Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil) **E-ISSN : 2723-7052**
Vol. 7, No.2, Desember 2026, Hal 27-36
https://doi.org/10.53695/jm.v7i2.1721

Studi Eksperimental Zeolit sebagai Pengganti Sebagian Semen terhadap Kuat Tekan *Self-Compacting Concrete (SCC)*

Athasya Shakira, Euneke Widyaningsih
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: athasyashakira@gmail.com

ABSTRAK
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perancangan campuran, karakterisasi beton segar, serta perkembangan kuat tekan Self-Compacting Concrete (SCC) dengan substitusi parsial semen menggunakan zeolit. Variasi kadar substitusi zeolit yang diuji meliputi 0%, 5%, 10%, 12,5%, dan 15% dari berat semen, dengan target mutu kuat tekan 45 MPa pada umur 28 hari. Perancangan campuran disusun mengacu pada SNI 03-6468-2000 yang dikombinasikan dengan metode Okamura serta spesifikasi SKh.1.7.23 Bina Marga. Pengujian slump flow dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kemudahan pengerjaan (workability), sedangkan pengujian kuat tekan silinder (10x20 cm) dilaksanakan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase zeolit cenderung menurunkan nilai slump flow akibat tingginya daya serap air dan luas permukaan spesifik zeolit. Campuran variasi 0%, 5%, dan 10% menghasilkan nilai slump flow berturut-turut sebesar 60 cm, 58 cm, dan 58 cm, memenuhi standar kriteria EFNARC kelas SF1 (55-65 cm). Sebaliknya, variasi 12,5% (46 cm) dan 15% (42 cm) tidak memenuhi standar. Pada sifat mekanis beton keras, substitusi zeolit 10% memberikan kinerja tertinggi dengan kuat tekan 28 hari mencapai 42,43 MPa (meningkat 4,05% dibandingkan beton kontrol 40,78 MPa). Penggunaan zeolit melebihi 10% menyebabkan penurunan kuat tekan akibat berkurangnya proporsi semen sebagai pengikat utama dan meningkatnya porositas karena air tambahan. Evaluasi pola keruntuhan menunjukkan dominasi pola cone, cone and split, serta cone and shear yang tergolong keruntuhan normal. Disimpulkan bahwa kadar substitusi zeolit 10% merupakan persentase optimum untuk menghasilkan keseimbangan terbaik antara workability dan kuat tekan SCC.

Kata kunci: Self-Compacting Concrete, Zeolit, Slump Flow, Kuat Tekan, Substitusi Semen

ABSTRACT
This study aims to evaluate the mix design, fresh concrete properties, and compressive strength development of Self-Compacting Concrete (SCC) utilizing natural zeolite as a partial cement replacement. The zeolite substitution ratios were set at 0%, 5%, 10%, 12.5%, and 15% by weight of cement, targeting a specified compressive strength of 45 MPa at 28 days. The mix proportions were developed based on SNI 03-6468-2000 in conjunction with Okamura's method and Bina Marga SKh.1.7.23 specifications. Slump flow tests were conducted to determine fresh workability, while compressive strength tests on 10x20 cm cylindrical specimens were performed at ages of 7, 14, and 28 days. The results revealed that increasing zeolite content reduced slump flow due to the higher water absorption and specific surface area of zeolite particles. The mixtures with 0%, 5%, and 10% zeolite achieved slump flow values of 60 cm, 58 cm, and 58 cm, respectively, complying with the EFNARC Class SF1 criteria. Conversely, the 12.5% and 15% mixtures failed to meet the flowability thresholds. Regarding hardened properties, the 10% zeolite replacement yielded optimum mechanical performance, achieving a 28-day compressive strength of 42.43 MPa (a 4.05% increase compared to the 40.78 MPa control). Exceeding 10% zeolite replacement caused strength degradation due to the reduction of primary cementitious binder. Fracture behavior evaluation confirmed normal failure modes (cone, cone and split, cone and shear) across all test specimens. In conclusion, a 10% zeolite replacement ratio is identified as the optimum dosage that balances optimal workability and compressive strength in SCC.

