 kg/m^3 sampai dengan 2.500 kg/m^3 .

Dalam beberapa penelitian, agregat kasar dan limbah granit digunakan untuk menginovasikan bahan penyusun beton. Penelitian yang dilakukan oleh (Rama dkk, 2023). adalah salah satunya. Penelitian ini menyelidiki bagaimana penggunaan limbah granit sebagai pengganti agregat kasar berdampak pada beton self-compacting. Studi ini menggunakan variasi limbah granit 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa limbah granit sebagai agregat kasar lebih baik daripada batu split sebagai agregat kasar. Selain itu, pengujian kekuatantekan dari beton normal ke beton dengan variasi limbah granit 100% hanya mengalami penurunan 1% (Albefanido dkk, 2023)

Setting time merupakan waktu yang dibutuhkan oleh pasta semen untuk mengeras. Proses diawali dari penambahan air sampai didapat semen mengeras, tidak dapat dibentuk lagi dalam waktu tertentu. Periode waktu pengikatan ini dapat dibagi menjadi 4 antara lain; domain initial set (pengikatan awal), domain final set (pengikatan akhir), ardening (pengerasan) dan dorman period. Semen apabila dicampur dengan air akan menghasilkan pasta yang plastis yang bisa dibentuk sampai beberapa waktu karakteristik dari pasta semen tetap dan periode ini sering disebut Dorman Period (periode tidur) (Isnaini dkk, 2020)

Permeabilitas beton merupakan kemudahan beton untuk dapat dilalui oleh zat cair. Jika beton mudah meloloskan zat cair atau air dapat dikatakan bahwa beton tersebut permeabel. Sebaliknya, jika beton sulit untuk meloloskan zat cair atau air maka beton tersebut dikatakan

impermeabel. (Prasetya, 2016)

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang sistematis merupakan faktor penting pada penelitian agar dapat tercapai tujuan dari penelitian. Metode eksperimental adalah metode yang digunakan pada penelitian ini. Metode eksperimental adalah jenis penelitian yang melakukan percobaan langsung untuk mendapatkan data-data dan dapat menunjukkan hubungan antara variabel yang diteliti. Penelitian dilakukan dengan melakukan penggantian parsial agregat kasar kerikil dengan limbah granit variasi 0%; 15%; 30%; 45% ke dalam campuran beton. Lokasi penelitian bertempat di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas SebelasMaret Surakarta.

Ada dua variabel dalam penelitian beton dengan agregat *recycle* menggunakan batu granit ini yaitu variabel bebas dan variabel tak bebas. Semua hal yang menjadi objek dalam penelitian atau faktor-faktor yang akan diteliti adalah variabel. Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi kadar granit yang digunakan (0%; 15%; 30%; dan 45% dari berat agregat kasar. Variabel tidak bebas pada penelitian ini adalah permeabilitas beton dan waktu ikat (*setting time*) beton. Benda uji yang dibutuhkan untuk uji waktu ikat (*setting time*) adalah beton kubus berukuran 20 x 20 x 20 cm berjumlah empat buah untuk uji permeabilitas yang diuji setelah *mixing* dilakukan. Benda uji yang dibutuhkan untuk uji permeabilitas beton adalah beton kubus berukuran 15 x 15 x 15 cm dengan masing-masing variasi berjumlah tiga benda uji.

Setelah kedua pengujian tersebut telah dilakukan, dilanjutkan dengan tahap pengolahan data-data hasil uji permeabilitas dan uji waktu ikat (*setting time*) beton. Software Microsoft Office Excel digunakan untuk mengolah dan menganalisis data-data tersebut. Software Microsoft Office Excel akan memudahkan dalam menghubungkan antar variabel dan hasil analisis data yang ada akan disajikan dalam bentuk grafik agar terlihat perbedaan serta selisihnya.

Analisis Data

Pada pengujian ini, Microsoft Excel digunakan untuk analisis data atau pengolahan data. Penggunaan Microsoft Excel bertujuan untuk menyajikan data hasil pengujian secara rinci dan dikemas secara sederhana sehingga mudah dipahami dan direalisasikan. Setelah melakukan analisis data selanjutnya yaitu menyusun pembahasan dari data atau hasil yang diperoleh dari penelitian dan menarik kesimpulan dari pembahasan data atau hasil tersebut, hasil pengolahan data dengan Microsoft Excel juga

dapat disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Bahan Dasar Penyusun Beton

Acuan yang digunakan untuk pengujian bahan dasar penyusun beton adalah SNI 2847-2019 yang merujuk pada *American Standard for Testing and Material (ASTM)* dan Peraturan Beton Indonesia (PBI).

