



ANALISIS PERILAKU MATERIAL DAN KOMPOSISI ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE: REVIEW

Indra Komara¹⁾, Priyo Suprobo^{1*)}, Data Iranata¹⁾, dan Faimun¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60111

Abstract

Engineered Cementitious Composite (ECC) concrete or micromechanical modeled concrete using analysis of a mixture of fiber and other added materials can produce a tensile strain capacity of up to three hundred to five hundred times compared to the strain capacity of conventional concrete. A review related to several studies that have been carried out previously on the properties of ECC and their constituent materials is presented in this paper. The behavior of the material is reviewed as an investigation parameter followed by determining the composition of the mixture, namely the effect of the water-cement ratio, the shape and length of the fiber and the addition of additives. The fiber volume fraction review was limited to between 2% to 3%, which resulted in outstanding tensile strain behavior. As it is known, ECC has an excellent capacity in terms of strain behavior which is accompanied by a large number of micro cracking patterns. ECC crack widths are usually predominantly less than 100 μm . ECC behavior is closer to that of steel which can bend or be ductile, whereas conventional concrete is brittle.

Key Words: concrete mixture, crack width, engineered cementitious composite, material behavior, tensile strain

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan utama yang hampir dapat digunakan di semua lokasi dalam skala besar karena beberapa keunggulannya dibandingkan material konstruksi lainnya seperti baja. Ketersediaan secara lokal pun menjadi parameter utama dalam pertimbangan kegunaannya. Seperti yang diketahui konstruksi beton terbuat dari beberapa material, seperti semen, agregat halus dan kasar, air dan bahan tambah, yang mana dapat dikombinasikan sesuai dengan kekuatan yang direncanakan. Faktanya, sifat beton lemah terhadap tarik dan kuat terhadap tekan. Untuk mengakomodasi hal tersebut, baja tulangan biasanya dikombinasikan untuk menjadi material komposit beton bertulang untuk meningkatkan perilaku beton dalam tarik. Beton sendiri apabila tidak didukung dengan bantuan penulangan akan bersifat getas (Kewalramani dkk., 2017).

Kebutuhan beton mutu tinggi di bidang industri pun meningkat dan bervariasi, yang mana didasari dari berbagai jenis serta peruntukan konstruksi yang memerlukan kapasitas tinggi. Tingkat kapasitas yang dimaksudkan disini adalah akibat tahanan terhadap gaya gempa yang identik dengan daktilitas struktur. Sama halnya dengan beton normal material pendukung untuk beton mutu tinggi pun dipergunakan material serupa hanya dengan komposisi yang berbeda. Yang menjadi

catatan disini adalah nilai daktilitas beton mutu tinggi yang secara teoritis akan menurun seiring dengan tingginya nilai kapasitas kuat tekan beton. Keterbatasan beton mutu tinggi yang memiliki nilai daktilitas rendah ini sangat berbahaya untuk aplikasi struktural. Penggunaan material daktilitas tinggi dalam elemen seismik dapat membantu dalam meningkatkan respons seismik struktur. Berdasarkan hal tersebut diperlukan alternatif penggunaan material lain untuk mendukung tingkat kegetasan beton. Menurut sudut pandang seismik, untuk mengurangi tingkat kegetasan beton, material lain berbasis kinerja yang memiliki daktilitas tinggi untuk aplikasi struktur diperlukan untuk dianalisis. Salah satu pengembangan dari beberapa studi adalah dengan melakukan rekayasa komposisi semen menggunakan engineered cementitious composite (ECC) (Victor C. Li, 2003; Şahmaran & Li, 2010).

Penelitian terkait ECC dikembangkan dan banyak dianalisis oleh Li (Victor C. Li, 1994). Dari beberapa studi yang dilakukan munculah alternatif beton yang dapat melengkung atau yang memiliki daktilitas sangat tinggi, yang mana melebihi perilaku tulangan baja (Victor C. Li & Wang, 2002). Dengan catatan memenuhi karakteristik campuran. Berdasarkan studi tersebut, ECC dikategorikan dalam kelas yang berbeda dengan high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) karena tidak memasukan agregat kasar dalam

komposisi campurannya. Kondisi tersebutlah yang membuat ECC memiliki perilaku daktail yang berbeda dengan HPFRCC. Tingkat daktilitas ECC didapatkan dari serat fiber yang dimasukkan kedalam campuran dalam proporsi cukup banyak. Akan tetapi harus diperhatikan besarnya jumlah fiber yang dimasukkan kedalam campuran karena akan mempengaruhi tingkat daktilitas. Proporsi fiber pun akan mempengaruhi slip beton ECC yang apabila terlalu banyak perilaku tarik beton ECC tidak akan terbentuk. Pengembangan ECC lebih ditekankan kepada proporsi campuran atau matrix material pendukung. Hal tersebut antara lain untuk mengoptimalkan material yang dipergunakan dalam campuran. Skema keruntuhannya pun akan berubah dari keruntuhan getas menjadi keruntuhan daktail (Victor C. Li & Herbert, 2013; Victor C Li & Stang, 2004).

