

Kompatibilitas Susut Antara Material Perbaikan dan Beton

SA Kristiawan

Jurusan Teknik Sipil-Universitas Sebelas Maret, Jalan Ir. Sutami 36 A Surakarta Jawa Tengah 57126

E-mail: sa_kristiawan@sipil.uns.ac.id

Abstrak

Pengelupasan selimut beton (delaminasi dan rontok) merupakan fenomena kerusakan yang biasa dijumpai pada struktur beton yang mengalami korosi pada tulangnya. Perbaikan terhadap kerusakan jenis ini dapat dilakukan melalui metode penambalan dengan menggunakan material perbaikan yang sesuai. Material perbaikan yang diaplikasikan untuk penambalan harus memenuhi persyaratan kompatibilitas dengan beton yang akan diperbaiki. Salah satu isu kompatibilitas yang harus menjadi perhatian adalah adanya fakta perbedaan susut antara material perbaikan dan beton induk. Makalah ini menyajikan metode untuk mengevaluasi kompatibilitas susut antara material perbaikan dan beton induk. Metode yang dikembangkan didasarkan pada kuantifikasi koefisien penyimpangan (M) riwayat susut terkekang antara material perbaikan dan beton induk yang menyebabkan timbulnya tegangan tarik. Riwayat susut terkekang merupakan fraksi perbedaan susut bebas antara material perbaikan dan beton induk. Atas dasar nilai M dan estimasi nilai susut ultimit, maka dapat diperkirakan besarnya tegangan tarik yang terjadi. Tegangan tarik ini dibandingkan dengan kapasitas tarik material perbaikan untuk menentukan kompatibel tidaknya material perbaikan sebagai bahan penambal kerusakan beton induk. Dalam aplikasinya untuk mengevaluasi kompatibilitas susut, metode ini memerlukan data pengujian susut pada benda uji non-komposit serta data pengujian total deformasi pada benda uji komposit. Hasil evaluasi kompatibilitas susut antara material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini dengan beton induk menyimpulkan bahwa seluruh material perbaikan masih kompatibel.

Kata-kata Kunci: Koefisien penyimpangan, kompatibilitas, material perbaikan, susut, tegangan tarik.

Abstract

Delamination and spalling of concrete cover are common phenomena observed in structural concrete with severe reinforcement corrosion. Repair of this damaged concrete may be carried out by patching method using appropriate repair material. The material for patching application should be compatible with the concrete being repaired. One of the compatibility issues being concerned is the fact that differential shrinkage exists between repair material and parent concrete. This paper presents a method to evaluate shrinkage compatibility between repair material and parent concrete. The development of the method was based on quantification of error coefficient (M) of restrained shrinkage history occurred in repair material-concrete composite which induced tensile stress. Restrained shrinkage history is a fraction of differential free-shrinkage between repair material and parent concrete. Using value of M and estimated ultimate shrinkage, the magnitude of induced tensile stress can be estimated. The magnitude of induced tensile stress may be compared with the tensile capacity of repair material to determine if the material is compatible or not for patching damaged parent concrete. In the application of this method, data of shrinkage observed on non-composite specimens and data of total deformation observed on composite specimens are required. The method has been applied to evaluate the compatibility between repair materials investigated in this research and concrete, with the conclusion is that all repair materials are compatible.

Keywords: Coefficient of error, compatibility, repair material, shrinkage, tensile stress.

1. Pendahuluan

Banyak bangunan yang terbuat dari beton bertulang gagal mempertahankan fungsinya sebelum umur layannya tercapai. Korosi tulangan merupakan salah satu contoh yang menjadi penyebab rusaknya bangunan sehingga bangunan tidak lagi mampu berfungsi sesuai rencana. Perbaikan atau rehabilitasi

kerusakan struktur beton merupakan upaya untuk mengembalikan fungsi bangunan, sehingga diharapkan bangunan tersebut mampu mencapai umur rencananya. Kerusakan yang sering dijumpai sebagai akibat dari korosi tulangan adalah pengelupasan selimut beton. Perbaikan terhadap kerusakan jenis ini dapat dilakukan dengan metode penambalan (Jumaat et al, 2006; Sahamitmongkol et al, 2008). Penambalan bertujuan

untuk mengembalikan ukuran penampang, melindungi tulangan dari bahaya korosi berlanjut dan secara parsial dapat memulihkan kekuatan elemen.

Material yang digunakan untuk pekerjaan penambalan harus memiliki persyaratan kompatibilitas dengan beton yang akan diperbaiki (Patnaik, 2006). European Standard ENV 1504-9 (1997) telah mengatur berbagai persyaratan teknis mengenai material perbaikan ini. Persyaratan teknis material perbaikan juga termuat dalam Technical Guideline No. 03733 yang dikeluarkan oleh International Concrete Repair Institute (1996). Persyaratan tersebut dapat dirangkum mencakup kompatibilitas dalam sifat mekanik, dimensi dan durabilitas. Secara teoritis kompatibilitas mekanik, dimensi dan durabilitas dapat dicapai dengan memilih material perbaikan yang mempunyai kekuatan, sifat perubahan bentuk dan durabilitas yang serupa dengan beton induk. Namun demikian harus disadari bahwa ada faktor-faktor alami yang membuat material perbaikan berpotensi tidak kompatibel dengan beton induk. Sebagai contoh, perubahan dimensi yang diakibatkan oleh susut pada material perbaikan cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan yang terjadi pada beton induk. Hal ini tidak bisa dihindari mengingat susut merupakan perubahan dimensi yang tergantung dari umur. Pada saat material perbaikan diaplikasikan sebagai bahan penambal kerusakan beton, maka material baru tersebut akan mengalami susut dengan laju yang tinggi, sementara beton induknya yang sudah berumur tua hampir tidak lagi mengalami susut. