

# MODEL CABUT-SERAT NYLON 600 TERTANAM DALAM MATRIKS SEMENTITIS BERBASIS FRAKTUR

Rr. M.I. Retno Susilorini

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,  
Universitas Katolik Soegijapranata  
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1, Bendan Dhuwur, Semarang 50234  
email: retno\_susilorini@yahoo.com; susilorini@unika.ac.id

## ABSTRACT

*The fracture mechanics is known as a fracture based approach to prohibit a catastrophic failure of structure. In micro scale field, the fracture mechanics is implemented especially to determine the performance of interface between fiber and cementitious matrix in 'fiber-reinforced cementitious composite'. The studies and applications of nylon clearly define the advance characteristic of nylon may influence the overall performance of composites and become a crucial issue to be learned, therefore, this paper forwards a fractured based pull-out model of short nylon 600 embedded in cementitious matrix with main concern on fracture phenomenon. The research applies experiment that applies pull-out test with embedded nylon 600 in cementitious matrix and the analytical method that constructs the fractured based pull-out model. The experiment results show the specimens with pull-out fibers have embedded length  $l_f = 30-60$  mm and the broken fibers  $l_f = 70-100$  mm. The pull-out test also shows several stages: (a) Pre-slip stage, (b) Slip stage, and (c) Strain-hardening stage. The model fits to experimental results. Several theories meet conclusions: (a) Whenever fracture takes place, it is always an unstable crack, (b) Stable cracks are established by the presence of crack arrester, (c) There is no way directly to determine the length of stable crack, but it still can be determined by fractured based approach, (d) The length of stable crack is determined by the position of crack arrester, (e) There is an equation derived for pull-out model (f) There is an equation to determine the stable crack length, (g) Stable cracks may be used to determined the bond capacity, (h) After the establishment of stable cracks, increasing strain beyond strain  $\epsilon_s$  will not increase stress  $\sigma_s$ , hence do not induce additional fracture, (i) Increasing of strain  $\epsilon$  after the establishment of stable cracks will increase stress  $\sigma$ , then the second slip will not take place, (j) Broken nylon fibers have a longer embedded length because of the possibility of crack arrester presence is bigger than the shorter ones.*

**Keywords:** model, fracture, pull-out, fiber, nylon, stable crack length



## PENDAHULUAN

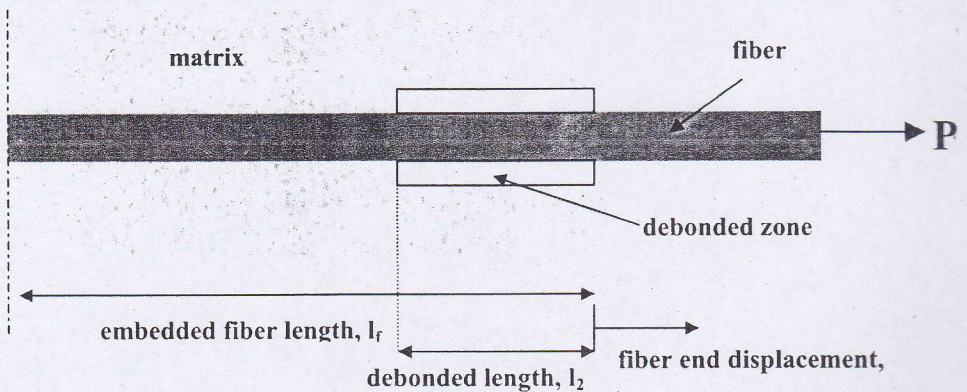
Mekanika fraktur dikenal sebagai suatu pendekatan berbasis fraktur untuk mencegah kerusakan struktur yang signifikan. Dengan mengimplementasikan mekanika fraktur, desain struktur akan lebih aman dan ekonomis serta memiliki keuntungan-keuntungan structural yang lebih besar (Susilorini, 2007b). Mekanika fraktur telah diimplementasikan sejak lima puluh tahun lalu oleh Bresler and Wollack, 1952, Kaplan, 1961, dan sebagainya (Bazant, 1992). Dalam skala mikro, pendekatan berbasis fraktur digunakan untuk merencanakan struktur bangunan gedung yang aman. Hal ini dapat dimengerti karena desain yang aman diperlukan saat pembangunan gedung untuk menjamin kriteria keamanan. Pendekatan berbasis fraktur juga digunakan dalam skala mikro, khususnya dalam menentukan kinerja antar-muka antara serat dan matriks sementitis dalam 'Komposit Sementitis Berserat', KSB. Bazant (1992) mengemukakan konsep utama mekanika fraktur dalam studi kasus skala mikro analisa fraktur. Menurut Bazant, kegagalan struktur berhubungan erat dengan distribusi retak pada kondisi pelunakan-regangan dan pengerasan. Retak yang terlokalisasi akan menjalar dan berkembang menjadi fraktur dan akhirnya mengakibatkan kegagalan. Mengkaji hal tersebut, perlu adanya upaya mengurangi kemungkinan terjadinya fraktur dengan cara antara lain meningkatkan keliatan dan daktilitas tarik yaitu dengan mengaplikasikan serat ke dalam komposit sementitis (Li and Wang, 2005).

Sejak jaman purba, serat telah digunakan untuk memperkuat komposit sementitis yang getas (Susilorini, 2007a). Kinerja serat dipastikan turut menentukan kinerja komposit secara keseluruhan. Oleh sebab itu, kinerja antar-muka antara serat dan matriks sementitis serta transfer tegangan memegang peranan penting dalam penentuan kinerja komposit, pemilihan kandungan komposit, dan prediksi kegagalan struktur komposit. Kinerja KSB keseluruhan dicirikan oleh antar-muka antara serat dan matriks sementitis dan dapat ditentukan melalui uji cabut-serat.

Penggunaan serat sintesis polimer, atau yang biasa disebut serat sintesis saja terutama ditujukan untuk memperkuat komposit. Beberapa jenis serat sintesis seperti telah polypropylene, polyethylene, polyester, nylon, aramid, acrylic, dan PVA diaplikasikan untuk komposit sementitis dan memperlihatkan keunggulan kinerja (Balaguru dan Shah, 1992). Salah satu jenis serat yang terkenal adalah nylon, yang memiliki nama generic polyamide (Hummel, 1998). Nylon memiliki karakteristik yang unik, berhelai-helai dan berserabut dengan rantai panjang (Nadai, 1950). Penyempitan berulang pada nylon terjadi saat peregangan (Nadai, 1950) yang disebut dengan 'perpanjangan titik leleh' yang besarnya 200%-300% kali panjang semula. Perbedaan mendasar pada 'perpanjangan titik leleh' nylon dan baja adalah adanya modulus elastisitas yang tinggi pada nylon. Hal lain yang perlu disadari adalah fenomena 'bergerigi' yang terjadi pada kurva tegangan-regangan atau beban-perpindahan dari baja lunak (Manjoine, dalam Nadai, 1950), aluminum alloy (Elam, dalam Nadai, 1950), dan nylon (Averett, 2004, dan Susilorini, 2007a). Aplikasi serat nylon local (buatan Indonesia) untuk beton telah dilakukan beberapa



peneliti (Suseno, et al, 2000a,b, dan Susilorini, 2007a,b,c,d; 2008a,b). Suseno, et al. (2000a,b) menggunakan benda uji balok lentur dan silinder beton serat dengan serat pendek lurus dan bergumpal dan menemukan bahwa kuat lentur dan kuat tarik belah beton serat nylon lebih tinggi daripada beton normal. Penelitian Suseno, et al. tersebut juga menemukan bahwa lebar retak pada beton normal lebih besar. Kajian dan aplikasi nylon tersebut di atas memperjelas keunggulan karakteristik nylon yang mempengaruhi kinerja komposit secara keseluruhan dan menjadi hal penting untuk dipelajari.



Gambar 1. Deskripsi Masalah Cabut-Serat

Sun dan Lin (2001) menyatakan bahwa kajian masalah cabut-serat harus dititikberatkan pada mekanisme antar-muka antara serat dan matriks, juga pada kekuatan dan distribusi tegangan di sepanjang antar-muka. Secara umum, masalah cabut-serat dapat dijelaskan oleh Gambar 1. Serat tertanam pada matriks sementitis. Beban tarik  $P$  bekerja pada ujung serat dan menimbulkan perpindahan sebesar  $\Delta$  pada ujung serat.

Para peneliti terdahulu telah memperlihatkan bahwa model dapat dibangun untuk merepresentasikan proses cabut-serat, antara lain model analitis, model berbasis mekanika fraktur, dan model mikro fraktura. Sebagian model tersebut mengaplikasikan serat baja, mengimplementasikan tegangan geser dan tegangan geser gesek di sepanjang serat, serta mengabaikan pengaruh angka Poisson (Wang, Li, Backer, 1988a, b; Li, Stang, 1987; Morrison, Shah, Jenq, 1988; Li, Chan, 1994; Sumitro, Tsubaki, 1997). Hanya sedikit peneliti (Naaman, et.al., 1994 dan Bentur, et.al., 1996) yang mempertimbangkan pengaruh angka Poisson yang berbasis pada teori 'shrink-fit' dari Timoshenko. Di antara model-model tersebut, belum terdapat pendekatan dengan panjang retak stabil dalam matriks. Tentu saja, panjang serat tertanam akan membuat beberapa perbedaan. Kinerja beberapa seri serat pendek

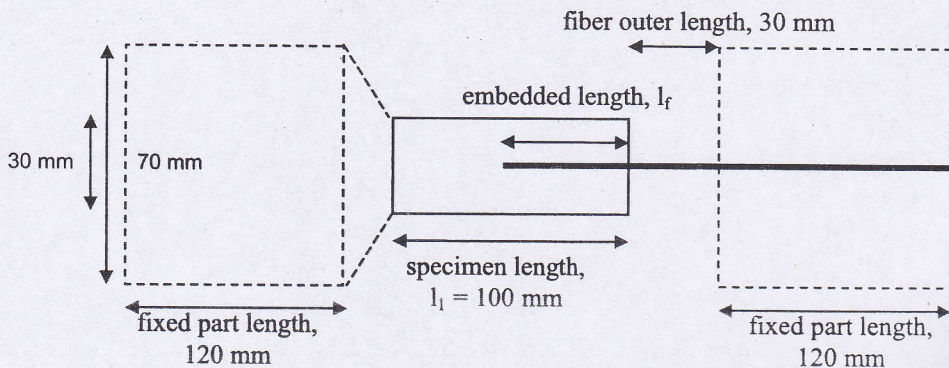


nylon 600 tertanam dalam matriks sementitis akan dikaji, serat panjang tidak akan dibahas dalam tulisan ini.

Hal penting untuk dicatat adalah fenomena fraktur pada masalah cabut-serat. Untuk itu, sebuah model harus dibangun untuk merepresentasikan fenomena fraktur yang berlangsung selama cabut-serat seperti yang dibahas oleh tulisan ini. Beberapa aspek yang menjadi pertimbangan dalam pemodelan cabut-serat berbasis fraktur (Susilorini, 2007a) meliputi: (1) Kapasitas fraktur dari serat tertanam merupakan fungsi dari angka Poisson serat, (2) Beberapa tahapan terjadi selama berlangsungnya proses cabut-serat, (4) Fenomena ‘bergerigi’ terjadi di bagian regangan-pengerasan pada kurva beban-perpindahan ( $P-\delta$ ) dan tegangan-regangan ( $\sigma-\epsilon$ ), dan (4) Fenomena proses fraktur tak stabil dan stabil terjadi selama berlangsungnya proses cabut-serat. Merujuk pada aspek-aspek tersebut, menjadi sebuah keharusan bagi tulisan ini untuk mengedepankan model berbasis fraktur untuk serat nylon 600 pendek yang tertanam dalam matriks sementitis dengan perhatian khusus pada fenomena fraktur.

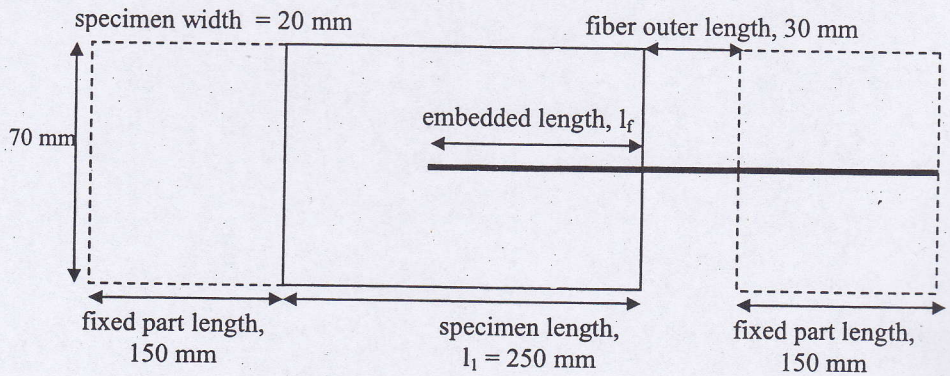
## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengaplikasikan metode eksperimental dan analitis yang akan dijelaskan sebagai berikut. Metode eksperimental mengimplementasikan uji cabut-serat dengan rancangan specimen seperti pada Gambar 2 dan 3, sedangkan tata letak uji cabut-serat pada Gambar 4. Spesimen cabut-serat menggunakan serat nylon 600 buatan local (merk “Golden Fish”) berdiameter 1.1 mm yang tertanam dalam matriks sementitis. Terdapat 2 jenis specimen, yaitu tipe A untuk panjang tertanam pendek 30, 40, 50, dan 60 mm, serta tipe A untuk panjang tertanam pendek 70 dan 100 mm. Komposisi campuran matriks sementitis dinyatakan dengan perbandingan semen : pasir : air sebesar 1:1:0.6. Metode analitis membangun model cabut-serat berbasis fraktur dengan merujuk pada hasil uji eksperimental.

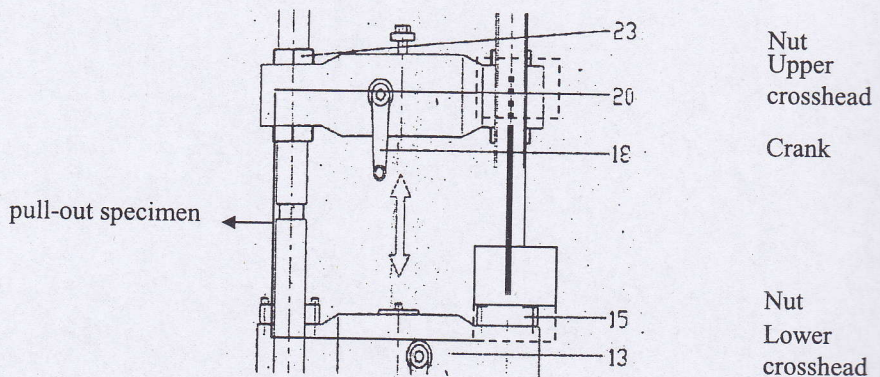


Gambar 2. Rancangan Benda Uji Cabut-Serat Tipe A





Gambar 3. Rancangan Benda Uji Cabut-Serat Tipe B



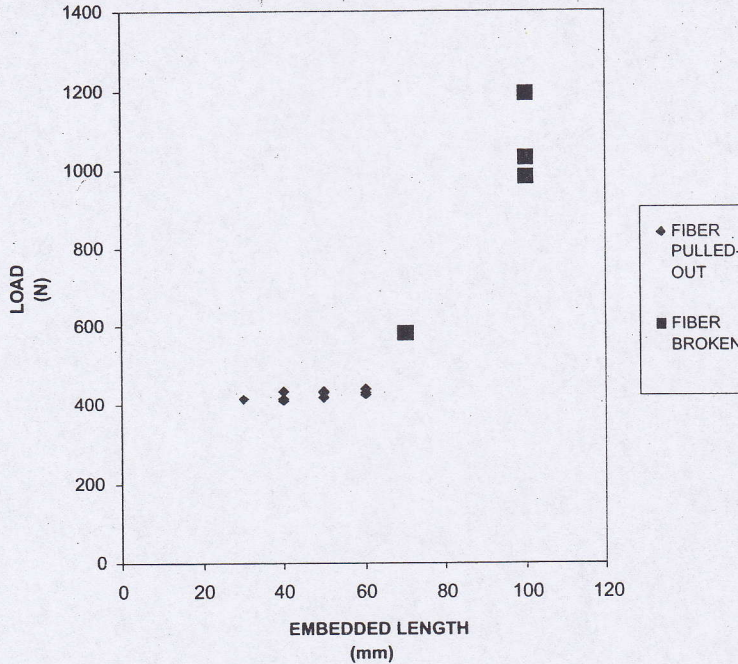
Gambar 4. Tata Letak Uji Cabut-Serat

## ANALISIS DA PEMBAHASAN

Hasil uji cabut-serat memperlihatkan bahwa specimen dengan serat tercabut memiliki panjang serat tertanam  $l_f = 30-60$  mm sedangkan specimen dengan serat putus  $l_f = 70-100$  mm (Gambar 5). Yang menarik adalah dijumpainya tahapan selama berlangsungnya proses cabut-serat, yaitu: (a) Tahap pra-selip, (b) Tahap



