

KAJIAN PENGARUH VARIASI RESIN EPOXY DAN FLY ASH 5% SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP KUAT LEKAT, PANJANG PENYALURAN, SUSUT KERING, DAN KARBONASI PADA POLYMER CEMENT CONCRETE.

Muhammad Akbar Fahrezi ¹⁾, Muhammad Thoriq Azza ²⁾, Wibowo ³⁾, Setiono ⁴⁾

¹⁻⁴ Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jl. Ir. Sutami 36A, Ketingan Surakarta, Jawa Tengah 57126, Telp (0271) 647069, Fax 662118
Email: akbarfahrezi35@gmail.com

ABSTRACT

The continuously growing construction sector in Indonesia drives innovations in stronger, more durable, and environmentally friendly concrete materials. This study aims to analyze the effect of epoxy resin variations at 0%, 2%, 4%, and 6% of the total binder on Polymer Cement Concrete (PCC) with 5% fly ash substitution regarding bond strength, development length, drying shrinkage, and carbonation. An experimental method was conducted using 20 cm cube specimens for bond strength and development length testing via a Universal Testing Machine (UTM), along with beam and cylinder specimens for drying shrinkage and carbonation tests up to 28 days of concrete age. The results showed that the bond strength values were 14.64 MPa, 18.04 MPa, 21.28 MPa, and 16.68 MPa, respectively, with development lengths of 77.75 mm, 63.93 mm, 53.86 mm, and 67.94 mm. Meanwhile, the addition of epoxy resin significantly reduced drying shrinkage from 317 to 283, 233, and 217 microstrain, and decreased carbonation depth from 8.81 mm to 6.77 mm, 4.62 mm, and 2.17 mm, respectively. This improvement in durability and microstructure density is attributed to the epoxy resin filling the concrete pores and the pozzolanic reaction of fly ash producing additional C-S-H. The 4% level emerged as the optimum epoxy resin variation for mechanical properties, yielding the highest bond strength and the lowest development length. Excessive use of epoxy (above 4%) was proven to disrupt the cement hydration process, thereby reducing bond strength. In conclusion, the use of up to 6% epoxy resin alongside 5% fly ash is highly effective in enhancing the microstructure density and durability of PCC, with 4% being the optimum level for structural performance.

Keywords: Polymer Cement Concrete (PCC), Epoxy Resin, Fly Ash, Bond Strength, Drying Shrinkage, Carbonation.

ABSTRAK

Sektor konstruksi di Indonesia yang terus berkembang mendorong inovasi material beton yang lebih kuat, tahan lama, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi resin epoksi sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% dari total pengikat (*binder*) pada *Polymer Cement Concrete* (PCC) dengan substitusi *fly ash* 5% terhadap kuat lekat, panjang penyaluran, susut kering, dan karbonasi. Metode yang digunakan adalah eksperimental menggunakan benda uji berupa kubus bersisi 20 cm untuk pengujian kuat lekat dan panjang penyaluran menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM), serta benda uji balok dan silinder untuk pengujian susut kering dan karbonasi hingga umur beton 28 hari. Hasil penelitian

Article History

Received: Agustus 2026
Reviewed: Agustus 2026
Published: Agustus 2026

Plagiarism Checker No
237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



menunjukkan nilai kuat lekat berturut-turut sebesar 14,64 MPa; 18,04 MPa; 21,28 MPa; dan 16,68 MPa, dengan panjang penyaluran sebesar 77,75 mm; 63,93 mm; 53,86 mm; dan 67,94 mm. Sementara itu, penambahan resin epoksi menurunkan susut kering secara signifikan secara berturut-turut dari 317 menjadi 283, 233, dan 217 mikrostrain, serta menurunkan kedalaman karbonasi dari 8,81 mm menjadi 6,77 mm, 4,62 mm, dan 2,17 mm. Peningkatan durabilitas dan kerapatan struktur mikro ini disebabkan oleh resin epoksi yang mengisi pori beton serta reaksi pozzolanik *fly ash* yang menghasilkan C-S-H tambahan. Kadar 4% menjadi variasi resin epoksi optimum untuk sifat mekanis karena menghasilkan kuat lekat tertinggi dan panjang penyaluran terendah. Penggunaan epoksi yang berlebihan (di atas 4%) terbukti mengganggu proses hidrasi semen sehingga menurunkan kuat lekat. Kesimpulannya, penggunaan resin epoksi hingga 6% bersama 5% *fly ash* sangat efektif meningkatkan kerapatan struktur mikro dan durabilitas beton PCC, dengan kadar 4% sebagai titik optimum untuk kinerja strukturalnya.

Kata Kunci : *Polymer Cement Concrete (PCC), Resin Epoksi, Fly Ash, Kuat Lekat, Susut Kering, Karbonasi.*

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki kuat tekan tinggi, daya tahan yang baik, serta mudah dalam pelaksanaan konstruksi. Namun, beton konvensional masih memiliki kelemahan berupa porositas yang dapat menjadi jalur masuk air dan zat kimia penyebab korosi pada baja tulangan. Selain itu, penggunaan semen dalam jumlah besar juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan akibat tingginya emisi karbon dari proses produksinya. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material beton yang tidak hanya memiliki performa mekanik yang baik, tetapi juga lebih ramah lingkungan.

