

Analisis Perilaku Kolom Crumb Rubber Concrete dengan Rectangular Hollow terhadap Beban Lateral Siklik

Jose Andre Gunawan*, Arie Putra Usman, Siti Aisyah Nurjannah

Universitas Sriwijaya, Indonesia

Email: joseandre7053@gmail.com*, arieputrausman@ft.unsri.ac.id,

sitiaaisyahn@ft.unsri.ac.id

Keywords:

crumb rubber concrete;
rectangular hollow column;
cyclic lateral loading; ductility;
energy dissipation.

Kata Kunci:

crumb rubber concrete; kolom
rectangular hollow; pembebanan
lateral siklik; daktilitas; disipasi
energi.

Abstract

This study investigates the structural behavior of rectangular hollow columns made of crumb rubber concrete (CRC) subjected to cyclic lateral loading. The research was motivated by the increasing accumulation of waste tires and the need for sustainable construction materials with adequate seismic performance. Crumb rubber was used as a partial replacement for fine aggregate at substitution levels of 5% and 10%. Material properties were obtained through laboratory testing, including compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, and Poisson's ratio. Subsequently, numerical simulations were conducted using the finite element method in ANSYS to evaluate the structural response of CRC columns with different hollow dimensions under cyclic loading. The evaluated parameters included stiffness degradation, ductility, backbone behavior, and cumulative energy dissipation. The results showed that CRC with 5% crumb rubber substitution achieved the optimum mechanical performance, with a compressive strength of 34.25 MPa and splitting tensile strength of 2.74 MPa. Numerical analysis indicated that columns with smaller hollow dimensions exhibited higher initial stiffness and lateral load capacity, while larger hollow dimensions provided greater deformation capability and energy dissipation. All models satisfied the high ductility criteria based on FEMA 356, indicating stable inelastic behavior under cyclic loading. The study concludes that the variation of hollow dimensions significantly influences the balance between stiffness, strength, and ductility of CRC columns, demonstrating the potential of crumb rubber concrete as a sustainable and ductile structural material for seismic-resistant applications.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur kolom rectangular hollow berbahan crumb rubber concrete (CRC) terhadap pembebanan lateral siklik. Penelitian dilatarbelakangi oleh meningkatnya limbah ban bekas serta kebutuhan material konstruksi berkelanjutan yang memiliki kinerja seismik memadai. Crumb rubber digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus sebesar 5% dan 10%. Parameter material diperoleh melalui pengujian laboratorium yang meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas, dan rasio Poisson. Selanjutnya, dilakukan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga menggunakan ANSYS untuk mengevaluasi respons struktur kolom CRC dengan variasi dimensi hollow terhadap pembebanan lateral siklik. Parameter yang dianalisis meliputi degradasi kekakuan, daktilitas, perilaku backbone, dan disipasi energi kumulatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CRC dengan substitusi crumb rubber sebesar 5% memberikan performa mekanik optimum dengan kuat tekan sebesar 34,25 MPa dan kuat tarik belah sebesar 2,74 MPa. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa kolom dengan dimensi hollow lebih kecil memiliki kekakuan awal dan

kapasitas beban lateral yang lebih tinggi, sedangkan dimensi hollow yang lebih besar memberikan kemampuan deformasi dan disipasi energi yang lebih baik. Seluruh model memenuhi kategori daktilitas tinggi berdasarkan FEMA 356, yang menunjukkan perilaku inelastis yang stabil terhadap pembebanan siklik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa variasi dimensi hollow memberikan pengaruh signifikan terhadap keseimbangan antara kekakuan, kekuatan, dan daktilitas kolom CRC, sehingga material ini berpotensi digunakan sebagai alternatif material struktural berkelanjutan untuk konstruksi tahan gempa.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor secara global memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan volume limbah ban setiap tahunnya. Beberapa laporan menunjukkan bahwa jumlah ban bekas yang dihasilkan telah mencapai sekitar satu miliar unit per tahun dan diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan perkembangan sektor transportasi di masa mendatang (World Business Council for Sustainable Development, 2018). Kondisi ini menimbulkan permasalahan lingkungan yang cukup serius, mengingat metode penanganan konvensional seperti penimbunan di landfill maupun pembakaran terbuka berpotensi menyebabkan pencemaran tanah dan udara, serta menghasilkan senyawa berbahaya yang bersifat toksik (United Nations Environment Programme, 2021). Selain itu, limbah ban memiliki sifat yang sulit terurai secara alami (non-biodegradable), sehingga dapat bertahan dalam lingkungan dalam jangka waktu yang sangat lama (Thomas et al., 2014). Oleh karena itu, berbagai penelitian telah mengembangkan alternatif pemanfaatan limbah ban menjadi material yang lebih bermanfaat, salah satunya melalui pengolahan menjadi crumb rubber yang digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus dalam campuran beton (Ganesan et al., 2013).

Di Indonesia, permasalahan ini menjadi semakin relevan mengingat posisi negara sebagai salah satu produsen karet alam terbesar di dunia. Data dari Kementerian Perindustrian menunjukkan bahwa produksi karet alam nasional mencapai sekitar 3,5 juta ton per tahun, dengan sektor industri ban menyerap sekitar 42% dari total produksi tersebut. Seiring dengan meningkatnya konsumsi ban, jumlah limbah yang dihasilkan juga terus bertambah. Secara global, diperkirakan sekitar 1,5 miliar ban mencapai akhir masa pakainya setiap tahun, dan jumlah ini berpotensi meningkat secara signifikan di masa mendatang. Kondisi tersebut mendorong perlunya inovasi dalam pemanfaatan limbah ban, salah satunya melalui pemanfaatan crumb rubber sebagai bahan substitusi dalam campuran beton (ACI Committee, 2014).

Di sisi lain, pengembangan elemen struktur beton dengan konfigurasi penampang rectangular hollow semakin menarik perhatian dalam rekayasa struktur modern. Penggunaan penampang berongga memungkinkan pengurangan berat sendiri struktur serta efisiensi penggunaan material, tanpa secara signifikan mengurangi kapasitas dalam menahan gaya dalam, khususnya momen lentur. Selain itu, bentuk geometrinya yang teratur memberikan kemudahan dalam penataan tulangan serta analisis perilaku struktural. Namun demikian, keberadaan rongga pada inti penampang menyebabkan distribusi tegangan dan regangan menjadi tidak homogen, sehingga respons mekanisnya tidak dapat disamakan dengan penampang solid.

Kajian mengenai perilaku struktur beton dengan penampang rectangular hollow masih relatif terbatas, khususnya dalam kondisi pembebanan lateral siklik yang merepresentasikan aksi gempa. Keberadaan rongga internal berpengaruh terhadap distribusi tegangan, degradasi kekakuan, serta pola retak yang berkembang selama pembebanan berulang. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada elemen beton konvensional atau sistem sambungan tertentu, sehingga pemahaman terhadap perilaku kolom beton hollow, khususnya yang menggunakan material modifikasi seperti crumb rubber concrete (CRC), masih memerlukan kajian yang lebih mendalam.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur kolom rectangular hollow berbahan crumb rubber concrete terhadap pembebanan lateral siklik. Parameter material beton diperoleh dari hasil pengujian laboratorium aktual, sehingga mampu merepresentasikan kondisi material secara lebih realistis. Selanjutnya, analisis dilakukan menggunakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga melalui perangkat lunak ANSYS. Evaluasi difokuskan pada respons struktural yang meliputi kurva histeresis, degradasi kekakuan, kapasitas deformasi (daktilitas), serta pola keruntuhan, sehingga diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kinerja kolom CRC dengan penampang hollow dalam kondisi pembebanan seismik.

Urgensi penelitian ini semakin dipertegas oleh beberapa faktor yang saling terkait. Pertama, secara global, akumulasi limbah ban mencapai tingkat yang mengkhawatirkan, dan Indonesia sebagai produsen karet terbesar kedua di dunia memiliki kontribusi signifikan terhadap permasalahan ini. Kedua, Indonesia terletak di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi, sehingga diperlukan material dan elemen struktur yang memiliki kinerja seismik baik, khususnya daktilitas dan disipasi energi yang tinggi. Ketiga, penggunaan penampang hollow pada kolom menjadi semakin populer karena efisiensi material dan pengurangan berat sendiri, namun pemahaman tentang perilaku seismiknya masih terbatas. Keempat, keberlanjutan (sustainability) dalam konstruksi menjadi tuntutan global, dan pemanfaatan limbah ban sebagai substitusi agregat alam merupakan langkah strategis menuju konstruksi hijau (green construction). Kelima, standar desain seperti SNI 2847:2019 dan FEMA 356 mensyaratkan evaluasi kinerja seismik yang komprehensif, termasuk parameter daktilitas dan disipasi energi, sehingga penelitian ini relevan untuk mendukung pengembangan regulasi teknis. Kombinasi faktor-faktor ini menjadikan penelitian tentang perilaku kolom crumb rubber concrete dengan penampang rectangular hollow terhadap beban lateral siklik sebagai sebuah kebutuhan yang mendesak, baik dari perspektif akademis untuk pengembangan ilmu, maupun dari perspektif praktis untuk aplikasi di lapangan.

Kebaruan penelitian (novelty) terletak pada beberapa aspek yang membedakannya secara fundamental dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan pengujian material CRC secara laboratorium (dengan variasi substitusi 5% dan 10%) dan pemodelan numerik elemen hingga menggunakan ANSYS untuk mengevaluasi perilaku kolom pada tingkat komponen, bukan hanya pada tingkat material. Kedua, penelitian ini secara spesifik mengkaji kolom dengan penampang rectangular hollow, yang jarang diteliti dalam konteks CRC, dengan empat variasi dimensi hollow yang berbeda (K1, K2, K3, K4) untuk memahami pengaruh parameter geometris terhadap respons struktur. Ketiga, penelitian ini mengevaluasi parameter-parameter kinerja seismik yang komprehensif, meliputi degradasi kekakuan (penurunan nilai kekakuan pada setiap tingkat drift ratio), daktilitas (rasio antara

perpindahan ultimit dan perpindahan leleh berdasarkan metode equal energy FEMA 356), kurva backbone (hubungan antara beban lateral maksimum dan perpindahan), serta disipasi energi kumulatif (luas area di dalam kurva histeresis). Keempat, penelitian ini menggunakan data properti material hasil pengujian laboratorium aktual sebagai input pemodelan numerik, sehingga hasil simulasi lebih akurat dan representatif dibandingkan penelitian yang hanya menggunakan data dari literatur. Kelima, penelitian ini membandingkan respons kolom CRC dengan kolom beton normal (melalui model verifikasi) untuk mengidentifikasi perbedaan perilaku struktural akibat substitusi crumb rubber. Kebaruan-kebaruan ini menjadikan penelitian ini memiliki kontribusi signifikan bagi pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya di bidang material konstruksi berkelanjutan dan rekayasa gempa.

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis perilaku kolom berbahan crumb rubber concrete dengan penampang rectangular hollow terhadap pembebanan lateral siklik. Permasalahan yang dikaji meliputi pengaruh penggunaan crumb rubber concrete terhadap sifat mekanik beton sebagai material penyusun kolom, pengaruh variasi ukuran penampang hollow terhadap perilaku struktural kolom, serta respons struktur yang ditinjau dari kapasitas beban, kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi. Berdasarkan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter sifat mekanik crumb rubber concrete, seperti kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, dan rasio Poisson sebagai input pemodelan numerik, menganalisis pengaruh variasi ukuran penampang hollow terhadap perilaku struktur kolom di bawah pembebanan lateral siklik, serta mengevaluasi dan membandingkan respons struktur kolom rectangular hollow crumb rubber concrete akibat variasi ukuran hollow terhadap kapasitas beban lateral, kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi.

METODE PENELITIAN

Penelitian tesis ini mengadopsi metode eksperimental yang bertujuan untuk memperoleh data properties material beton dan baja tulangan dari pengujian laboratorium yang dilanjutkan dengan melakukan pemodelan struktur kolom menggunakan program bantu berbasis metode elemen hingga, yaitu ANSYS. Tahapan penelitian diawali dengan mengumpulkan data serta studi literatur sebagai data sekunder. Setelah memperoleh data, dilanjutkan dengan pengujian laboratorium terhadap crumb rubber concrete.

Pengujian properties material crumb rubber concrete dengan mensubstitusi bahan dasar beton yaitu pasir secara parsial sebesar 5% dan 10% menggunakan ratio air terhadap semen (w/c) sebesar 0,5. Benda uji yang digunakan memiliki tinggi 15 cm dan diameter 30 cm. Hasil yang didapat dari pengujian beton yaitu kuat tarik belah, kuat tekan, poisson ratio, kuat tekan, hubungan tegangan-regangan serta kuat tekan beton. Pengujian material baja tulangan sebagai data primer. Proses selanjutnya adalah memodelkan elemen struktur pada program ANSYS, melakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh, dan menyusun kesimpulan serta saran berdasarkan temuan dari penelitian yang dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material

Sebelum diaplikasikan sebagai material penyusun crumb rubber concrete, seluruh bahan penyusun terlebih dahulu melalui serangkaian pengujian karakteristik material. Pengujian dilakukan terhadap agregat halus berupa pasir, agregat kasar berupa batu pecah, serta material

crumb rubber. Pengujian pada agregat halus mencakup penentuan berat jenis, analisis gradasi melalui saringan, pengukuran kadar air, pemeriksaan kandungan lumpur, dan identifikasi zat organik. Untuk agregat kasar, pengujian meliputi berat jenis, kadar air, dan analisis saringan. Sementara itu, karakterisasi crumb rubber difokuskan pada analisis saringan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran. Rekapitulasi hasil pengujian seluruh material agregat tersebut disajikan secara lengkap pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Material

No	Jenis Pengujian	Material	Hasil Pengujian
1	Kadar lumpur (%)	Agregat halus	2.86
2	Kadar zat organik	Agregat halus	No. 3
3	<i>Specific gravity</i> (gr)	Agregat halus	2.41
		Agregat kasar	3.48
4	Analisis saringan	Agregat halus	Pasir Sedang
		Agregat kasar	12.5-19 mm
		<i>Crumb rubber</i>	2.36-4.75 mm
5	Kadar air (%)	Agregat halus	8.18
		Agregat kasar	4.95

1. Kadar Lumpur

Berdasarkan hasil pengujian yang dirangkum dalam Tabel 4.1, kadar lumpur pada agregat halus tercatat sebesar 2,86%. Nilai tersebut masih berada dalam rentang yang diizinkan, yakni di bawah ambang batas maksimum 5%. Oleh karena itu, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini dinilai memenuhi persyaratan mutu dan dapat dimanfaatkan sebagai material penyusun campuran beton.

2. Kadar Zat Organik

Hasil pengujian kandungan zat organik yang disajikan pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa warna larutan uji pada organic plate berada pada tingkat nomor 3, yang ditandai dengan warna merah gelap. Nilai tersebut masih berada pada batas maksimum yang diperkenankan sesuai standar pengujian. Oleh karena itu, agregat halus yang digunakan dapat dikategorikan memiliki kandungan zat organik pada tingkat sedang dan masih memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan penyusun campuran beton.

3. Spesific Gravity

Nilai berat jenis (*specific gravity*) agregat halus dan agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1, masing-masing sebesar 2,41 dan 3,48. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua jenis agregat memiliki karakteristik berat jenis yang memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton. Dengan demikian, agregat yang digunakan dinilai layak dan mampu memberikan kontribusi yang memadai terhadap kekuatan serta kestabilan campuran beton yang dihasilkan.

4. Analisis Saringan

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan yang dirangkum dalam Tabel 4.1, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini termasuk ke dalam zona 2 yang menunjukkan karakteristik gradasi sedang. Sementara itu, agregat kasar memiliki gradasi yang relatif seragam, di mana sebagian besar butiran lolos pada saringan berukuran 19 mm dan tertahan pada saringan 12,5 mm. Pemilihan karakteristik gradasi tersebut dilakukan dengan

mempertimbangkan penggunaan crumb rubber sebagai substitusi parsial agregat halus, sehingga distribusi ukuran butiran dalam campuran beton tetap seimbang dan mampu menjaga mutu serta kinerja beton. Crumb rubber yang digunakan memiliki rentang ukuran partikel sekitar 2,36–4,75 mm, sehingga diharapkan dapat berinteraksi secara efektif dengan matriks beton tanpa menurunkan kualitas campuran secara signifikan.

5. Kadar Air

Mengacu pada data yang disajikan dalam Tabel 4.1, kadar air pada agregat halus dan agregat kasar masing-masing tercatat sebesar 8,18% dan 4,95%. Namun demikian, pada campuran beton ini sebagian agregat halus digantikan oleh crumb rubber yang telah melalui tahap perlakuan awal berupa pencucian dan pemanasan menggunakan oven. Proses pre-treatment tersebut bertujuan untuk menurunkan pengaruh kelembapan berlebih yang dapat memengaruhi konsistensi campuran. Di samping itu, perancangan mix design dilakukan dengan menetapkan nilai water–cement ratio (w/c) sebesar 0,5 serta penambahan bahan superplasticizer, sehingga kelecakan beton dapat ditingkatkan tanpa penambahan air pencampur. Pendekatan ini diharapkan mampu menjaga mutu campuran sekaligus mempertahankan kekuatan beton sesuai dengan target perencanaan.