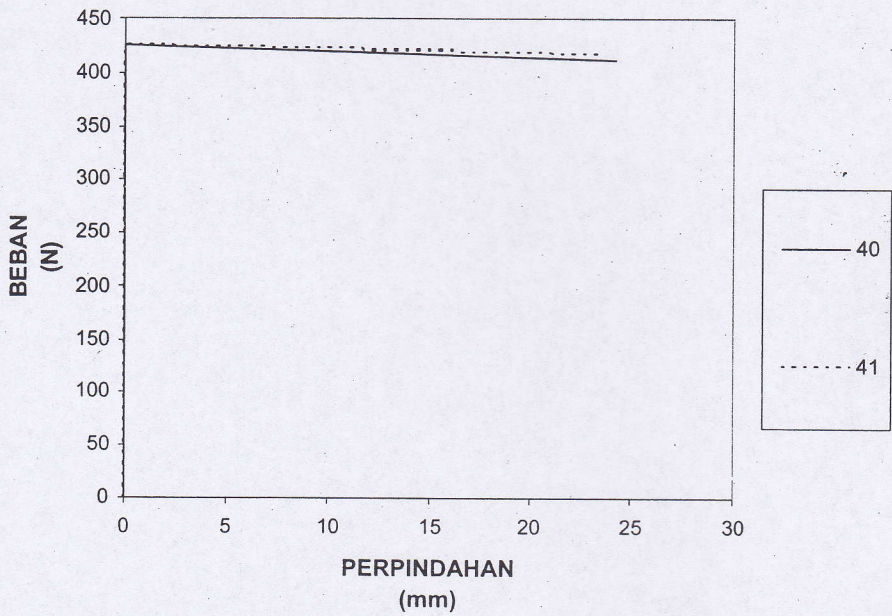
selip, dan (c) Tahap pengerasan-regangan. Beban pra-selip pada uji cabut-serta adalah 400-430 N dengan perpindahan tidak lebih dari 0.1 mm. Beban selip ditemukan dalam kisaran yang sama dengan beban pra-selip dengan perpindahan berkisar 3-30 mm. Beban pengerasan-regangan sebesar 1000-2000 N dengan perpindahan berkisar 80-120 mm.



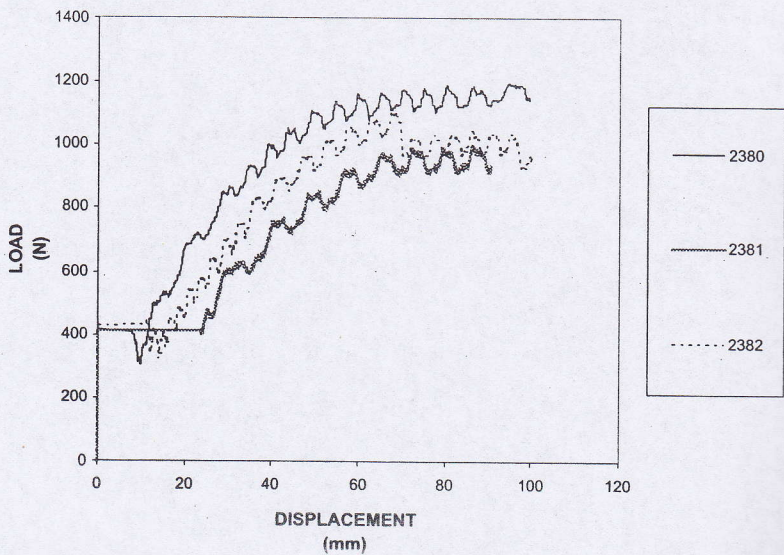
Gambar 5. Rekapitulasi Hasil Uji Cabut-Serat

Hasil uji eksperimental memperlihatkan bahwa serat putus ditemukan pada panjang serat tertanam  $l_f > 60$  mm. Alasan untuk terjadinya fenomena ini adalah kemungkinan timbulnya penahan retak lebih besar pada panjang serat tertanam  $l_f > 60$  mm dibandingkan dengan panjang serat tertanam  $l_f < 60$ . Dengan demikian, penyempitan berulang akan terjadi pada panjang serat tertanam  $l_f = 70$  dan  $100$  mm dengan bagian pengerasan-regangan kurva berbentuk 'gerigi' (Gambar 7) namun tidak dijumpai pada panjang serat tertanam  $l_f = 30, 40, 50,$  dan  $60$  mm (Gambar 6)





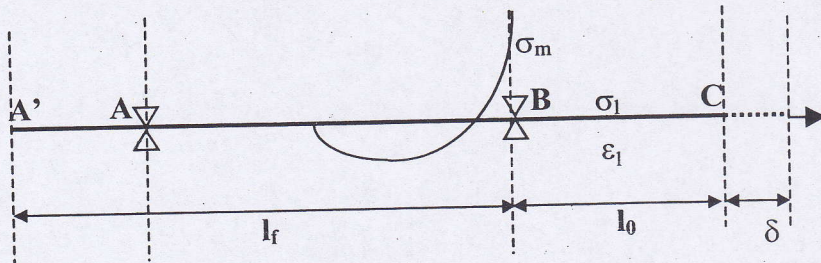
Gambar 6. Relasi Beban-Perpindahan untuk Spesimen Cabut-Serat dengan  $l_f = 30$  mm



Gambar 7. Relasi Beban-Perpindahan untuk Spesimen Cabut-Serat dengan  $l_f = 100$  mm



Pemodelan cabut-serat berbasis fraktur mempertimbangkan beberapa aspek: (1) Kapasitas fraktur serat tertanam merupakan fungsi angka Poisson serat, (2) Terdapat tahapan selama proses cabut-serat, (3) Fenomena 'bergerigi' terjadi pada bagian pengerasan-regangan pada kurva beban-perpindahan ( $P-\delta$ ) dan tegangan-regangan ( $\sigma-\varepsilon$ ) hasil uji cabut-serat, dan (4) Fenomena proses fraktur tak stabil dan stabil terjadi selama berlangsungnya proses cabut-serat.



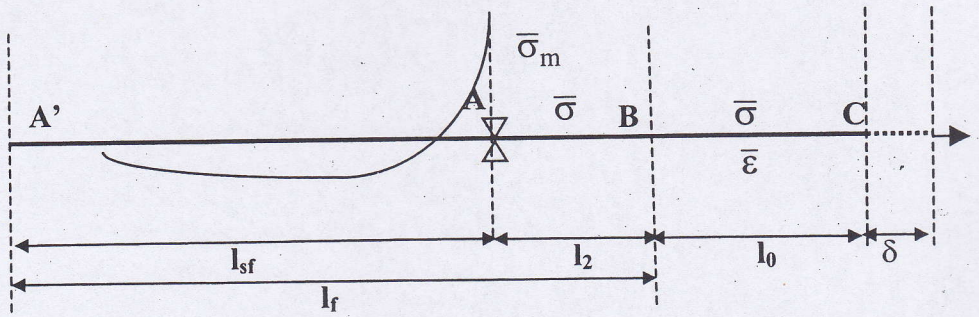
Gambar 8. Model Cabut-Serat pada Tahap Elastis

Gambar 8 memperlihatkan serat tertanam (A'A) dengan ujung serat tertanam A' yang dikekang pada A dan B, namun bebas kekangan pada C. Panjang serat dengan ujung bebas disebut  $l_0$  dan panjang serat tertanam dinamakan  $l_f$ . Suatu perpindahan sebesar  $\delta$  dikenakan pada C dan pada saat ini baik serat maupun matriks sementitis dalam keadaan komposit. Perpindahan  $\delta$  menimbulkan tegangan matriks  $\sigma_m$ . Selanjutnya, tegangan matriks  $\sigma_m$  akan terus meningkat hingga tercapai kondisi  $\sigma_m = \bar{\sigma}_m = \sigma_m(\bar{v})$ . Perlu dicatat bahwa nilai tegangan matriks kritis  $\bar{\sigma}_m$  merupakan kapasitas lekatan pada saat terjadinya retak yang merepresentasikan kapasitas tarik fraktur ultimit. Dengan demikian, regangan dan tegangan pada BC dapat dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta}{l_0} \tag{1}$$

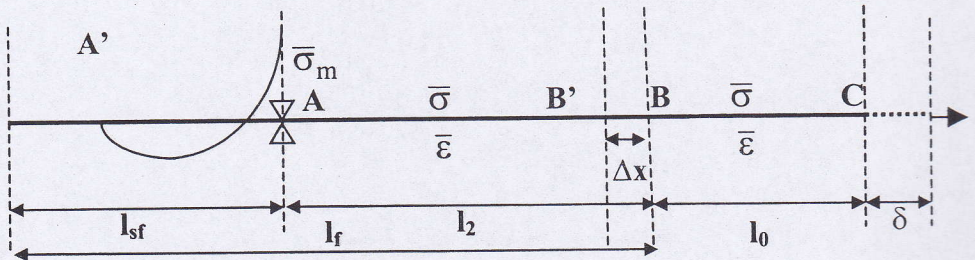
$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E_s \tag{2}$$





Gambar 9. Model Cabut-Serat pada Saat Proses Fraktur Tak Stabil

Merujuk pada Gambar 9, bila perpindahan  $\delta$  terus meningkat, maka akan terbentuk retak. Retak tersebut akan menimbulkan proses fraktur tak stabil. Segera setelah retak terbentuk, tegangan pada komposit akan dipindahkan ke serat. Dengan terbentuknya retak, maka proses fraktur tak stabil akan melepaskan kekangan pada B. Panjang retak akan meningkat sehingga mencapai sebesar  $l_2$ , sementara itu kekangan pada A akan terus berpindah ke arah kiri. Bila panjang retak  $l_2$  lebih besar daripada panjang tertanam  $l_f$ , maka serat akan tercabut.



Gambar 10. Model Cabut-Serat pada Saat Proses Fraktur Stabil

Proses fraktur stabil dapat terjadi setelah proses fraktur tak stabil berlangsung. Diasumsikan bahwa retak telah terbentuk (Gambar 10), maka meningkatnya perpindahan  $\delta$  akan meningkatkan regangan  $\epsilon_1$  dan tegangan  $\sigma_1$  pada B'B. Peningkatan regangan  $\epsilon_1$  dan tegangan  $\sigma_1$  akan mencapai nilai kritis dari tegangan  $\bar{\sigma}_m$  dan regangan  $\bar{\epsilon}$  matriks. Oleh sebab itu, peningkatan perpindahan  $\delta$  akan berulang pada B' pada saat bersamaan terbentuknya retak baru, dan menimbulkan  $\Delta x$  di sisi sebelah kiri serat. Hal ini terjadi terus menerus hingga kekangan pada A tetap, tidak bergerak. Dengan demikian kekangan pada A akan menjadi penahan retak yang mencegah berkembangnya retak. Dalam hal ini retak akan berhenti berkembang dan panjang retak akan tetap sebesar  $l_2$ . Sekali panjang



retak tercapai  $l_2$ , maka regangan pada bagian  $l_0$  akan dipindahkan ke bagian  $l_2$ . Tegangan dan regangan yang timbul dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{l_2} = \varepsilon_0 = \varepsilon_r \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{l_2} = \sigma_0 = \sigma_r \quad (4)$$

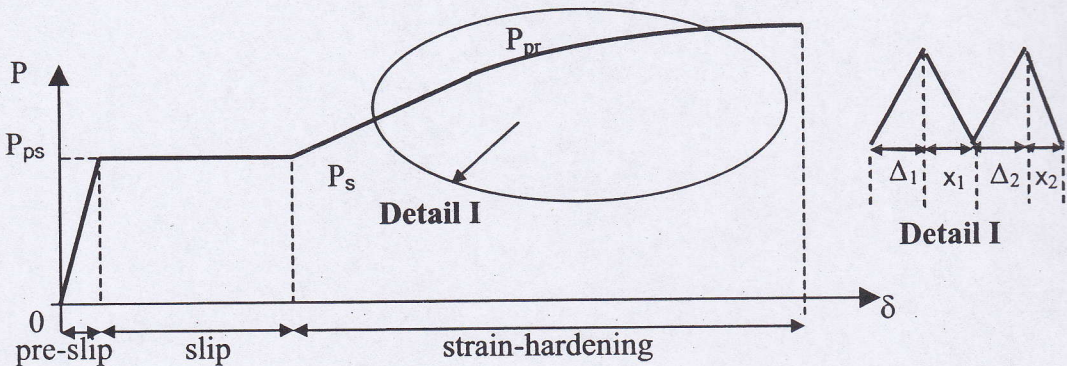
$$\varepsilon_r = \frac{\delta}{l_0 + l_2} \quad (5)$$

Bila  $\bar{\sigma}_m = \sigma_m(\bar{v})$  tercapai dan regangan pada AC adalah sebesar  $\varepsilon = \bar{\varepsilon}$ , maka  $\delta = \bar{\delta}$  sehingga besarnya regangan menjadi:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\delta}}{l_0 + l_2} \quad \text{where} \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon(\bar{v}) \quad (6)$$

Dengan demikian panjang retak stabil dirumuskan sebagai:

$$l_2 = \frac{\bar{\delta} - \bar{\varepsilon}l_0}{\bar{\varepsilon}} \quad (7)$$



Gambar 11. Relasi Beban-Perpindahan pada Model Cabut-Serat

Untuk jelasnya, model cabut-serat menghasilkan kurva  $P-\delta$  (beban-perpindahan) (Gambar 11) dan persamaan (8) yang terdiri atas 3 (tiga) tahap: (a) Tahap pra-selip, (2) Tahap selip, dan (3) Tahap pengerasan-regangan. Selama tahap pra-selip berlangsung, retak tidak terbentuk sehingga fenomena proses fraktur tidak terjadi. Bila tegangan matriks kritis  $\bar{\sigma}_m$  terlampaui, maka retak terbentuk sehingga tahap selip dan proses fraktur tak stabil dimulai. Jenis fraktur pada tahap ini adalah fraktur lateral. Proses fraktur tak stabil ini akan terus



berlangsung dan panjang retak akan terus meningkat hingga panjangretak stabil  $l_2$  tercapai di akhir tahap selip. Dengan tercapainya panjang retak stabil  $l_2$ , maka proses fraktur tak stabil akan berubah menjadi proses fraktur stabil. Proses fraktur stabil berlanjut hingga ke tahap pengerasan-regangan, sementara fenomena 'bergerigi' yang disebabkan penyempitan berulang pada serat nylon timbul. Pada tahap ini, meningkatnya regangan  $\epsilon$  akan menyebabkan meningkatnya tegangan  $\sigma$  hingga serat putus. Proses cabut-serat ini dapat diformulasikan sebagai persamaan beban dalam fungsi perpindahan sebagai berikut:

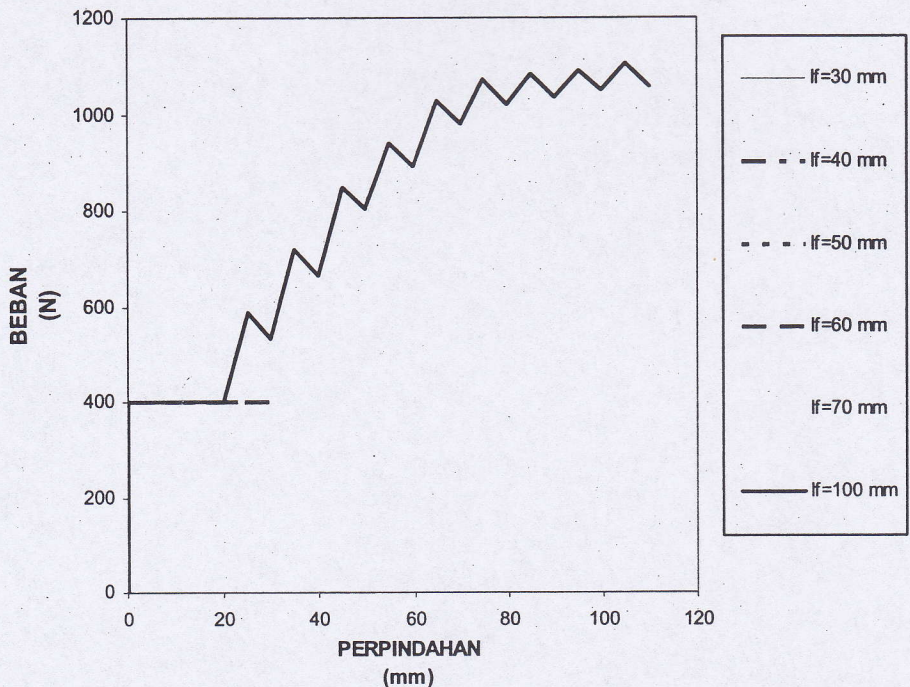
$$P_n = \left( r_{\Delta I} \frac{a_1}{a_2} E_{ps} A \right) + \left( r_{\Delta II} \frac{a_1}{a_2} E_s A \right) + \left( r_{\Delta III} \frac{a_1}{a_2} E_{pr} A \right) \quad (8)$$