Berdasarkan beberapa kondisi yang disebutkan sebelumnya, studi kecocokan material pendukung menjadi material kunci untuk menentukan perilaku beton ECC. Analisis difokuskan kepada proporsi matrik dan properti material yang digunakan untuk memberikan alternatif penggunaan beton ECC yang bisa diaplikasikan menyesuaikan dengan proporsi material yang tersedia secara lokal. Beberapa dokumentasi serta data pendukung dari beberapa peneliti akan dibandingkan satu sama lain sehingga memberikan gambaran secara utuh terhadap beton ECC.

Proporsi campuran beton ECC

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, proposi campuran beton ECC memiliki proporsi campuran yang mirip dengan beton normal yang membedakan adalah penambahan material *fiber* dan tidak dipergunakannya agregat kasar. Proporsi campuran mix desain beton ECC berdasarkan peneliti pioner dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Proposi Campuran Beton ECC berdasarkan (Victor C. Li dkk., 2004).

Proporsi campuran	Mix desain ECC
Semen	1,0
Fly ash	1,2
Pasir	0,8
Air	0,56
HRWR*	0,012
Fiber (vol %)	0,02

*High range water reducer

Beton ECC juga dikenal sebagai beton yang ramah lingkungan, hal ini dikarenakan penggunaan bahan tambah mineral atau *mineral admixture* cukup besar porsinya dibandingkan dengan beton konvensional. Dalam komposisi campuran sesuai Tabel 1. Bahan tambah mineral yang dipakai adalah fly ash dengan proporsi lebih besar dibandingkan dengan semen.

Bahan tambah mineral tersebut dikategorikan sebagai bahan pozzolan halus yang ditambahkan ke dalam beton untuk meningkatkan kualitas beton. *Ground granulated blast furnace slag* (GGBFS), fly ash, metakaolin, silika fume (SF) dan abu sekam padi dan lainnya digunakan sebagai bahan tambahan mineral dalam beton. Produk-produk tersebut adalah produk sampingan industri yang dikategorikan sebagai limbah berbahaya, karena memberikan dampak buruk terhadap lingkungan. Karena dikategorikan sebagai limbah, sehingga kualitas dan ketersediaannya beragam dan membuat beton yang didesain lebih murah dan ramah lingkungan. Secara garis besar, peran dari bahan tambah ini dapat meningkatkan kemampuan kerja beton.

2. LITERATURE REVIEW

Identifikasi studi berdasarkan beberapa review dari penelitian sebelumnya dapat diamati pada Tabel 2, bahwa berbagai jenis bahan tambah mineral digunakan untuk menggantikan FA, pasir silika dan semen di ECC. Juga, beberapa peneliti menggunakan agregat ringan di ECC untuk meningkatkan sifat pengerasannya. Meng dkk. telah menggunakan pasir yang tersedia secara lokal sebagai pengganti pasir silika (Meng dkk., 2017). Diamati bahwa kuat tekan hampir sama, kapasitas regangan tarik menurun dan kekuatan tarik dan lentur utama meningkat dibandingkan dengan ECC pada umumnya. Pasir silika pun yang biasa dipakai pada ECC dapat diganti dengan *Recycled Concrete Fines* (RCF) yang mana sebagai alternatif penggunaan pasir silika yang terbatas (J. Li & Yang, 2017). Didapatkan bahwa kuat tekan ECC menggunakan RCF ukuran 300 µm dapat memberikan perilaku yang sama dengan ECC normal. Kemudian kuat tekan akan menurun sejalan dengan peningkatan ukuran agregat dari RCF. Tambahan lainnya, kekuatan lentur dan kapasitas regangan dengan menggunakan RCF maksimum pada ukuran 600 µm.

Penelitian sejenis lain yang dilakukan oleh Lepech dkk. menginvestigasi penggunaan agregat ringan sebagai pengganti pasir silika (Lepech & Li, 2009). Studi tersebut menghasilkan kuat tekan, tarik dan lentur menurun dengan meningkatnya agregat ringan dari 10% menjadi 20%. Yang menjadi pertimbangan lain adalah susut yang berpengaruh besar pada beton ECC, dengan digunakannya agregat ringan, susut kering dapat menurun sebesar 28–37%. Dengan tinjauan susut, Zhou dkk. menggunakan SF sebesar 0,1% sebagai bahan tambahan dalam ECC (J Zhou dkk., 2010). Dari pengamatan didapatkan bahwa penggunaan SF meningkatkan sifat matriks fiber, kapasitas regangan tarik mencapai 22-51% dan kekuatan tarik akhir dapat mencapai 8-31%. Dari studi juga dilakukan

