

ENERGI FRAKTUR BETON DENGAN KERUNTUHAN KUASI-REGAS BERDASARKAN MODEL RETAK FIKTIF FUNGSI BI-LINIER

Agnes H. Patty, Sugiarti
Politeknik Negeri Malang
E-mail: agneshpatty@gmail.com

ABSTRAK

Pengujian fraktur dilakukan terhadap balok beton polos dengan kuat tekan rencana 30 MPa, merujuk pada RILEM Technical Committee 50-FMC di bawah displacement control dengan menggunakan *close-loop testing machine*. Response pasca puncak yang bersifat non-linier dimodelkan menurut kurva bi-linier yang direkomendasikan oleh CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90). Dengan mengaplikasikan prinsip J-integral pada kurva 'Load-CMOD', bukaan retak kritis w_c ditentukan. Energi fraktur yang dihasilkan secara empiris berdasarkan rekomendasi MC 90, dimana kuat tekan adalah variabelnya, bernilai sekitar 50% dari nilai yang dianalisis dengan menggunakan fungsi bi-linier, sebuah nilai yang memenuhi konsep J-integral untuk linear elastic fracture mechanics (LEFM). Verifikasi dilakukan terhadap hasil pengujian fraktur dengan pemodelan Round-Robin Test. Hasil akhir adalah, energy fraktur secara empiris berdasarkan kuat tekan adalah 184 N/m, berdasarkan fungsi bi-linier 188 N/m, dan 194 N/m untuk Round-Robin Test.

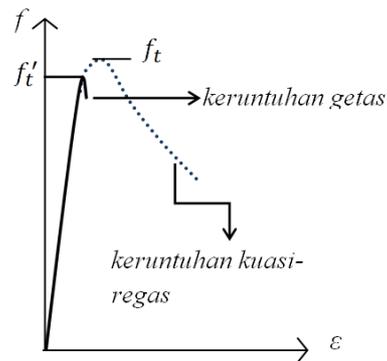
Kata kunci: mekanika fraktur, retak fiktif, J-integral

PENDAHULUAN

Keruntuhan material beton secara mendasar dapat digolongkan sebagai 'runtuh getas' (*brittle failure*). Ini berarti bahwa tepat saat retak terbentuk dan merambat karena pelampauan energi fraktur kritis G_c (*surface energy*), perambatannya akan sangat cepat memotong baik matriks maupun agregatnya. Keruntuhan getas terjadi karena ketidakmungkinan terjadinya redistribusi tegangan plastis setelah pencapaian kuat tarik matriks f'_t .

Dari sudut pandang mekanika fraktur, komposisi beton untuk kekuatan normal dimana kekakuan dan modulus elastisitas agregat lebih tinggi dari matriks mampu mengalihkan retak untuk berjalan melalui *interface zone*, selanjutnya dikenal sebagai 'runtuh kuasi-regas', dibawah nilai f_t .

Kedua fenomena ini ditunjukkan pada **Gambar 1**, dimana f_t adalah nilai kuat tarik beton dibawah nilai mana, agregat terlepas dari matriks (*rupture*).



Gambar 1. Pola Runtuh Beton

Kedua phenomena ini ditunjukkan pada **Gambar 1**, dimana f_t adalah nilai kuat tarik beton dibawah nilai mana, agregat terlepas dari matriks (*rupture*).

Investigasi ini menelaah disipasi energi selama proses *rupture* berjalan, dari beton polos normal dengan kekuatan rencana 30 MPa dibawah pengujian tiga titik lentur (*three point loading*) dengan pemodelan fungsi bi-linier (CEB-FIP Model Code 90). Bukaan retak kritis w_c saat tegangan turun ke nilai nol,

diperoleh dengan mengaplikasikan prinsip *J-integral* terhadap kurva 'beban-bukaan mulut retak kritis' (*Load-CMOD curve*).

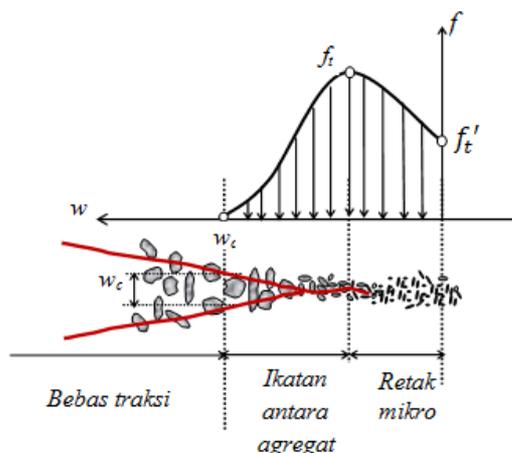
STUDI PUSTAKA

- Retak Fiktif

Dugdale (1960) dan Barenblatt (1959, 1962) adalah yang pertama kali memperkenalkan konsep retak fiktif pada material daktail. Mereka mengusulkan adanya zona plastik di ujung retak dengan panjang tertentu. Panjang zona plastik ini haruslah sedemikian rupa sehingga tegangan singularitas di ujung retak akibat beban luar diiadakan oleh tegangan leleh pada zona ini.

Pada material kuasi-regas seperti beton, zona plastik dapat dikembangkan dengan cara meningkatkan *aggregate interlock* yang pada akhirnya menghasilkan terbentuknya retak mikro sebagaimana terlihat pada **Gambar 2**. Aplikasi konsep Dugdale-Barenblatt untuk material kuasi-regas diprakarsai oleh Hillerborg, Modeer dan Petersson (1976) sebagai model retak fiktif.

Retak fiktif merupakan terminologi lain bagi zona proses fraktur dalam hal ini adalah retak mikro.



Gambar 2. Pengaruh Retak Mikro Terhadap Ketegaran Fraktur

Redistribusi tegangan plastis terjadi justru dengan adanya retak mikro dimana f'_t yang merupakan kuat tarik matriks berangsur-angsur meningkat menjadi f_t yang didefinisikan sebagai kuat tarik beton, atas nilai mana agregat terlepas dari matriks. Phenomena ini dikontribusi oleh 'bridging' atau *aggregate interlock*, yang oleh Shah (1995) dijelaskan sebagai berikut: "*Bridging occurs when the crack has advanced beyond an aggregate that continues to transmit stresses across the crack until it ruptures or is pulled out*".

- Energi Fraktur

Redistribusi tegangan plastik seperti yang disebutkan sebelumnya sejalan dengan disipasi energi yang secara kuantitas menentukan laju keruntuhan struktur. Beton normal dengan kekakuan dan modulus elastisitas matriksnya lebih rendah dari kekakuan dan modulus elastisitas agregat, akibat beban, berpotensi mendisipasi energi seiring proses *unloading*. Energi fraktur dalam terminologi laju pelepasan energi regangan (*strain energy release rate*), oleh Shah (1995) dinyatakan sebagai:

$$G_q = G_c + G_\sigma \dots\dots\dots 1$$

dimana G_c (*surface energy*) adalah energi yang dibutuhkan untuk membentuk satu unit bidang retak, dan G_σ adalah energi yang dibutuhkan untuk pembukaan satu unit bidang retak. Untuk material getas seperti beton mutu tinggi, saat pemisahan bidang retak mencapai panjang kritis a_c , struktur akan segera runtuh di bawah laju pelepasan energi regangan sebesar:

$$G_q = G_c \dots\dots\dots 2$$

Sebaliknya pada material yang mampu membangkitkan mekanisme traksi atau *bridging*, (misalnya pada beton serat), energi G_σ akan lebih dominan, dan struktur akan runtuh di bawah laju pelepasan energi regangan sebesar:

$$G_q = G_\sigma \dots\dots\dots 3$$

Energi fraktur untuk ketiga pendekatan di atas ditunjukkan pada **Gambar 3a**, untuk material getas yang bersifat elastik linier, **Gambar 3b**, untuk material kuasi-regas, dan **Gambar 3c**, untuk material daktail.