Polymer Cement Concrete (PCC) dikembangkan sebagai salah satu solusi untuk meningkatkan kualitas beton melalui penambahan bahan polimer, seperti resin *epoxy*, yang mampu memperbaiki mikrostruktur beton. Resin *epoxy* dapat mengisi pori-pori dan retakan halus pada beton sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat, mengurangi permeabilitas, serta meningkatkan daya lekat antara beton dan baja tulangan. Selain itu, penggunaan *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan karena mampu memanfaatkan limbah hasil pembakaran batu bara yang memiliki sifat pozzolanik dan dapat meningkatkan mutu beton seiring bertambahnya umur beton.

Pada struktur beton bertulang, kuat lekat dan panjang penyaluran merupakan aspek penting karena berperan dalam proses transfer gaya antara baja tulangan dan beton. Ikatan yang baik diperlukan agar gaya tarik dapat disalurkan secara optimal tanpa terjadi slip maupun kegagalan struktur. Selain itu, kombinasi resin epoksi dan *fly ash* ini diharapkan mampu mereduksi retak akibat penyusutan dan meningkatkan ketahanan karbonasi, sehingga menghasilkan material PCC dengan mutu dan keawetan optimal untuk aplikasi infrastruktur modern. Oleh karena itu,



pengujian kuat lekat dan panjang penyaluran diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan resin *epoxy* dan *fly ash* terhadap performa beton bertulang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi resin *epoxy* sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% dengan substitusi *fly ash* 5% terhadap kuat lekatn panjang penyaluran, susut kering, dan kedalaman karbonasi pada *Polymer Cement Concrete*.

TINJAUAN PUSTAKA

Pesatnya pembangunan infrastruktur modern saat ini sangat bergantung pada penggunaan beton konvensional karena nilai ekonomis dan kuat tekannya yang tinggi. Namun, material ini memiliki kelemahan bawaan, yaitu rentan terhadap gaya tarik dan memiliki porositas alami. Porositas inilah yang menjadi celah bagi masuknya air dan gas berbahaya, sehingga memicu masalah penyusutan volume serta kerentanan terhadap korosi pada baja tulangan. Untuk menanggulangi keterbatasan tersebut, inovasi material terus dikembangkan, salah satunya melalui penciptaan *Polymer Cement Concrete* (PCC). Sebagai beton modifikasi, PCC memanfaatkan polimer baik sebagai bahan tambah maupun pengganti sebagian bahan pengikat. Penambahan ini telah terbukti secara ilmiah mampu memperbaiki mikrostruktur, mengurangi tingkat porositas, serta meningkatkan daya tahan beton secara keseluruhan saat menghadapi kondisi lingkungan yang agresif (Wang et al., 2016).

Dalam pengaplikasiannya, salah satu jenis polimer yang paling masif digunakan pada PCC adalah resin epoksi. Material yang terdiri dari resin dan hardener ini akan mengalami proses polimerisasi saat dicampurkan, membentuk sebuah struktur matriks berkekuatan tinggi. Kehadiran epoksi secara efektif dapat meningkatkan kuat tekan, tarik, lentur, serta resistensi beton terhadap serangan kimia, di mana kinerjanya sangat dipengaruhi oleh jenis resin dan rasio pencampuran (Mridha et al., 2024). Untuk memaksimalkan performa tersebut, PCC kerap dikombinasikan dengan bahan pozzolanik seperti *fly ash*, yang merupakan limbah sisa pembakaran batu bara. Selain berfungsi untuk mengurangi konsumsi semen dan emisi karbon (Badan Standarisasi Nasional, 2019), *fly ash* yang kaya akan silika dan alumina berkontribusi langsung pada peningkatan mutu beton. Sejumlah studi telah membuktikan efektivitas kedua bahan ini. Misalnya, penelitian Alfianto (2023) dan Setiyarto & Pradana (2022) mengonfirmasi bahwa penambahan resin epoksi pada kadar tertentu terbukti meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan. Di sisi lain, Syaka (2013) menemukan bahwa substitusi 5% *fly ash* sebagai pengganti semen merupakan proporsi paling optimal untuk memaksimalkan kekuatan mekanik. Beranjak dari temuan-temuan tersebut, penggabungan epoksi hingga batas 6% dengan proporsi konstan 5% *fly ash* menjadi sebuah langkah inovatif yang menjanjikan untuk dieksplorasi lebih lanjut.