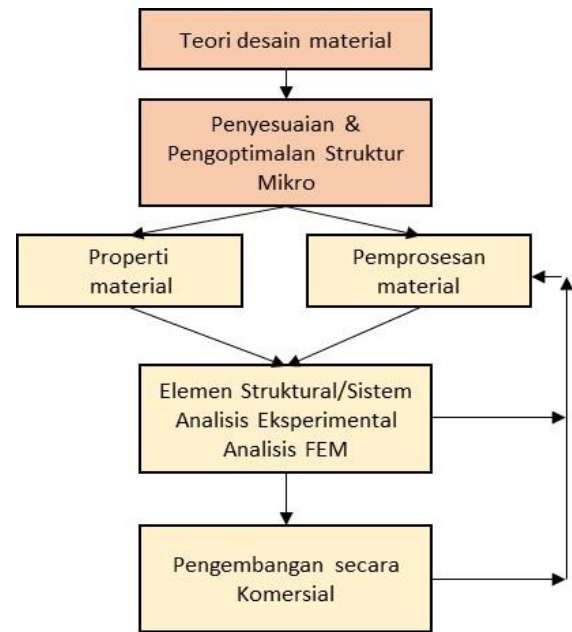
pengamatan bahwa dengan penambahan pasir dalam jumlah besar, dapat menurunkan susut akibat pengeringan, kapasitas regangan tarik sebesar 85% dan kekuatan tarik ultimit sebesar 26%.

deformabilitas dapat meningkat hingga 1,5-2,9 kali dari proporsi campuran ECC biasa.

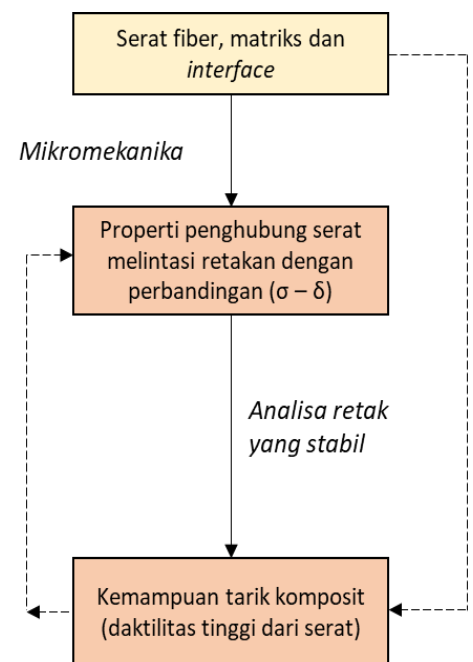
Tabel 2. Variasi penggunaan bahan tambah mineral pada beton ECC berdasarkan berbagai investigasi studi

Review Studi	Bahan tambah mineral				
	FA	P.silika	SBB	SF	Kapur
(I. Komara dkk., 2020)	✓	✓	-	-	-
(Bastian dkk., 2020)	✓	✓	-	-	-
(Indra Komara, Tambusay, Sutrisno, & Suprobo, 2019)	✓	✓	-	-	-
(Meng dkk., 2017)	✓	✓	-	-	-
(J. Li & Yang, 2017)	-	✓	-	-	-
(X. Huang, Ranade, & Li, 2013)	✓	✓	✓	-	-
(Zhang dkk., 2006)	-	✓	-	-	-
(Fischer & Li, 2002)	✓	✓	-	-	-
(Tian dkk., 2015)	-	✓	-	✓	✓
(Şahmaran dkk., 2012)	✓	✓	-	-	-
(Soe dkk., 2013)	✓	✓	-	-	-
(Chung dkk., 2018)	✓	✓	-	-	-
(Qiu & Yang, 2017)	-	✓	-	✓	-
(Yu dkk., 2017)	✓	✓	-	✓	-
(Thaishnavi dkk., 2016)	✓	✓	-	✓	-
(Paegle & Fischer, 2016)	✓	✓	-	-	-
(Liu dkk., 2017)	✓	✓	-	-	-
(Wang & Li, 2006)	✓	✓	-	-	-
(Leung dkk., 2007)	-	✓	-	-	-
(Zhang dkk., 2006)	-	✓	-	-	-
(M. Li & Li, 2006)	✓	✓	-	-	-
(Kamada & Li, 2000)	✓	✓	-	-	-
(Zhang dkk., 2002)	-	✓	-	✓	-
(Fischer & Li, 2002)	-	✓	-	✓	-
(Fischer & Li, 2002)	-	✓	-	-	-
(Kim dkk., 2004)	✓	✓	-	-	-
(V C Li, 2003)	-	✓	-	-	-
(V C Li, 2003)	✓	✓	-	-	-
(Wang & Li, 2007)	✓	✓	-	-	-

Penelitian lanjutan dilakukan oleh Sahmaran dkk. yang mana menggunakan pasir pecah dan pasir kerikil sebagai pengganti pasir silika (Sahmaran dkk., 2009). Dari pengamatan didapatkan bahwa kuat tekan maksimum didapat dengan menggunakan pasir silika, yang mana perilaku susut lebih baik dengan menggunakan pasir silika daripada pasir kerikil. Zhang dkk. pun melakukan identifikasi serupa dengan menggunakan remah karet sebagai pengganti pasir silika dengan prosentase pengganti sebesar 0,15 dan 25% (Fischer & Li, 2002). Diamati bahwa kuat tekan menurun hingga 35%, kekuatan retak pertama dan keuletan matriks juga menurun. Akan tetapi, dengan peningkatan remah karet,



Gambar 1. Diagram alir elemen dasar penelitian dan pengembangan proporsi campuran ECC (Victor C. Li, 2003)



Gambar 2. Keterkaitan antara konstituen material, retak dan kapasitas tarik komposit (Victor C. Li, 2003)

Studi lainnya yang dilakukan Huang dkk. adalah dengan menggunakan pasir lokal lainnya sebagai pengganti pasir silika yaitu dengan gradasi < 200 μm (T. Huang & Zhang, 2020). Terlihat bahwa kuat tekan hampir sama, kapasitas regangan tarik menurun dan kekuatan tarik ultimit meningkat. Huang dkk. menggunakan serbuk bijih besi (SBB) atau *iron ore tailings forwer* (IOTs) sebagai

pengganti semen (X. Huang, Ranade, & Li, 2013). Didapatkan bahwa kuat tekan, kuat tarik ultimit, kuat retak pertama dan lebar retakan menurun begitu halnya dengan kapasitas regangan tariknya. Keunggulan menggunakan SBB adalah ikatan matriks meningkat menjadi lebih baik. Huang dkk. juga telah menggunakan karet ban daur ulang sebagai pengganti SBB hingga 40%. Diamati bahwa kuat tekan, retak pertama dan kuat tarik menurun begitu juga dengan kapasitas regangan tarik, susut pada saat pengeringan bebas meningkat dengan penambahan karet ban daur ulang sebagai pengganti SBB tersebut yaitu hingga 10% dan 20% dari volume berat (X. Huang, Ranade, Ni, dkk., 2013).

Altwaair dkk. dalam studinya menggunakan abu bahan bakar minyak sawit atau *palm oil fuel ash* (POFA) hingga 55% dari berat semen (Singh & Siddique, 2012). Dari studi tersebut dihasilkan bahwa kuat tekan meningkat dengan penggunaan kandungan POFA 18% dan kemudian menurun sejalan dengan peningkatan persentasinya, jumlah retakpun meningkat akan tetapi kekuatan retak pertama menurun. Huang dkk. menggunakan *fly ash cenosphere* (FAC) sebagai pengganti SBB (X. Huang, Ranade, Zhang, dkk., 2013). Studi didapatkan bahwa dengan penggunaan FAC; lebar retak, kuat tekan dan tarik menurun dan kapasitas regangan tarik meningkat.

Tabel 3. Variasi penggunaan bahan tambah mineral pada beton ECC berdasarkan berbagai investigasi studi

No	Referensi	Jenis Agregat	Pengganti (%)
1	(Meng dkk., 2017)	Pasir lokal	100
2	(J. Li & Yang, 2017)	Agregat halus daur ulang (RCF)	100
3	(X. Huang, Ranade, & Li, 2013)	Serbuk Baja (IOTs)	Hingga 80
4	(Zhang dkk., 2006)	Abu terbang sekam kelapa (POFA)	55 dari volume semen
5	(X. Huang, Ranade, Zhang, dkk., 2013)	Fly ash kelas F	Hingga 100
6	(Şahmaran dkk., 2009)	Agregat ringan	Hingga 20

Perilaku struktur balok ECC lainnya di investigasi oleh Komara, dkk, yang menganalisis balok ECC akibat pengaruh korosi. Penggunaan FA tipe F dan C pun digunakan pada penelitian ini dengan harapan dapat memberikan alternatif material beton ECC di Indonesia (Bastian dkk., 2020; I. Komara dkk., 2020; Indra Komara, Tambusay, Sutrisno, Suprobo, dkk., 2019; Mooy dkk., 2020; Oktaviani dkk., 2020)

3. PEMBAHASAN

Campuran pengganti pasir silika dan semen

Dari tinjauan literatur telah diamati bahwa variasi campuran bahan tambah dan pasir lokal

digunakan untuk menggantikan pasir silika dan semen. Pengaruh penggantian pasir silika dan pasir lokal terhadap ECC ditunjukkan pada Tabel 4. Dari Tabel tersebut terlihat bahwa jenis bahan tambah mineral yang berbeda digunakan untuk menggantikan pasir silika, semen dan FA. Hasil dari tabel tersebut menunjukkan bahwa sifat keras ECC meningkat pesat. Karena ECC merupakan jenis material beton yang masih belum umum diaplikasikan sehingga alternatif campuran pengganti masih perlu dilakukan studi lebih lanjut. Gambar 1 menunjukkan diagram alir dari beberapa elemen penting analisis dan pengembangan beton ECC, dari teori desain bahan dasar hingga aplikasi komersial praktis. Dari ilustrasi tersebut penyesuaian pencampuran pada beton ECC masih harus ditelaah kembali yang lebih ditekankan pada penentuan properti material dan proses pencampurannya (Victor C. Li, 2003).

Tabel 4. Variasi penggunaan bahan tambah mineral pada beton ECC berdasarkan berbagai investigasi studi (Lanjutan)

No	Kuat Tekan (%)	Kuat Tarik	Kuat Lentur (%)
1	Mendekati sama	Turun sekitar 80%	Naik hingga 9%
2	Turun sekitar 20%	Mendekati sama	Naik 3% dengan 600 µm RCF
3	Turun hingga 35	Naik hingga 28%	-
4	Naik sekitar 5% dengan 18% POFA	-	Naik hingga 7% dengan 18% POAF dan turun setelahnya
5	Turun sekitar 8%	Naik hingga 25%	-
6	Turun Sekitar 25%	Turun sekitar 20%	Turun sebesar 13%

Distribusi fiber dalam ECC

Fiber adalah material tambah berupa serat yang memiliki karakteristik unik yang dimiliki oleh properti materialnya. Bentuk serat fiber pun beragam, bisa *circular*, *triangular* ataupun *rectangular*. Tipe serat fiber pun dikategorikan dalam bentuk natural dan sintesis yang mana akan memiliki aspek rasio yang berbeda satu sama lainnya. Aspek rasio fiber dapat dikategorikan sebagai perbandingan antara panjang serat dengan diameternya yang pada umumnya berkisar antara 30 hingga 150. Dapat diamati pada Tabel 5 bahwa sebagian besar peneliti menggunakan serat polivinil alkohol (PVA) dalam beton ECC dan beberapa peneliti lain telah menggunakan serat alami di ECC (Soe dkk., 2013; Tian & Zhang, 2016, 2017).

Tabel 5. Tinjauan studi penggunaan fiber dalam beton ECC

Referensi	Tipe fiber yang dipakai
(Soe dkk., 2013; Tian dkk., 2015, 2015; Tian & Zhang, 2017)	Steel fiber (SE)
(Pakravan dkk., 2016)	Polypropylene fiber (PP)
(Kamada & Li, 2000; V C Li, 2003; Zhang dkk., 2002)	Polyethylene fiber (PE)
(Bhaumik Merchant & Ajay Gelot, 2015; T. Huang & Zhang, 2020; Meng dkk., 2017)	Polyvinyl alcohol fiber (PVA)
(Bastian dkk., 2020; I. Komara dkk., 2020; Mooy dkk., 2020; Oktaviani dkk., 2020)	(PVA)

Tabel 6. Variasi penggunaan bahan tambah mineral pada beton ECC berdasarkan berbagai investigasi studi

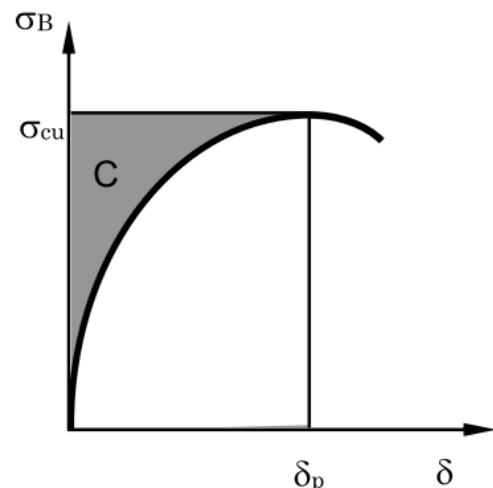
Referensi	Rasio w/c	Kuat lentur	Deform (mm)	Reg. (%)
(Sasmal & Avinash, 2016)	0.3, 0.35, 0.40	↓	↑	↑
(Zhang dkk., 2006)	0.33, 0.36, 0.38	↓	↑	↑
(Pan dkk., 2015)	↑	↓	-	-

Dari beberapa studi tersebut, dapat diketahui bahwa panjang fiber PVA biasanya memiliki panjang antara 6-12 mm. Panjang fiber tersebut didistribusikan secara acak digunakan untuk memperkuat ECC. Volume serat di ECC umumnya dikondisikan kurang dari 2%. Serat lain yang memiliki modulus tinggi seperti serat karbon, baja dan kaca telah digunakan untuk meningkatkan kekuatan material komposit; namun, nilai regangan serta daktilitas tidak dapat tercapai karena material komposit tersebut terlalu getas. PVA, Polypropylene (PP) dan Polyethylene (PE) menawarkan kemampuan untuk mengurangi retak dan meningkatkan daktilitas campuran beton secara signifikan (Ma dkk., 2021; Maalej dkk., 2005; Pakravan dkk., 2016; Soe dkk., 2013; Tian dkk., 2015). Kapasitas regangan tarik dan daktilitas dapat meningkat walaupun rekatan friksi berkurang karena lapisan minyak pada permukaan fiber (Victor C. Li, 2003).

Tian H., dkk. melakukan penelitian menggunakan serat ampas tebu untuk memperkuat beton komposit, dengan proporsi 3%, 8% dan 12% dari berat volume semen (Tian dkk., 2015; Tian & Zhang, 2016, 2017). Dari data tersebut dapat diamati bahwa dengan meningkatnya kandungan serat; kuat tekan, lentur, kuat tarik dan nilai modulus elastisitas menurun. Sifat mekanik beton komposit dengan serat ampas tebu tersebut sebanding dengan beton konvensional yang mana memenuhi sifat bahan konstruksi yang ramah lingkungan. Yang harus diperhatikan adalah peningkatan kandungan serat ampas tebu dalam beton komposit yang dapat meningkatkan kandungan udara dalam matriks,

sehingga menyebabkan berkurangnya kekompakan matriks.

Penelitian berkelanjutan lain yang telah dilakukan oleh beberapa ahli menunjukkan bahwa sifat paling mendasar dari beton ECC adalah sifat yang dapat memberikan dukungan serat fiber melintasi retakan pada matriksnya yang mana umum disebut sebagai kurva $\sigma - \delta$ (Chethan V R dkk., 2015; M. Li, 2009; M. Li & Li, 2006; Victor C. Li dkk., 2004, 2004; Victor C. Li & Kanda, 1998; Şahmaran & Li, 2009; Zhang dkk., 2002; Jian Zhou, 2011). Kurva tersebut merupakan tegangan tarik rata-rata yang dikorelasikan dengan fiber dan retakan. Ilustrasi konstituent material, retak dan kapasitas tarik ECC dapat dilihat pada Gambar 3. Kemudian untuk memahami mekanisme dasar perilaku *strain-hardening* ECC, maka dapat dilihat Gambar 3, yang mana setelah retak pertama atau area *multiple cracking* (C), kondisi *strain hardening* akan meningkat yang mengarah pada peningkatan daktilitas dan kekuatan tarik material. Kekuatan tarik material beton ECC tersebut bisa melebihi 5.5 Mpa atau antara 4 – 6%.



Gambar 3. Konsep energi komplementer – *strain hardening multiple*

Pengaruh rasio w/c, suhu dan teknik pencampuran pada ECC

Seperti yang disampaikan sebelumnya, fiber dibagi kedalam tipe alami dan sintetis yang mana dikategorikan berdasarkan material pendukungnya. Kondisi fiber tersebut yang mempengaruhi kinerjanya dalam campuran. Ada beberapa faktor yang akan mempengaruhi kinerja fiber dalam matrix beton diantaranya yaitu, nilai w/c, suhu atau temperatur dan teknik pencampuran. Literatur sebelumnya menyampaikan bahwa peningkatan ukuran spesimen, suhu dan durasi pemanasan menurunkan kuat tekan, kekakuan dan kuat residu. Kondisi tersebut berpengaruh serupa pada beberapa benda uji yang memiliki perbedaan ukuran (Liu dkk., 2017).

Selanjutnya bagian yang terkait dengan parameter pencampuran adalah perbandingan w/c, dapat diamati dari Tabel 6 bahwa peningkatan rasio air-semen (w/c) tersebut menurunkan kuat tekan, kuat retak pertama dan kuat lentur. Juga rasio w/c yang lebih tinggi meningkatkan fenomena pengerasan regangan, beberapa retak dan kapasitas defleksi lentur. Pada penggunaan rasio air-semen rendah, nilai kuat tekan tinggi dapat tercapai yang sejalan dengan nilai daktilitas tinggi (Sasmal & Avinash, 2016; Zhang dkk., 2006; Pan dkk., 2015). Berdasarkan Investigasi tersebut penulis membuat urutan waktu pengecoran ECC yang mana setiap tahapan perlu diperhatikan; (1) menuangkan semua material serbuk sekaligus berupa semen, silica sand dan fly ash disertai air sebagian untuk menjaga tidak ada material yang terbang, (2) material di mix menggunakan mixer yang kemudian secara bertahap dimasukan material cair berupa air dan HRWR, (3) selanjutnya pada tahapan akhir adalah memasukan fiber yang selanjutnya di mix secara bertahap dengan beberapa mode kecepatan.

4. KESIMPULAN

Berbagai jenis bahan tambah, seperti FA, SF, IOTs dan lainnya telah digunakan pada beton ECC sebagai parameter campuran yang disertai dengan berbagai faktor pendukung lainnya. Pengaruh tersebut diambil dari beberapa investigasi yang sudah dilakukan berdasarkan studi terdahulu, dengan berbagai pertimbangan untuk mengetahui perilaku beton ECC seperti kuat tekan, kuat retak disertai jumlah dan lebar retak, susut dan lekatan matriks. Dari review studi tersebut, dapat disimpulkan beberapa kondisi untuk mempermudah pekerjaan lanjutannya untuk mengembangkan penggunaan beton ECC, sbb:

- 1) Material ECC sangat tergantung pada material penyusunnya yang mana penggunaannya banyak mengimplementasikan bahan tambah berupa *supplementary cementitious material* seperti fly ash, abu sekam, serbuk besi, silicafume dan lainnya untuk menghasilkan kuat tekan besar namun tidak getas.
- 2) Penggunaan *supplementary cementitious material* dalam jumlah besar menurunkan kuat tekan, tarik dan lentur; tetapi, meningkatkan kapasitas regangan tarik, ketahanan api, ikatan serat/matriks, susut pengeringan, kekuatan matriks, serta jumlah retak dan lebar retak.
- 3) Proporsi campuran ECC tidak menggunakan agregat kasar untuk membentuk matrix dukungan dengan fiber secara sempurna.
- 4) Penggunaan pasir dengan ukuran lebih besar dari 300 μm disertai gabungan bahan tambah mineral akan menurunkan kuat tekan,

deformasi, kuat lentur dan susut akibat pengeringan akan tetapi meningkatkan sifat mekanik berupa sifat tarik material.