- Kurva Perlambatan

Kurva perlambatan (*softening curve*) merepresentasikan mekanisme keruntuhan pasca puncak sebagai proses pelepasan energi saat *unloading*. Proses ini dikenal sebagai ‘disipasi energi’ G_σ dalam pendekatan retak fiktif. Pada saat besaran ini mencapai nilai kritisnya, retak mulai membuka pada tingkat tegangan (di ujung retak) mencapai f_t dan berpropagasi. Besaran kritis inilah yang dikenal sebagai ‘ketegaran fraktur’ (*fracture toughness*) pada model retak fiktif.

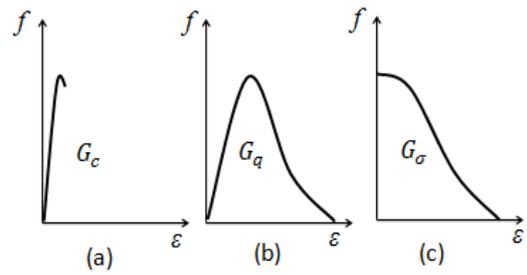
Berperan sebagai komponen yang menyebabkan disipasi energi, adalah zona proses fraktur yang dimungkinkan eksis karena adanya traksi. Zona proses fraktur (*FPZ*) dari material sementitis seperti beton terdiri atas dua komponen utama, yaitu ikatan antar agregat (*aggregate interlocking*), dan retak mikro (*micro-cracks*) diujung retak utama. Traksi yang bekerja sepanjang *FPZ* merupakan parameter yang didefinisikan sebagai kurva perlambatan sering tampil sebagai hubungan tegangan dan bukaan retak sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4** dan secara matematis ditulis sebagai berikut:

$$\sigma_w = f(w) \dots \dots \dots 4$$

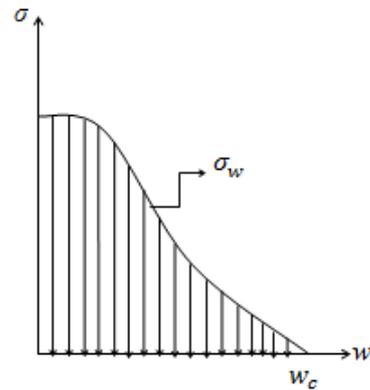
dan

$$G_\sigma = \int_0^{w_c} \sigma_w dw \dots \dots \dots 5$$

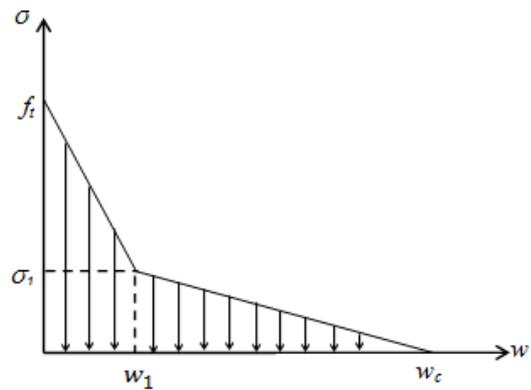
dimana w_c adalah bukaan retak kritis saat tegangan atau beban turun ke nilai nol.



Gambar 3. Energi Fraktur
(a) Elastik linier, (b) Kuasi-regas, (c) Daktail



Gambar 4. Traksi – Softening Curve



Gambar 5. Traksi dengan Kurva Bi-linier

Ditunjukkan pada **Gambar 5**, Roelfstra dan Wittmann (1986) mengusulkan kurva σ_w berupa fungsi bi-linier, yang memenuhi persamaan berikut

$$\sigma(w) = f_t - (f_t - \sigma_1) \frac{w}{w_1} \dots w < w_1 \dots \dots \dots 6$$

$$\sigma(w) = \sigma_1 - \sigma_1 \frac{w - w_1}{w_c - w_1} \dots w > w_1$$

dimana $\sigma_1 = 0.15 f_t$ dan w_1 ditentukan sebagai:

$$w_1 = \frac{G_F - 22w_c \left(\frac{G_F}{a_d} \right)^{0.95}}{150 \left(\frac{G_F}{a_d} \right)^{0.95}} \dots\dots\dots 7$$

Dimana G_F adalah energi fraktur, a_d adalah konstanta dan w_c adalah bukaan retak kritis, keduanya tergantung pada diameter butir maksimum dari agregat, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Koefisien a_d , dan w_c , Korelasinya dengan Diameter Maksimum Agregat d

D [mm]	a_d	w_c
8	4	0.12
16	6	0.15
32	10	0.25

Sebuah pendekatan empiris *CEB-FIP Model Code 1990 (MC 90)* memberikan hubungan empiris untuk mendapatkan energi fraktur berdasarkan nilai kuat tekan f'_c yaitu

$$G_F = a_d f_c^{0.7} \dots\dots\dots 8$$

PROGRAM EKSPERIMENTAL

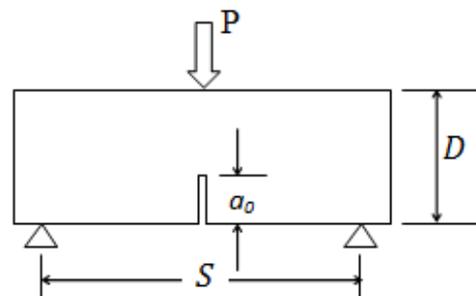
- Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah beton agregat normal dengan kuat rencana normal. Komposisi benda uji didisain untuk mencapai kuat tekan rencana sebesar 30 MPa pada umur 28 hari.

Agregat kasar yang digunakan adalah agregat normal dengan diameter butir maksimum 19 mm digradasikan menurut ACI 544-1R-82

- Benda Uji

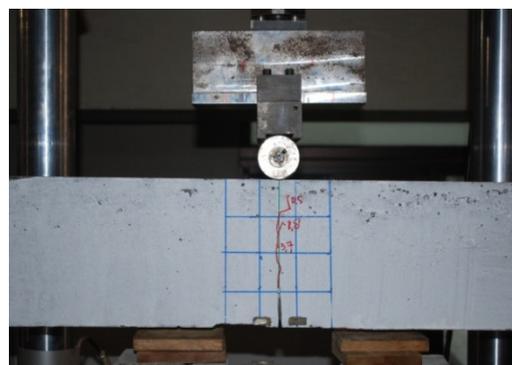
Mengacu pada *RILEM Technical Committee 50-FMC*, benda uji utama adalah balok ‘tiga titik lentur’ dengan bukaan retak tunggal (*mode I fracture beams*) berukuran (100x200x1190) mm. Adapun retak awal a_0 , panjangnya sama dengan 1/3 tinggi balok, D, yaitu 66 mm, dan bentang, S, sama dengan 1,190 mm sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Balok Fraktur *Mode I* Tiga Titik Lentur

- Pengujian Utama

Memenuhi tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini, pengujian fraktur terhadap balok ‘tiga titik lentur’ dilakukan, merujuk pada *RILEM Technical Committee 50-FMC* untuk memperoleh nilai kuat tarik (beton) f_t dan nilai bukaan retak kritis w_c (**Gambar 7**).



Gambar 7. Pengujian Fraktur

Pengujian tiga titik lentur dilakukan dengan menggunakan Material Testing Machine (MTS) dibawah kendali perpindahan (*displacement control*) dengan kelajuan rata-rata 0.0075mm/detik. Dicatat disini bahwa f_t adalah nilai tegangan tepat saat terjadi *pull-out*, dalam hal ini, terlepasnya agregat dari matriks yang diperoleh berdasarkan nilai beban puncak pada hubungan beban-defleksi atau beban-bukaan mulut retak. Kuat tarik (matriks) (f_t') didefinisikan melalui pengujian '*modulus of rupture*' (*MOR*). Selanjut -nya w_c , yang merupakan nilai bukaan retak kritis tepat saat tegangan turun menjadi nol, ditentukan dengan mengaplikasikan konsep *J-integral* pada kurva *Load-CMOD*.

HASIL PENGUJIAN

1. Kuat Tekan

Merujuk pada ASTM C-39 pengujian kuat tekan dilakukan terhadap benda uji silinder dengan kuat tekan rencana sebesar 30 MPa; dibawah *displacement control*, kuat tekan rata-rata yang dicapai adalah 41.82 MPa.

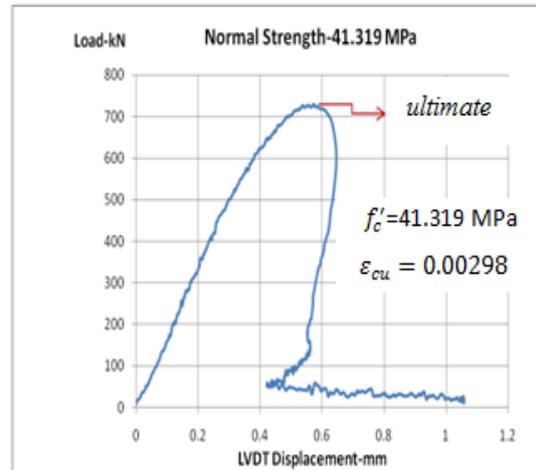
Mewakili semua benda uji (silinder) pada penelitian ini, **Gambar 8** diatas memperlihatkan pola runtuh kuasi-regas salah satu benda uji dibawah beban tekan.

2. Kuat tarik

Penentuan kuat tarik (retak pertama) pada penelitian ini berdasarkan uji *modulus of rupture* (*MOR*) yang merujuk pada ASTM C-78. Kuat tarik rata-rata (f_t') adalah sebesar 5.3844 MPa.

3. Parameter fraktur

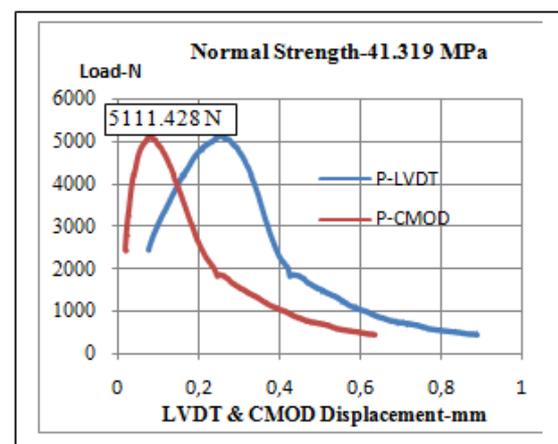
Pengujian fraktur terhadap empat benda uji memberikan nilai beban puncak (P_c), atas nilai mana kuat tarik f_t dan bukaan retak kritis w_c dikalkulasi. Nilai-nilai ini disajikan pada **Tabel 2**, sedangkan *performance* keruntuhan disajikan pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Runtuh Tekan di Bawah *Displacement Control*