Hasil Pengujian Beton Crumb Rubber

1. Pengujian Sifat Mekanik Beton

Pengujian sifat mekanik beton dalam penelitian ini meliputi uji kuat tekan serta analisis hubungan tegangan-regangan. Hasil dari kedua pengujian tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi terhadap karakteristik mekanis beton, yang selanjutnya menjadi acuan dalam menilai performa material beton yang digunakan dalam penelitian ini.

a. Uji Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan crumb rubber concrete pada penelitian ini dilakukan setelah benda uji mencapai umur 28 hari melalui proses curing. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine (UTM) untuk memperoleh nilai kuat tekan beton dalam satuan MPa. Spesimen yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Hasil rekapitulasi pengujian kuat tekan pada umur 28 hari disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rata – rata kuat tekan crumb rubber concrete

Kode campuran	Kuat tekan (MPa)			Rata-Rata
	1	2	3	
CRC-5	32.60	36.43	33.72	34.25
CRC-10	34.65	32.33	34.84	33.94

Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata-rata kuat tekan crumb rubber concrete pada variasi substitusi 5% lebih tinggi dibandingkan dengan variasi 10%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar crumb rubber dalam campuran cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan beton.

Hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan bahwa nilai rata-rata kuat tekan untuk campuran CRC-5 dan CRC-10 masing-masing sebesar 34,25 MPa dan 33,94 MPa. Hal ini menunjukkan adanya penurunan kuat tekan sebesar 0,91% pada campuran CRC-10 dibandingkan CRC-5, meskipun penurunan tersebut relatif kecil. Kondisi ini terjadi meskipun crumb rubber telah melalui proses pre-treatment berupa pencucian dan pemanasan pada suhu 150 °C sebelum digunakan dalam campuran beton.

Penurunan kuat tekan ini berkaitan dengan karakteristik crumb rubber yang memiliki kemampuan ikatan (bonding) yang lebih rendah terhadap pasta semen, serta sifat elastisitas yang lebih tinggi dan kekakuan yang lebih rendah dibandingkan agregat alami. Kondisi tersebut menyebabkan mekanisme transfer beban dalam matriks beton menjadi kurang efektif, sehingga berdampak pada penurunan nilai kuat tekan yang dihasilkan.

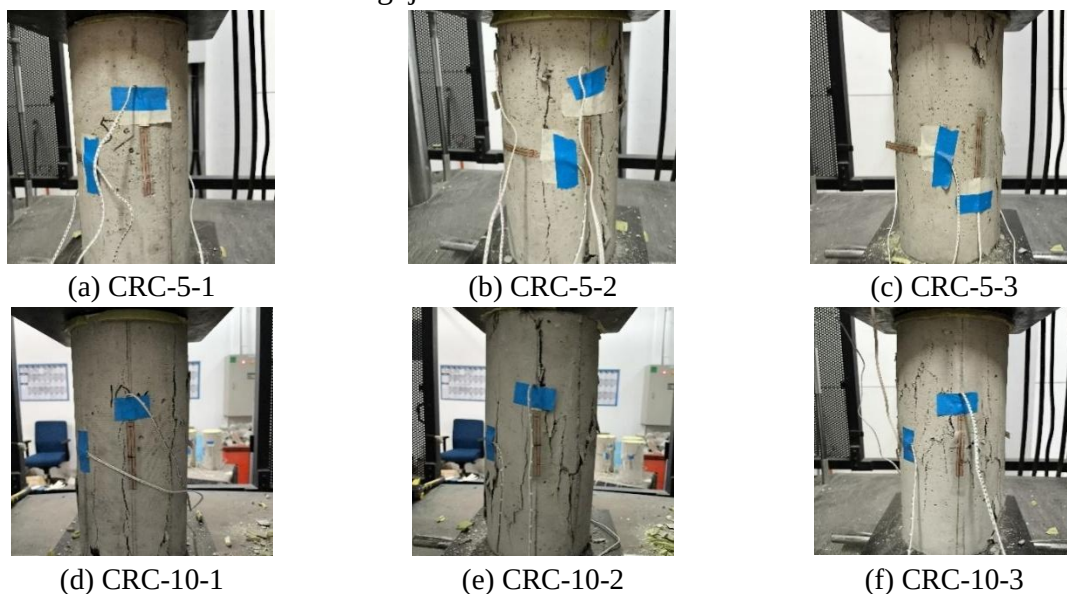
Berdasarkan penelitian terdahulu Fuad dan Firda (2024) menunjukkan hasil bahwa substitusi 25% dan 50% agregat halus dengan crumb rubber dapat menurunkan kuat tekan beton masing-masing sebesar 58,85% dan 78,73%. Penurunan ini menunjukkan bahwa penggunaan crumb rubber dalam jumlah besar dapat secara signifikan mengurangi kekuatan beton, sehingga perlu dilakukan pertimbangan yang matang dalam perencanaan campuran beton.

Selain itu, berdasarkan Fauzan, et al. (2023) menyelidiki pengaruh kombinasi serat baja, limbah ban, dan crumb rubber terhadap sifat mekanik beton. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan crumb rubber dapat menurunkan kuat tekan beton, terutama pada campuran dengan kandungan crumb rubber yang lebih tinggi. Penurunan ini disebabkan oleh ikatan yang lemah antara crumb rubber dan pasta semen, serta potensi kerusakan pada antarmuka tersebut, yang akhirnya menurunkan kekuatan beton yang mengandung crumb rubber. Namun, penggunaan kombinasi dengan serat baja dapat membantu meningkatkan sifat mekanik beton secara keseluruhan. Studi ini memberikan wawasan tambahan mengenai interaksi antara crumb rubber dan bahan tambahan lainnya dalam campuran beton.

Meskipun terjadi penurunan kuat tekan pada campuran CRC-10, besarnya penurunan tersebut tergolong kecil dan tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap kinerja struktural. Nilai kuat tekan yang diperoleh tetap berada di atas batas minimum beton struktural sebesar 17,5 MPa, serta memenuhi persyaratan kuat tekan minimum 21 MPa untuk sistem rangka pemikul momen khusus dan dinding struktural khusus sesuai SNI 2847:2019.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan crumb rubber dengan perlakuan yang tepat masih memungkinkan beton mempertahankan kinerja mekanik yang memadai, sehingga tetap layak untuk diaplikasikan pada elemen struktural.

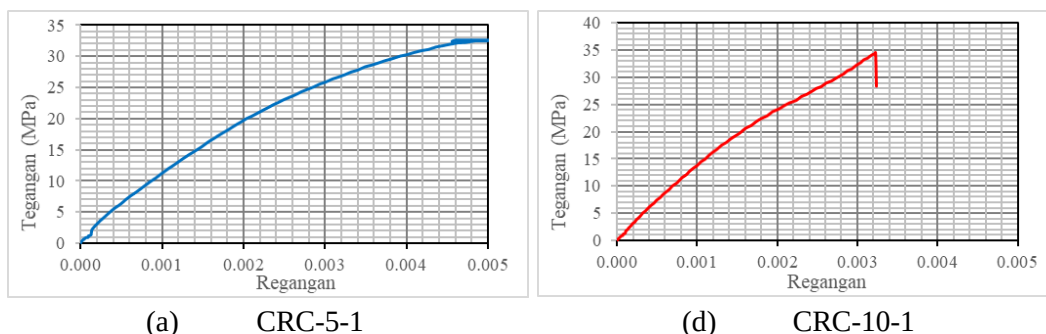
Gambar 1. Pengujian Kuat Tekan crumb rubber concrete

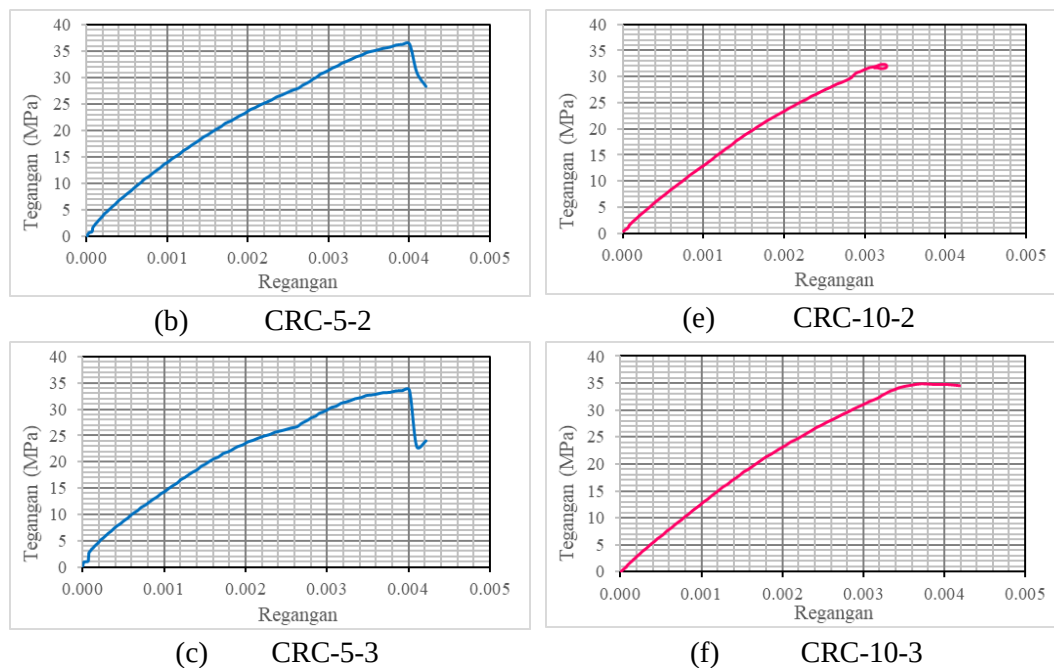


Hasil pengujian kuat tekan crumb rubber concrete yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami pola keruntuhan tipe 3, yaitu kombinasi keruntuhan kerucut dan geser sesuai klasifikasi ASTM C39/C39M. Spesimen CRC-5 (a–c) memperlihatkan retakan vertikal dan diagonal yang mengindikasikan dominasi gaya tekan dengan kontribusi gaya geser, serta awal terbentuknya kerucut keruntuhan.

