

## Pengontrolan Retak pada Beton dengan Optimalisasi Interaksi Komposit Beton pada Interface Zone

**Resmi Bestari Muin<sup>(\*)</sup>**

Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan, Kec. Kembangan, DKI Jakarta 11650,  
E-mail: resmi.bestari@mercubuana.ac.id

**Sagir Alva**

Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan, Kec. Kembangan, DKI Jakarta 11650,  
E-mail: sagir.alva@mercubuana.ac.id

**Agnes Hanna Patty**

Universitas Katolik Widyakarya Malang, Jl. Bondowoso 2-Malang No.2, Gading Kasri, Kec. Klojen,  
Kota Malang, Jawa Timur 65115, E-mail: agneshpatty@gmail.com

**Fidi**

Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan, Kec. Kembangan, DKI Jakarta 11650,  
E-mail: fidilee@gmail.com

**Adelfy Dara Arianti**

Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan, Kec. Kembangan, DKI Jakarta 11650,  
E-mail: adelfydaraarianti@gmail.com

### Abstrak

Studi ini melakukan kajian yang signifikan terhadap kemungkinan terjadinya retak awal dan perambatannya yang rentan terjadi pada struktur-struktur di daerah marine. Retak beton yang terjadi merambat terutama di sepanjang interface zone yang secara signifikan dikondisikan oleh karakteristik agregat. Karakteristik agregat sebagai pengisi beton memiliki peran signifikan sebagai media pelepasan energi regangan dan dikenal sebagai energi fraktur. Hubungan energi fraktur dengan sifat material belum diidentifikasi secara jelas, dan sebagian besar studi menunjukkan ketidakpekaan relatif terhadap faktor air-semen, di mana retakan beton merambat terutama di sepanjang antarmuka agregat-semen. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental tentang karakteristik fraktur beton dengan variasi gradasi agregat kasar diameter maksimum 25 mm dan 20 mm, serta variasi faktor air-semen (w/c rasio) 0,30, 0,40 dan 0,6 dengan diameter maksimum agregat kasar 19 mm. Eksperimen meliputi uji kuat tekan dan uji parameter fraktur yang terdiri dari energi fraktur dan faktor intensitas tegangan. Tes lentur tiga titik dipilih berdasarkan rekomendasi RILEM untuk menghitung parameter fraktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gradasi agregat yang digunakan dalam campuran beton mempengaruhi energi fraktur beton. Energi puncak tertinggi didapat dengan menggunakan gradasi agregat menerus. Ukuran maksimum agregat mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap energi fraktur. Semakin besar ukuran maksimum agregat dalam campuran beton, semakin tinggi energi puncak yang dicapai. Gradasi seragam dengan ukuran maksimum yang lebih kecil memiliki nilai kuat tekan yang tinggi namun energi fraktur yang rendah. Kuat tekan meningkat dengan menurunnya w/c rasio air-semen, sedangkan energi fraktur tidak memberikan pola yang sama dengan kuat tekan dengan perubahan w/c rasio.

**Kata kunci:** BKT (beton kinerja tinggi), komposit beton, retak awal, interface zone.

### Astract

This study conducts a significant study of the possibility of initial cracking and its propagation, which is susceptible to concrete structures. Concrete cracks that occur propagate mainly along the interface (interface zone) which is significantly influenced by the cement water factor and aggregate characteristics, as a concrete filler have a significant role as a strain energy release media known as fracture energy (GF). The relationship of fracture energy to material properties has not been clearly identified, besides that most studies show a relative insensitivity to the water-cement factor, where concrete cracks propagate mainly along the aggregate-cement interface. This study is an experimental study of the characteristics of concrete fractures with variations in coarse aggregate gradations, namely uniform coarse gradations with the maximum diameter of 25 mm (25 S) and 20 mm (20 S); continuous coarse aggregate with the maximum diameter of 25 mm (25 M), as well as variations in the water-cement factor (w / c ratio): 0.30 (HSC); 0.40 (MSC) and 0.6 (NSC) with a coarse aggregate maximum diameter of 19 mm. Experiments include compressive strength tests and concrete fracture property tests consisting of fracture energy

\*Penulis Korespondensi

( $G_F$ ) and stress intensity factor ( $K_I$ ). The three point flexural test was chosen based on RILEM's recommendation to calculate fracture parameters. The results showed that the aggregate gradation used in concrete mixes affected the energy of the concrete fracture. Concrete that uses aggregate with continuous gradation produces the highest fracture energy. The maximum size of the aggregate has a significant effect on the fracture energy. The greater the maximum aggregate size in the concrete mixture, the higher the energy achieved. Uniform gradations with smaller maximum sizes have high compressive strength but low fracture energy. Compressive strength increases with decreasing water/cement ratio w/c, whereas fracture energy does not give the same pattern as compressive strength with changes in w/c ratio.

**Keywords:** HPC (high performance concrete), composite material, initial cracking, interface zone

## 1. Pendahuluan

Peningkatan populasi penduduk Indonesia di abad ke-21 terjadi dengan sangat pesat disertai dengan pertumbuhan ekonomi yang pesat pula. Hal ini merupakan alasan yang kuat bagi perluasan pemukiman baik untuk perumahan, perkantoran, maupun industri sekaligus sarana dan prasarana. Sebagai negara (berkembang) dengan komposisi geographis tujuh puluh persen lautan, pengembangan sarana-prasarana sebagaimana yang disebutkan diatas, berpotensi meluas sampai ke daerah-daerah marine dengan kondisi ekstrem. Konsekuensinya, material untuk struktur-struktur pada lokasi seperti ini haruslah durable berarti membutuhkan unsur-unsur pembentuk utama (constituent) dengan kualifikasi khusus; mampu bertahan terhadap serangan-serangan lingkungan yang bersifat kimiawi, fisika, sebelum dibebani secara mekanis.