Pengujian Agregat Halus

Kesesuaian material yang digunakan berdasarkan standar yang berlaku bisa diketahui dengan pengujian material ini. Kualitas agregat halus yang tidak sesuai dengan standar berpengaruh terhadap mutu beton. Pengujian yang dilakukan pada agregat halus, meliputi pengujian gradasi, *specific gravity*, kandungan lumpur, kandungan zat organik, dan berat satuan agregat halus. Rekapitulasi analisis data hasil pengujian agregat halus dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Rekapitulasi hasil pengujian agregat halus

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
1.	Ukuran saringan (mm)	9,5	100 ASTM C 33	100 Memenuhi Syarat
		4,75	96,13 ASTM C 33	95 – 100 Memenuhi Syarat
		2,36	90,47 ASTM C 33	80 – 100 Memenuhi Syarat
		1,18	78,93 ASTM C 33	50 – 85 Memenuhi Syarat
		0,6	51,97 ASTM C 33	25 – 60 Memenuhi Syarat
		0,3	27,86 ASTM C 33	5 – 30 Memenuhi Syarat
		0,15	5,88 ASTM C 33	0 – 10 Memenuhi Syarat
	Modulus kehalusan	2,49	1,5 < MH < 3,8 SII-0052-80	Memenuhi Syarat
2.	Kadar Lumpur	3,7%	<5% ASTM C 117	Memenuhi Syarat
3.	Kandungan Zat Organik	Kuning Tua	Kuning Kemerahan ASTM C 40	Memenuhi Syarat

4.	Absorption	4,38%	-	-
	Apparent Specific Gravity	2,68	-	-
	Bulk Specific Gravity	2,40	-	-
	Bulk Specific Gravity SSD	2,50	2,5 – 2,7 ASTM C.128-79	Memenuhi Syarat

Pengujian Agregat Kasar

Kesesuaian material yang digunakan berdasarkan standar yang berlaku bisa diketahui dengan pengujian material ini. Kualitas agregat kasar yang tidak sesuai dengan standar berpengaruh terhadap mutu beton. Pengujian yang dilakukan pada agregat kasar, meliputi pengujian gradasi, *specific gravity*, abrasi, dan berat satuan agregat kasar. Rekapitulasi analisis data hasil pengujian agregat kasar dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Rekapitulasi hasil pengujian agregat kasar

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
1.	Ukuran saringan (mm)	25	100 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		19	92,67 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		12,5	21,55 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		9,5	6,2 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		4,75	2,12 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
	Modulus kehalusan	6,76	6,5 - 7,1 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
2.	Spesific Gravity SSD	6,30	min. 2,6 ASTM C 127	Memenuhi Syarat
	Absorption	2,27%	maks. 3% ASTM C 128	Memenuhi Syarat
3.	Abrasi	25%	maks. 40% ASTM C 131	Memenuhi Syarat

Pengujian Limbah Granit

Standar yang digunakan dalam pengujian granit sama dengan standar pengujian agregat kasar. Penetapan standar yang sama tersebut karena granit dijadikan sebagai substitusi parsial agregat kasar. Kualitas granit yang tidak sesuai dengan standar atau kualitas agregat kasar berpengaruh terhadap mutu beton. Pengujian yang dilakukan pada granit, meliputi pengujian gradasi, *specific gravity*, abrasi, dan berat satuan granit. Rekapitulasi analisis data

hasil pengujian granit dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Rekapitulasi hasil pengujian granit

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan	
1.	Ukuran saringan (mm)	25	100	100 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		19	93,57	90 – 100 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		12,5	22,32	20 – 55 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		9,5	3,65	0 – 15 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
		4,75	1,48	0 – 5 ASTM C 33	Memenuhi Syarat
	Modulus kehalusan	6,79	6,5 - 7,1 ASTM C 33	Memenuhi Syarat	
2.	<i>Spesific Gravity SSD</i>	6,33	min. 2,5 – 3,7 ASTM C 128-79	Memenuhi Syarat	
	Absorption	0,55%	maks. 3% ASTM C 128	Memenuhi Syarat	
3.	Abrasi	20,08%	< 40% ASTM C 131	Memenuhi Syarat	

Mix Design Beton

SNI 7656:2012 tentang “Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Masa” menjadi acuan penelitian ini dalam membuat rancang campur (*mix design*) beton normal dengan substitusi parsial agregat kasar menggunakan limbah granit. Variasi kadar limbah granit yang digunakan, yaitu sebesar 0%, 15%, 30%, dan 45% terhadap berat agregat kasar atau kerikil. Sedangkan rekapitulasi *mix design* disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Rekapitulasi *mix design* beton substitusi agregat kasar dengan limbah granit

