

## Pendekatan Daerah Kohesif dan Kegagalan Kontinum untuk Memperkirakan Kegagalan pada Sambungan Perekat

Sugiman<sup>a</sup>, AD Crocombe<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Nusa Tenggara Barat

<sup>b</sup> Division of Mechanical, Medical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK.

<sup>a</sup> Email: s.giman@yahoo.com

### Abstrak

Sambungan perekat telah secara luas digunakan di industri pesawat terbang dan industri transportasi darat seperti pada mobil. Hal tersebut karena sambungan perekat mempunyai distribusi tegangan yang homogen, mampu menyambung dua material yang berbeda dan tahan terhadap kelelahan. Banyak faktor-faktor yang berpengaruh untuk menghasilkan kekuatan sambungan yang tinggi seperti panjang sambungan, jenis perekat, ketebalan perekat, jenis material yang disambung dan lain-lain. Penyelidikan secara eksperimen untuk mengetahui kekuatan sambungan membutuhkan dana yang tidak sedikit. Pendekatan lain yaitu pendekatan numerik (contoh dengan metode elemen hingga) mampu memprediksi kegagalan sambungan perekat secara akurat dan lebih detil mengetahui kondisi tegangan dalam sambungan. Penyelidikan secara numerik pada kegagalan sambungan aluminium dengan perekat telah dilakukan. Penyelidikan menggunakan sambungan tumpang tunggal (*single lap joint*) dengan perekat FM 73 yang sering digunakan pada komponen konstruksi pesawat terbang. Pendekatan daerah kohesif (*cohesive zone*) dan kegagalan kontinum (*continuum damage*) dievaluasi untuk memperkirakan kekuatan sambungan dan mekanisme kegagalannya. Respon beban-simpangan diperkirakan dengan hukum tarikan-pemisahan linier (dalam pendekatan daerah kohesif) dan sifat mekanik konvensional (dalam pendekatan kontinum). Spesimen perekat dan *double cantilever beam* digunakan untuk mendapatkan secara berurutan, sifat mekanik perekat (modulus elastis, kekuatan tarik) dan energi patah mode pembukaan (mode I) dari perekat. Data tersebut digunakan sebagai parameter dari model daerah kohesif dan kontinum. Secara umum, kesesuaian antara respon beban-simpangan yang diperoleh secara numerik dan eksperimen diperoleh dengan baik, baik menggunakan pendekatan daerah kohesif and pendekatan kontinum. Kegagalan perekat dalam model daerah kohesif terjadi dalam perekat karena kegagalan telah ditentukan lintasannya sebelumnya, sedang kegagalan pada pendekatan kontinum mengikuti lintasan yang sembarang dalam perekat.

Kata kunci: sambungan perekat, single lap joint, daerah kohesif, kontinum

### 1. Pendahuluan

Sambungan perekat telah digunakan secara luas di industri otomotif, pesawat terbang, konstruksi kayu dan konstruksi non kritis lainnya. Sambungan perekat mempunyai beberapa kelebihan dibanding sambungan las dan bolt seperti; distribusi tegangan yang lebih merata, mampu menyambung dua material yang berbeda, dan kekuatan lelah yang lebih baik. Namun sambungan perekat belum mampu mendukung komponen struktural kritis, seperti sambungan las atau bolt. Sehingga studi secara eksperimental dan secara numerik terus dilakukan untuk menghasilkan sambungan perekat yang mempunyai kekuatan tinggi baik dari segi desain, pengembangan perekat dan metode untuk memprediksi kegagalan sambungan.

Secara numerik, metode untuk memprediksi kegagalan suatu material telah banyak dikembangkan, seperti pendekatan kontinum (Lemaitre, 1985), pendekatan daerah kohesif (Barenblatt 1959; 1962), dan *virtual crack closure technique* (VCCT), extended finite element method (XFEM) (Campilho et al, 2011a; 2011b) dan pendekatan mekanika perpatahan. Pendekatan daerah kohesif mendapat banyak perhatian karena metode ini cukup akurat dan mudah, namun penggunaannya masih diperdebatkan karena banyaknya parameter yang harus ditentukan dan metode ini hanya cocok untuk sebuah sistem yang lintasan perambatan retaknya telah diketahui, seperti kegagalan sebuah interface. Metode kontinum cukup sederhana, parameter yang digunakan berdasar pada sifat mekanik konvensional seperti dari kurva tegangan-regangan

dan lintasan kegagalan bisa mengikuti arah yang sembarang.

Paper ini menyajikan penggunaan pendekatan daerah kohesif dan kegagalan kontinum untuk memprediksi kegagalan sambungan perekat single lap. Material yang disambung adalah aluminium 2024-T3 dengan perekat film FM 73 OST. Kurva beban-simpangan yang diperoleh secara numerik bersesuaian baik dengan yang diperoleh secara eksperimen.

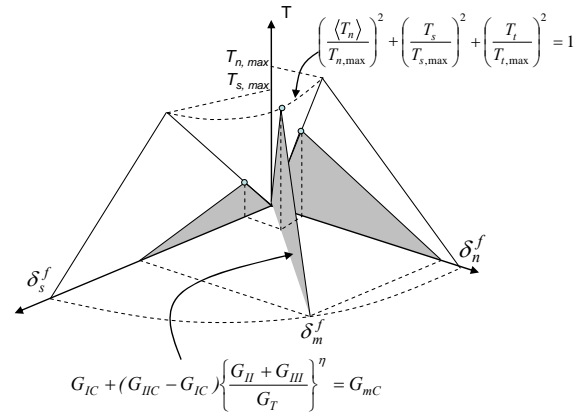
**2. Metode eksperimen**

Sambungan perekat terbuat dari aluminium 2024-T3 yang direkatkan dengan perekat film FM 73 OST. Sebelum disambung permukaan aluminium dietsa dengan larutan chromic, kemudian dianodasi dengan asam phosphor dan kemudian diberi lapisan primer BR127. Perekat dilapiskan ke permukaan aluminium sambil ditekan pelan-pelan untuk mengurangi udara yang terjebak dalam perekat. Kedua material yang akan disambung, kemudian direkatkan pada perekat tersebut dan ditaruh di dalam alat bantu dan diberi tekanan kira-kira 0,28 MPa. Sambungan tersebut kemudian dicuring pada suhu 120°C selama 1 jam sesuai dengan rekomendasi pembuat perekat (Cytec, 1998). Spesimen kemudian diuji menggunakan mesin Instron dengan laju 0,1 mm/menit sampai gagal. Untuk mengetahui kurva tegangan-regangan perekat, spesimen tulang anjing diuji pada mesin Instron dengan laju regangan 0,1 mm/menit.

**3. Metode elemen hingga**

**3.1 Model daerah kohesif (Cohesive Zone Model)**

Dalam hukum daerah kohesif, tegangan kohesif biasanya meningkat secara tajam cepat sampai mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun secara perlahan dengan meningkatnya pemisahan dan mencapai nol saat terjadi pemisahan sempurna. Piranti lunak metode elemen hingga komersial, ABAQUS mempunyai kemampuan mengimplementasikan model daerah kohesif sebagai hukum tarikan-pemisahan bilinear. Model tarikan-pemisahan bilinear mempunyai tiga parameter penting; kekakuan elastis ( $K$ ), tarikan kritis ( $T_{max}$ ) dan energi patah ( $G_c$ ) seperti ditunjukkan di Gb. 1. Tarikan kritis dan energi patah berhubungan masing-masing dengan permulaan kerusakan dan evolusi kerusakan.



Gb. 1. Skema model tarikan-pemisahan bilinear.

Dalam metode elemen hingga ini, permulaan kerusakan menggunakan kriteria tegangan nominal kuadratik, Pers. (1).

$$\left\{ \frac{\langle T_n \rangle}{T_{n,max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{T_s}{T_{s,max}} \right\}^2 + \left\{ \frac{T_t}{T_{t,max}} \right\}^2 = I \quad (1)$$

dimana subscripts  $n, s$  and  $t$  menunjukkan masing-masing tarikan ( $T$ ) normal, geseran ke-1 dan geseran ke-2. Operator Macaulay  $\langle \rangle$  menunjukkan tegangan tekan tidak menyebabkan kerusakan.

Evolusi kerusakan mode campuran berdasar pada energi dan mengikuti formula Benzeggah-Kenane (1996) seperti Pers. (2)

$$G_{IC} + (G_{IIc} - G_{IC}) \left\{ \frac{G_{II} + G_{III}}{G_T} \right\}^\eta = G_{mC} \quad (2)$$

dimana  $G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$ , dan  $\eta$  adalah parameter material.  $G_{IC}, G_{IIc}$  and  $G_{mC}$  adalah masing-masing energi patah untuk pembebanan mode I, mode II dan mode campuran.  $G_I, G_{II}$  and  $G_{III}$  adalah masing-masing laju pelepasan energi regangan untuk mode I, mode II dan mode campuran. Dalam kriteria ini, energi patah mode II diasumsikan sama dengan energi patah mode III,  $G_{IIc} = G_{IIIc}$  (lihat Gb. 1).

**3.2 Model kegagalan kontinum (Continuum Damage Model)**

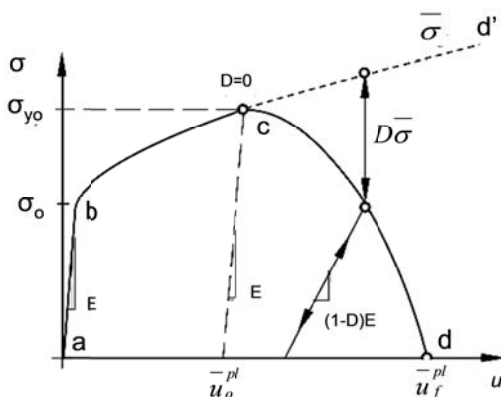
Pada tingkat makroskopik, Kachanov (1959) mengajukan mekanika kerusakan untuk mengkarakterisasi kekosongan, void-void mikro di

dalam sebuah material. Lemaitre (1985) and Caboche (1984) mengembangkan model kerusakan kontinum untuk logam ulet. Kerusakan didefinisikan sebagai kehilangan kemampuan menahan beban secara progresif sebagai hasil dari nukleasi dan pertumbuhan void-void mikro. Model tersebut mengasumsikan bahwa kekakuan akan menurun dengan keberadaan cacat-cacat. Penurunan modulus elastis dituangkan dalam bentuk parameter skalar kerusakan,  $D$ :

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \tag{3}$$

$\bar{E}$  dan  $E$  adalah modulus elastis material yang rusak dan tidak rusak. Pada material yang utuh,  $D = 0$ , dan material yang rusak sepenuhnya,  $D = 1$ .

Kerangka umum kegagalan progresif untuk logam ulet seperti ditunjukkan oleh Gb. 2 (ABAQUS, 2009). Respon material digambarkan sebagai kurva tegangan-regangan (Gb. 2). Material berperilaku linear dari titik a ke titik b. Setelah respon linier ini, material mengalami deformasi plastik dari titik b ke titik c. Titik c ke titik d' mewakili respon untuk material yang tidak rusak, namun ketika material mulai rusak, setelah titik c, tegangan menurun sampai tidak mampu lagi menahan beban dan kemudian tegangan menjadi nol (titik d). Titik c disebut sebagai awal kerusakan (*damage initiation*), sedang kurva c-d mewakili evolusi kerusakan material. Kondisi kerusakan,  $D$  pada inisiasi kerusakan adalah nol dan selama evolusi kerusakan,  $D$  meningkat dan mencapai satu ketika material sepenuhnya rusak.



Gb. 2. Skema inisiasi dan evolusi kerusakan dalam model kegagalan kontinum.

Sesuai dengan kriteria kerusakan ulet, rusak terjadi ketika kriteria inisiasi kerusakan tercapai mengikuti kondisi berikut,

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} = 1 \tag{4}$$

Regangan plastic equivalent saat inisiasi ( $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ ) adalah sebagai fungsi tegangan triaksial,  $\eta$  dan laju regangan plastik equivalent( $\dot{\epsilon}^{pl}$ ). Kondisi variabel ( $\omega_D$ ) meningkat secara monoton dengan deformasi plastik.

Evolusi kerusakan berdasar pada respon tegangan-regangan adalah sangat bergantung pada mesh. Berdasar kerja dari Hillerborg (1976), ketergantungan pada mesh dapat dikurangi dengan menggunakan respon tegangan-simpangan setelah kerusakan mulai (Gb. 2). Energi untuk membuka sebuah unit luasan ( $G_f$ ) setelah inisiasi kerusakan dibutuhkan untuk menghubungkan regangan dan simpangan ( $u$ ). Pemakaian respon tegangan-simpangan dalam metode elemen hingga membutuhkan panjang karakteristik ( $L$ ) pada sebuah titik integrasi. Energi patah didefinisikan

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L \sigma_y \bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \tag{5}$$

Untuk model evolusi kerusakan linier berdasar pada simpangan, variabel kerusakan meningkat sesuai dengan

$$\dot{d} = \frac{\dot{\bar{u}}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \tag{6}$$

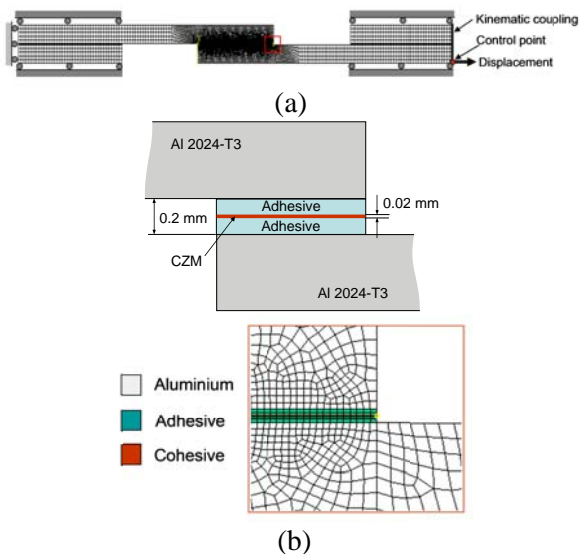
Ketika simpangan plastis efektif mencapai simpangan plastik saat gagal ( $\bar{u}^{pl} = \bar{u}_f^{pl}$ ), kekakuan material akan terdegradasi secara penuh ( $d=1$ ).

Tabel 1. Parameter daerah kohesif

$K_n$ (N/m m <sup>3</sup> )	$K_s$ (N/m m <sup>3</sup> )	$T_{n,ma}$ $x$ (MP a)	$T_{s,ma}$ $x$ (MP a)	$G_{IC}$ (kJ/ m <sup>2</sup> )	$G_{IIC}$ (kJ/ m <sup>2</sup> )	$\eta$
10000	35750	52,5	30,3	2,5	5	2
0						

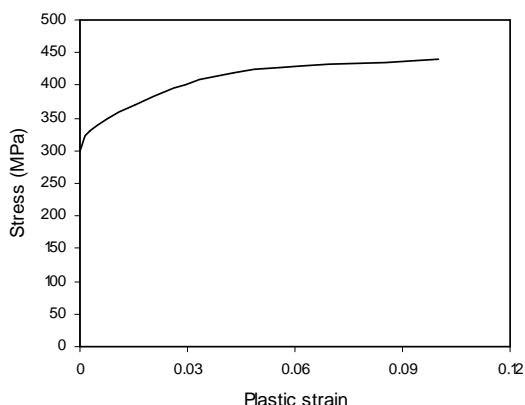
Dalam pemodelan *single lap joint* ini, kegagalan dimodelkan dengan model tarikan-pemisahan bilinear dan model kegagalan kontinum. Sambungan dimodelkan secara dua dimensi (2D) dengan mesh seperti Gb. 3a. Posisi elemen kohesif ditengah perekat (lihat Gb. 3b) dengan tebal 0,02 mm, sedang untuk model kontinum, seluruh

ketebalan perekat (0,2 mm) dianggap sebagai elemen kontinu. Pemodelan mempertimbangkan ketidaklinieran material dan geometri.



Gb. 3 Kondisi batas dan mesh *single lap joint*.

Regangan plastik aluminium seperti terlihat pada Gb. 4, dengan modulus elastis 70 GPa dan angka perbandingan Poisson 0,33. Sedang kurva tegangan-regangan untuk perekat seperti terlihat di Gb. 5. Modulus elastis perekat 2450 MPa dan angka Poisson 0,38. Parameter daerah kohesif seperti terlihat pada Tabel 1. Energi patah mode I ( $G_{IC}$ ) diperoleh dari uji *double cantilever beam*, sedang  $G_{IIC}$  diperoleh dari literature (Hafiz et al., 2002).



Gb. 4 Regangan plastik (plastic strain) Al 2024-T3.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Kurva beban-simpangan untuk *single lap joint* yang diperoleh dari pemodelan dengan menggunakan pendekatan daerah kohesif seperti terlihat di Gb. 6. Kurva beban-simpangan yang

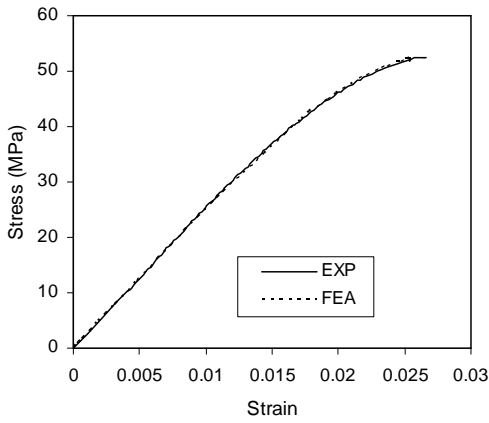
diperoleh dari eksperimen juga ditampilkan sebagai perbandingan. Terjadi kesesuaian yang sangat baik antara kurva beban-simpangan dari eksperimen dan pemodelan.

Untuk pemodelan dengan menggunakan pendekatan kontinu, kalibrasi parameter dilakukan pada kurva tegangan-regangan perekat. Ada beberapa parameter yang digunakan di samping regangan plastik perekat, yaitu regangan plastik saat inisiasi kerusakan, dan total energi atau simpangan saat patah. Regangan plastik saat inisiasi kerusakan adalah 0,0054, dan energi patah mode I adalah 2,5 kJ/m<sup>2</sup>, sama seperti energi patah mode I untuk pendekatan kohesif. Hasil kalibrasi seperti terlihat di Gb. 5 dan menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil eksperimen dan pemodelan. Parameter tersebut kemudian dipakai untuk pemodelan kegagalan *single lap joint* tanpa modifikasi dan hasil pemodelan seperti terlihat pada Gb. 6. Kurva beban-simpangan yang diperoleh dari pendekatan kontinu bersesuaian dengan baik dengan hasil eksperimen dan juga dari pendekatan kohesif, walaupun besarnya simpangan sedikit lebih rendah dari pemodelan daerah kohesif (simpangan hasil eksperimen lebih tinggi dari hasil pemodelan yang mungkin merupakan hasil sumbangan dari sistem pembebanan mesin uji).

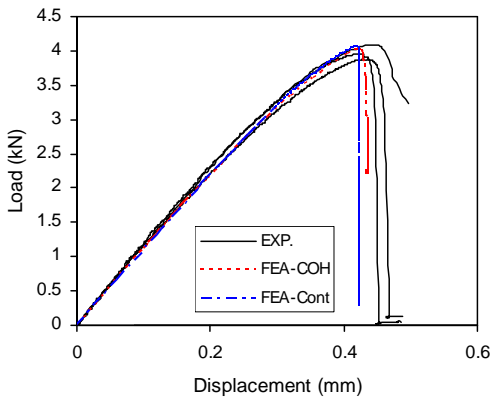
Kontur kerusakan ( $D$ ) perekat seperti terlihat pada Gb. 7, baik untuk pendekatan daerah kohesif dan pendekatan kontinu, pada saat beban puncak. Nilai  $D$  yang berbeda untuk pendekatan daerah kohesif dan pendekatan kontinu pada saat beban maksimum kemungkinan disebabkan oleh kriteria kerusakan yang berbeda dari kedua pendekatan tersebut, namun nilai beban maksimum dari kedua pendekatan menunjukkan hasil yang tidak berbeda secara signifikan. Kerusakan daerah kohesif telah terdefinisi secara jelas karena lintasan kerusakan yang telah ditentukan (di tengah-tengah perekat), sedang untuk kerusakan kontinu, kerusakan dapat terjadi secara sembarang dengan inisiasi kerusakan terjadi pertama pada daerah singular (contoh di daerah sudut).