Bangunan-bangunan sipil di lingkungan marine yang terbuat dari beton, selayaknya memiliki sifat yang durable berarti membutuhkan unsur-unsur pembentuk utama (constituent) dengan kualifikasi khusus; mampu bertahan terhadap serangan-serangan lingkungan yang bersifat kimiawi, fisika, sebelum dibebani secara mekanis. Struktur-struktur beton seperti terowongan bawah laut, pilar-pilar jembatan panjang, dam, platform dls, merupakan struktur-struktur dibebani beban monotonik dan dinamis, misalnya tumbukan gelombang (Mehta & Monteiro, 2006). Pembebanan jenis ini mengakibatkan ekspansi retak mayor melalui interface zone terjadi secara cepat, dipicu oleh 'kerja' (work) akibat beban luar. Sebagai material yang rentan terhadap lubang (notch sensitive material) (Meng, Yao, Mobasher, & Khayat, 2017), (Tran, Tran, Jeon, Park, & Kim, 2016), (Chauhan, Tewani, & Kalyana Rama, 2018) ketahanan fraktur beton tergantung pada kemampuan retak/lubang awal untuk mempertahankan stabilisasi kelajuan propagasinya.

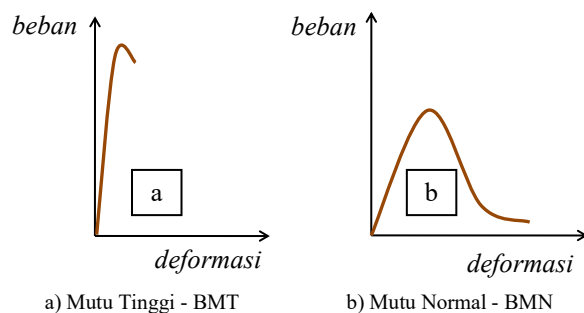
Retakan mikro yang umumnya terjadi pada struktur beton merupakan sumber potensial perambatan retak yang mengarah pada kemungkinan kegagalan katastrofik. Permasalahannya, adalah bagaimana mengeliminasi kemungkinan terjadinya retak awal sebagai starting point keruntuhan struktur. Selanjutnya, apabila terjadinya retak awal tidak dapat dicegah, maka bagaimana mengoptimalkan interaksi komposit yang bekerja pada interface zone sedemikian rupa sehingga material mampu mengembangkan crack arrester system.

Tingkat tegangan pada zona kritis di ujung retak secara signifikan dipengaruhi oleh ketegaran fraktur (fracture

toughness) direpresentasikan sebagai laju pelepasan energy kritis  $G_c$  atau faktor intensitas tegangan kritis  $K_{Ic}$ . Tujuan studi ini adalah menelaah peranan zona plastik berdasarkan konsep mekanika fraktur, mengembangkan dan mengaplikasikan konsep 'pengaruh komposisi' campuran material beton terhadap properti fraktur untuk beton marine. Komposisi yang di targetkan pada penelitian ini adalah mampu mengembangkan stable crack, artinya berpotensi untuk mengembangkan plastisitas di ujung retak actual.

### 1.1 Beton kinerja tinggi (BKT)

Kemajuan teknologi material (khususnya material sementitis) pada abad ke 21 ini telah menghasilkan sejumlah terobosan yang merubah paradigma 'kekuatan' menjadi 'kinerja'. Fenomena ini ditunjukkan oleh hubungan beban-deformasi pada **Gambar 1a.** (beton mutu tinggi) untuk fenomena kekuatan dan **Gambar 1b.** (beton normal) untuk fenomena kinerja. Persoalan yang dihadapi adalah bagaimana membuat beton dengan kinerja tinggi yang memenuhi seluruh aspek standar yaitu kekuatan, daktilitas maupun durabilitas dimana masing-masing berperan secara signifikan terhadap daya dukung, kinerja pasca puncak, dan ketahanan terhadap lingkungan.



**Gambar 1. Hubungan Beban-Deformasi Material Beton**

Program SHRP tentang *High Performance Concrete* mendefinisikan BKT untuk aplikasi jalan raya dalam terminologi kekuatan, dan rasio air-semen sebagai berikut (S. Shah & Ahmad, 2014) :

Karakteristik kekuatan;

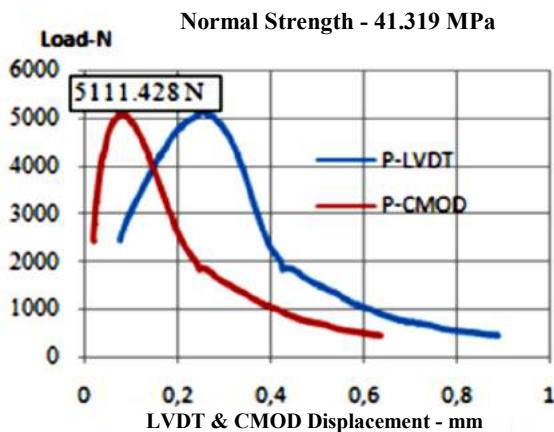
umur 4 jam,  $f'_c \geq 17,5 \text{ MPa}$