No.	Variasi Kadar Granit	Kebutuhan Bahan Penyusun Beton untuk Tiap 1 m ³ Beton				
		Air (liter)	Semen (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Limbah Granit (kg)
1.	0%	205	352,23	822,77	960	0,000
2.	15%	205	352,23	823,27	819,82	144,68

3.	30%	205	352,23	818,77	678,30	290,70
4.	45%	205	352,23	814,27	535,43	438,08

Hasil Pengujian Benda Uji dan Pembahasan

Workabilitas Beton

Kelacakan atau workabilitas beton dapat diketahui dengan mengukur penurunan tinggi beton terhadap tinggi cetakan kerucut *Abrams*. Acuan yang dipakai untuk pengujian ini adalah SNI 03-1972-1990 tentang “Metode Pengujian *Slump* Beton”. Tempat pengujian ini berada di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta. Pengujian *slump* tegak dilakukan pada menit ke 0 atau pengujian yang dilakukan secara langsung setelah beton segar jadi. Hasil pengujian *slump* tegak beton dan pengaruh substitusi agregat kasar dengan limbah granit terhadap nilai *slump* dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Hasil pengujian *slump* tegak beton dengan variasi kadar limbah granit

No	Variasi Kadar Granit	Nilai <i>Slump</i> Beton 0 Menit	
		cm	% Peningkatan terhadap beton kontrol
1	0%	7	-
2	15%	8,5	21,4
3	30%	6,5	-7,1
4	45%	7	0

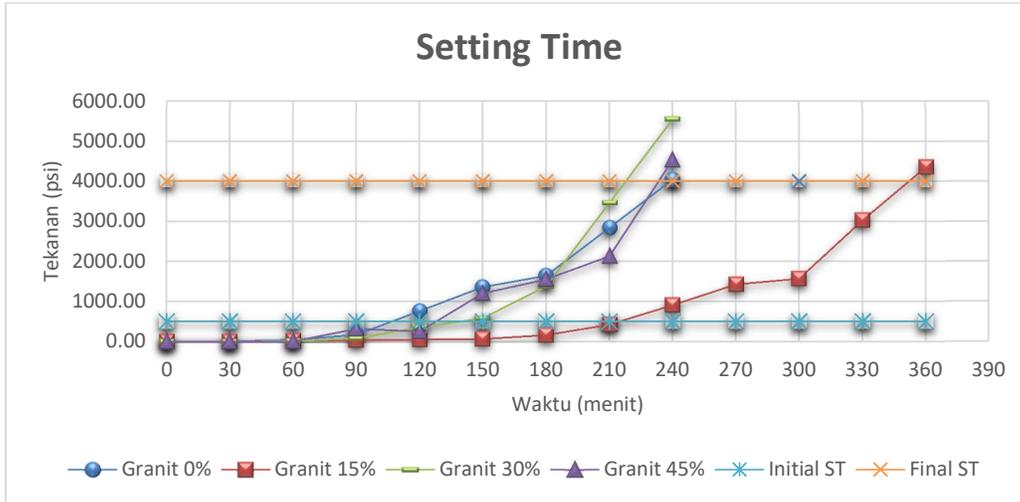
Berdasarkan **Tabel 5**, dapat diketahui bahwa nilai *slump* beton dengan variasi limbah granit sangat fluktuatif. Peningkatan kadar substitusi agregat kasar dengan limbah granit tidak berbanding linear dengan nilai *slump* beton. Titik optimum berada pada kadar limbah granit 15% dan titik terendah terjadi pada kadar granit 30%. Kadar limbah granit 15% memberikan peningkatan 1,5 cm atau 21,4% terhadap beton kontrol. Sedangkan kadar limbah granit 30% memberikan penurunan 0,5 cm atau -7% terhadap beton kontrol.

Penelitian ini menggunakan kadar air yang sama untuk setiap campuran beton dengan variasi kadar limbah granit. Beton segar yang semakin encer mengindikasikan peningkatan workabilitas beton dan nilai *slump* yang semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian parsial agregat kasar dengan limbah granit pada kadar tertentu dapat mereduksi kebutuhan air dalam campuran beton.