Keywords: Self-compacting concrete, Zeolite, Slump flow, Compressive strength, Cement replacement

Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil) **E-ISSN : 2723-7052**
Vol. 7, No.2, Desember 2026, Hal 27-36
https://doi.org/10.53695/jm.v7i2.1721

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik sipil karena kemudahan produksi, daya tahan yang tinggi, serta biaya yang relatif efisien [1]. Material komposit ini umumnya tersusun dari campuran semen hidraulis, agregat kasar, agregat halus, dan air yang mengalami proses hidrasi sehingga mengeras dan memiliki kekuatan tekan tertentu [2]. Seiring dengan perkembangan teknologi konstruksi dan meningkatnya kompleksitas desain arsitektural yang menuntut struktur dengan penulangan yang sangat rapat, pengecoran menggunakan beton konvensional seringkali menemui kendala. Pemadatan yang tidak optimal menggunakan alat getar (vibrator) dapat menyebabkan timbulnya rongga udara (*honeycomb*) yang berakibat pada penurunan mutu dan durabilitas struktur beton.

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, beton memadat sendiri atau Self-Compacting Concrete (SCC) muncul sebagai inovasi penting. SCC pertama kali diperkenalkan pada awal tahun 1990-an oleh Hajime Okamura di Jepang [3]. SCC memiliki kemampuan untuk mengalir secara mandiri (flowability), melewati celah tulangan yang rapat tanpa hambatan (passing ability), dan mengisi seluruh ruang di dalam bekisting dengan bantuan berat sendirinya tanpa mengalami segregasi material (segregation resistance) [4]. Penggunaan SCC tidak hanya meminimalisir kebisingan di lokasi proyek karena hilangnya proses vibrasi, tetapi juga secara signifikan mempercepat waktu pengerjaan dan mengurangi biaya tenaga kerja.

Secara komposisi, SCC memerlukan penyesuaian khusus dibandingkan beton normal. SCC umumnya memiliki kadar agregat kasar yang lebih rendah, kandungan pasta (powder) yang jauh lebih tinggi, serta penambahan bahan kimia aditif berupa superplasticizer [5]. Kombinasi ini krusial untuk mencapai tingkat workability yang sangat tinggi tanpa harus meningkatkan rasio air-semen (w/c) yang dapat merugikan kuat tekan beton. Di Indonesia, fly ash (abu terbang) lazim digunakan sebagai material filler atau substitusi parsial semen dalam campuran SCC karena ukuran partikelnya yang halus mampu memperbaiki gradasi dan sifat mekanik beton [6]. Namun, ketersediaan fly ash sebagai limbah dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) seringkali tidak stabil.

Oleh karena itu, diperlukan material filler alternatif yang ramah lingkungan dan ketersediaannya melimpah di alam Indonesia. Zeolit, sebagai mineral aluminosilikat terhidrasi alam, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen [7]. Secara struktural, zeolit tersusun atas rangka tiga dimensi dari silika (SiO_4) dan alumina (AlO_4) yang saling berikatan dan membentuk sistem pori-pori mikro yang teratur. Sifat pozzolanik dari zeolit memungkinkannya bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang merupakan produk sampingan dari reaksi hidrasi semen, untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder. Reaksi sekunder ini sangat bermanfaat untuk meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kuat tekan dan durabilitas [8].

Meskipun zeolit menawarkan keuntungan mekanis, penggunaannya dalam campuran beton segar menghadirkan tantangan tersendiri. Berbagai studi terdahulu menunjukkan bahwa zeolit memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan tingkat porositas yang tinggi, sehingga memiliki daya serap air yang jauh lebih masif dibandingkan semen portland biasa [9]. Kondisi ini berpotensi menurunkan tingkat kelecakan (*workability*) atau nilai *slump flow* secara signifikan pada campuran SCC jika tidak diimbangi dengan perancangan campuran yang cermat [10]. Oleh karena itu, diperlukan proporsi campuran yang sangat presisi serta penyesuaian penambahan air dan dosis bahan tambah kimia (*superplasticizer*) agar sifat rheologi SCC tetap memenuhi spesifikasi standar [11].

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, penelitian ini bertujuan untuk menyusun perancangan campuran (*mix design*) SCC menggunakan substitusi zeolit sebesar 0%, 5%, 10%, 12,5%, dan 15% terhadap berat semen. Analisis difokuskan pada evaluasi sifat segar beton melalui uji *slump flow* dan sifat mekanis beton melalui uji kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil pengujian ini diharapkan dapat menentukan persentase optimum zeolit yang mampu memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja aliran beton segar (*workability*) dan kekuatan struktural beton keras pada beton SCC mutu tinggi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental murni di laboratorium. Proses penelitian mencakup persiapan dan pengujian material penyusun, perancangan proporsi campuran (*mix design*), pembuatan benda uji, pengujian karakteristik beton segar, tahap perawatan (*curing*), hingga pengujian mekanis beton keras.