umur 24 jam,  $f'_c \geq 34,5 \text{ Mpa}$

umur 28 hari,  $f'_c \geq 69 \text{ Mpa}$

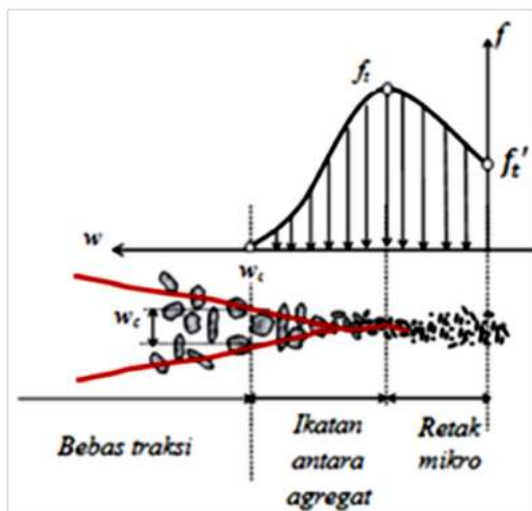
Memiliki faktor air semen  $\leq 0,35$

Upaya peningkatan kinerja BKT dalam penelitian ini akan dititikberatkan pada peningkatan kekuatan yang kompatibel (compatible) antara agregat dan matriks (semi daktilitas), yaitu dengan mengoptimalkan peranan interface zone sedemikian rupa sehingga dimungkinkan terciptanya fenomena 'kelelahan-partial' pada material beton polos. Hal ini diperlukan sebagai stimulus yang memungkinkan terjadinya crack closure phenomenon pada kasus pembebanan fatik. Kuat-tekan yang tinggi sekaligus kelelahan-parsial dimungkinkan terjadi dibawah pengendalian yang cermat terhadap: factor air-semen, butir maksimum agregat, gradasi, anguliritas, kekerasan dan kekakuan agregat, serta metoda pemeliharaan. Sebuah penelitian (Patty & Sugiarti, 2013) dilakukan terhadap beton polos dengan kuat tekan actual 41.319 MPa menggunakan pengujian tiga titik lentur (RILEM Technical Committee 50 FMC) menghasilkan energy fraktur  $G_F$  untuk model 'retak fiktif' berbentuk fungsi bi-linier sebesar 188 N/m. Verifikasi dilakukan berdasarkan CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90) diperoleh kuat tekan sebesar 184N/m. Studi yang sama



(a)

Hasil pengujian tiga titik lentur beton polos-displacement control



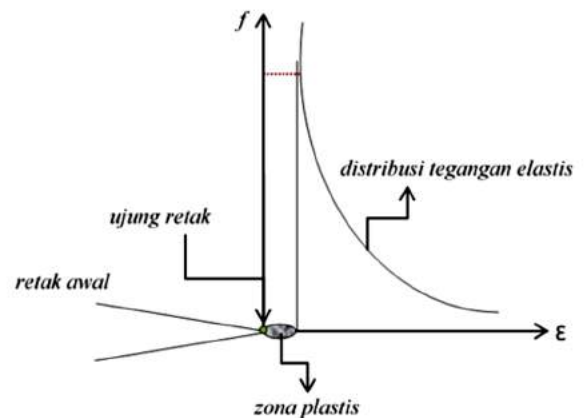
(b)

Retak mikro sebagai crack arrester

Gambar 2. Bridging effect terhadap kelajuan perambatan retak

dilaporkan oleh RILEM Round Robin Teast (S. P. Shah, Swartz, & Ouyang, 1995), adalah 193 N/m. Kurva perlambatan (decending curve) sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2. merepresentasikan perambatan retak yang tertahan oleh retak mikro (Patty & Sugiarti, 2013).

Retak mikro, merupakan konsekuensi dari *bridging effect*, dimana agregat berperan sebagai *reinforcement* dari matriks. Dari sudut pandang interaksi komposit antara agregat dan matriks, *bridging* terjadi karena kemampuan *interface zone* mengikat atau mempertahankan gelinciran agregat terhadap matriks 'sesaat' pada nilai tegangan tarik  $f_t$ . Dalam kasus ini, agregat berperan sebagai *reinforcement* bagi matriks. Penahanan terhadap gelinciran pada tegangan tetap secara bertahap membentuk retak mikro di ujung retak mayor. Bila retak mikro ini cukup solid,  $f_t$  bernilai konstan sepanjang zona retak mikro yang dikenal sebagai zona plastis (*plastic zone*). Fenomena inilah yang mendasari gagasan leleh beton secara parsial setiap kali terjadi pembukaan ujung retak actual (*crack tip opening displacement*) sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Zona plastis di ujung retak

Pada beton normal, dibuktikan bahwa dibawah *non-reversed fatigue loading*, panjang zona plastis lebih panjang dibandingkan dengan pada beban monotonik, sebuah implikasi dari *crack closure phenomenon* (Patty & Sugiarti, 2013)

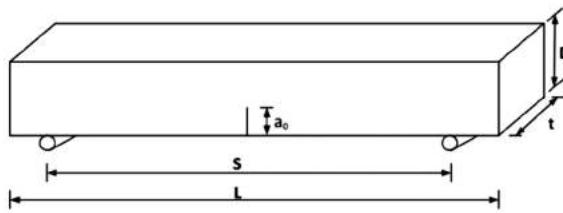
## 2. Metode

### 2.1 Benda uji

Benda uji merupakan beton normal dan beton kinerja tinggi dengan kuat tekan rencana masing-masing 35 dan 65 MPa. Benda uji utama berupa balok dengan retak awal dan dibagi atas dua kelompok yaitu:

- Beton dengan variasi gradasi, yakni gradasi seragam 20 mm (20 S), seragam 25 mm (25 S) dan gradasi menerus 25 mm (25 M), masing-masing dengan w/c rasio yang sama yakni 0,3.
- Beton dengan variasi w/c rasio, yakni w/c rasio 0,30 (HSC); 0,40 (MSC) dan 0,6 (NSC) dengan diameter agregat maksimum 19 mm.

Merujuk kepada RILEM (S. P. Shah, 1990), benda uji utama merupakan balok lentur, mempunyai dimensi beams 100x200x1190 mm dengan panjang antar perletakan  $S = 113 \pm 0,5$  cm sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4**.