Peningkatan performa pada beton PCC hasil kombinasi ini tidak terjadi secara begitu saja, melainkan melalui sinergi tiga reaksi kimia yang berlangsung secara simultan di dalam matriks campuran. Reaksi pertama diawali oleh proses hidrasi semen yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai penyumbang kekuatan utama beton, sekaligus melepaskan kalsium hidroksida sebagai produk sampingannya. Selanjutnya, partikel halus *fly ash* memicu reaksi pozzolanik dengan mengikat kalsium hidroksida sisa hidrasi tersebut untuk menciptakan



senyawa C-S-H tambahan yang secara efektif mengisi celah-celah mikropori. Pada saat yang bersamaan, resin epoksi dan hardener mengalami proses polimerisasi berupa ikatan silang (crosslinking). Ketika beton mulai mengeras dan kehilangan air, polimer ini beralih bentuk menjadi lapisan film yang menyelimuti rongga pori dan berbau erat dengan struktur matriks beton. Hasil akhirnya adalah sebuah material komposit yang jauh lebih padat, tangguh, dan kedap.

Untuk memastikan bahwa inovasi material ini benar-benar layak diaplikasikan pada struktur nyata, serangkaian evaluasi yang komprehensif mutlak diperlukan, baik pada fase beton segar maupun setelah mengeras. Pada tahap awal, uji slump krusial untuk memastikan bahwa campuran memiliki workability atau kemudahan pengerjaan yang memadai di lapangan. Setelah beton mencapai umur 28 hari, fokus evaluasi bergeser pada parameter struktural dan durabilitas jangka panjang. Pada aspek struktural, interaksi antara beton dan baja tulangan dievaluasi melalui parameter kuat lekat dan panjang penyaluran. Kuat lekat merepresentasikan kemampuan beton menahan gaya agar tidak terjadi pelepasan ikatan dengan tulangan, sementara panjang penyaluran memastikan gaya tarik dapat ditransfer sepenuhnya tanpa memicu slip atau kegagalan struktur. Kepadatan matriks PCC berkat epoksi dan fly ash diharapkan mampu mengoptimalkan cengkraman ini.

Di samping kekuatan mekanik, durabilitas material juga menjadi fokus utama melalui pengujian susut kering dan karbonasi. Sifat elastis dari jaringan polimer di dalam PCC diproyeksikan mampu meredam retak mikro yang lazim terjadi akibat penguapan air saat proses penyusutan. Lebih jauh lagi, struktur pori yang sangat rapat diharapkan menjadi perisai yang tangguh dalam memblokir penetrasi gas CO₂. Perlindungan terhadap karbonasi ini sangat vital, sebab masuknya gas tersebut dapat mereduksi pH beton dari kondisi basa kuat menjadi netral, yang pada akhirnya akan menghancurkan lapisan anti-karat pelindung tulangan baja. Dengan demikian, penerapan teknologi PCC tidak hanya sekadar meningkatkan kinerja struktural, tetapi juga menjadi solusi komprehensif dalam memperpanjang umur layan infrastruktur beton bertulang di masa depan.

Rumus pendekatan yang dapat digunakan untuk menghitung kuat lekat menggunakan rumus RILEMCEB RC 6 (1983) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{P}{\pi \phi L_d} \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

- μ = kuat lekat (MPa)
- P = beban (kN)
- ϕ = diameter tulangan (mm)
- L_d = panjang penjangkaran (mm)

Rumus pendekatan yang dapat digunakan untuk menghitung panjang penyaluran menggunakan rumus RILEMCEB RC 6 (1983) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$L_d = \frac{1}{4} \times \frac{\phi \times f_y}{\mu} \dots\dots\dots [2]$$

Keterangan:

- L_d = panjang penyaluran (mm)
- ϕ = diameter baja tulangan (mm)
- f_y = tegangan leleh baja tulangan (MPa)
- μ = kuat lekat (MPa)

Rumus pendekatan yang dapat digunakan untuk menghitung susut kering menggunakan rumus berikut :

$$\epsilon_{Sh} = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots [3]$$

Keterangan:

- ϵ_{Sh} = besar nilai shrinkage
- ΔL = perubahan panjang setelah t waktu (mm)
- L_0 = panjang mula-mula (mm)

Rumus pendekatan yang dapat digunakan untuk menghitung karbonasi menggunakan rumus berikut :

$$k = \frac{x}{t^{1/2}} \dots\dots\dots [4]$$

Keterangan:

- k = koefisien karbonasi (mm/tahun)
- x = kedalaman karbonasi (mm)
- t = waktu paparan (tahun)

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Gedung 5, Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret Surakarta. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk penentuan material penyusun, dilanjutkan dengan pemeriksaan karakteristik bahan guna memastikan kesesuaiannya dengan standar acuan, hingga bermuara pada tahap pembuatan dan pengujian benda uji. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji karakteristik *Polymer Cement Concrete* (PCC) guna menghasilkan inovasi beton dengan kekuatan, fleksibilitas, dan daya tahan tinggi, khususnya terhadap parameter kuat lekat, panjang penyaluran, susut kering, dan kedalaman karbonasi.