Setting Time Beton

Setting time beton dapat diketahui dengan melakukan pengujian waktu ikat pada setiap variasi kadar limbah granit campuran beton segar hingga beton memadat (*final setting time*). Beton segar yang lolos saringan 4,75 mm setelah diayak merupakan sampel yang digunakan pada pengujian ini. Bekisiting kubus berukuran 20 cm x 20 cm x 20 cm menjadi

tempat untuk menuangkan benda uji mortar dengan ketinggian minimal 15 cm. Penetrometer adalah alat yang digunakan untuk melakukan penetrasi jarum yang ukurannya sesuai dengan tingkat pengikatan mortar pada pengujian *setting time* beton ini. Penetrasi menggunakan penetrometer dilakukan secara berkala dengan interval 30 menit menyesuaikan dengan tingkat pengikatan mortar sampai mencapai *final setting time*. Grafik hasil pengujian *setting time* beton dengan variasi kadar limbah granit dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Grafik hubungan waktu terhadap ketahanan penetrasi pada beton substitusi parsial limbah granit

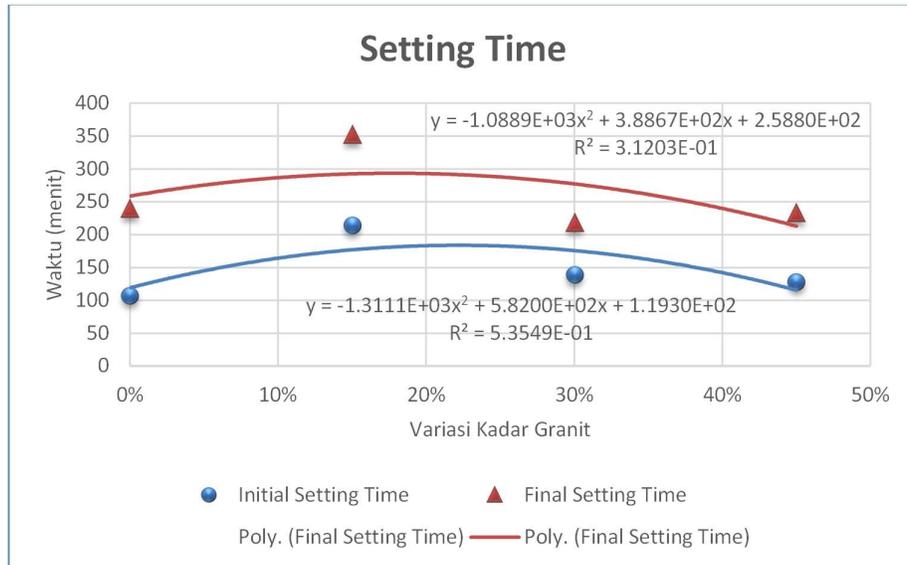
Ketahanan penetrasi beton pada waktu pengujian yang dilakukan dalam interval waktu tertentu dapat dilihat pada **Gambar 1**. Ketahanan beton terhadap penetrasi sebesar 500 psi disebut *intial setting time* dan ketahanan beton terhadap penetrasi sebesar 4000 psi disebut *final setting time*. Hasil pengujian *setting time* beton dan pengaruh substitusi parsial agregat kasar dengan limbah granit terhadap beton kontrol dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Hasil pengujian *setting time* beton dengan substitusi parsial agregat kasar menggunakan variasi limbah granit

No.	Variasi Kadar Granit	<i>Initial Setting Time</i>				<i>Final Setting Time</i>			
		Waktu		Perlambatan terhadap Beton Kontrol		Waktu		Perlambatan terhadap Beton Kontrol	
		Jam	Menit	Jam	Menit	Jam	Menit	Jam	Menit
1.	0%	1	47	-	-	3	59	-	-
2.	15%	3	34	1	48	5	52	1	53
3.	30%	2	19	0	32	3	38	0	21
4.	45%	2	8	0	27	3	53	0	6

Grafik korelasi antara variasi limbah granit yang menjadi substitusi parsial agregat

kasar terhadap *setting time* beton terdapat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Grafik hubungan variasi kadar limbah granit terhadap *setting time* beton

Table 6 dan **Gambar 2**, menunjukkan data *initial setting time* dan *final setting time* beton dengan substitusi parsial agregat kasar menggunakan variasi limbah granit. Penggantian parsial agregat kasar menggunakan variasi limbah granit menyebabkan perlambatan *setting time* dan *final setting time* pada kadar tertentu dan kemudian mengalami percepatan. Melambatnya waktu ikat beton ini dapat mempertahankan *workability* beton segar dengan waktu yang lebih lama. Kadar limbah granit 15% berpengaruh terhadap perlambatan *initial setting time* dibandingkan dengan beton kontrol selama 108 menit dan perlambatan *final setting time* selama 113 menit. Waktu perlambatan *setting time* beton ini berkurang seiring penambahan kadar granit setelah kadar 15% yang digunakan untuk substitusi parsial agregat kasar. Persentase kadar optimum granit untuk mencapai *setting time* terlama bisa diperoleh dari persamaan garis regresi polinomial sebagai berikut:

Initial Setting Time

$$y = -1,3111 \cdot 10^3 x^2 + 5,8200 \cdot 10^2 x + 1,1930 \cdot 10^2$$

Diferensialkan agar memperoleh nilai (x), sehingga:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$2(-1,3111 \cdot 10^3) x + (5,8200 \cdot 10^2) = 0$$

$$-2,6222 \cdot 10^3 x + 5,8200 \cdot 10^2 = 0$$

$$x = \frac{-5,8200 \cdot 10^2}{-2,6222 \cdot 10^3}$$

$$= 0,2219$$

$$= 22,2\%$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh nilai x adalah 22,2%. Substitusi nilai x tersebut ke dalam persamaan regresi dan akan didapatkan nilai y:

$$\begin{aligned} y &= -1,3111 \cdot 10^3 x^2 + 5,8200 \cdot 10^2 x + 1,1930 \cdot 10^2 \\ &= -1,3111 \cdot 10^3 (0,2219)^2 + 5,8200 \cdot 10^2 (0,2219) + 1,1930 \cdot 10^2 \\ &= 189,9 \text{ menit} \end{aligned}$$

Final Setting Time

$$y = -1,0889 \cdot 10^3 x^2 + 3,8867 \cdot 10^2 x + 2,5880 \cdot 10^2$$

Diferensialkan agar memperoleh nilai (x), sehingga:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$2(-1,0889 \cdot 10^3) x + (3,8867 \cdot 10^2) = 0$$

$$-2,1778 \cdot 10^3 x + 3,8867 \cdot 10^2 = 0$$

$$x = \frac{-3,8867 \cdot 10^2}{-2,1778 \cdot 10^3}$$

$$= 0,1784$$

$$= 17,8\%$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh nilai x adalah 17,8%. Substitusi nilai x tersebut ke dalam persamaan regresi dan akan didapatkan nilai y:

$$\begin{aligned} y &= -1,0889 \cdot 10^3 x^2 + 3,8867 \cdot 10^2 x + 2,5880 \cdot 10^2 \\ &= -1,0889 \cdot 10^3 (0,178)^2 + 3,8867 \cdot 10^2 (0,178) + 2,5880 \cdot 10^2 \\ &= 292,7 \text{ menit} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis regresi di atas, diperoleh nilai optimum *initial setting time* berada pada variasi kadar granit 22,2% dengan waktu ikat 189,9 menit. Nilai optimum untuk *final setting time* berada pada variasi kadar granit 17,8% dengan waktu ikat 292,7 menit. Hasil analisa regresi pada **Gambar 4** memperlihatkan bahwa penambahan kadar granit sebagai substitusi parsial agregat kasar memperlambat *setting time* beton hingga kadar optimum sebesar 22,2% untuk *initial setting time* dengan waktu 189,9 menit serta 17,8% untuk *final setting time* dengan waktu 292,7 menit dan akan kembali besar nilainya ketika melebihi kadar optimum.

Kuat Tekan Beton

Pada umur 28 hari beton diuji dengan pengujian kuat tekan. Benda uji yang digunakan adalah silinder berukuran 15 x 30 cm dengan menggunakan alat *Compressing Testing Machine*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Tujuan pengujian adalah untuk mengetahui apakah beton yang telah dibuat sudah memenuhi kuat tekan rencana. Hasil pengujian kuat tekan ini mengutip

dari penelitian yang dilakukan oleh Najwa, 2024. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton terdapat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Hasil pengujian kuat tekan beton (Najwa, 2024)

No	Variasi Kadar Granit	f'c rata-rata beton 15x30 cm (Mpa)
1	0%	22,27
2	15%	23,26
3	30%	29,27
4	45%	25,28

Berdasarkan **Tabel 7** didapatkan bahwa kuat tekan untuk beton substitusi parsial agregat kasar dengan variasi kadar granit 0%, 15%, 30%, dan 45% berturut-turut adalah 22,27 Mpa, 23,26 Mpa, 29,27 Mpa, dan 25,28 Mpa. Nilai-nilai tersebut sudah memenuhi kuat tekan rencana sebesar 20 Mpa dan memenuhi syarat sebagai beton mutu sedang menurut SNI 03-6468-2000. Kuat tekan terbesar berada pada variasi kadar granit 30% dengan nilai 29,27 Mpa.