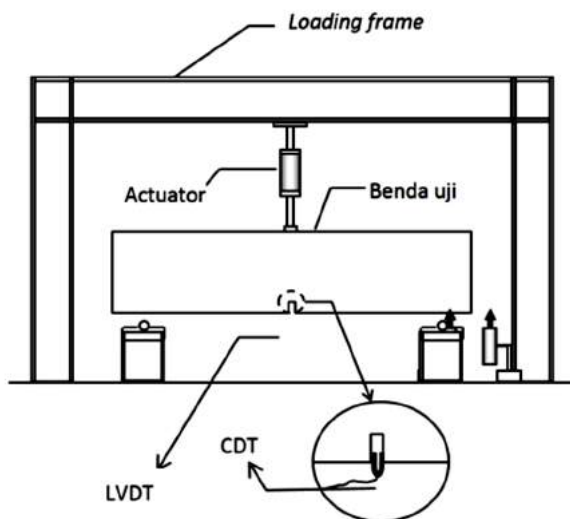


**Gambar 4.** Dimensi benda uji lentur

Selain benda uji berbentuk balok, juga dibuat benda uji berbentuk silinder dengan ukuran 15x30 cm dari molen yang sama untuk masing-masing variasi campuran agar diketahui kuat tekan dan modulus elastisitas campuran beton setiap variasi campuran.

## 2.2 Pengaturan pembebanan

Benda uji dibebani secara lentur tiga titik dengan menggunakan *Dartec Testing Machine* kapasitas 120 kN. Melalui actuator pembebanan diberikan secara bertahap (monotonic) dengan laju perpindahan sebesar 0.05 mm/det. Pengukuran dilakukan terhadap perpindahan di tengah bentang dan bukaan retak yang dilakukan secara simultan masing-masing dengan menggunakan LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) tipe SDP-100 dan CDT (*Crack Displacement Transducer*) tipe UB-5 seperti diperlihatkan pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Sistematika set-up pengujian monotonic balok

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Program ekperimental

#### 3.1.1 Material

Pemeriksaan material diperlukan sebelum proses pembuatan spesimen beton yang akan diuji. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik dari material yang sesuai dengan standar dan sebagai data untuk perencanaan campuran beton. Uji karakteristik terhadap bahan-bahan utama pembentuk beton dilakukan terutama terhadap agregat kasar dan halus, dimana kedua bahan ini merupakan bahan alam yang berubah sesuai dengan lokasi pengambilannya.

Pada penelitian ini digunakan agregat kasar berupa batu pecah yang berasal dari Rumpin, Bogor. Sedangkan agregat halus menggunakan pasir Bangka yang diperoleh dari toko Budi Karya Joglo. Sedangkan semen yang digunakan adalah semen tipe 1 yang diperoleh dari batching plant PT JHS.

Semua pengujian karakteristik agregat dilakukan di laboratorium bahan Teknik Sipil Universitas Mercubuana. Pengujian terhadap material-material penyusun beton di periksa dengan menggunakan metode-metode pengujian sebagai berikut:

Pemeriksaan agregat kasar dilakukan secara visual serta dilakukan pengujian berat jenis (ASTM C-127), kadar air (ASTM C-556), dan berat isi agregat kasar (ASTM C 29); Pemeriksaan agregat halus meliputi berat jenis dan penyerapan (ASTM C 128-98), kadar air (ASTM C 566-78), kadar lumpur (ASTM C 117-80), analisis saringan (ASTM C 33-93), berat volume (ASTM C 29); Pemeriksaan terhadap semen dilakukan dengan cara visual yaitu semen dalam keadaan tertutup rapat dan setelah dibuka tidak ada gumpalan serta butirannya yang halus; Pemeriksaan terhadap air dilakukan secara visual yaitu air harus bersih, tidak mengandung lumpur, minyak dan garam sesuai dengan persyaratan. Hasil dari pemeriksaan material disajikan pada **Tabel 1**.

Hasil yang didapat dari pemeriksaan material diatas digunakan sebagai data dalam pembuatan rancangan campuran (mix design) beton.

#### 3.1.2 Rancangan campuran (mix design)

Untuk eksperimen atas dasar variasi air terhadap semen (w/c ratio), rancangan campuran beton dibagi dalam 2 kategori berdasarkan kekuatannya, yaitu; beton mutu normal untuk w/c ratio 0.4 dan 0.6 dan beton mutu tinggi untuk w/c ratio 0.3. Berdasarkan data-data karakteristik bahan-bahan pada **Tabel 1** dibuat rancangan campuran beton normal menggunakan

**Tabel 1.** Karakteristik agregat kasar dan halus

	Berat Jenis (gr/cm <sup>3</sup> )	Berat Isi (gr/cm <sup>3</sup> )	Kadar Air (%)	Penyerapan (%)	Kandungan Lumpur (%)	Modulus Halus Butir
Agregat kasar	2.49	1.46	2.23	3.55	-	3.28
Agregat halus	2.63	1.67	4.4	0.6	1	2.79

**Tabel 2. Komposisi campuran beton untuk eksperimen atas dasar variasi w/c ratio**

Kode mix	Semen Portland	Agregat Halus	Agregat Kasar	Fly Ash	SP	Air	w/c	Slump
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>		mm
NSC	320	927	906	0	0	192	0.6	48
MSC	507	726	909	0	0	203	0.4	44
HSC	382	546	1153	160	3	163	0.3	32

**Tabel 3. Komposisi campuran beton untuk eksperimen atas variasi gradasi agregat kasar**

Kodemix	Semen	Fly Ash	Pasir	Agregat kasar (Kg/m <sup>3</sup> )				Total Agregat Kasar	SP	Air	w/c	Slump
	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	25 mm	19.1 mm	12,7 mm	9.52 mm	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>		cm
25 M	382	160	546	288	358	231	277	1153	3.2	163	0.3	5
25 S	382	160	546	1153	-	-	-	1153	3.2	163	0.3	5
20 S	382	160	546	-	1153	-	-	1153	3.2	163	0.3	5

prosedur yang ditetapkan SNI 7656-2012 yang mengadopsi ACI R-211-1.91, sedangkan untuk beton mutu tinggi digunakan proporsi dari Burg & Ost dalam (Mehta & Monteiro, 2006). Dan setelah dilakukan koreksi komposisi akibat pengaruh kadar air dan penyerapan agregat, diperoleh komposisi Campuran beton atas dasar massa dengan agregat kasar maksimum 19 mm untuk setiap m<sup>3</sup> beton seperti terlihat pada **Tabel 2**