- 5) Beton ECC cukup sensitif terhadap temperatur tinggi, yang mana akan menurunkan kuat tekan dan tarik. Kondisi temperatur tinggi pun akan menginisiasi retak berlebih akibat penyusutan dan rangkai, hal ini dikarenakan karena beton ECC tidak menggunakan agregat kasar.
- 6) Rasio w/c yang tinggi menurunkan kekuatan tekan, kekakuan, kekuatan retak pertama dan kuat lentur; tetapi, meningkatkan perilaku pengerasan regangan dengan jumlah retak yang banyak. Sebagian besar peneliti menggunakan *high range water reducer* berbasis polikarboksilat, yang mana membantu proses *mixing* dengan nilai kelecakan tinggi yang tidak mempengaruhi kuat tekan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan finansial dari Departemen Teknik Sipil ITS melalui riset unit kerja di bawah skema Riset Departemen.

REFERENSI

- Bastian, M. A., Tambusay, A., Komara, I., Sutrisno, W., Irawan, D., & Suprobo, P. (2020). Enhancing the Ductility of a Reinforced Concrete Beam using Engineered Cementitious Composite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506, 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012044>
- Bhaumik Merchant, & Ajay Gelot. (2015). Evaluation of Engineering Cementitious Composites (ECC) With Different Percentage of Fibers. *International Journal of Engineering Research and*, V4(06), 40–43. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is060084>
- Chethan V R, Ramegowda, M., & Manohara H E. (2015). Engineered Cementitious Composites-a Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(5), 144–149. www.irjet.net
- Chung, K. L., Ghannam, M., & Zhang, C. (2018). Effect of Specimen Shapes on Compressive Strength of Engineered Cementitious Composites (ECCs) with Different Values of Water-to-Binder Ratio and PVA Fiber. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1825–1837. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2776-8>
- Fischer, G., & Li, V. C. (2002). Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). *ACI Structural Journal*, 99(1), 104–111. <https://doi.org/10.14359/11041>
- Huang, T., & Zhang, Y. X. (2020). Mechanical Properties of a Pva Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 1(1), 439–444. <https://doi.org/10.14455/isec.res.2014.40>
- Huang, X., Ranade, R., & Li, V. C. (2013). Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 923–931.

- [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000674](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000674)
- Huang, X., Ranade, R., Ni, W., & Li, V. C. (2013). On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durable concrete repairs. *Construction and Building Materials*, 46, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.027>
- Huang, X., Ranade, R., Zhang, Q., Ni, W., & Li, V. C. (2013). Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 48, 954–960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.104>
- Kamada, T., & Li, V. C. (2000). Effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system. *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 423–431. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00042-1)
- Kewalramani, M. A., Mohamed, O. A., & Syed, Z. I. (2017). Engineered Cementitious Composites for Modern Civil Engineering Structures in Hot Arid Coastal Climatic Conditions. *Procedia Engineering*, 180, 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.237>
- Kim, Y. Y., Fischer, G., Lim, Y. M., & Li, V. C. (2004). Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcreting process for repair applications. *ACI Materials Journal*, 101(1), 42–49. <https://doi.org/10.14359/12986>
- Komara, I., Suprobo, P., Iranata, D., Tambusay, A., & Sutrisno, W. (2020). Experimental investigations on the durability performance of normal concrete and engineered cementitious composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 930(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012056>
- Komara, Indra, Tambusay, A., Sutrisno, W., & Suprobo, P. (2019). Engineered Cementitious Composite as an innovative durable material: A review. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(4), 822–833.
- Komara, Indra, Tambusay, A., Sutrisno, W., Suprobo, P., & Iranata, D. (2019). The Investigation study of improving Durability Performance of Marine Infrastructure by using the Engineered Cementitious Composite. *The 14th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST) 2019*, 8–12. <https://doi.org/10.4324/9780367853815-2>
- Lepech, M. D., & Li, V. C. (2009). Water permeability of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.002>
- Leung, C. K. Y., Cheung, Y. N., & Zhang, J. (2007). Fatigue enhancement of concrete beam with ECC layer. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.015>
- Li, J., & Yang, E. H. (2017). Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines. *Cement and Concrete Composites*, 78, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.013>
- Li, M. (2009). *Multi-Scale Design for Durable Repair*.
- Li, M., & Li, V. C. (2006). Behavior of ECC/Concrete Layer Repair System Under Drying Shrinkage. *Restoration of Buildings and Monuments*, 12(2), 143–160.
- Li, V. C. (2003). Durable Overlay Systems with Engineered Cementitious Composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(2), 1–20.
- Li, Victor C. (1994). From micromechanics to structural engineering –the design of cementitious composites for civil engineering applications. In *Structural Engineering/Earthquake Engineering* (Vol. 10, Nomor 2, hal. 1–34).
- Li, Victor C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215–230. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>
- Li, Victor C., & Herbert, E. N. (2013). Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment. *Materials*, 6(7), 2831–2845. <https://doi.org/10.3390/ma6072831>
- Li, Victor C., & Kanda, T. (1998). Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66–69. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(66))
- Li, Victor C., Lepech, M., & Wang, S. (2004). Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 1(September), 181–191. <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/11346106.pdf#page=192>
- Li, Victor C., & Wang, S. (2002). Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*, 99(1), 11–21. <https://doi.org/10.14359/11311>
- Li, Victor C., & Stang, H. (2004). Elevating FRC material ductility to infrastructure durability. *6th RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes*, September, 171–186.
- Liu, H., Zhang, Q., Li, V., Su, H., & Gu, C. (2017). Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment. *Construction and Building Materials*, 133, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.074>
- Ma, H., Yi, C., & Wu, C. (2021). Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC). *Construction and Building Materials*, 287, 122719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122719>
- Maalej, M., Quek, S. T., & Zhang, J. (2005). Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 143–152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(143))
- Meng, D., Huang, T., Zhang, Y. X., & Lee, C. K. (2017). Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients. *Construction and Building Materials*, 141, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.158>
- Mooy, M., Tambusay, A., Komara, I., Sutrisno, W., Faimun, & Suprobo, P. (2020). Evaluation of Shear-Critical Reinforced Concrete Beam Blended with Fly Ash. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012041>
- Oktaviani, W. N., Tambusay, A., Komara, I., Sutrisno, W., Faimun, F., & Suprobo, P. (2020). Flexural Behaviour of a Reinforced Concrete Beam Blended with Fly ash as Supplementary Material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506, 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012042>
- Paegle, I., & Fischer, G. (2016). Phenomenological interpretation of the shear behavior of reinforced Engineered Cementitious Composite beams. *Cement and Concrete Composites*, 73, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.018>
- Pakravan, H. R., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2016). The effect of hybridization and geometry of polypropylene fibers on engineered cementitious composites reinforced by polyvinyl alcohol fibers. *Journal of Composite Materials*, 50(8), 1007–1020. <https://doi.org/10.1177/0021998315586078>
- Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC).