Pada spesimen CRC-10 (d–f), pola retakan yang muncul relatif serupa, namun disertai dengan indikasi pengelupasan permukaan yang menunjukkan mekanisme keruntuhan yang lebih progresif. Meskipun terjadi substitusi sebagian agregat halus dengan crumb rubber, pola keruntuhan yang diamati tetap menunjukkan karakteristik fraktur yang sebanding dengan beton konvensional.

Kurva tegangan–regangan yang ditampilkan pada Gambar 4.5 memperlihatkan perbedaan perilaku pasca-puncak antara campuran CRC-5 dan CRC-10. Pada CRC-10, penurunan tegangan setelah mencapai nilai maksimum berlangsung relatif tajam, yang mengindikasikan terjadinya kehilangan kapasitas secara cepat dan kecenderungan perilaku getas. Sebaliknya, CRC-5 menunjukkan respons pasca-puncak yang lebih gradual dan memanjang, mencerminkan kemampuan deformasi plastis yang lebih baik. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa CRC-5 memiliki kapasitas deformasi pasca-puncak yang lebih stabil, sehingga perilaku keruntuhannya dapat dikategorikan sebagai kehancuran yang bersifat progresif. Kondisi ini berkaitan dengan interaksi antara crumb rubber dan pasta semen pada CRC-5 yang masih berada pada tingkat keseimbangan tertentu, sehingga integritas struktur internal beton tetap terjaga. Sementara itu, CRC-10 memperlihatkan respons struktural yang lebih rapuh, meskipun secara visual kerusakan yang terjadi tampak menyebar. Secara umum, seluruh benda uji CRC memperlihatkan pola tegangan–regangan yang serupa, yaitu peningkatan tegangan seiring bertambahnya regangan hingga mencapai puncak, kemudian diikuti oleh penurunan tegangan sebagai indikasi awal kegagalan material. Namun demikian, panjang kurva pasca-puncak yang lebih besar pada CRC-5 dibandingkan CRC-10 menegaskan bahwa substitusi crumb rubber pada kadar yang lebih rendah masih memungkinkan beton mempertahankan sifat daktilnya, sedangkan pada kadar yang lebih tinggi justru berpotensi menurunkan kestabilan pasca-keruntuhan akibat melemahnya zona transisi antar muka (ITZ) dan rendahnya kekakuan partikel crumb rubber.





Gambar 2. Hubungan tegangan-regangan crumb rubber concrete

b. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

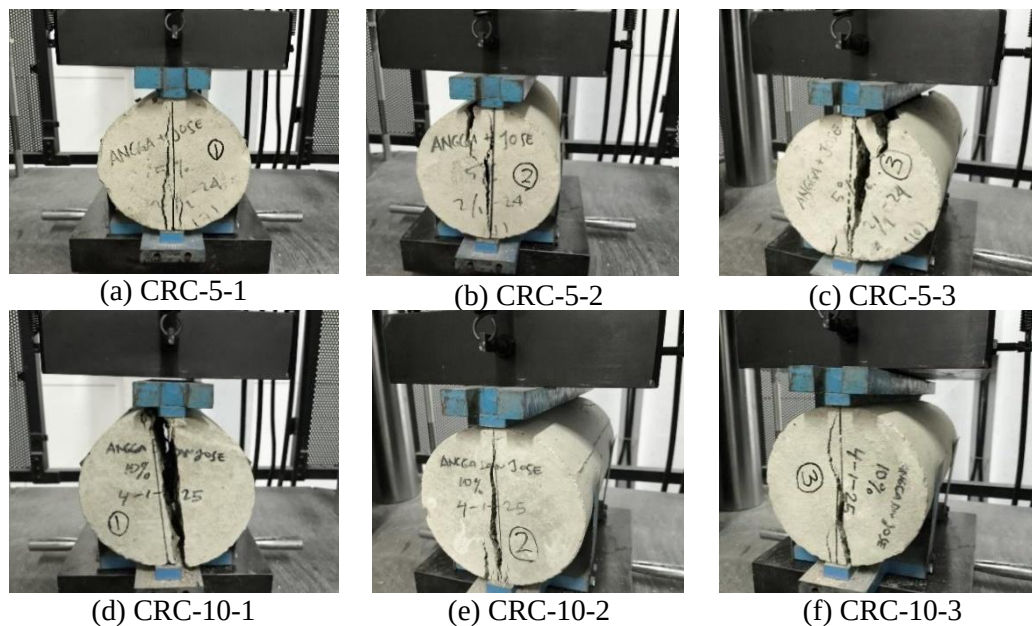
Hasil pengujian kuat tarik belah crumb rubber concrete (CRC) menunjukkan bahwa peningkatan kadar substitusi crumb rubber sebagai pengganti agregat halus cenderung menurunkan kapasitas tarik beton. Berdasarkan Tabel 4.3, nilai rata-rata kuat tarik belah pada campuran CRC-5 sebesar 2,74 MPa, sedangkan pada CRC-10 menurun menjadi 2,54 MPa.

Penurunan ini dipengaruhi oleh rendahnya kualitas ikatan antar muka antara partikel crumb rubber dan pasta semen, serta meningkatnya porositas akibat sifat hidrofobik material tersebut yang berpotensi menyebabkan terbentuknya rongga udara dalam matriks beton. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada Tabel 3, sementara perbandingan nilai rata-rata tiap variasi ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 3. Rata – rata kuat tarik belah crumb rubber concrete

Kode campuran	Kuat tarik belah (MPa)			
	1	2	3	Rata-Rata
CRC-5	2.85	2.55	2.81	2.74
CRC-10	2.37	2.53	2.71	2.54

Temuan dalam penelitian ini sejalan dengan hasil studi sebelumnya. Fauzan et al. (2023) melaporkan bahwa penggunaan crumb rubber sebesar 10% dalam campuran beton dapat menurunkan kuat tarik belah hingga 32,43% apabila dibandingkan dengan beton konvensional. Hasil serupa juga disampaikan oleh Wanasinghe et al. (2021), yang menyimpulkan bahwa peningkatan kadar crumb rubber cenderung menyebabkan penurunan kapasitas tarik belah beton. Penurunan tersebut terutama dikaitkan dengan meningkatnya porositas material serta lemahnya ikatan antar muka antara partikel crumb rubber dan pasta semen, yang berdampak langsung pada kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik.



Gambar 3. Pengujian kuat tarik-belah crumb rubber concrete

Berdasarkan Gambar 3, hasil pengujian kuat tarik belah crumb rubber concrete pada variasi CRC-5 dan CRC-10 menunjukkan bahwa pola retakan yang terbentuk cenderung linear dan berkembang sepanjang bidang diametral searah dengan arah pembebanan, yang mengindikasikan kegagalan tarik dominan.

Namun, secara visual terlihat bahwa spesimen CRC-10 menghasilkan retakan yang lebih kasar dengan bukaan yang lebih lebar dibandingkan CRC-5. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar crumb rubber berpengaruh terhadap penurunan kapasitas tarik beton, yang tercermin dari karakteristik keretakan yang lebih signifikan pada variasi dengan kadar karet yang lebih tinggi.

c. Pengujian Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson

Pengujian modulus elastisitas dilakukan menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, dengan pengukuran deformasi longitudinal dan lateral akibat pembebanan aksial menggunakan strain gauge. Berdasarkan Tabel 4.4, nilai rata-rata modulus elastisitas crumb rubber concrete (CRC) pada variasi CRC-5 sebesar 11.407,67 MPa, sedangkan pada CRC-10 meningkat menjadi 12.843,33 MPa. Hubungan nilai tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.

Peningkatan modulus elastisitas ini menunjukkan bahwa penambahan crumb rubber yang telah melalui pre-treatment dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekakuan beton. Perlakuan termal pada suhu 150 °C berperan dalam memperbaiki kondisi permukaan partikel serta meningkatkan kualitas interaksi antara crumb rubber dan pasta semen. Hal ini berdampak pada peningkatan kemampuan beton dalam menahan deformasi elastis, yang tercermin dari nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi.

Gambar 5 menunjukkan hubungan tegangan–regangan pada daerah elastis yang menggambarkan respons linier crumb rubber concrete (CRC). Pada tahap ini, peningkatan tegangan berbanding lurus dengan regangan sehingga perilaku material masih mengikuti hukum Hooke. Pada campuran CRC-5, nilai gradien kurva yang merepresentasikan modulus

elastisitas masing-masing spesimen adalah 10.013 MPa, 12.307 MPa, dan 11.904 MPa, dengan rata-rata sebesar 11.408 MPa.