Untuk eksperimen atas dasar variasi gradasi agregat, beton dirancang untuk mutu tinggi dengan mengadopsi proporsi dari Burg & Ost dalam (Mehta & Monteiro, 2006). Rancangan campuran direncanakan menggunakan 3 jenis gradasi agregat yaitu gradasi menerus dengan ukuran maksimum agregat 25 mm (25 M) dan gradasi seragam dengan ukuran maksimum agregat 25 mm (25 S) dan 20 mm (20 S). Dan setelah dilakukan koreksi komposisi akibat pengaruh kadar air dan penyerapan agregat, diperoleh komposisi campuran beton untuk setiap m<sup>3</sup> beton seperti terlihat pada **Tabel 3**.

### 3.1.3 Spesimen

Pembuatan benda uji untuk mendapatkan kuat tekan karakteristik beton terdiri dari kubus berukuran 15x15cm dan silinder berukuran 15x30 cm yang diuji pada usia 7, dan 28 hari sesuai dengan standar pengujian SNI 1974-2011. Sedangkan pembuatan sampel uji beban lentur menggunakan balok berukuran 20x10x120cm dengan panjang antar perletakan  $S=113\pm0,5$ cm yang merujuk pada (S. P. Shah et al., 1995) dengan ukuran maksimum agregat 16.1-31 mm. Pengaturan rasio takik 0.25 dari tinggi balok dengan laju pembebanan diatur 0.05 mm/menit dan diuji dibawah 3 titik lentur sehingga menghasilkan kurva load-displacement. Pengujian beban lentur didasari oleh RILEM technical committee 89-FMT 1990 yang memberikan rekomendasi parameter fraktur material, dimana close-loop testing machine dengan CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) yang akan memberikan sinyal balik untuk mencapai kegagalan stabil. Alat bantu clip gauge controls atau LVDT diperlukan untuk mengukur CMOD, hal ini dikarenakan antara beban dan CMOD akan terekam secara menerus selama masa pengujian.

### 3.2 Hasil kuat tekan dan modulus elastisitas

Pengujian kuat tekan beton dilakukan terhadap benda uji kubus dan silinder dengan menggunakan mesin uji kuat tekan Compression Testing Machine. Pengujian kuat tekan beton dilakukan setelah beton mencapai umur 7 hari (diperlukan untuk dapat memperkirakan kekuatan awal beton) dan 28 hari. Sedangkan Modulus elastisitas adalah rasio dari tegangan normal tarik atau tekan terhadap regangan, yang nilainya tergantung pada umur beton, sifat-sifat agregat dan semen, kecepatan pembebanan, jenis dan ukuran dari benda uji. Metode uji modulus elastisitas beton menggunakan prosedur dari ASTM C469-94. Hasil dari pengujian parameter kekuatan dari sampel ini disajikan dalam **Tabel 4**.

Dari **Tabel 4** terlihat bahwa karakteristik dari agregat mempengaruhi kemampuan beton dalam menahan tekan baik berdasarkan gradasi maupun ukuran maksimum agregat. Kuat tekan tertinggi didapat dari campuran beton dengan gradasi seragam 20 mm. Hal ini terjadi karena komposisi agregat dari campuran dengan ukuran maksimum agregat 20 mm lebih mengisi rongga antar ruang dalam campuran beton sehingga beton yang dihasilkan menjadi lebih padat. Dengan ukuran maksimum agregat yang sama, gradasi menerus lebih memiliki nilai kuat tekan dan modulus yang lebih besar. Karena distribusi agregat yang menerus mengisi ruang/rongga dalam campuran beton sehingga menjadi lebih padat dibandingkan dengan gradasi seragam. Hasil dari pengujian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Siregar (Atur P N Siregar, 2012) bahwa gradasi yang lebih halus menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi karena mengisi rongga antar ruang dalam campuran beton sehingga menjadi lebih padat. Hasil yang sama juga diperoleh (Beshr, Almusallam, & Maslehuddin, 2003) bahwa karakteristik agregat sangat berpengaruh dalam kemampuan beton dalam menahan beban dan (Meddah, Zitouni, & Belâabes, 2010) yang mengatakan bahwa kemampuan beton dalam menahan kuat tekan dipengaruhi oleh ukuran maksimum agregat. Untuk beton normal, semakin besar ukuran maksimum agregat menghasilkan kemampuan menahan tekan yang lebih besar dan sebaliknya, pada beton mutu tinggi,



**Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas beton**

Kode mix	w/c	Kuat Tekan (fc')			Modulus Elastisitas (E) (N/mm <sup>2</sup> )	Slump (mm)
		7 hari	42 Hari	56 Hari		
NSC	0.6	26.01	22.21	32.09	5524	48
MSC	0.4	28.96	40.01	41.87	8758	44
HSC	0.4	40.21	47.17	41.87	7746	32
25 M	0.3	38.58		49.83	7881	50
25 S	0.3	35.02		36.45	6881	50
20 S	0.3	44.62		51.1	8114	50

**Tabel 5. Perbandingan hasil kuat tekan dan modulus elastisitas beton dengan penelitian terdahulu**

Kode	Studi ini			Penelitian Terdahulu											
	NSC	MSC	HSC	Halit C. M. (2008)			David Darwin (2001)			Dawei Zhang (2013)			Zhang Dong (2001)		
				10EB	14EB	18EB	NB	MB	HB	LS	MHS	HS	NSC	MSC	HSC
w/c	0.6	0.4	0.3	0.3	0.26	0.25	0.46	0.35	0.28	0.63	0.40	0.33	0.50	0.40	0.30
Usia (hari)	56	56	56	62	57	83	56	56	56	-	-	-	28	28	28
Kuat Tekan (fc')	32.09	41.87	46.85	75.2	103.7	110.6	42.3	51.6	87.6	29.3	52.6	78.8	43.4	58.0	83.6
Modulus Elastisitas (E)	5524	8758	7746	-	-	-	-	-	-	26800	33400	36800	28900	33000	44900
Slump	48	44	32	-	-	-	80	120	160	-	-	-	-	-	-

semakin kecil ukuran maksimum agregat menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar.