Dalam pelaksanaannya, penelitian ini menetapkan dua variabel utama. Variabel bebas yang digunakan adalah variasi kadar *admixture* berupa cairan polimer resin epoksi sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% dari berat semen, yang dikombinasikan dengan penambahan *fly ash* sebesar 5% sebagai substitusi sebagian semen. Sementara itu, variabel terikatnya adalah parameter kinerja beton PCC itu sendiri, yang mencakup nilai kuat lekat, panjang penyaluran, susut kering, dan karbonasi.

Untuk mengevaluasi parameter tersebut, dibuat beberapa klasifikasi benda uji sesuai dengan jenis pengujiannya. Pengujian kuat lekat dan panjang penyaluran menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang sisi 20 cm, yang dibuat sebanyak 3 (tiga) buah untuk setiap variasi kadar. Pengujian mekanik ini dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) pada saat beton telah mengeras sempurna di umur 28 hari. Di sisi lain, untuk pengujian parameter durabilitas, digunakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran 30 cm x 10 cm x 10 cm untuk pengujian susut kering, serta benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm untuk pengujian karbonasi. Pemantauan susut kering dan karbonasi pada beton PCC ini dilakukan secara berkala mulai dari umur beton 1 hari hingga mencapai umur 28 hari. Kebutuhan benda uji kuat lekat dan panjang penyaluran dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan kebutuhan benda uji susut kering dan karbonasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji Kuat Lekat dan Panjang Penyaluran

No.	Kode Benda Uji	Resin Epoxy	Fly Ash	Umur (hari)	Jumlah Benda Uji
1	PCC-RE 0%-KL	0%	5%	28	3
2	PCC-RE 2%-KL	2%	5%	28	3
3	PCC-RE 4%-KL	4%	5%	28	3
4	PCC-RE 6%-KL	6%	5%	28	3
Jumlah Benda Uji					12

Tabel 2. Jumlah Benda Uji Susut Kering dan Karbonasi

No.	Kadar Po-limer	Kadar Fly ash	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah Benda Uji
UJI SUSUT					
1	0%	5%	PCC-RE-0%-S	28	3
2	2%	5%	PCC-RE-2%-S	28	3
3	4%	5%	PCC-RE-4%-S	28	3
4	6%	5%	PCC-RE-6%-S	28	3
Total Benda Uji Susut					12
UJI KARBONASI					
1	0%	5%	PCC-RE-0%-K	7 14 28	9
2	2%	5%	PCC-RE-2%-K	7 14 28	9
3	4%	5%	PCC-RE-4%-K	7 14 28	9
4	6%	5%	PCC-RE-6%-K	7 14 28	9
Total Benda Uji Karbonasi					36
Total Benda Uji Keseluruhan					48

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang Campur (*Mix Design*)

Rancang campur *Polymer Cement Concrete* dengan penambahan *fly ash* 5% dan variasi resin *epoxy* sebagai substitusi semen dibuat berdasarkan komposisi dari penelitian yang telah dilakukan oleh Joerda Foulhudan, Dwi Nurtanto, dan Krisnamurti (2022) dengan acuan SNI 7656:2012. FAS yang digunakan adalah sebesar 0,4. Rekapitulasi rancang campur beton dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 3. Rekapitulasi Rancang Campur *Polymer Cement Concrete*

Variasi Benda Uji	Agregat		Cementitious			Air (kg/m ³)
	Agregat Halus (kg/m ³)	Agregat Kasar (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Resin Epoxy (kg/m ³)	
FA5%-RE0%	736,23	995,87	432,78	22,78	0,00	182,08
FA5%-RE2%	736,23	995,87	423,67	22,78	9,11	182,08
FA5%-RE4%	736,23	995,87	414,56	22,78	18,22	182,08
FA5%-RE6%	736,23	995,87	405,45	22,78	27,33	182,08

Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Data hasil pengujian kuat tarik pada baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 4. Hasil uji kuat tarik baja tulangan

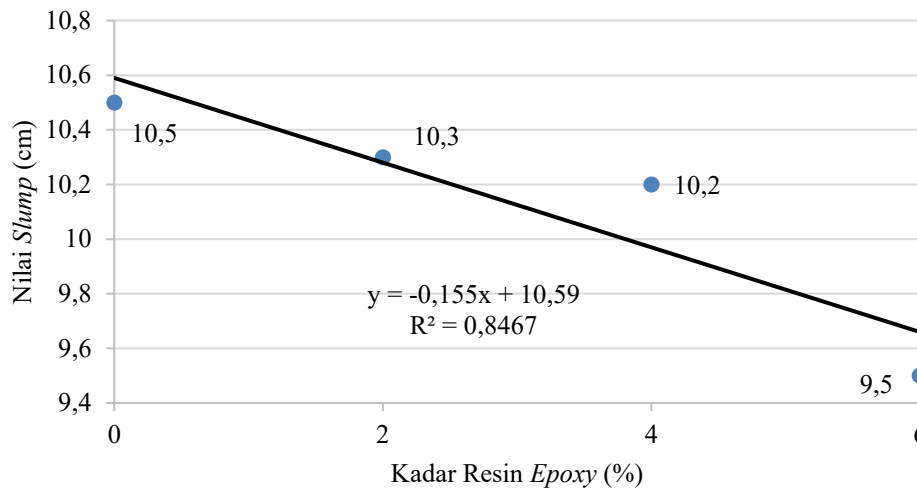
Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	P Leleh (kN)	P Maks (kN)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Leleh Rata-rata (MPa)
A	10,12	80,42	36,19	43,5	449,99	450,03
B	10,25	82,50	37,13	43,3	450,06	
C	10,19	81,53	36,69	42,8	450,01	
D	10,07	79,68	35,86	42,3	450,08	