Tabel 2. Parameter Fraktur

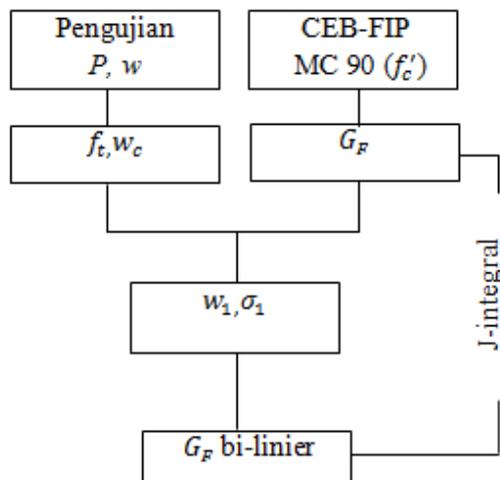
No. spes	P_c (N)	f_t (MPa)	w_c (mm)
N ₁	5111.428	8.037	0.157
N ₂	4876.649	7.642	0.170
N ₃	4750.290	7.444	0.108
N ₄	4757.191	7.455	0.117



Gambar 9. Hasil Uji Fraktur di Bawah *Displacement Control*

ANALISIS DATA

Proses analisis untuk mendapatkan nilai energi fraktur G_F berdasarkan kurva bi-linier dilakukan dengan mengikuti diagram alir pada **Gambar 10**. Formula-formula yang digunakan pada proses ini adalah persamaan 7 dan persamaan 8. Penentuan w_c , dilakukan dengan mengaplikasikan prinsip *J-integral* pada kurva *Load-CMOD* yang diperoleh dari pengujian fraktur.



Gambar 10. Diagram Alir Analisis

Tabel 3. Variable Pada Fungsi Bi-linier

No. spes	w_c (N)	σ_1 (MPa)	w_1 (mm)	G_{FBL} (N/m)
N ₁	0.157	1.205	0.027	199
N ₂	0.170	1.146	0.024	190
N ₃	0.108	1.116	0.033	182
N ₄	0.117	1.118	0.032	181

Nilai w_1 dihitung menurut persamaan 7 untuk tiap nilai w_c . Proses ini melibatkan energi fraktur (G_{FEMP}) yang didekati dengan menggunakan persamaan 8. Hasil akhir, w_1 , dan σ_1 , sekaligus nilai energi G_{FBL} berdasarkan kurva bilinier disajikan pada **Tabel 3**.

Verifikasi

Energi fraktur G_F pada **Tabel 4** merupakan hasil dari RILEM Round-Robin Test yang dipublikasikan pada Jurnal “*Materials and Structures*, vol. 18, No.107, 1985 oleh Hillerborg melalui: “*Results of Three Comparative Test Series For Determining the Fracture Energy G_F of Concrete*” (G_{FRR})

Tabel 4. Nilai G_F Hasil Round-Robin Test

Dimensi	PC g/m ³	da mm	Umur hari	G_{FRR} N/m
800.100.100	364	19	30	188
800.100.100	302	19	30	200
800.100.100	259	19	30	193

PEMBAHASAN

1. Kuat tekan

a) Kuat tekan rencana $f'_c=30$ MPa, dengan capaian rata-rata adalah sebesar 41.82 MPa. Ini menunjukkan bahwa, material menurut definisinya merupakan beton mutu tinggi dengan keruntuhan semi-plastis atau quai-regas sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 8**.

b) Hal ini dimungkinkan karena gradasi agregat yang merujuk pada ACI 544-IR-82 berpotensi meningkatkan kepadatan.

c) Efek lanjut dari butir 1b di atas, di bawah ‘*displacement control*’, material mampu menghasilkan alur-alur retak yang terakumulasi membentuk alur retak utama yang lebih panjang melalui *interface zone* sebelum *rupture*.

d) Pada akhirnya, material mampu men-disipasi energi relatif besar berupa G_q pada persamaan 1.

2. Kuat tarik

a) Sebagaimana disebutkan di atas, bahwa, material yang dihasilkan pada penelitian ini secara definisi memenuhi beton mutu tinggi,

dengan performansi kerun -tuan semi-plastis atau kuasi-regas.

b) Implikasinya adalah bahwa tepat saat kuat retak pertama (dari matriks) f'_t dicapai, retak mulai terbentuk di bawah sejumlah *surface energy* G_c .

c) Pada kasus material getas, struktur akan segera runtuh secara katastropik (*rapid or catastrophically failure*), sedangkan pada material kuasi-regas, beban masih bisa ditingkatkan dari f'_t ke f_t (lihat **Gambar 2**). Begitu f_t dicapai, agregat terlepas dari matriks; proses inilah yang dikenal sebagai perambatan retak. Itulah sebabnya kenapa $f_t > f'_t$.