Selain itu dari pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas pada **Tabel 4**, dapat dinyatakan bahwa semakin rendah nilai faktor air semen maka kekuatan beton akan semakin meningkat. Hal ini dikarenakan adanya proses reaksi hidrasi antara semen dan air, dimana senyawa-senyawa pada partikel semen berinteraksi dan saling mengikat satu sama lain, yang kemudian menyebabkan komponen menjadi padat dan secara spesifik membentuk suatu struktur yang kokoh. Hal ini dibuktikan oleh penelitian terdahulu yang dirangkum pada **Tabel 5**.

Dapat dilihat pada **Tabel 5** bahwa berdasarkan Penelitian Dawei Zhang (2013)(Zhang, Ueda, & Furuuchi, 2012), memvariasikan beton berdasarkan 3 kategori yaitu *low strength (LS)*, *middle high strength (MHS)*, dan *high strength (HS)*. Dimana hasilnya adalah kekuatan tekan beton yang menggunakan w/c rasio 0.33 memiliki nilai kekuatan tekan yang relatif lebih besar 1-2% per 0.01 kenaikan w/c rasio. Sedangkan hasil kekuatan pada penelitian Zhang Dong (2001)(Dong & Keru, 2001), terlihat sangat signifikan menyerupai penelitian David Darwin (2001)(Darwin, Barham, Kozul, & Luan, 2001) dimana nilai kekuatan tekan terbesar terjadi pada beton yang memiliki w/c rasio sebesar 0.34.

Apabila dilihat dari pola keruntuhan atau retak beton, Halit C. M. (2008)(Mertol, Rizkalla, Zia, & Mirmiran, 2008), menyatakan bahwa masing-masing kekuatan silinder untuk tiga kekuatan target dalam penelitiannya (76,4, 102,5, dan 106 MPa) dicapai nilai rata kekuatan silinder sebesar 16,0 KSI (110 MPa) yang memiliki w/c rasio 0.25 dengan semua spesimen tes memiliki

mode kegagalan peledak serupa tanpa retak yang terlihat sampai kegagalan. Sedangkan David Darwin (2001)(Darwin et al., 2001), melakukan pengamatan dalam penelitiannya cocok dengan peneliti lain yaitu (Kaplan, 1959; Giaccio, Et. AL., 1992; Ozturan dan Cecen, 1997) yang menemukan bahwa matriks pasta semen yang lebih padat dan kaku pada beton kekuatan tinggi, mengakibatkan kompatibilitas yang lebih besar dari segi kekuatan dan kekakuan antara pasta semen dan agregat, sehingga mengarah ke menurunkan konsentrasi stres di matriks-agregat antarmuka.

Hal diatas mendukung hasil pengujian kuat tekan pada penelitian ini dimana beton dengan w/c rasio lebih rendah memiliki kekuatan tekan yang relatif meningkat, dengan model kegagalan dan retak beton dapat dilihat pada **Gambar 6**, dimana beton dengan kekuatan tinggi relatif hancur pada matriks agregat, sedangkan untuk beton dengan kekuatan sedang dan rendah pola retak menjalar disekitar agregat dan menunjukkan perilaku keruntuhan yang lebih stabil.

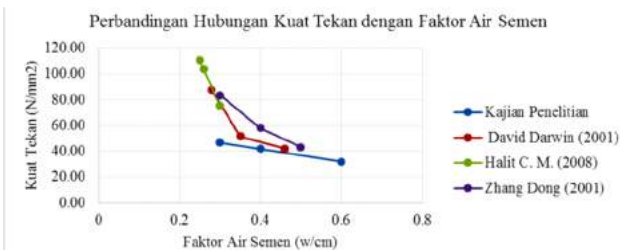
Perbandingan kuat tekan dari studi ini dan peneliti terdahulu disajikan pada **Gambar 7**.



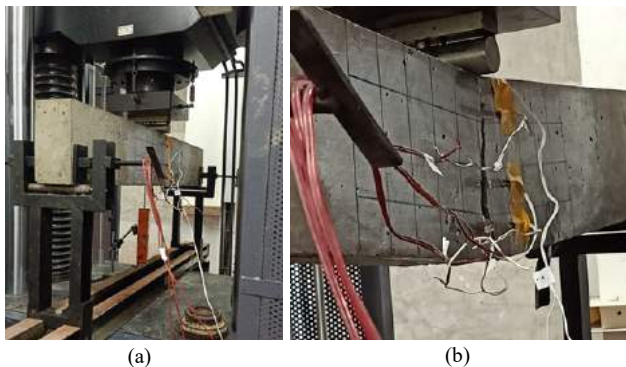
**Gambar 6. Pola kerusakan spesimen pada uji pembebanan tekan (kiri ke kanan) pada beton dengan w/c rasio 0.3, 0.4 dan 0.6**

### 3.3 Energi fraktur beton

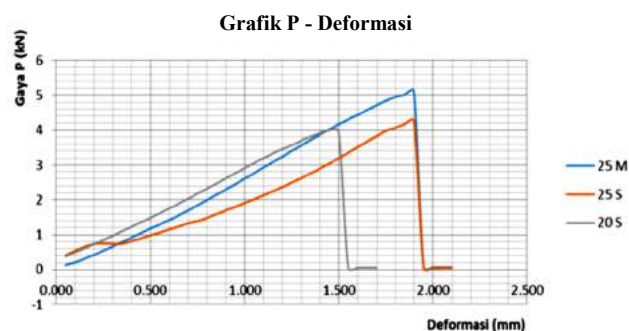
Untuk mendapatkan energi fraktur beton dilakukan uji *three point bend* menggunakan mesin uji servo-hidraulik closed loop di laboratorium Rekayasa Struktur ITB Bandung. Beban monotonik dan laju deformasi diatur sebesar 0.05 mm/menit diberikan terhadap spesimen balok yang seperti terlihat pada **Gambar 8**.