Sementara itu, campuran CRC-10 menghasilkan nilai gradien sebesar 13.573 MPa, 12.427 MPa, dan 12.526 MPa, dengan nilai rata-rata 12.842 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar crumb rubber hingga 10% tidak menyebabkan penurunan modulus elastisitas, bahkan cenderung meningkatkan kekakuan elastis beton. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan distribusi partikel crumb rubber yang lebih merata dalam matriks beton serta pengaruh pre-treatment yang meningkatkan kualitas interaksi antara partikel karet dan pasta semen pada tahap awal pembebanan.

Tabel 4. Rata – rata modulus elastisitas crumb rubber concrete

Kode campuran	Modulus elastisitas (MPa)			Rata-Rata
	1	2	3	
CRC-5	10012	12309	11902	11407.67
CRC-10	13577	12429	12524	12843.33

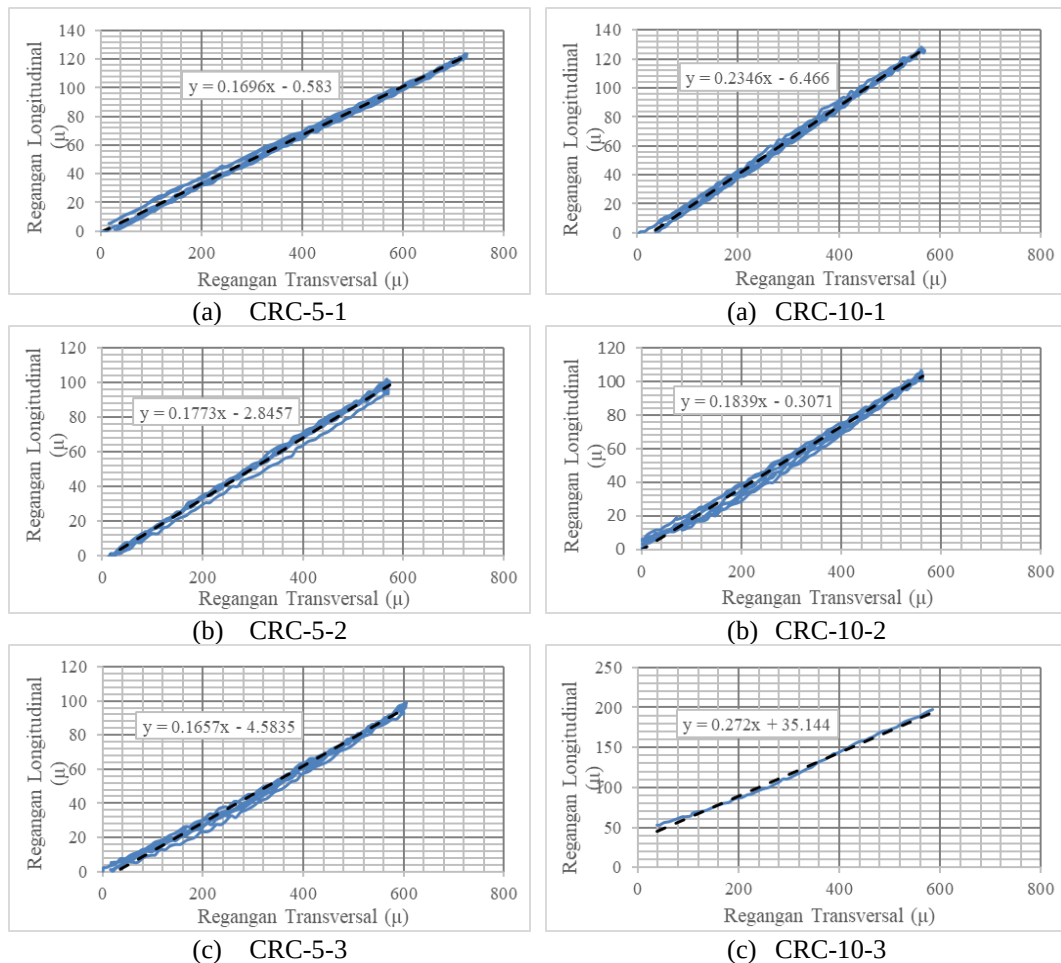
Rasio Poisson merupakan parameter mekanik yang menggambarkan perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial pada kondisi pembebanan elastis. Pada beton normal, nilai rasio Poisson umumnya berada dalam kisaran 0,15 hingga 0,20.

Penambahan crumb rubber dalam campuran beton mempengaruhi nilai parameter ini, karena material karet memiliki sifat elastomerik dengan rasio Poisson yang lebih tinggi, mendekati 0,3. Akibatnya, peningkatan kadar crumb rubber dalam beton cenderung menyebabkan kenaikan nilai rasio Poisson secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 4.10, nilai rata-rata rasio Poisson pada campuran CRC-5 tercatat sebesar 0,171, sedangkan pada campuran CRC-10 meningkat menjadi 0,230. Nilai tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.7, yaitu sebagai perbandingan antara regangan transversal (ϵ_t) dan regangan longitudinal (ϵ_l) pada tahap elastis. Kenaikan rasio Poisson ini menunjukkan bahwa beton dengan kandungan crumb rubber yang lebih tinggi mengalami deformasi lateral yang relatif lebih besar dibandingkan deformasi aksialnya pada kondisi elastis. Fenomena ini sejalan dengan karakteristik crumb rubber yang bersifat elastomerik, sehingga lebih mudah mengalami deformasi lateral ketika menerima beban tekan. Selain itu, peningkatan kadar crumb rubber berpotensi melemahkan zona transisi antarmuka (interfacial transition zone/ITZ) antara agregat dan pasta semen, yang menyebabkan beton menjadi lebih mudah mengalami pelebaran transversal. Namun demikian, nilai rasio Poisson yang lebih tinggi pada CRC-10 tidak dapat diinterpretasikan sebagai indikator daktilitas yang lebih baik, karena parameter ini ditentukan pada fase elastis sebelum terjadinya kerusakan material. Sebaliknya, berdasarkan karakteristik kurva tegangan–regangan, CRC-5 menunjukkan respons pasca-puncak yang lebih stabil dengan deformasi plastis yang lebih besar, sehingga secara mekanis dapat dikategorikan lebih daktil dibandingkan CRC-10.

Tabel 5. Rata-rata ratio poisson crumb rubber concrete

Kode campuran	Rasio Poisson			Rata-Rata
	1	2	3	
CRC-5	0.170	0.177	0.166	0.171
CRC-10	0.235	0.184	0.272	0.230



Gambar 4. Hubungan regangan longitudinal-transversal crumb rubber concrete

Berdasarkan Gambar 4, hubungan antara regangan longitudinal dan transversal pada crumb rubber concrete (CRC) dengan variasi crumb rubber 5% dan 10% menunjukkan kecenderungan linier. Nilai gradien pada CRC-10 yang lebih besar dibandingkan CRC-5 mengindikasikan meningkatnya rasio deformasi lateral terhadap deformasi aksial akibat penambahan crumb rubber. Hal ini mencerminkan respons lateral yang lebih dominan, yang berkaitan dengan sifat elastomerik crumb rubber dan melemahnya zona transisi antarmuka. Regangan aksial yang digunakan berada pada rentang 550–750 μ , sehingga seluruh parameter dievaluasi dalam kondisi elastis dan hasil perhitungan modulus elastisitas serta rasio Poisson dapat dibandingkan secara konsisten.

Peningkatan rasio Poisson pada crumb rubber concrete (CRC) berkaitan dengan sifat elastomerik partikel crumb rubber yang cenderung mengalami deformasi lateral lebih besar ketika dikenai beban aksial. He, dkk. (2023) melaporkan bahwa penambahan crumb rubber mampu meningkatkan fleksibilitas dan kapasitas serap energi beton, khususnya pada kondisi pembebanan dinamis, dengan CRC berkadar tinggi menunjukkan peningkatan kemampuan serap energi yang signifikan dibandingkan beton normal. Namun demikian, rasio Poisson ditentukan pada fase elastis sehingga tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menilai daktilitas material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun CRC-10 memiliki rasio Poisson lebih tinggi, CRC-5 memperlihatkan respons pasca-puncak yang lebih stabil dan deformasi plastis yang lebih besar, sehingga secara mekanis lebih daktil. Dengan

kombinasi deformasi elastis yang memadai dan kapasitas plastis yang baik, CRC-5 dinilai lebih potensial untuk diaplikasikan pada elemen struktural yang menuntut deformabilitas tinggi, sekaligus mendukung upaya keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah ban bekas.