2.1 Bahan-Bahan Penelitian

Material penyusun yang digunakan dalam penelitian ini telah dipilih secara spesifik untuk memenuhi persyaratan mutu SCC. Semen yang digunakan adalah Semen Portland Tipe I. Zeolit alam yang digunakan berasal dari wilayah Jawa Barat dan telah melalui proses preparasi khusus, yakni penggilingan dan penyaringan hingga lolos saringan ukuran 200 mesh agar dapat berfungsi optimal sebagai material pozzolan (*mineral admixture).* Agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah (*split*) yang berasal dari Padalarang dengan ukuran butir maksimum 20 mm. Agregat halus menggunakan pasir alam dari Garut yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm). Untuk mengontrol kelecakan tanpa menambah rasio air berlebih, digunakan bahan tambah kimia (*chemical admixture*) berupa *superplasticizer* jenis Sika Viscocrete 3115N [12]. Air yang digunakan adalah air bersih laboratorium yang terbebas dari kandungan lumpur, minyak, dan senyawa kimia pengganggu.

2.2 Pengujian Sifat Teknis Agregat

Sebelum merancang campuran, seluruh material agregat wajib diuji untuk mengetahui sifat fisik dan karakteristiknya. Pengujian agregat kasar dan agregat halus meliputi pengujian berat jenis (*bulk, apparent*, dan SSD) serta persentase penyerapan air, pengujian kadar air, pengujian kadar lumpur, pengujian berat isi (kondisi padat dan lepas), dan analisis saringan untuk mengetahui modulus kehalusan dan distribusi ukuran butiran. Hasil dari pengujian ini menjadi parameter utama dalam perhitungan *mix design*.

2.3 Perancangan Campuran (Mix Design)

Perancangan proporsi campuran disusun dengan merujuk pada standar SNI 03-6468-2000 mengenai Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal dan Mutu Tinggi [13]. Perhitungan proporsi tersebut kemudian dimodifikasi menggunakan metode penyesuaian Okamura, di mana perbandingan volume agregat kasar dan agregat halus ditetapkan pada rasio 50:50 dari total volume agregat. Selain itu, perancangan juga disesuaikan dengan spesifikasi teknis SKh.1.7.23 Bina Marga guna memastikan campuran memenuhi kriteria beton memadat sendiri [14]. Target kuat tekan (f'c) yang direncanakan adalah sebesar 45 MPa pada umur 28 hari.

Variasi kadar substitusi zeolit yaitu 0%, 5%, 10%, 12,5%, dan 15%. Substitusi ini dilakukan berdasarkan volume *powder* total yang dibutuhkan. Benda uji beton keras yang digunakan berbentuk silinder dengan dimensi diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Setiap

variasi campuran dibuat dalam tiga sampel replikasi untuk setiap umur pengujian (7, 14, dan 28 hari), sehingga total keseluruhan benda uji berjumlah 45 buah silinder.

2.4 Prosedur Pembuatan dan Pengujian

Proses pembuatan benda uji diawali dengan menimbang seluruh material sesuai dengan proporsi *mix design* yang telah dikalibrasi. Pencampuran dilakukan menggunakan *mini concrete mixer* hingga adukan mencapai kondisi homogen. Segera setelah proses pencampuran selesai, pengujian karakteristik beton segar dilakukan melalui metode *Slump Flow Test* menggunakan kerucut Abrams standar. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi parameter *flowability* dengan mengukur diameter sebaran aliran beton.