**Gambar 7. Grafik perbandingan hubungan kuat tekan dan w/c rasio terhadap penelitian terdahulu**



**Gambar 8. a) Bentuk pengaturan spesimen sebelum diuji  
b) Spesimen setelah diuji dengan beban monotonik.**



**Gambar 9. Hubungan gaya (kN) dengan deformasi vertikal spesimen balok dengan variasi gradasi agregat kasar**

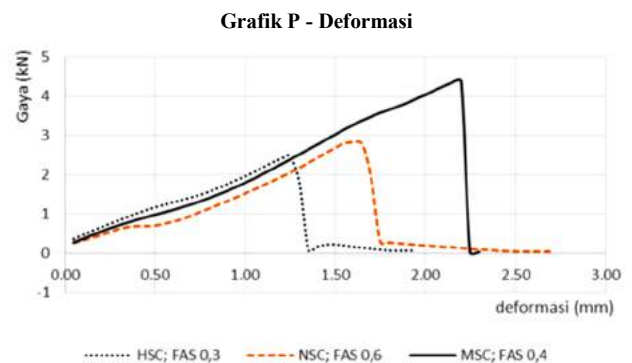
Hasil pengujian spesimen secara monotonik menghasilkan hubungan antara beban/gaya yang diberikan dalam kN terhadap deformasi balok ditengah bentang yang disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 9 dan 10**.

Berdasarkan grafik pada **Gambar 9 dan 10** dapat dihitung energi fraktur ( $G_F$ ) beton dengan menggunakan metode Work of fracture berdasarkan rumus dari (Yan, Wu, Zhang, & Yao, 2001):

$$G_F = \frac{w_o + mg \cdot \delta_{max}}{A_{lig}} \quad (1)$$

Dimana  $G_F$  adalah energi fraktur total;  $w_o$  adalah luas daerah kurva;  $mg$  = berat dari sampel balok; dan  $A_{lig}$  adalah luas bersih dari penampang melintang sampel balok. Metode work of fracture ini merupakan metode yang telah banyak digunakan oleh para peneliti terdahulu seperti (Kazemi, Golsorkhtabar, Beygi, & Gholamitabar, 2017); (A P N Siregar, Rafiq, & Mulheron, 2017); (Bazant & Yu, 2011) dan (Wang et al., 2012). Hasil perhitungan energi fraktur berdasarkan persamaan (1) disajikan pada **Tabel 6**.

Dari **Tabel 6**, terlihat bahwa energi fraktur tertinggi: 491.128 N/m didapat dari campuran MSC tanpa bahan superplastisizer (NSP) dengan w/c 0.4 dan agregat apa adanya dengan diameter maksimum 25 mm, menyusul pada campuran 25 M menggunakan SP dengan w/c ratio 0.3. Hal ini disebabkan karena komposisi dari agregat yang terdistribusi secara menerus tidak memungkinkan rambatan energi di interface zone sehingga, energi yang diberikan terserap langsung ke dalam agregat yang dapat mengakibatkan runtuh secara



**Gambar 10. Hubungan gaya (kN) dengan deformasi vertikal spesimen balok dengan variasi w/c ratio**

**Tabel 6. Hasil karakteristik fraktur setiap campuran dengan metoda work of fracture**

Kode Mix	Umur hari	Fc' Mpa	E Mpa	m.g N	Wo Nm	$\delta$ m	D m	ao m	t m	GF N/m	KIC
25 S	56	36.45	6.881	554.680	3.923	0.002	0.2	0.05	0.1	401.614	52.569
20 S	56	51.1	8.114	542.528	3.386	0.001	0.2	0.05	0.1	334.098	52.066
25 M	56	49.83	7.881	550.368	4.919	0.002	0.2	0.05	0.1	467.229	60.681
NSC	56	32.09	5524	521.948	2.55	0.0027	0.2	0.05	0.1	357.510	
MSC	56	41.87	8758	536.060	4.90	0.0023	0.2	0.05	0.1	491.128	
HSC	56	41.87	7746	539.784	1.91	0.0019	0.2	0.05	0.1	267.517	

seketika apabila energi yang diserap melebihi kemampuan dari agregat.

Ukuran maksimum agregat juga berpengaruh yang signifikan terhadap energi fraktur beton. Ukuran butiran yang lebih kecil membuat komposisi dari agregat menjadi lebih padat, sama dengan gradasi menerus, ukuran agregat yang lebih kecil mengurangi rambatan energi di interface zone sehingga seluruh energi diserap saat loading dan digunakan untuk membuka retakan pada beton.

Sedangkan untuk ukuran agregat yang besar dan gradasi seragam, energi yang diserap saat loading di distribusikan pada hubungan antara agregat dengan matriks, sehingga energi puncak yang didapat lebih rendah dibandingkan dengan gradasi menerus yang ukuran maksimal agregat sama.