Hasil pengujian kuat tarik pada baja tulangan menunjukkan bahwa mutu baja ulir/sirip yang digunakan pada benda uji kuat lekat dengan diameter 10 mm dan tegangan leleh rata-rata 450,3 MPa termasuk ke dalam kategori BjTS 420B (SNI 2052-2017).

Pengujian Beton Segar

Parameter beton segar yang digunakan pada penelitian ini adalah *workability* atau kemudahan pengerjaan, yang dievaluasi melalui pengujian *slump*. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*flowability*) dari *Polymer Cement Concrete* dengan variasi resin *epoxy*. Pelaksanaan uji slump menggunakan alat kerucut abrams mengacu pada ketentuan SNI

1972:2008 tentang “Metode Uji Slump Beton”. Prosedur pengujian dilakukan dengan cara mengisi cetakan kerucut terpancung dalam tiga lapisan, di mana setiap lapisan dipadatkan sebanyak 25 kali menggunakan batang penumbuk baja. Setelah itu, cetakan diangkat secara vertikal secara perlahan untuk mengamati penurunan tinggi beton (*slump*). Nilai *slump* yang diperoleh digunakan sebagai indikator untuk menilai konsistensi dan tingkat kemudahan pengerjaan beton. Data hasil pengujian slump pada *Polymer Cement Concrete* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1. Hasil Pengujian *Slump Polymer Cement Concrete*

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa nilai *slump* beton PCC dengan variasi penambahan resin *epoxy* cenderung mengalami penurunan. Nilai *slump* tertinggi diperoleh pada campuran tanpa resin *epoxy* (0%) sebesar 10,5 cm. Selanjutnya terjadi penurunan pada variasi 2%, 4%, dan 6% dengan nilai masing-masing 10,3 cm; 10,2 cm; dan 9,5 cm.

Penurunan nilai *slump* tersebut menunjukkan bahwa penambahan resin *epoxy* memengaruhi *workability* beton. Hal ini disebabkan oleh sifat resin *epoxy* yang memiliki viskositas tinggi dan tidak dapat bercampur sempurna dengan air, sehingga memengaruhi distribusi air dalam campuran beton. Kehadiran resin *epoxy* juga mengisi sebagian volume yang seharusnya ditempati oleh air, serta membentuk lapisan film pada permukaan material yang menghambat fungsi air dalam melumasi butiran agregat dan mengurangi gesekan.

Selain itu, penambahan resin *epoxy* meningkatkan kohesi dalam campuran akibat sifat polimernya, sehingga beton segar menjadi lebih kaku. Kondisi ini menyebabkan nilai *slump* menurun dan *workability* beton berkurang, karena peran air sebagai pengencer menjadi tidak optimal akibat pengaruh viskositas resin *epoxy*.

Pengujian Kuat Lekat Beton

Pada pengujian kuat lekat beton digunakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang sisi 20 cm yang telah mencapai umur 28 hari. Hasil perhitungan kuat lekat pada saat terjadi slip 0,25 mm disajikan pada Tabel 4.

Tabel 5. Hasil perhitungan kuat lekat saat terjadi slip 0,25 mm

Kadar Resin <i>Epoxy</i>	Kode Benda Uji	P saat Slip 0,25 mm (kN)	Kuat Lekat (MPa)	Rata-rata Kuat Lekat (MPa)
0%	A	10,17	6,47	7,35
	B	14,18	9,03	
	C	10,29	6,55	
2%	A	15,40	9,80	9,89
	B	15,20	9,68	
	C	16,00	10,19	
4%	A	19,00	12,10	13,10
	B	20,75	13,21	
	C	22,00	14,01	
6%	A	15,20	9,68	9,04
	B	13,00	8,28	
	C	14,40	9,17	

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai kuat lekat saat *slip* 0,25 mm mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar resin *epoxy* dari 0% hingga 4%. Pada kadar 0% kuat lekat sebesar 7,35 MPa, kemudian meningkat menjadi 9,89 MPa pada kadar 2%, dan mencapai nilai maksimum sebesar 13,10 MPa pada kadar 4%. Namun, setelah melewati kadar tersebut, nilai kuat lekat mengalami penurunan pada kadar 6% menjadi sebesar 9,04 MPa.