Perilaku Struktur Kolom Beton Normal (Verifikasi)

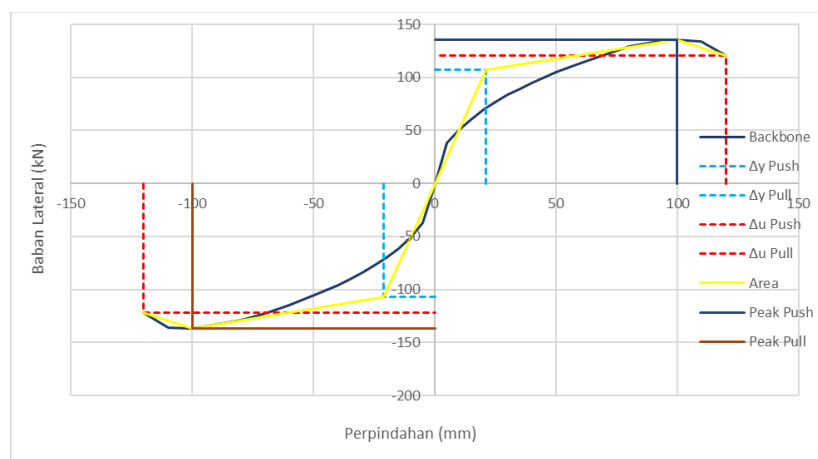
1. Daktilitas

Daktilitas merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan struktur untuk mengalami deformasi setelah melewati batas elastis sebelum mencapai kondisi keruntuhan. Nilai daktilitas dinyatakan sebagai perbandingan antara perpindahan ultimit (Δu) dan perpindahan saat leleh (Δy). Penentuan titik leleh dilakukan menggunakan pendekatan metode kesetaraan luas (equal energy method) sebagaimana dijelaskan dalam FEMA 356 (2000). Metode ini dilakukan dengan menarik garis horizontal pada kurva hubungan gaya lateral–perpindahan sehingga luasan area yang terbentuk di atas dan di bawah garis tersebut menjadi relatif seimbang.

Setelah posisi titik leleh diperoleh melalui pendekatan tersebut, nilai daktilitas selanjutnya dihitung sebagai rasio antara perpindahan ultimit (Δu) dan perpindahan saat leleh (Δy). Nilai perpindahan pada kondisi leleh dan kondisi ultimit yang diperoleh dari hasil analisis numerik ANSYS pada model N1 disajikan pada Tabel 6, yang diturunkan dari kurva hubungan gaya lateral–perpindahan sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 6. Daktilitas model verifikasi

Arah Pembebanan	Perpindahan Maksimum	Perpindahan Saat Leleh	Daktilitas	Daktilitas Rata-Rata
	Δu	Δy	μ	
Dorong	119,991	21,190	5,663	5,700
Tarik	-119,991	-20,914	5,737	



Gambar 5. Kurva envelope model verifikasi

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan ANSYS, diperoleh nilai daktilitas rata-rata struktur sebesar 5,7. Nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur kolom mampu mengalami deformasi inelastis yang cukup besar sebelum terjadi penurunan kapasitas beban lateral secara signifikan. Mengacu pada klasifikasi tingkat daktilitas menurut FEMA 356 (2000), nilai daktilitas tersebut termasuk dalam kategori daktilitas tinggi karena berada di atas rentang 4.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur memiliki kemampuan deformasi yang baik serta kapasitas disipasi energi yang tinggi ketika menerima pembebanan lateral siklik, sehingga respons struktur terhadap pengaruh beban gempa dapat dikendalikan dengan lebih efektif.

Secara mekanis, nilai daktilitas sebesar 5,7 diperoleh dari perbandingan antara perpindahan ultimit (Δu) dan perpindahan pada saat struktur mulai mengalami kondisi leleh (Δy). Nilai ini menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kinerja struktur terhadap beban gempa, karena semakin besar nilai daktilitas yang dimiliki suatu elemen struktur, maka semakin besar pula kemampuannya untuk mempertahankan stabilitas melalui deformasi plastis tanpa mengalami keruntuhan yang bersifat tiba-tiba. Dengan demikian, nilai daktilitas yang tinggi menunjukkan bahwa struktur memiliki tingkat ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi akibat pembebanan gempa yang berulang.

2. Kekakuan dan Kekuatan

Nilai kekakuan pada setiap tingkat drift ratio ditentukan berdasarkan perbandingan antara besarnya beban lateral yang bekerja dan perpindahan yang terjadi pada struktur. Hubungan antara kekakuan dan drift ratio kemudian direpresentasikan melalui kurva pada arah pembebanan dorong maupun tarik yang menggambarkan perubahan kekakuan struktur selama proses pembebanan, mulai dari tahap awal hingga mencapai drift ratio maksimum. Di sisi lain, kapasitas kekuatan struktur ditentukan dari nilai beban lateral maksimum yang tercapai pada setiap tingkat drift ratio, sehingga membentuk kurva backbone yang merepresentasikan kemampuan struktur dalam menahan beban lateral.

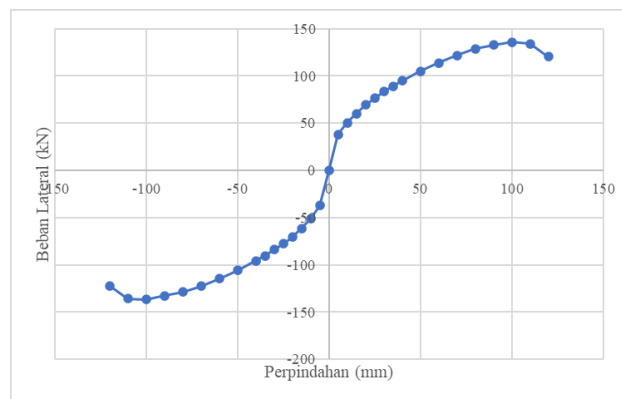
Hubungan antara nilai kekakuan dan drift ratio pada model struktur verifikasi yang diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ANSYS, baik pada arah pembebanan dorong maupun tarik, menunjukkan bahwa elemen kolom mengalami penurunan kekakuan secara bertahap seiring meningkatnya drift ratio. Penurunan kekakuan tersebut mengindikasikan berkurangnya kemampuan struktur dalam mempertahankan kekakuannya akibat pengaruh pembebanan lateral siklik, sehingga mencerminkan respons nonlinier struktur yang mengalami degradasi selama proses pembebanan berlangsung. Persentase degradasi kekakuan pada setiap tingkat pembebanan disajikan pada Tabel 7, yang menunjukkan perubahan perilaku struktur kolom selama siklus pembebanan dan dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktural terhadap pengaruh pembebanan lateral siklik.

Tabel 7. Penurunan nilai kekakuan struktur verifikasi

Drift	Push (kN/mm)	Degradasi Kekakuan	Pull (kN/mm)	Degradasi Kekakuan
0,25	7,586	0,000	7,411	0,000
0,5	5,056	33,351	5,115	30,989
0,75	4,023	46,965	4,091	44,802
1	3,468	54,280	3,526	52,424
1,25	3,062	59,640	3,101	58,159
1,5	2,777	63,391	2,797	62,261
1,75	2,547	66,423	2,583	65,149
2	2,375	68,689	2,397	67,653
2,5	2,099	72,336	2,116	71,455
3	1,895	75,027	1,914	74,170

Drift	Push (kN/mm)	Degradasi Kekakuan	Pull (kN/mm)	Degradasi Kekakuan
3,5	1,739	77,080	1,751	76,371
4	1,611	78,759	1,611	78,264
4,5	1,478	80,523	1,477	80,071
5	1,357	82,114	1,368	81,545
5,5	1,219	83,930	1,234	83,356
6	1,002	86,792	1,017	86,281

Kurva backbone yang diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ANSYS pada model kolom ditampilkan pada Gambar 4.39. Kurva tersebut merepresentasikan hubungan antara beban lateral maksimum dan perpindahan yang terjadi pada struktur, sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan kapasitas kekuatan kolom dalam merespons pembebanan lateral siklik.



Gambar 6. Kurva Backbone Model Verifikasi

3. Disipasi Energi Kumulatif

Disipasi energi kumulatif merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kemampuan struktur dalam menyerap dan meredam energi akibat pembebanan berulang. Nilai ini dihitung berdasarkan total energi yang terdisipasi pada suatu tingkat drift ratio, yang diperoleh dari luas area yang terbentuk di dalam kurva siklus gaya–perpindahan selama proses pembebanan.

Nilai disipasi energi kumulatif yang diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ANSYS pada model yang dianalisis disajikan pada Tabel 4.13. Hubungan antara drift ratio dan disipasi energi kumulatif ditunjukkan pada Gambar 4.37, yang menggambarkan perkembangan kemampuan struktur dalam menyerap energi seiring dengan peningkatan tingkat deformasi.

Tabel 8. Disipasi energi kumulatif model verifikasi

Story Drift (%)	Disipasi Energi (kN.mm)	Disipasi Energi Kumulatif (kN.mm)
0,25	46,813	46,813
0,5	55,868	102,681
0,75	59,611	162,292
1	67,963	230,255

Story Drift (%)	Disipasi Energi (kN.mm)	Disipasi Energi Kumulatif (kN.mm)
1,25	100,456	330,711
1,5	180,509	511,219
1,75	280,057	791,276
2	419,026	1210,302
2,5	888,265	2098,566
3	1571,649	3670,215
3,5	2446,521	6116,736
4	3486,178	9602,913
4,5	4484,719	14087,632
5	5640,327	19727,959
5,5	6914,895	26642,855
6	8757,151	35400,005

Berdasarkan Gambar 6, peningkatan nilai disipasi energi kumulatif mulai terlihat lebih signifikan ketika drift ratio mendekati 3,5%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa struktur mengalami transisi dari respons dominan elastis menuju perilaku inelastis, di mana mekanisme disipasi energi menjadi lebih aktif. Pada tahap ini, perkembangan retak, redistribusi tegangan internal, serta terbentuknya zona plastis berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan struktur dalam menyerap energi akibat pembebanan siklik. Dengan demikian, tren peningkatan disipasi energi tersebut mengindikasikan bahwa struktur memiliki kapasitas yang memadai dalam meredam energi gempa, terutama pada fase deformasi lanjut.

Perilaku Struktur Kolom Crumb Rubber Concrete Dengan Variasi Hollow

1. Daktilitas

Nilai perpindahan pada kondisi leleh (yield displacement) dan kondisi ultimit (ultimate displacement) untuk elemen kolom berbahan crumb rubber concrete diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ANSYS. Parameter tersebut diekstraksi dari kurva respons gaya-perpindahan dan digunakan untuk menghitung nilai daktilitas struktur. Nilai daktilitas merepresentasikan kemampuan struktur dalam mengalami deformasi inelastis tanpa mengalami keruntuhan secara tiba-tiba, sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja deformasi kolom terhadap pembebanan lateral siklik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh model kolom memiliki nilai daktilitas yang tergolong tinggi. Nilai daktilitas rata-rata diperoleh sebesar 8,079 pada model K4, 7,656 pada model K3, 7,473 pada model K2, dan 6,649 pada model K1. Berdasarkan kriteria FEMA 356 (2000), seluruh model kolom berbahan crumb rubber concrete termasuk dalam kategori daktilitas tinggi karena memiliki nilai daktilitas lebih besar dari 4. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi model memiliki kemampuan deformasi inelastis yang baik serta kapasitas disipasi energi yang memadai dalam merespons pembebanan lateral siklik.

Secara umum, variasi dimensi hollow tidak menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan terhadap nilai daktilitas antar model, meskipun terdapat kecenderungan perubahan nilai daktilitas seiring bertambahnya ukuran hollow. Model dengan dimensi hollow yang lebih besar menunjukkan kemampuan deformasi yang relatif berbeda dibandingkan model dengan dimensi hollow yang lebih kecil. Kondisi ini berkaitan dengan perubahan luas penampang

efektif beton, tingkat kekakuan, serta kapasitas pengekanan (confinement) pada elemen kolom.

Model dengan ukuran hollow yang lebih besar cenderung mengalami penurunan kapasitas pengekanan internal sehingga distribusi tegangan menjadi kurang merata dan degradasi kekakuan pada tahap pasca-puncak berlangsung lebih cepat. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan struktur dalam mempertahankan deformasi plastis menjadi lebih terbatas. Sebaliknya, model dengan ukuran hollow yang lebih kecil masih mampu mempertahankan integritas penampang yang lebih baik sehingga perkembangan deformasi plastis dapat berlangsung lebih stabil dan menghasilkan respons daktilitas yang lebih baik.

Selain itu, perbedaan respons antara arah pembebanan dorong dan tarik menunjukkan nilai daktilitas yang relatif sebanding pada setiap model. Hal ini mengindikasikan bahwa material crumb rubber concrete mampu memberikan respons deformasi yang cukup stabil terhadap pembebanan lateral siklik pada kedua arah pembebanan. Dengan demikian, variasi ukuran hollow pada kolom mempengaruhi kemampuan deformasi plastis struktur, di mana peningkatan dimensi hollow cenderung mengurangi kapasitas struktur dalam mempertahankan perilaku daktil pada tahap pasca-leleh.

2. Kekakuan dan Kekuatan

Hubungan antara kekakuan dan drift ratio pada model K1, K2, K3, dan K4 untuk arah pembebanan dorong maupun tarik menunjukkan bahwa nilai kekakuan struktur mengalami penurunan secara bertahap seiring meningkatnya deformasi akibat pembebanan lateral siklik. Penurunan kekakuan ini mencerminkan respons nonlinier struktur, di mana kekakuan awal yang relatif tinggi mulai berkurang setelah struktur memasuki kondisi leleh. Kondisi tersebut ditandai dengan terbentuknya retak serta berkembangnya deformasi plastis pada elemen kolom selama proses pembebanan berlangsung.

Variasi dimensi hollow memberikan pengaruh terhadap karakteristik kekakuan struktur. Model dengan ukuran hollow yang lebih kecil cenderung memiliki kekakuan awal yang lebih tinggi dan mampu mempertahankan kekakuannya lebih lama sebelum mengalami degradasi yang signifikan. Sebaliknya, peningkatan ukuran hollow menyebabkan penurunan kekakuan akibat berkurangnya luas penampang efektif dan meningkatnya fleksibilitas elemen struktur. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi geometris kolom, khususnya dimensi hollow, memiliki peran penting dalam mengontrol respons kekakuan struktur terhadap pembebanan lateral siklik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa model K1 secara konsisten memiliki nilai kekakuan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan model K2, K3, dan K4 pada setiap tingkat drift ratio, baik pada arah pembebanan dorong maupun tarik. Perbedaan tersebut paling jelas terlihat pada tahap awal pembebanan, ketika kekakuan awal K1 berada pada nilai tertinggi sebelum mengalami penurunan secara bertahap. Kondisi ini mengindikasikan bahwa dimensi hollow yang lebih kecil pada model K1 memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekakuan awal struktur sehingga kemampuan elemen kolom dalam menahan deformasi elastis menjadi lebih baik dibandingkan model dengan ukuran hollow yang lebih besar.

Meskipun demikian, seiring meningkatnya drift ratio, seluruh model menunjukkan tren degradasi kekakuan yang relatif serupa dan cenderung mendekati nilai yang hampir sama pada tingkat deformasi yang lebih tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaruh variasi ukuran hollow terhadap kekakuan menjadi kurang dominan pada fase inelastis, karena respons struktur

lebih dipengaruhi oleh perkembangan retak, redistribusi tegangan, serta terbentuknya zona plastis pada elemen kolom. Perbedaan respons antara arah pembebanan dorong dan tarik juga menunjukkan kecenderungan yang konsisten, meskipun terdapat sedikit variasi akibat pengaruh nonlinier material dan interaksi antar elemen struktur.

Kurva backbone hasil analisis numerik pada model kolom berbahan crumb rubber concrete dengan variasi ukuran hollow menunjukkan hubungan antara beban lateral maksimum dan perpindahan struktur pada masing-masing model, yaitu K1, K2, K3, dan K4. Secara umum, seluruh model memperlihatkan pola respons yang relatif serupa, di mana beban lateral meningkat seiring bertambahnya perpindahan hingga mencapai kapasitas maksimum, kemudian diikuti oleh kecenderungan penurunan atau kondisi plateau pada tahap pasca-puncak.

Meskipun pola kurva backbone antar model memiliki kecenderungan yang sama, terdapat perbedaan pada kapasitas dan karakteristik deformasi struktur. Model dengan ukuran hollow yang lebih kecil, seperti K1, menunjukkan kekakuan awal yang lebih tinggi serta respons yang lebih stabil pada fase awal pembebanan. Sebaliknya, model dengan ukuran hollow yang lebih besar, seperti K4, memperlihatkan respons yang lebih fleksibel dengan kemampuan mengalami deformasi yang lebih besar sebelum mencapai kondisi ultimit. Hal ini terjadi akibat berkurangnya luas penampang efektif beton seiring meningkatnya dimensi hollow, yang berdampak pada penurunan kekakuan serta kapasitas pengekan internal struktur.

Selain itu, bentuk kurva yang relatif halus dan tidak menunjukkan penurunan kapasitas secara tiba-tiba mengindikasikan bahwa material crumb rubber concrete memiliki kemampuan yang baik dalam meredam energi dan menjaga kestabilan respons struktur selama pembebanan lateral siklik. Dengan demikian, meskipun terdapat variasi ukuran hollow, seluruh model kolom tetap mampu mempertahankan kapasitas kekuatan secara bertahap, yang mencerminkan perilaku struktur yang duktail dan tidak mengalami keruntuhan secara getas.

3. Disipasi Energi Kumulatif

Nilai disipasi energi kumulatif pada kolom berbahan crumb rubber concrete dengan variasi ukuran hollow diperoleh dari hasil analisis numerik menggunakan ANSYS, baik untuk arah pembebanan dorong maupun tarik. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan struktur dalam menyerap dan meredam energi akibat pembebanan lateral siklik. Hubungan antara disipasi energi kumulatif dan drift ratio menunjukkan adanya peningkatan kapasitas disipasi energi seiring bertambahnya deformasi struktur. Peningkatan tersebut mencerminkan kontribusi perilaku nonlinier material serta berkembangnya mekanisme plastis selama proses pembebanan berlangsung.

Berdasarkan hasil analisis, seluruh model mengalami peningkatan nilai disipasi energi kumulatif secara progresif seiring meningkatnya drift ratio. Pada tahap awal pembebanan, perbedaan nilai disipasi energi antar model relatif kecil, yang menunjukkan bahwa pengaruh variasi ukuran hollow belum terlalu signifikan pada kondisi elastis. Namun, ketika deformasi struktur semakin besar dan respons memasuki fase inelastis, perbedaan kapasitas disipasi energi antar model mulai terlihat lebih jelas.

Model K4 secara konsisten menunjukkan nilai disipasi energi kumulatif paling tinggi dibandingkan model lainnya, kemudian diikuti oleh model K3, K2, dan K1. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan ukuran hollow menyebabkan struktur menjadi lebih fleksibel

dan mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum mengalami penurunan kapasitas. Fleksibilitas tersebut memungkinkan terbentuknya mekanisme plastis yang lebih berkembang sehingga energi yang dapat diserap dan didisipasikan oleh struktur menjadi lebih besar selama pembebanan lateral siklik.

Pada drift ratio maksimum sebesar 6%, nilai disipasi energi kumulatif model K4 mencapai 45.343,342 kN·mm, sedangkan model K3 sebesar 38.470,237 kN·mm, model K2 sebesar 38.228,732 kN·mm, dan model K1 sebesar 37.608,175 kN·mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model dengan ukuran hollow yang lebih besar memiliki kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi, terutama pada fase inelastis ketika deformasi plastis mulai mendominasi respons struktur. Dengan demikian, variasi ukuran hollow memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan struktur dalam menyerap energi akibat pembebanan siklik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perilaku struktur kolom berbahan crumb rubber concrete (CRC) dengan variasi dimensi hollow terhadap pembebanan lateral siklik, dapat disimpulkan bahwa penggunaan crumb rubber sebagai substitusi parsial agregat halus hingga kadar 10% masih memenuhi persyaratan beton struktural sesuai SNI 2847:2019. Komposisi optimum diperoleh pada campuran CRC 5% dengan kuat tekan sebesar 34,25 MPa dan kuat tarik belah 2,74 MPa, sedangkan CRC 10% menunjukkan nilai modulus elastisitas dan rasio Poisson yang lebih tinggi sehingga mengindikasikan peningkatan deformasi lateral. Hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS menunjukkan deviasi beban lateral maksimum sebesar $\pm 3\text{--}4\%$ terhadap hasil eksperimen, sehingga model numerik dinilai cukup representatif dalam menggambarkan respons struktur terhadap beban lateral siklik. Variasi dimensi hollow juga memberikan pengaruh terhadap perilaku struktur, di mana semakin kecil dimensi hollow maka kapasitas beban lateral dan kekakuan awal cenderung meningkat, sedangkan dimensi hollow yang lebih besar menghasilkan kemampuan deformasi dan daktilitas yang lebih tinggi. Seluruh model termasuk dalam kategori daktilitas tinggi sesuai FEMA 356 (2000), sehingga menunjukkan bahwa variasi dimensi hollow memberikan trade-off antara kekakuan dan kemampuan deformasi struktur. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan variasi kadar crumb rubber, melakukan validasi eksperimental, mengkaji variasi pembebanan, serta menyempurnakan model numerik agar hasil simulasi semakin akurat dan dapat diterapkan secara lebih luas pada desain struktur tahan gempa berbahan crumb rubber concrete.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committe, 213R-14. (2014). Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*.
- ACI Committee 304. (2002). ACI 304R-00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, p. 41.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2005). Steel construction manual (13th ed.). Chicago: AISC.
- ANSYS Inc. 2013. ANSYS Mechanical APDL Introductory Tutorials. United States of America.

- ASTM C330M-17a. (2017). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C331M-17. (2017). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C332-17. (2017). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Badshah, M., Badshah, S., & Jan, S. (2020). Comparison of computational fluid dynamics and fluid structure interaction models for the performance prediction of tidal current turbines. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(2), 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.10.001>
- B.S. Thomas, R.C. Gupta. 2015. Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. *J Cleaner Prod.* (102) 78–87.
- Beza, Hailu, dan Goshu Kenea. 2023. Effect of transverse opening on the strength of reinforced concrete column. *Asian Journal of Civil Engineering* (2023) 24:639–655.
- Chung, S.-Y.; Abd Elrahman, M.; Stephan, D. (2017). Effect of Different Gradings of Lightweight Aggregates on the Properties of Concrete. *Appl. Sci.* 7(585).
- Cook, dkk. 2001. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th Edition. United States of America: Wiley.
- DIN EN 1992-1-1. (2011). Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Beuth-Verlag: Berlin, Germany; p. 241.
- DIN EN 206. (2013). Concrete-Specification, Performance, Production and Conformat. Beuth Verlag: Berlin, Germany; p. 96.
- Demirboga, R.; Gül, R. (2003). Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures. *Energy Build.* 35(1155–1159).
- Dipohusodo, Istimawan. 1999. *Struktur Beton Bertulang*. Gramedia Pustaka Utama: Jakarta.
- Elango, K. S., J. Sanfeer, R. Gopi, A. Shalini, R. Saravanakumar, & L. Prabhu. (2021). Properties of Light Weight Concrete – A State of The Art Review. *Materials Today : Proceedings* 46 (2021) 4059-4062. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.571>.
- Eltayeb, E., Xing Ma, Yan Zhuge, Osama Youssf, Julie E. M. 2020. Influence of Rubber Particles, on The Properties of Foam Concrete. *Journal of Building Engineering* 30(101217).
- E.-S. Abd-Elal, S. Araby, J.E. Mills, O. Youssf, R. Roychand, X. Ma, Y. Zhuge, R.J. Gravina. 2019. Novel approach to improve crumb rubber concrete strength using thermal treatment. *Construction Building Materials* (229)116901.
- Fauzan, E. E., Evir, H. P., Agista, G. A., & Juliafad, E. (2023). Experimental Investigation on the Use of Crumb Rubber as Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete Incorporating Cement Replacement Materials. *GEOMATE Journal*, 25(111), 246–253.
- Fuad, Indra Syahrul, dan Ani Firda. 2024. The Effect of Crumb Rubber as a Substitute for Fine Aggregate in Lightweight Concrete with Addition of Fly Ash. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*, Volume 13 No. 1.
- FEMA 356. 2000. *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency.
- Ganesan, N., Raj, B., & Shashikala, A. P. (2013). Mechanical properties of rubberized concrete. *Materials and Structures*, 47(6), 1031–1042.
- H. Su, J. Yang, T.-C. Ling, G.S. Ghataora, S. Dirar. 2015. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *J. Cleaner Prod.* (91)288–296.
- Hassan, M., Sulaiman Khan, Shaojun Fu, Khushal Khan. 2025. Structural behavior of reinforced concrete column having mid-span transverse opening: Experimental study and numerical analysis. *Results in Materials* 26. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100685>.

- Hutagalung, Teresa Astuti. 2019. Potensi Pemanfaatan Limbah Karet. Kementrian Perindustrian Republik Indonesia.
- Thienel, Karl-Christian, Timo Haller, & Nancy Beuntner. (2020). Lightweight Concrete – From Basics to Innovations. *Materials* 2020, 13(1120). <https://doi.org/10.3390/ma13051120>.
- Maso, J.C., Alexander, M.G., Bentur, A., Massat, M., Massazza, F., Mindess, S., Monteiro, P.J.M., Odler, I., Ollivier, J.P., Pratt, P.L., dkk. (1996). Interfacial Transition Zone in Concrete-State-of-the-Art Report Prepared by RILEM Technical Committee 108-ICC. E & FN SPON: London, UK, Vol. 11.
- Moasas, Abdulrhman Mohamad, dkk. 2022. A Worldwide Development in the Accumulation of Waste Tires and Its Utilization in Concrete as a Sustainable Construction Material: A Review. *Case Studies in Construction Materials* 17 e01667. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01677>.
- N.N. Hilal. 2017. Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 6 (1)191–206.
- Negassa, Fraol. 2020. Numerical Investigation of Reinforced Concrete Column with Transverse Holes. *GSJ : Volume 8, Issues 2*.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). Reinforced concrete structures. New York: John Wiley & Sons.
- Pudjisuryadi, P., Tavo dan Suprobo, P. 2015. Performance of square reinforced concrete columns externally confined by steel angle collars under combined axial and lateral load. *Proceeding Engineering* 125(1043-1049).
- Ren, Fengming, Jinxu Mo, Qing Wang, & Johnny Ching Ming Ho. 2022. Crumb Rubber as Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete : An Overview. *Construction and Building Materials* (343). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128049>
- Shafigh, P.; Nomeli, M.A.; Alengaram, U.J.; Mahmud, H.B.; Jumaat, M.Z.. 2016. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash. *J. Clean. Prod.* 135(148–157).
- S. Raffoul, R. Garcia, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, N.F. Medina. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: an experimental investigation. *Construction Building and Materials.* (124) 391–404.