Hasil dari penelitian ini mendukung hasil penelitian terdahulu (Patty, 2016) yang mana dari hasil penelitian ini dinyatakan bahwa material beton dengan butiran agregat kecil cenderung lebih padat dan monolitik; seluruh energi yang diserap saat loading dipergunakan hanya untuk separasi bidang retak, kemudian dilepas secara seketika. Pada butiran yang lebih besar, diperlukan energi saat loading yang lebih besar sebagai konsekuensi adanya hambatan berupa traksi. Penelitian dari (A P N Siregar et al., 2017) juga menyatakan bahwa distribusi ukuran agregat dalam campuran beton mempengaruhi kemampuan beton mutu tinggi dalam menahan energi fraktur. (Khalilpour, BaniAsad, & Dehestani, 2019) juga menyatakan bahwa dengan meningkatkan ukuran agregat maksimum, energi fraktur meningkat. Hal ini disebabkan karena agregat yang lebih besar membutuhkan lebih banyak penyerapan energi baik dengan meningkatkan energi yang dibutuhkan untuk memecah agregat atau perpanjangan jalur perambatan retak untuk berjalan di sekitar agregat.

#### **4. Kesimpulan**

Dari beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari gradasi agregat terhadap energi fraktur beton, Kesimpulan yang didapat adalah:

- Gradasi agregat yang digunakan dalam campuran beton mempengaruhi energi fraktur beton. Energi puncak tertinggi didapat dengan menggunakan gradasi agregat menerus.
- Ukuran maksimum agregat mempunyai pengaruh yang signifikan juga terhadap energi fraktur. Semakin besar ukuran maksimum agregat dalam campuran beton, semakin tinggi energi puncak yang dicapai.
- Gradasi seragam dengan ukuran maksimum yang lebih kecil memiliki nilai kuat tekan yang tinggi namun energi fraktur yang rendah. Hal ini menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai kuat tekan dari beton, semakin getas beton tersebut.
- Kuat tekan meningkat dengan menurunnya w/c rasio air-semen, sedangkan energi fraktur tidak

memberikan pola yang sama dengan kuat tekan dengan perubahan w/c rasio. Hal ini terjadi selaras dengan peningkatan energi tarik yang tersimpan pada material namun kemampuan untuk membuang energi tersebut tetap, sehingga menyebabkan ketidakstabilan pada struktur. Didukung oleh spesimen pasca-uji yang menunjukkan pola perambatan retak yang identik seperti penelitian Zhang Dong, Et. Al. 2001. Jalur retak pada beton HS merambat dan memberikan pecah pada matriks agregat-pasta. Hal ini dikatakan serupa oleh Kim et al. (1997) yang memperoleh hasil cenderung sama dengan studi ini.

#### **5. Ucapan Terima Kasih**

Penelitian ini terlaksana atas dukungan dana Hibah PTM dari Kemenristek DIKTI dan PT JHS yang telah turut mendukung dalam hal pengadaan sebagian material. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih, semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat dalam perkembangan teknologi beton.

#### **6. Daftar Pustaka**

- Bazant, Z. P., & Yu, Q. (2011). Size-effect testing of cohesive fracture parameters and nonuniqueness of work-of-fracture method. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(8), 580–588.
- Beshr, H., Almusallam, A. A., & Maslehuddin, M. (2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 97–103.
- Chauhan, D. R., Tewani, H. R., & Kalyana Rama, J. S. (2018). Application of Principles of Linear Elastic Fracture Mechanics for Concrete Structures: A Numerical Study. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 877, pp. 282–288).
- Darwin, D., Barham, S., Kozul, R., & Luan, S. (2001). Fracture energy of high-strength concrete.
- Dong, Z., & Keru, W. (2001). Fracture properties of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(1), 86–88.
- Kazemi, M. T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M. H. A., & Gholamitabar, M. (2017). Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. *Construction and Building Materials*, 142, 482–489.
- Khalilpour, S., BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). A review on concrete fracture energy and effective parameters. *Cement and Concrete Research*, 120, 294–321.
- Meddah, M. S., Zitouni, S., & Belâabes, S. (2010). Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of



- concrete. *Construction and Building Materials*, 24 (4), 505–512.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. New York (Third edit). London: McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071462899>
- Meng, W., Yao, Y., Mobasher, B., & Khayat, K. H. (2017). Effects of loading rate and notch-to-depth ratio of notched beams on flexural performance of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 83, 349–359.
- Mertol, H. C., Rizkalla, S., Zia, P., & Mirmiran, A. (2008). Characteristics of compressive stress distribution in high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 105(5), 626.
- Patty, A. H. (2016). Peranan Diameter Maksimum Agregat Terhadap Kinerja Fraktur Beton Normal Pola Bukaam Tarik Tunggal. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XII* (pp. 419–426).
- Patty, A. H., & Sugiarti, S. (2013). Energi Fraktur Beton Dengan Keruntuhan Kuasi-Regas Berdasarkan Model Retak Fiktif Fungsi Bi-Linier. *Rekayasa Sipil*, 7(2), 88–95.
- Shah, S., & Ahmad, S. (2014). *High performance concretes and applications*. New York: CRC Press.
- Shah, S. P., Swartz, S. E., & Ouyang, C. (1995). *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. New York: John Wiley & Sons.
- Siregar, A P N, Rafiq, M. I., & Mulheron, M. (2017). Experimental investigation of the effects of aggregate size distribution on the fracture behaviour of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 252–259.
- Siregar, Atur P N. (2012). Fracture Characteristic Of Normal And High Strength Concrete Using Different Aggregate Grading.
- Tran, N. T., Tran, T. K., Jeon, J. K., Park, J. K., & Kim, D. J. (2016). Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 79, 169–184.
- Wang, G., Zhang, L., Zhang, J., Largeot, C., Portet, C., Chmiola, J., ... Holze, R. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chem. Soc. Rev.*, 41(2), 797–828. <https://doi.org/10.1039/C1CS15060J>
- Yan, A., Wu, K.-R., Zhang, D., & Yao, W. (2001). Effect of fracture path on the fracture energy of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1601–1606.
- Zhang, D., Ueda, T., & Furuuchi, H. (2012). Fracture mechanisms of polymer cement mortar: concrete interfaces. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(2), 167–176.