Setelah pengujian beton segar memenuhi kriteria, adukan beton dituangkan ke dalam cetakan silinder 10x20 cm. Sesuai dengan prinsip SCC, penuangan dilakukan tanpa bantuan alat pemadat mekanis. Benda uji didiamkan selama 24 jam di dalam cetakan, kemudian dilepas dan direndam dalam bak air untuk proses perawatan (*curing*) basah. Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan pada saat beton mencapai umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) [15]. Selain mencatat beban maksimum yang mampu ditahan, pola keruntuhan setiap silinder juga diamati secara visual dan diklasifikasikan sesuai standar SNI 1974:2011.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Fisik Agregat

Hasil pengujian terhadap sifat-sifat teknis material agregat menunjukkan bahwa agregat halus dan kasar yang digunakan memenuhi spesifikasi standar yang disyaratkan untuk pembuatan beton mutu tinggi. Ringkasan hasil pengujian properti material disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Pengujian Properti Fisik Material

No	Jenis Pengujian	Agregat Halus	Agregat Kasar	Semen	Zeolit
1	Berat Jenis (Semu/Apparent)	2,74	2,50	-	-
2	Berat Jenis (SSD)	2,62	2,43	3,15	2,36
3	Penyerapan Air (%)	2,67	1,94	-	-
4	Berat Isi Padat (gr/cm³)	1,61	1,41	-	-
5	Kadar Air (%)	2,26	5,54	-	-
6	Kadar Lumpur (%)	2,36	0,40	-	-
7	Modulus Kehalusan	3,035	-	-	-

Data di atas memperlihatkan bahwa kadar lumpur pada agregat kasar sangat rendah (0,40%) dan agregat halus berada pada batas toleransi yang aman (2,36%). Perbedaan berat jenis antara semen (3,15) dan zeolit (2,36) juga menjadi catatan penting, karena substitusi dilakukan berdasarkan persentase massa, sehingga volume *absolut powder* di dalam setiap variasi akan sedikit berbeda, namun konsistensi *mix design* tetap dijaga

secara proporsional.

3.2 Proporsi Desain Campuran (Mix Design)

Berdasarkan perhitungan SNI dan penyesuaian Okamura, berikut merupakan hasil perhitungan setiap variasi campuran dengan satuan kg/m^3 yang disajikan pada **Tabel 2.**

Tabel 2. Proporsi Campuran Beton per Meter Kubik

Material	V-Control	V-Z5%	V-Z10%	V-Z12,5%	V-Z15%
Air (kg/m³)	194,85	194,85	194,85	194,85	194,85
Semen Portland (kg/m³)	510,69	485,15	459,62	446,85	434,09
Zeolit Mesh 200 (kg/m³)	0,00	19,13	38,26	47,83	57,39
Agregat Kasar (kg/m³)	783,04	783,04	783,04	783,04	783,04
Agregat Halus (kg/m³)	783,04	783,04	783,04	783,04	783,04

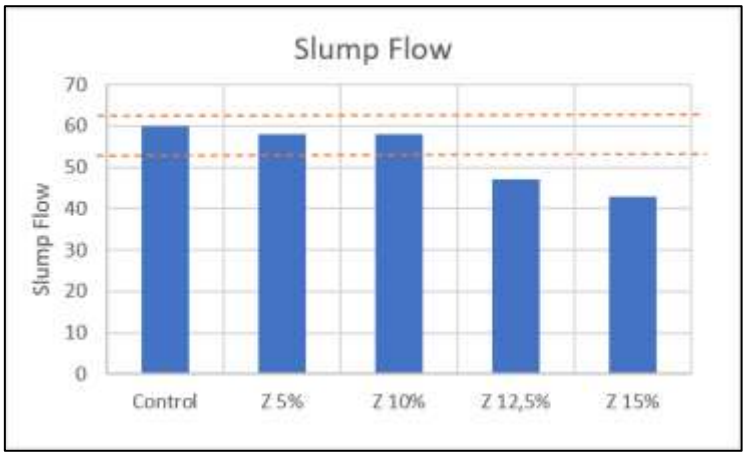
3.3 Evaluasi Beton Segar (Workability)

Pengujian *slump flow* dilakukan pada beton segar setelah proses *mixing* selesai. Pengujian ini sangat menentukan apakah campuran berhasil dikategorikan sebagai SCC atau tidak. Berdasarkan pedoman EFNARC (2005) dan SKh. 1.7.23 Bina Marga, rentang diameter sebaran aliran yang diizinkan adalah sebesar 550 mm – 850 mm, rentang tersebut terbagi menjadi 3 kelas yaitu SF1 hingga SF3. Hasil pengukuran diameter *slump flow* untuk kelima variasi ditunjukkan pada **Tabel 3** dan diilustrasikan dalam grafik.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Slump Flow

Variasi Campuran	Kadar Zeolit	Slump Flow (cm)	Keterangan (Klasifikasi EFNARC SF1)
V-Control	0%	60	Memenuhi (SF1)
V-Z5%	5%	58	Memenuhi (SF1)
V-Z10%	10%	58	Memenuhi (SF1)
V-Z12,5%	12,5%	47	Tidak Memenuhi
V-Z15%	15%	43	Tidak Memenuhi

https://doi.org/10.53695/jm.v7i2.1721



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian *Slump Flow* Terhadap Variasi Zeolit

Dari hasil pengujian, terbukti bahwa peningkatan persentase zeolit berbanding terbalik secara signifikan dengan nilai *workability*. Campuran V-*Control* menghasilkan aliran terbesar yaitu 60 cm. Pada penambahan zeolit 5% dan 10%, aliran sedikit menurun menjadi 58 cm, namun masih stabil dan masuk dalam toleransi kelas SF1 yaitu 55 – 65 cm. Penurunan drastis terjadi pada substitusi 12,5% dan 15%, di mana aliran terhenti pada diameter 47 cm dan 43 cm, sehingga gagal dikategorikan sebagai SCC. Kegagalan ini disebabkan karena volume zeolit yang dimasukkan terlalu banyak, sehingga sisa air bebas dan superplasticizer dalam campuran tidak lagi sanggup melumasi agregat akibat terabsorbsi kuat oleh partikel zeolit.

Perlu dicatat bahwa dalam penelitian ini, pengujian SCC lainnya seperti *L-Box (passing ability*) dan *V-Funnel (segregation resistance)* juga sempat dilakukan. Namun, pengujian tersebut tidak menghasilkan data yang valid dan tidak memenuhi ketentuan EFNARC. Pada pengujian *L-Box,* beton mengalami *blocking* di celah tulangan karena ukuran agregat kasar maksimum yang digunakan mencapai 20 mm, yang mana relatif besar untuk pengujian spesifik tersebut. Selain itu, keterlambatan durasi pemindahan adukan antar alat uji menyebabkan hilangnya slump (*slump loss*), sehingga pada saat *V-Funnel* dilakukan, beton sudah kehilangan sifat alirnya dan waktu tempuhnya melampaui batas maksimal.

3.4 Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis beton, serta mengukur efektivitas kimiawi dari penambahan zeolit. Pengujian dilakukan pada silinder beton saat mencapai umur 7, 14, dan 28 hari perawatan. Hasil rekapitulasi data kuat tekan rata-rata dapat dilihat pada **Tabel 4.**

Hasil analisis menunjukkan dinamika kekuatan yang sangat menarik. Pada variasi 5% (V-Z5%), kuat tekan pada umur 28 hari (40,00 MPa) hampir setara namun sedikit di bawah beton kontrol (40,78 MPa). Ini mengindikasikan bahwa pada kadar 5%, jumlah zeolit terlalu sedikit untuk memicu reaksi pozzolanik yang masif sehingga kontribusinya belum terlihat signifikan melampaui semen portland yang digantikannya.

Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil) **E-ISSN : 2723-7052**
Vol. 7, No.2, Desember 2026, Hal 27-36
https://doi.org/10.53695/jm.v7i2.1721

Tabel 4. Perkembangan Hasil Kuat Tekan Beton SCC Rata-Rata

Variasi Campuran	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)		
	Umur 7 Hari	Umur 14 Hari	Umur 28 Hari
V-Control	23,94	36,44	40,78
V-Z5%	23,06	34,29	40,00
V-Z10%	32,10	40,18	42,43
V-Z12,5%	21,95	23,92	31,29
V-Z15%	20,80	23,25	30,44

Puncak kinerja optimal terjadi secara nyata pada variasi substitusi 10% (V-Z10%). Pada umur awal (7 hari), V-Z10% langsung melonjak dengan kuat tekan 32,10 MPa, yang mana 34,11% lebih tinggi dibandingkan V-*Control* di umur yang sama. Pada umur 28 hari, V-Z10% mencapai kuat tekan maksimum sebesar 42,43 MPa, meningkat sekitar 4,05% dari beton kontrol. Peningkatan ini adalah bukti nyata terjadinya reaksi pozzolanik yang sukses. Silika reaktif dalam zeolit berhasil mengikat kalsium hidroksida bebas ($Ca(OH)_2$) yang dihasilkan dari hidrasi 90% semen yang tersisa, mengubahnya menjadi gel Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) tambahan. C-S-H sekunder ini mengisi pori-pori kapiler halus di dalam matriks beton, meningkatkan kepadatan (densitas) struktur internal, dan secara langsung meningkatkan kemampuan beton memikul beban.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan Beton SCC

Namun, ketika substitusi ditingkatkan menjadi 12,5% dan 15%, grafik kuat tekan menunjukkan penurunan yang drastis. Pada umur 28 hari, V-Z12,5% hanya mencapai 31,29 MPa (turun 26,26% dari V-Z10%) dan V-Z15% menurun menjadi 30,44 MPa (turun 28,25% dari V-Z10%). Degradasi ekstrem ini diyakini terjadi karena efek dilusi (pengenceran). Proporsi semen portland yang ditiadakan terlalu besar (mencapai 15%), sehingga jumlah ($Ca(OH)_2$) yang diproduksi dari hidrasi primer sangat terbatas. Akibatnya, sejumlah besar partikel zeolit tidak memiliki pasangan reaksi untuk membentuk gel C-S-H dan hanya bertindak sebagai pengisi pasif biasa. Selain itu, pori zeolit yang menyerap air tambahan pada saat pencampuran dapat meninggalkan rongga

udara mikro ketika beton mengering, meningkatkan porositas makro struktur yang berujung pada kelemahan struktural. Jika meninjau keseimbangan secara keseluruhan (Perbandingan Kuat Tekan dan *Workability*), variasi V-Z10% terbukti sebagai batas aman sekaligus titik optimal. Pada titik ini, zeolit memberikan kontribusi mekanis maksimal tanpa mengorbankan sifat reologi (*flowability*) beton segar hingga ke bawah standar EFNARC.

3.5 Pola Keruntuhan (Failure Modes)

Bentuk keruntuhan silinder pasca pengujian beban maksimum (*Compression Testing*) dievaluasi untuk memastikan validitas. Berdasarkan observasi visual yang dicocokkan dengan standar SNI 1974:2011, benda uji pada seluruh variasi menunjukkan pola keruntuhan yang tergolong normal. Pola keruntuhan yang dominan teridentifikasi adalah tipe *Cone* (Kerucut), *Cone and Split* (Kerucut dan Belah), serta *Cone and Shear* (Kerucut dan Geser).



Gambar 3. Identifikasi Pola Keruntuhan Benda Uji Beton SCC

Pola *Cone and Split*, yang sering teramati, ditandai dengan penghancuran berbentuk kerucut di salah satu atau kedua ujung silinder yang bersentuhan dengan plat baja mesin, diikuti oleh retakan lurus memanjang ke arah vertikal yang membelah badan silinder. Pola ini mengonfirmasi bahwa mesin penekan mendistribusikan beban secara merata dan sentris (tidak eksentris). Pola *Cone and Shear* menunjukkan retak geser diagonal yang menandakan kombinasi tegangan tekan dan geser internal. Penting untuk dicatat bahwa perubahan kadar zeolit tidak secara drastis merubah tipe pola keruntuhan. Zeolit bekerja pada level mikrostruktur untuk menunda timbulnya retak pertama, bukan merubah mekanisme dari keruntuhan beton. Hasil pola keruntuhan pada penelitian ini membuktikan bahwa proses pencampuran, pencetakan, dan perataan permukaan (*capping*) silinder telah dilakukan dengan sangat baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian eksperimen, pengujian material, perancangan *mix design*, dan analisis data laboratorium mengenai pengaruh substitusi parsial semen oleh zeolit pada *Self-Compacting Concrete* (SCC), dapat ditarik beberapa kesimpulan komprehensif sebagai berikut:

Pertama, penggunaan zeolit alam sebagai bahan substitusi semen memberikan dampak langsung yang signifikan terhadap karakteristik beton segar. Seiring dengan peningkatan persentase zeolit (dari 0% hingga 15%), tingkat kelecakan (workability) yang direpresentasikan oleh diameter *slump flow* cenderung terus menurun. Hal ini diakibatkan oleh karakteristik zeolit yang berpori dan memiliki luas permukaan spesifik tinggi, sehingga secara agresif mengadsorpsi air pencampur.

Meskipun demikian, campuran dengan substitusi zeolit hingga batas 10% (V-Z10%) masih mampu mencapai diameter slump flow sebesar 58 cm, yang mana memenuhi persyaratan ketat EFNARC untuk kelas SCC SF1 (55 - 65 cm).

Kedua, dalam tinjauan sifat mekanis beton keras, substitusi zeolit tidak memiliki efek linier terhadap kuat tekan. Takaran substitusi zeolit sebesar 10% (V-Z10%) teridentifikasi sebagai persentase optimum yang memberikan kinerja paling superior. Pada variasi ini, kuat tekan beton pada umur 28 hari mencapai nilai puncak sebesar 42,43 MPa. Peningkatan ini didorong oleh optimalisasi reaksi pozzolanik pembentuk C-S-H tambahan.

Ketiga, penggunaan zeolit yang melampaui ambang batas optimum (khususnya pada variasi 12,5% dan 15%) terbukti sangat merugikan bagi struktur SCC. Penurunan kadar semen yang terlalu masif menghilangkan bahan pengikat utama, membuat zeolit kelebihan kapasitas, serta memicu penurunan *workability* secara signifikan. Hal ini tercermin dari turunnya kuat tekan menjadi 31,29 MPa (V-Z12,5%) dan 30,44 MPa (V-Z15%). Dengan demikian, komposisi V-Z10% merupakan rancangan paling ideal yang menyeimbangkan antara kemudahan pengerjaan beton segar dan pencapaian target mutu kekuatan mekanis struktural di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] BSN, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2019)," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2019.
[2] BSN, "Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal (SNI 03-6468-2000)," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2000.
[3] H. Okamura and M. Ouchi, "Self-compacting concrete," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
[4] EFNARC, "The European Guidelines for Self Compacting Concrete," EFNARC, London, 2005.
[5] W. C. Anggitia, M. Nuklirullah, and F. F. Bahar, "Pengaruh penambahan fly ash sebagai pengganti sebagian semen terhadap kuat tekan beton SCC," *J. Komposit J. Ilmu-Ilmu Tek. Sipil*, vol. 8, no. 2, 2023.
[6] A. Firdaus, S. Riyanto, and A. Rahman, "Pengaruh fly ash dan zeolit sebagai substitusi semen terhadap kuat tekan beton," *JOS-MRK (Jurnal Online Skripsi Manaj. Rekayasa Konstr.*, vol. 5, no. 4, pp. 50–56, 2024.
[7] S.-M. Alexa-Stratulat *et al.*, "The use of natural zeolites in cement-based construction materials-A state of the art review," *Coatings*, vol. 14, no. 1, p. 18, 2024.
[8] B. Pamungkas, "Pengaruh zeolit sebagai pengganti sebagian semen terhadap sifat mekanik beton SCC mutu tinggi," Universitas Islam Indonesia, 2025.
[9] L. P. Sholikah, S. Sumari, and Y. D. Yunisari, "Modification and application study of activated natural zeolite for the treatment of liquid waste from chemical laboratory," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 26, no. 9, pp. 332–343, 2023.
[10] H. Bayat, R. Banar, M. Nikravan, P. Farnood, A. M. Ramezanianpour, and A. Kashani, "Durability, mechanical, workability, and environmental assessment of self-consolidating concrete containing blast furnace slag and natural zeolite," *J. Build. Eng.*, vol. 86, p. 108737, 2024.
[11] M. Dzikri and M. F. Sofianto, "Pengaruh penambahan superplasticizer pada beton dengan limbah tembaga (copper slag) terhadap kuat tekan beton sesuai umurnya," *J. REKAT*, vol. 2, no. 2, 2018.

[12] K. PUPR, "Spesifikasi Khusus Interim SKh-1.7.23 Beton Memadat Sendiri," Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta, 2017.
[13] K. Adiwicaksono and S. P. Budio, "Pengaruh variasi jenis semen terhadap panas hidrasi pada beton massa," *J. Mhs. Jur. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, pp. 426–433, 2020.
[14] BSN, "Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder (SNI 1974:2011)," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2011.
[15] A. Widodo, R. Budiarto, and D. Sari, "Pengaruh Penambahan Zeolit pada Durabilitas Beton Self-Compacting Concrete terhadap Korosi," *J. Rekayasa Sipil Indones.*, vol. 15, no. 2, pp. 123–135, 2023.