- Construction and Building Materials*, 78, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.071>
- Qiu, J., & Yang, E. H. (2017). Micromechanics-based investigation of fatigue deterioration of engineered cementitious composite (ECC). *Cement and Concrete Research*, 95, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.029>
- Şahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M. A., & Li, V. C. (2009). Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Research*, 39(10), 893–901. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.006>
- Sahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M. A., Ranade, R., & Li, V. C. (2009). Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106(3), 308–316. <https://doi.org/10.14359/56556>
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033–1043. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.009>
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2010). Engineered Cementitious Composites. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2164(1), 1–8. <https://doi.org/10.3141/2164-01>
- Şahmaran, M., Özbay, E., Yücel, H. E., Lachemi, M., & Li, V. C. (2012). Frost resistance and microstructure of Engineered Cementitious Composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.10.002>
- Sasmal, S., & Avinash, G. (2016). Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers. *Construction and Building Materials*, 128, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.025>
- Singh, G., & Siddique, R. (2012). Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.041>
- Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013). Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 43, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.021>
- Thaishnavi, A., Suryaprakash, S., Krishnaraja, A. R., & Ash, F. (2016). *Experimental Studies on Properties of Engineered Cementitious Composites*. 2(21), 217–222.
- Tian, H., & Zhang, Y. X. (2016). The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 111, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.103>
- Tian, H., & Zhang, Y. X. (2017). Ageing effect on tensile and shrinkage behaviour of new green hybrid fibre-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 75, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.11.005>
- Tian, H., Zhang, Y. X., Ye, L., & Yang, C. (2015). Mechanical behaviours of green hybrid fibre-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 95, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.143>
- Wang, S., & Li, V. C. (2006). High-early-strength engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 103(2), 97–105. <https://doi.org/10.14359/15260>
- Wang, S., & Li, V. C. (2007). Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal*, 104(3), 233–241. <https://doi.org/10.14359/18668>
- Yu, K., Wang, Y., Yu, J., & Xu, S. (2017). A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8%. *Construction and Building Materials*, 137, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.060>
- Zhang, J., Leung, C. K. Y., & Cheung, Y. N. (2006). Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam. *Composites Science and Technology*, 66(11–12), 1501–1512. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.024>
- Zhang, J., Li, V. C., Nowak, A. S., & Wang, S. (2002). Introducing ductile strip for durability enhancement of concrete slabs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 253–261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(253\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(253))
- Zhou, J., Quian, S., Van Breugel, K., & Ye, G. (2010). Engineered cementitious composites with low volume of cementitious materials. *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications*, Neville 1995, 1–6. <http://www.framcos.org/FraMCoS-7/13-03.pdf>
- Zhou, Jian. (2011). *Performance of Engineered Cementitious Composites for Concrete Repairs*.