#### 5. Kesimpulan

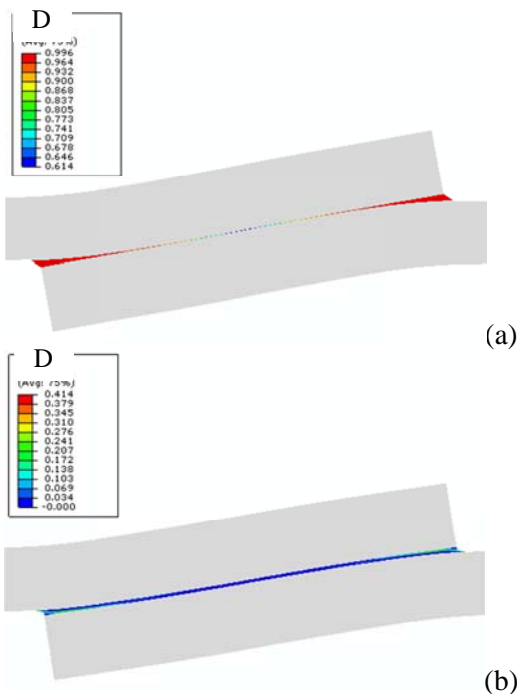
Pemodelan elemen hingga telah dilakukan baik dengan pendekatan daerah kohesif dan pendekatan kontinu pada *single lap joint*. Secara umum diperoleh kesesuaian yang baik antara kurva beban-simpangan yang diperoleh dari eksperimen dan dari kedua pendekatan tersebut.



Gb. 5 Kurva tegangan-regangan perekat diperoleh dari eksperimen dan pemodelan.



Gb. 6 Kurva beban-simpangan single lap joint yang diperoleh dari eksperimen dan pemodelan.



Gb. 7 (a) Kontur kerusakan daerah kohesif, (b) kontur kerusakan kontinum.

ABAQUS, User manual, version 6.9.1, Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., USA, 2009.

Barenblatt GI, The formation of equilibrium crack during brittle fracture, general ideas and hypothesis. *Axially-symmetric cracks*, J. Applied Mathematics and Mechanics (PMM) 1959, Vol. 23, No. 4, pp. 1009-1029.

Barenblatt GI, Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics* 1962, Vol. 7, pp. 55-129.

Benzeggagh ML, and Kenane M, Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus, *Composites Science and Technology* 1996, Vol. 56, pp. 439-449.

Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus APM, Strength prediction of single and double-lap joints by finite element modeling, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2011a, 31, pp. 363-372.

Campilho RDSG, Banea MD, Chaves FJP, da Silva LFM, eXtended finite element method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I, *Computational Materials Science* 2011b, 50, pp. 1543-1549.

Chaboche JL, Continuum damage mechanics I – General Concepts, *Journal of Applied Mechanic* 1988, 55(1), pp. 59-64.

Cytec Engineered Materials, FM<sup>®</sup> 73 toughened epoxy film, Technical Service, 1300 Revolution Street, Havre de Grace, Maryland, 1998.

Hafiz TA, Abdel Wahab MM, Crocombe AD, Smith PA, Mixed-mode fracture of adhesively bonded metallic joints under quasi-static loading, *Engineering Fracture Mechanics* 2010, 77, pp. 3434-3445.

Hillerborg A, Modeer M, Petersson PE, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research* 1976, Vol. 6, pp.773-782.

Kachanov LM, Time of rupture process under creep conditions. *Izy Akad Nank SSR Otd Tech Nauk* 1959, 8, pp. 26-31.

Lemaitre J, A continuous damage mechanics model for ductile fracture, *Journal Engineering Materials and Technology* 1985, 107, pp. 83-89.

Referensi