Permeabilitas Beton

Pelaksanaan penelitian permeabilitas beton dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas SebelasMaret Surakarta menggunakan Alat Uji Permeabilitas (*Water Permeability Apparatus*). Benda uji yang digunakan adalah beton berbentuk kubus dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm yang berumur 28 hari. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui koefisien permeabilitas beton dengan cara melihat penurunan air pada tabung Alat Uji Permeabilitas yang diberikan tekanan air tertentu dalam durasi waktu tertentu.

Cara kerja Alat Uji Permeabilitas (*Water Permeability Apparatus*) adalah dengan memberikan tekanan pada benda uji dengan besar sesuai yang telah ditentukan dan alat uji akan menunjukkan besar penurunan air pada tabung (volume) dengan satuan ml atau cm³. Selanjutnya, volume yang sudah didapatkan dibagi dengan lama waktu pemberian tekanan (t) dalam satuan detik dan akan diperoleh nilai debit (Q). Nilai debit ini diperlukan untuk mencari koefisien permeabilitas (K) beton

Contoh perhitungan koefisien permeabilitas benda uji LG0%-P (Tekanan 5 kg/cm²) sebagai berikut:

Perhitungan Debit Air

$$\begin{aligned}v &= 65 \text{ ml} \\ &= 65 \text{ cm}^3 \\ t &= 72 \text{ jam} \\ &= 74 \times 3600\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 259.200 \text{ detik} \\
 Q &= \frac{V}{t} \\
 &= \frac{65}{259.200} \\
 &= 2,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Koefisien Permeabilitas Beton

$$\begin{aligned}
 \rho \text{ air} &= 1 \text{ g/cm}^3 \\
 &= 0,001 \text{ kg/cm}^3 \\
 L &= 15 \text{ cm} \\
 A &= L \times L \\
 &= 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \\
 &= 225 \text{ cm}^2 \\
 P &= 1 \text{ kg/cm}^2 \times g \text{ (gaya gravitasi)} \\
 &= 5 \text{ kg/cm}^2 \times 980,665 \text{ cm/s}^2 \\
 &= 4.903,33 \text{ kgcm/ s}^2 \\
 K &= 1 \text{ kg/cm}^2 \times g \text{ (gaya gravitasi)} \\
 &= \frac{\rho g L Q}{P A} \\
 &= \frac{0,001 \times 980,65 \times 15 \times 2,5 \times 10^{-4}}{44.903,33 \times 225} \\
 &= 3,4095 \times 10^{-12} \text{ cm/s}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil pengujian dan rata-rata koefisien permeabilitas beton disajikan pada

Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8 Hasil pengujian permeabilitas beton 15 cm x 15 cm x 15 cm

Variasi Kadar Granit	Tekanan	Volume Penurunan Air			Rata-Rata	Debit	Waktu Penekanan Beton	Koefisien Permeabilitas
		Sampel A	Sampel B	Sampel C	Volume Penurunan Air			
		P (kgcm/s ²)	(cm ³)	(cm ³)	(cm ³)			
0%	4.903,33	65	100	70	78,33	3,02E-4	259200	4,11E-12
15%	4.903,33	51	105	43	66,33	2,56E-4	259200	3,48E-12
30%	4.903,33	17	139	10	41,33	1,59E-4	259200	2,17E-12
45%	4.903,33	35	150	20	64,67	2,49E-4	259200	3,24E-12

Tabel 9 Hasil pengujian permeabilitas beton 15 cm x 15 cm x 15 cm

Variasi Kadar Granit	Kode Benda Uji	Penetrasi	Rata-Rata Koefisien Permeabilitas	ACI 301-729 (revisi 1975)