Tabel 1. Kisaran nilai  $E_s$ ,  $E_{ps}$ , dan  $E_{pr}$

$l_f$ (mm)	$l_2$ (mm)	STAGE OF	STAGE OF SLIP		STAGE OF
		PRE-SLIP	INITIAL SLIP	FINAL SLIP	STRAIN-HARDENING
		$E_{ps}$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$E_{pr}$ (MPa)
30	53.3903	100000 - 600000	1000000 - 1500000	500 -1500	---
40	42.4539	100000 - 600000	1000000 - 1500000	500 -1500	---
50	51.4764	100000 - 600000	1000000 - 1500000	500 -1500	---
60	75.2632	100000 - 600000	1000000 - 1500000	500 -1500	---
70	37.7375	500000 - 650000	1500000 - 2000000	500 -1500	400 -1500
100	37.7375	500000 - 650000	2000000 - 3000000	500 -1500	400 -2000

Kisaran nilai  $E_s$ ,  $E_{ps}$ , dan  $E_{pr}$  untuk model cabut-serat dijelaskan pada Tabel 1. Terbukti bahwa model (Gambar 12) sesuai dengan hasil uji eksperimental, seperti yang direpresentasikan oleh kurva beban-perpindahan (Gambar 13 sebagai representasi).

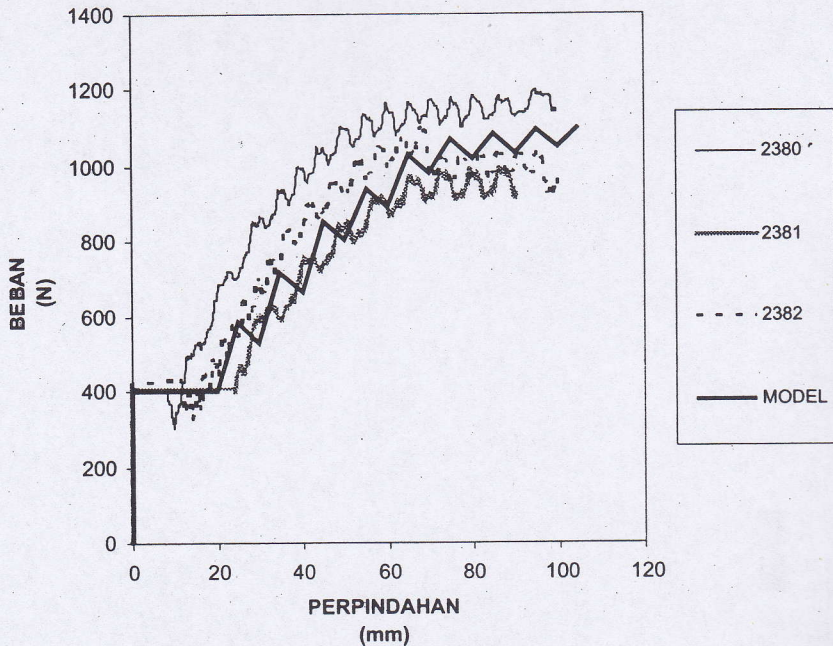




Gambar 12. Relasi Beban- Perpindahan untuk Model Cabut-Serat

Berdasarkan analisa hasil uji eksperimental dan model, diperoleh beberapa asumsi mendasar yang perlu mendapat perhatian: (1) Kapasitas fraktur dari lekatan pada antar-muka serat-matriks adalah konstan dan homogen di sepanjang serat, (2) Serat dan matriks adalah material homogen, (3) Permukaan serat nylon sangat licin sehingga geser tidak terjadi di sepanjang serat terlepas selama berlangsungnya proses cabut-serat, atau dengan kata lain geser terjadi di sepanjang serat tertanam pada saat serat dan matriks masih dalam keadaan komposit, (4) Kapasitas lekatan  $\bar{\sigma}_m$  tidak dipengaruhi oleh geser, (5) Tegangan matriks  $\sigma_m$  merupakan fungsi angka Poisson serat  $\nu$  atau  $\sigma_m = (\nu)$ , (6) Fenomena fraktur yang terjadi adalah fraktur-getas sehingga tidak terjadi pertumbuhan maupun penjalaran retak selama berlangsungnya proses cabut-serat.





Gambar 13. Representasi Relasi Beban-Perpindahan Hasil Uji Eksperimental dan Model Cabut-Serat dengan  $l_r = 100$  mm

## KESIMPULAN

Beberapa teori telah dikemukakan oleh tulisan ini dengan perhatian khusus pada fenomena fraktur. Teori-teori tersebut mencapai kesimpulan sebagai berikut:

1. Saat terjadi fraktur, maka akan selalu timbul retak tak stabil
2. Retak stabil akan timbul oleh karena hadirnya penahan retak
3. Tidak ada suatu cara langsung untuk menentukan panjang retak stabil, namun hal tersebut dapat ditentukan berdasarkan pendekatan berbasis fraktur
4. Panjang retak stabil ditentukan oleh posisi penahan retak
5. Diperoleh suatu persamaan untuk model cabut-serat
6. Diperoleh suatu persamaan untuk panjang retak stabil
7. Panjang retak dapat digunakan untuk menentukan kapasitas lekatan
8. Setelah retak stabil terbentuk, peningkatan regangan yang melampaui regangan  $\epsilon_1$  tidak akan meningkatkan tegangan  $\sigma_1$  (tahap selip terjadi), dengan demikian tidak akan menimbulkan fraktur tambahan
9. Peningkatan regangan setelah terbentuknya retak stabil akan meningkatkan tegangan  $\sigma$  (tahap pengerasan-regangan terjadi), maka selip kedua tidak akan terjadi



10. Serat nylon yang putus memiliki panjang serat tertanam yang lebih besar oleh karena kemungkinan hadirnya penahan retak lebih besar dibandingkan dengan panjang serat tertanam yang lebih kecil

## DAFTAR PUSTAKA

- Avarett, RD (2004). *Fracture Mechanics of High Performance Nylon Fibers*, Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
- Balaguru, P.N., Shah, S.P. (1992). *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill International Edition, Singapore.
- Bazant, ZP. (1992). "Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models, and Determination of Material Properties – State of the Art Report", Proceedings, First International Conference on Fracture Mechanics Concrete Structure (Framcos 1), (Ed. Bazant, ZP), Colorado, USA, pp.6-140.
- Bentur, A., Wu, S.T., Bantia, N., Baggott, R., Hansen, W., Katz, W., Leung, C.K.Y, Li, V.C., Mobasher, B., Naaman, A.E., Robertson, R., Soroushian, P., Stang, H., Taerwe, L.R. (1996). "Fiber-Matrix Interfaces", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2*, (eds. Naaman, A.E., Reindhardt, H.W.), E&FN Spons, London, 149-191.
- Hummel, R.E. (1998). *Understanding Materials Science: History, Properties, Applications*, Springer-Verlag Inc., New York.
- Li, V.C., Chan, Y.W., Wu, H.C. (1994). "Interface Strengthening Mechanism in Polymeric Fiber Reinforced Cementitious Composites", Proceedings of International Symposium on Brittle Matrix Composites, (eds. Brandt, A.M, Li, V.C., Marshall, L.H), IKE and Woodhead Publ, Warsaw, pp. 7-16.
- Li, V.C., Stang, H. (1997). "Interface Property Characterization and Strengthening Mechanism in Fiber Reinforced Cement Based Composites", (Review Article), *Journal of Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 1-20.
- Li, V.C., and Wang, S. (2005). "Suppression of Fracture Failure of Structures by Composite Design based on Fracture Mechanics", corresponding paper in Compendium of Papers CD ROM, Paper 5543.
- Morisson, J.K., Shah, S.P., Jenq, Y.S. (1988). "Analysis of Fiber Debonding and Pull-out in Composites", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 2, February, pp. 277-294.
- Naaman, AE., Namur, GG., Alwan, JM., Najm, HS. (1990). "Fiber Pullout and Bond Slip. I: Analytical Study", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 117, No. 9, pp. 2769-2790.
- Nadai, A. (1950). *Theory of Flow and Fracture of Solids*, Volume I, McGraw-Hill Company. Inc, New York, USA.
- Sumitro, S., Tsubaki, T. (1998). "Microfractural Pullout Model of Steel Fiber Reinforced Concrete", Proceedings Framcos-3, AEDIFICATIO Publishers, Freiburg, Germany, pp. -.



- Sun, W., Lin, F. (2001). "Computer Modelling and FEA Simulation for Composite Single Fiber Pullout", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 14, No. 4, pp. 327-343.
- Suseno, W., Saptono, K., Yosephine, P., Andre, S. (2000a). "Pengaruh Fiber Senar Pancing Terhadap Kuat Lentur Beton", *Jurnal Sipil Supra*, Vol. 2, No. 4, April-Juni, pp. 116-124.
- Suseno, W., Saptono, K., Saphthina, M., Wibowo, M. (2000b). "Uji Tarik Belah pada Beton Serat dengan Senar Pancing", *Jurnal Sipil Supra*, Vol. 2, No. 6, Oktober-Desember, pp. 238-247.
- Susilorini, Retno, M.I. (2007a). "Model Masalah Cabut-Serat Nylon 600 Tertanam dalam Matriks Sementitis yang Mengalami Fraktur", Disertasi, Parahyangan Catholic University, Bandung.
- Susilorini, Retno, Rr. M.I. (2007b). "The Performance Improvement of Fiber Pull-Out of Nylon 600 with Clumped Fiber End, *In: First International Conference of European Asian Civil Engineering Forum (EACEF)*, 26-27 September, Pelita Harapan University, Lippo Karawaci, Jakarta, D64-D71.
- Susilorini, Retno, Rr. M.I. (2007c). "Fractured Based Approach for Structural Element Design – Safe Building, Safe City", *Proceeding Third International Conference on Economic and Urban Management "City Marketing, Heritage, and Identity"*, PMLP Unika Soegijapranata, Semarang, pp.451-465.
- Susilorini, Retno, Rr. M.I. (2007d). "Integral-J Kritis untuk Model Elemen Hingga pada Cabut Serat Fraktur Nylon 600", *Prosiding Seminar Nasional Tiga Roda Forum "Perkembangan Terkini Teknologi dan Rekayasa Konstruksi Beton di Indonesia"*, Hotel Bumi Karsa - Bidakara, Jakarta, pp.1-14.
- Susilorini, Retno, Rr. M.I. (2008a). "The Role of Shear-Friction on Pull-Out Fractured Based Modeling of Nylon 600 with Clumped Fiber End", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil IV, Program Studi Teknik Sipil Pascasarjana dan Jurusan Teknik Sipil, ITS, Surabaya*, pp. B91-B101.
- Susilorini, Retno, Rr. M.I. (2008b). "Fracture to Failure: a Fracture Mechanics Approach for Bridge Failure Analysis", *Proceeding International Seminar "Rekayasa Perencanaan XI"*, UPN Jawa Timur, Surabaya, pp. M.20.1-M.20.6.
- Wang, Y., Li, V.C., Backer, S. (1988a). "Analysis of Synthetic Fiber Pull-out from a Cement Matrix", (eds. Mindess, S., Shah, S.P), *Proceedings of Material Research Society Symposium*, Vol. 114, Pittsburgh, pp. 159-165.
- Wang, Y., Li, V.C., Backer, S. (1988b). "Modeling of Fibre Pull-out from a Cement Matrix", *The International Journal of Concrete Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 10, No. 3, pp. 143-149.