3. Energi fraktur

a) Energi fraktur yang dikalkulasi dengan merujuk pada persamaan 8 (MC 90) hanya menggambarkan energi elastik sebelum f'_c dicapai. Untuk kuat tekan rata-rata $f'_c = 41.82$ MPa diperoleh $G_{FRR} = 92.102$ N/m.

b) Nilai ini mendekati 50% dari nilai G_{FBL} , yaitu G_F berdasarkan fungsi bi-linier; berarti pendekatan dengan menggunakan *J-integral* dipenuhi dimana nilai w_c pada kurva bilinier adalah dua kali nilai w_c koresponding dengan beban puncak pada kurva *Load-CMOD* pada **Gambar 9**.

c) Hasil akhir

$$G_{FEMP} = 184 \text{ N/m} \dots\dots\dots (\text{pers.8})$$

$$G_{FBL} = 188 \text{ N/m} \dots\dots\dots (\text{Gambar 5})$$

$$G_{FRR} = 194 \text{ N/m} \dots\dots\dots (\text{Tabel 3})$$

Kesimpulan

1. Mekanika fraktur merupakan sebuah pendekatan yang tepat untuk menggambarkan fenomena retak khususnya pada tingkat mikro.

2. *Displacement control* memberikan peluang bagi agregat untuk berperan sebagai *reinforcement* (terhadap matriks) sedemikian rupa sehingga proses *bridging* berjalan secara maksimal yang pada akhirnya mampu mengembangkan retak mikro di ujung retak, melalui mana, redistribusi tegangan plastis dibangkitkan.

3. Konsep *J-integral* yang diperuntukkan bagi material elastik linier yang *path independent*, terbukti cukup valid untuk diaplikasikan pada material kuasi-regas yang *path dependent*, sejauh pengujian dilakukan di bawah *displacement control*.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M.R. (2010), "Fracture Tough -ness of Plain Concrete Specimens Made with Industry-burnt Brick Aggregates", *Journal of Civil Engineering (IEB)*, Vol. 38, No. 1, 81-94.
- Bazant, Z. P. (1996), "Analysis of Work-of-Fracture Method for Measuring Fracture Energy of Concrete", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 122, No.2, 138-143.
- CEB-FIP Model Code (1990), First Predraft 1988, Bulletin d'Information No.190a, 190b, Comite Euro International du Beton, Lausanne
- Hillerborg, A., "Results of Three Comparative Test Series for Determining the Fracture Energy G_F of Concrete", *Materials and Structures*, vol.18, No.107, 1985, pp. 407-413.
- Neville, M.A. (1997), "Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete", *ACI Materials Journal*, vol.94, No.1, 71-74
- RILEM Committee 50-FMC, (1985), "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", Draft Recommendation, *Materials and Structures*, vol.18, No.106, 285-290
- RILEM Technical Committee 89-FMT (1990), "Determination of Fracture Parameters of Plain Concrete Using Three-point Bend Tests", Draft Recommendation, *Materials and Structures*, vol.23, No.138, 457-460.
- Rice, J. R. (1973), "Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates", in

Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM-STP 536, 231-245.

Roelfstra, R. E., and Wittmann, F. H. (1986), "A Numerical Method to Link Strain Softening with Fracture in Concrete", in *Fracture Toughness and Fracture Energy*

in Concrete, edited by Wittmann, F. H., Elsevier Science, Amsterdam, 163-175.

Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C. (1995), *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and Other Quasi-Brittle Materials*, John Wiley & Sons, Inc, New York.