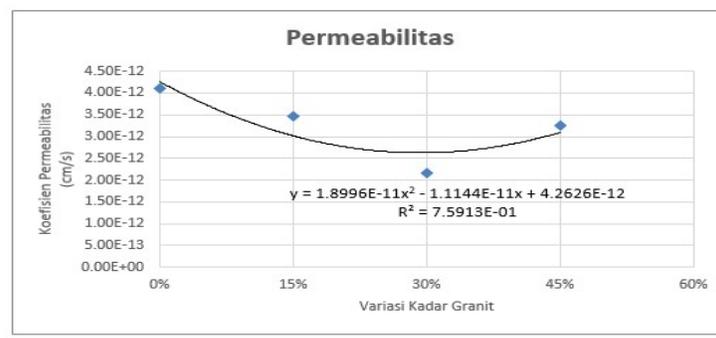
		(mm)	K (cm/s)	Maksimum $1,5 \times 10^{-9}$ cm/s
0%	LG0%-ST -A	30	4,11E-12	Memenuhi
	LG0%-ST -B	35		
	LG0%-ST -C	20		
15%	LG15%-ST -A	20	3,48E-12	Memenuhi
	LG15%-ST -B	40		
	LG15%-ST -C	20		
30%	LG30%-ST -A	30	2,17E-12	Memenuhi
	LG30%-ST -B	31		
	LG30%-ST -C	15		
45%	LG45%-ST -A	42	3,24E-12	Memenuhi
	LG45%-ST -B	35		
	LG45%-ST -C	40		

Menurut SNI 03-2914-1992, beton yang tidak tembus air dan harus memenuhi ketentuan minimum untuk beton kedap air agresif disebut beton kedap air. Tembusnya air ke dalam beton tidak boleh melampaui batas tertentu ketika diuji menggunakan tekanan air, berikut ketentuannya :

- a. Agresif sedang : 50 mm
- b. Agresif kuat : 30 mm

Hasil pengujian pada **Tabel 9** menunjukkan bahwa besar nilai penetrasi air dalam beton pada beton substitusi parsial agregat kasar dengan limbah granit dengan kadar 0%, 15%, 30%, dan 45% memenuhi syarat untuk digunakan sebagai beton kedap air agresif dengan mengacu pada standar SNI 03-2914-1992.

Nilai koefisien permeabilitas maksimum disyaratkan sebesar $1,5 \times 10^{-11}$ m/s ($1,5 \times 10^{-9}$ cm/s) menurut ACI 301-729 (revisi 1975) (dalam *Neville and Brooks, 1987*). Berdasarkan hasil analisis pada **Tabel 9** beton dengan substitusi agregat kasar kadar granit 0%, 15%, 30%, dan 45% semuanya memenuhi syarat ACI 301-729 (revisi 1975). Nilai koefisien permeabilitas semua beton tersebut lebih kecil dari $1,5 \times 10^{-11}$ m/s ($1,5 \times 10^{-9}$ cm/s).



Gambar 3 Grafik hubungan rata-rata koefisien permeabilitas beton

dengan variasi limbah granit

Porositas beton merupakan hal yang dapat mempengaruhi permeabilitas beton, semakin kecil porositas dari beton maka semakin kecil juga koefisien permeabilitas beton. Hasil pengujian yang disajikan pada **Tabel 9** dan **Gambar 3** yang menunjukkan bahwa nilai koefisien permeabilitas beton pada variasi limbah granit 0%, 15%, 30%, dan 45% mengalami penurunan dan kemudian meningkat. Nilai minimum terjadi pada kadar granit 30% dengan nilai koefisien permeabilitas pada tekanan 5 kg/cm² sebesar $2,17 \times 10^{-12}$ cm/s. Penggantian parsial agregat kasar dengan granit kadar 0%, 15%, 30%, dan 45% memiliki nilai koefisien permeabilitas berturut-turut $4,11 \times 10^{-12}$, $3,48 \times 10^{-12}$, $2,17 \times 10^{-12}$, dan $3,25 \times 10^{-12}$. Semakin rendah nilai koefisien permeabilitas beton membuktikan bahwa bahwa beton tersebut kedap dan sulit ditembus fluida atau disebut juga *impermeable*. Beton yang padat serta *impermeable* menciptakan beton dengan durabilitas yang baik. Persentase kadar optimum granit untuk mencapai koefisien permeabilitas terkecil bisa diperoleh dari persamaan garis regresi polinomial sebagai berikut:

Berdasarkan hasil analisis **Gambar 3**, didapatkan garis regresi polinomial dengan persamaan sebagai berikut:

Tekanan 5 kg/cm²

$$y = 1,8986 \cdot 10^{-11} x^2 - 1,1144 \cdot 10^{-11} x + 4,2626 \cdot 10^{-12}$$

Diferensialkan agar memperoleh nilai (x), sehingga:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$2(1,8986 \cdot 10^{-11}) x - (1,1144 \cdot 10^{-11}) = 0$$

$$3,7972 \cdot 10^{-11} x - 1,1144 \cdot 10^{-11} = 0$$

$$x = \frac{1,1144 \cdot 10^{-11}}{3,7972 \cdot 10^{-11}}$$

$$= 0,2935$$

$$= 29,35\%$$

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh nilai x adalah 29,35%. Substitusi nilai x tersebut ke dalam persamaan regresi dan akan didapatkan nilai y:

$$y = 1,8986 \cdot 10^{-11} x^2 - 1,1144 \cdot 10^{-11} x + 4,2626 \cdot 10^{-12}$$

$$= 1,8986 \cdot 10^{-11} (0,2935)^2 - 1,1144 \cdot 10^{-11} (0,2935) + 4,2626 \cdot 10^{-12}$$

$$= 2,6273 \cdot 10^{-12} \text{ cm/s}$$

Rata-rata nilai koefisien permeabilitas beton 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan tekanan 5 kg/cm² selama 72 jam memiliki nilai optimum pada variasi kadar limbah granit 29,35% sebesar $2,63 \cdot 10^{-12}$ cm/s.. Hasil analisa regresi pada **Gambar 3** memperlihatkan bahwa

penambahan kadar granit sebagai substitusi parsial agregat kasar mengurangi permeabilitas beton hingga kadar optimum sebesar 29,35% dengan nilai koefisien permeabilitas $2,63 \cdot 10^{-12}$ cm/s dan akan kembali besar nilainya ketika melebihi kadar optimum.

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa sampai kadar optimum beton dengan substitusi parsial agregat kasar dengan granit memiliki permeabilitas yang lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa substitusi limbah granit. Granit memiliki massa jenis yang lebih besar dari kerikil biasa yang berarti granit lebih padat dibandingkan dengan kerikil biasa. Granit juga memiliki *absorption* yang lebih rendah dibandingkan dengan kerikil biasa. Hal tersebut menunjukkan bahwa granit dapat akan berpengaruh terhadap *workability* dan permeabilitas beton.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis perhitungan data, dan pembahasan yang dilakukan pada beton substitusi parsial agregat kasar dengan variasi limbah granit didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi parsial agregat kasar dengan variasi limbah granit tidak mempengaruhi waktu ikat (*setting time*) beton sampai kadar tertentu. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan nilai *initial setting time* dan *final setting time* variasi kadar granit 0%, 15%, 30%, dan 45% fluktuatif dan nilai koefisien determinasi (R^2) pada regresi linear hanya bernilai 0,5 dan 0,3. Hal tersebut karena *setting time* beton dipengaruhi oleh dua komponen yaitu reaksi antara air dan semen atau bahan tambah lain sehingga substitusi parsial agregat kasar menggunakan granit tidak berpengaruh.
2. Berdasarkan hasil penelitian selama 72 jam dengan tekanan 5 kg/cm^2 nilai permeabilitas pada beton substitusi parsial limbah granit 0%, 15%, 30%, dan 45% berturut-turut adalah $4,11 \times 10^{-12}$ cm/s; $3,48 \times 10^{-12}$ cm/s; $2,17 \times 10^{-12}$ cm/s; dan $3,25 \times 10^{-12}$ cm/s. Kadar substitusi parsial agregat kasar dengan limbah granit optimum pada kadar 29,35% dengan nilai koefisien permeabilitas yaitu $2,63 \times 10^{-12}$ cm/s.

Saran

1. Membuat benda uji tambahan lebih banyak lagi untuk mengantisipasi adanya kerusakan.
2. Membuat variasi dengan interval yang lebih kecil didaerah maksimum sehingga didapatkan hasil yang lebih optimum.

6. REFERENSI

- Albefanido, R. (2023). *Pengaruh penggunaan limbah keramik granite alam sebagai pengganti agregat kasar terhadap kuat tekan beton memadat sendiri (self compacting concrete)* [Thesis, Diploma Teknik Sipil]. Universitas Bung Hatta.
- Isnaini, N. (2020). Pengaruh penambahan CaCO_3 sebagai filler pada semen OPC (Ordinary Portland Cement) terhadap performa setting time dan kuat tekan (Studi kasus PT. Semen Indonesia). *Jurnal Fisika dan Terapannya*, 7(2), 97–106.
- Najwa. (2024). *Kajian kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton variasi kadar granit sebagai substitusi parsial agregat kasar* [Skripsi S1 Teknik Sipil]. Universitas Sebelas Maret.
- Prasetya, R. Y. (2016). *Analisis kuat tekan dan permeabilitas beton dengan agregat halus campuran pasir merah Purwodadi dan pasir Kaliworo Klaten* [Tugas Akhir S1 Teknik Sipil]. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Tjokrodimulyo, K. (2007). *Teknologi beton*. Biro Penerbit Teknik Sipil Keluarga Mahasiswa Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.