Hasil perhitungan kuat lekat saat beban maksimum dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 6. Hasil perhitungan kuat lekat saat beban maksimum

Kadar Resin <i>Epoxy</i>	Kode Benda Uji	P maks (kN)	Kuat Lekat (MPa)	Rata-rata Kuat Lekat (MPa)
0%	A	23,40	14,90	14,64
	B	24,60	15,66	
	C	21,00	13,37	
2%	A	28,70	18,27	18,04
	B	27,30	17,38	
	C	29,00	18,46	
4%	A	34,50	21,96	21,28
	B	33,80	21,52	
	C	32,00	20,37	
6%	A	27,10	17,25	16,68
	B	25,50	16,23	
	C	26,00	16,55	

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai kuat lekat saat beban maksimum mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar resin *epoxy* dari 0% hingga 4%. Pada kadar 0% kuat lekat sebesar 14,64 MPa, kemudian meningkat menjadi 18,04 MPa pada kadar 2%, dan mencapai nilai

maksimum sebesar 21,28 MPa pada kadar 4%. Namun, setelah melewati kadar tersebut, nilai kuat lekat mengalami penurunan pada kadar 6% menjadi sebesar 16,68 MPa.

Berdasarkan hasil pengujian, Nilai kuat lekat maksimum pada *Polymer Cement Concrete* diperoleh pada variasi 4%. Pada kadar tersebut, resin *epoxy* berperan optimal sebagai bahan perekat yang mampu meningkatkan ikatan antara pasta semen, agregat, dan permukaan tulangan. Selain itu, keberadaan *fly ash* sebagai bahan pozzolan juga berkontribusi dalam memperbaiki struktur mikro beton dengan mengisi pori-pori halus, sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan memiliki porositas yang rendah. Kondisi ini memungkinkan terbentuknya ikatan yang lebih kuat antara beton dan tulangan. Namun, ketika kadar resin *epoxy* ditingkatkan menjadi 6% terjadi penurunan kuat lekat. Hal ini disebabkan penggunaan kadar resin *epoxy* yang berlebihan dapat mengganggu proses hidrasi semen dan menurunkan ikatan mekanis antara beton dan tulangan. Selain itu, kadar resin *epoxy* yang terlalu tinggi dapat membentuk lapisan film pada permukaan agregat dan tulangan, sehingga ikatan antara beton dan tulangan menjadi kurang optimal.

Perhitungan Panjang Penyaluran Baja Tulangan

Berdasarkan hasil perhitungan nilai kuat lekat yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan panjang penyaluran tulangan pada *Polymer Cement Concrete* dengan variasi resin *epoxy*. Perhitungan ini menggunakan persamaan RILEMCEB RC6 (1983). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Panjang Penyaluran

No.	Variasi Kadar Resin Epoxy	Kuat Lekat (MPa)	Panjang Penyaluran (mm)
1	0%	14,64	77,75
2	2%	18,04	63,93
3	4%	21,28	53,86
4	6%	16,68	67,94

Berdasarkan hasil perhitungan kuat lekat, nilai panjang penyaluran baja tulangan dapat ditentukan melalui substitusi ke dalam persamaan RILEMCEB RC6. Hasil perhitungan menunjukkan adanya hubungan yang berbanding terbalik antara kuat lekat dan panjang penyaluran pada variasi resin *epoxy* 0%, 2%, 4%, dan 6%. Pada variasi 0%, nilai kuat lekat sebesar 14,64 MPa menghasilkan panjang penyaluran sebesar 77,75 mm. Pada variasi 2%, peningkatan kuat lekat menjadi 18,04 MPa menyebabkan panjang penyaluran menurun menjadi 63,93 mm. Selanjutnya, variasi 4% menghasilkan nilai kuat lekat tertinggi sebesar 21,28 MPa dengan panjang penyaluran terkecil sebesar 53,86 mm. Namun, pada variasi 6%, nilai kuat lekat menurun menjadi 16,68 MPa sehingga panjang penyaluran kembali meningkat menjadi 67,94 mm.

Hal tersebut terjadi karena kuat lekat menunjukkan kemampuan beton dalam menahan dan meneruskan gaya tarik dari baja tulangan. Jika nilai kuat lekat rendah, ikatan antara beton dan baja tulangan menjadi lebih lemah sehingga gaya tarik tidak dapat disalurkan secara optimal dalam jarak pendek. Oleh karena itu, diperlukan panjang penyaluran yang lebih besar agar



tulangan tidak mengalami slip saat menerima beban. Sebaliknya, apabila nilai kuat lekat tinggi, ikatan antara beton dan baja tulangan menjadi lebih kuat sehingga gaya tarik dapat disalurkan dengan lebih efektif dan panjang penyaluran yang dibutuhkan menjadi lebih pendek.

Pengujian Susut Kering Beton

Pada pengujian susut kering beton digunakan benda uji berbentuk balok dengan panjang 30 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm dari umur 1 sampai 28 hari tanpa metode curing. Hasil perhitungan susut kering disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan susut kering PCC

Kadar Resin <i>Epoxy</i>	Kode Benda Uji	Shrinkage (10^{-6} mm)	Rata-rata	Presentase Penurunan (%)
0%	A	350	316,67	-
	B	300		
	C	300		
2%	A	300	283,33	10,53
	B	250		
	C	300		
4%	A	200	233,33	26,32
	B	250		
	C	250		
6%	A	200	216,67	31,58
	B	200		
	C	250		

Tabel 4 menunjukkan bahwa penambahan variasi *resin epoxy* menurunkan nilai susut beton. Penggunaan variasi *resin epoxy* sebagai substitusi semen pada PCC dengan *fly ash* dapat menurunkan nilai susut pada beton. Nilai susut tertinggi terjadi pada beton dengan variasi *resin epoxy* 0% pada waktu 28 hari, yaitu 317 microstrain, sedangkan penggunaan kadar *resin epoxy* 6% dapat mengurangi susut kering pada beton yaitu menjadi 217 microstrain. Dengan mensubstitusikan semen pada PCC dengan variasi *resin epoxy* 2%; 4%; dan 6% berturut-turut akan menurunkan nilai susut pada beton rata-rata sebesar 10,53%, 26,32%, dan 31,58%. Berdasarkan hasil di atas dapat disimpulkan bahwa penggunaan *resin epoxy* dalam uji susut kering pada beton mencapai persentase maksimum pada kadar 6%.

Penurunan susut kering terjadi karena *resin epoxy* mengisi sebagian pori dan rongga pada matriks beton, sehingga porositas berkurang dan jalur keluarnya air dari beton menjadi lebih terbatas. Akibatnya, proses penguapan air bebas dan potensi susut kering cenderung menurun seiring meningkatnya kadar *resin epoxy*.



Pengujian Karbonasi Beton

Hasil pengujian karbonasi saat beban maksimum dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan karbonasi PCC

Nama Benda Uji	Waktu Rendaman (Hari)	Kedalaman Karbonasi (mm)			Kedalaman Rata-rata (mm)	Penurunan (%)
		A	B	C		
PCC-0%	7	6,57	6,78	6,16	6,50	-
	14	7,21	7,34	6,99	7,18	-
	28	8,89	9,05	8,5	8,81	-
PCC-2%	7	5,02	5,2	4,81	5,01	22,96
	14	6,43	6,4	6,21	6,35	11,61
	28	6,59	7,01	6,71	6,77	23,18
PCC-4%	7	3,02	3,25	2,85	3,04	53,25
	14	3,78	3,9	3,65	3,78	47,40
	28	4,59	4,82	4,45	4,62	47,58
PCC-6%	7	1,18	1,2	1,14	1,17	81,96
	14	1,44	1,5	1,4	1,45	79,85
	28	2,15	2,27	2,1	2,17	75,34

Tabel 5 pada beton PCC dengan variasi *resin epoxy* 0% diperoleh nilai kedalaman rata-rata karbonasi pada perendaman 7 hari sebesar 6,50 mm, pada perendaman 14 hari sebesar 7,18 mm, dan pada perendaman 28 hari sebesar 8,81 mm. Kedalaman karbonasi pada beton PCC dengan variasi *resin epoxy* 2% diperoleh nilai kedalaman rata-rata karbonasi pada perendaman 7 hari sebesar 5,01 mm, pada perendaman 14 hari sebesar 6,35 mm, dan pada perendaman 28 hari sebesar 6,71 mm. Kedalaman karbonasi pada beton PCC dengan variasi *resin epoxy* 4% diperoleh nilai kedalaman rata-rata karbonasi pada perendaman 7 hari sebesar 2,85 mm, pada perendaman 14 hari sebesar 3,65 mm, dan pada perendaman 28 hari sebesar 4,62 mm. Kedalaman karbonasi pada beton PCC dengan variasi *resin epoxy* 6% diperoleh nilai kedalaman rata-rata karbonasi pada perendaman 7 hari sebesar 1,17 mm, pada perendaman 14 hari sebesar 1,45 mm, dan pada perendaman 28 hari sebesar 2,17 mm.

Hasil pengujian karbonasi dapat turun karena reaksi pozzolanik yang mengubah Ca(OH)_2 menjadi C-S-H tambahan. Hal ini menghambat dan mengurangi reaksi Ca(OH)_2 dengan H_2CO_3 yang merupakan hasil reaksi antara CO_2 dengan air sehingga laju karbonasi berkurang. Reaksi pozzolanik juga meningkatkan kuat tekan dan daya rekat antar partikel agregat yang ada dalam beton melalui reaksi kimia. Akibatnya, tingkat porositas dan permeabilitas beton berkurang.



KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian *Polymer Cement Concrete* dengan *fly ash* 5% dan variasi kadar resin *epoxy* adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat lekat saat *slip* 0,25 mm dengan variasi kadar resin *epoxy* 0%; 2%; 4%; dan 6% masing-masing bernilai 7,35 MPa; 9,89 MPa; 13,10 MPa; dan 9,04 MPa. Nilai kuat lekat beton maksimum saat *slip* 0,25 mm terjadi pada kadar resin *epoxy* 4% dengan nilai kuat lekat sebesar 13,10 MPa.
2. Berdasarkan hasil pengujian kuat lekat saat beban maksimum dengan variasi kadar resin *epoxy* 0%; 2%; 4%; dan 6% masing-masing bernilai 14,64 MPa; 18,04 MPa; 21,28 MPa; dan 16,68 MPa. Nilai kuat lekat beton maksimum saat beban maksimum terjadi pada kadar resin *epoxy* 4% dengan nilai kuat lekat sebesar 21,28 MPa.
3. Panjang penyaluran baja tulangan pada *Polymer Cement Concrete* dengan variasi kadar resin *epoxy* 0%; 2%; 4%; dan 6% masing-masing bernilai 77,75 mm; 63,93 mm; 53,86 mm; 67,94 mm. Panjang penyaluran terpendek terjadi pada variasi resin *epoxy* 4% dengan nilai 53,86 mm. Panjang penyaluran berbanding terbalik dengan kuat lekat beton. Semakin tinggi nilai kuat lekat beton, maka panjang penyaluran baja tulangan yang dibutuhkan akan semakin pendek. Sebaliknya, apabila kuat lekat beton rendah, maka panjang penyaluran yang diperlukan menjadi lebih panjang agar tulangan tetap mampu menyalurkan gaya secara optimal.
4. Berdasarkan hasil penelitian, penambahan variasi *resin epoxy* akan menurunkan nilai susut kering pada kadar tertentu hingga batas optimumnya. Hasil pengujian susut kering pada benda uji beton variasi *resin epoxy* 0%, 2%, 4%, dan 6% pada umur 28 hari berdasarkan pengujian laboratorium masing-masing kadar adalah sebagai berikut 317 μ , 283 μ , 233 μ , dan 217 μ .
5. Hasil nilai kedalaman karbonasi memenuhi syarat beton kedap air yang ditetapkan oleh SNI 03-2914-1992 yaitu kedalaman karbonasi tidak lebih dari 30 mm untuk syarat agresif sedang dan tidak lebih dari 50 mm untuk syarat agresif kuat. Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan *fly ash* dan variasi *resin epoxy* pada PCC dapat menurunkan nilai kedalaman karbonasi beton. Kedalaman karbonasi pada perendaman 7 hari untuk variasi 0%; 2%; 4%; dan 6% masing-masing adalah 6,50; 5,01; 3,04; dan 1,17 (mm). Kedalaman karbonasi pada perendaman 14 hari untuk variasi yang sama masing-masing adalah 7,18; 6,35; 3,78; dan 1,45 (mm). Sementara itu, kedalaman karbonasi pada perendaman 28 hari untuk variasi yang sama masing-masing adalah 8,81; 6,77; 4,62; dan 2,17 (mm).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada dosen pembimbing, tim skripsi *Polymer Cement Concrete*, Laboratorium Bahan Konstruksi Universitas Sebelas Maret, *Batching Plant* Javan Beton Indo *Precast*, dan PT. SCG Readymix Indonesia (Jayamix) Plant Solo atas bantuan yang sudah diberikan untuk penelitian ini. Terimakasih juga kepada keluarga serta teman-teman yang telah mendoakan dan mendukung sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.



REFERENSI

- Alfiyanto, M. D. Y. (2023). Pengaruh Penambahan Resin *Epoxy* terhadap Kuat Tekan Beton. Universitas Pancasakti Tegal.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Standar Nasional Indonesia*.
- Mridha, N., Zakaria, M., Khan, M. S. R., Rahman, M. M., & Galib, M. O. F. (2024). *Improvement of Concrete Durability and Strength with Epoxy Resin Concrete*. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2(6), 689-699.
[https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(6\).61](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(6).61)
- Setiyarto, Y. D., & Pradana, D. (2022). Pengaruh Penggunaan Zat *Epoxy* terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, 3(1), 12-17.
<https://ojs.unikom.ac.id/index.php/crane>
- Syaka, D. R. W. (2013). Pembuatan Beton Normal dengan *Fly Ash* menggunakan *Mix Desain* yang Dimodifikasi. Universitas Jember.
- Wang, R., Wang, P. M., & Li, X. G. (2016). *Physical and Mechanical Properties of Polymer-Modified Cement Mortars*. *Advanced Material Research*, 1134, 245-248.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1134.245>
- Neville, A. M. (2016). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited..
- Harrison, J., & Mangat, P. (1990). Carbonation of concrete and its effect on reinforcement corrosion. *Magazine of Concrete Research*, 42(153), 101-109.
- (ASTM), A. S. for T. and M. (2019). *Standard Specification for Portland Cement (ASTM C150)*. ASTM International.
- Suresh, B., & Venkatesh, K. (2018). Performance of polymer modified concrete using epoxy resin. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 1165-1173.
- EFNARC. (2005). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures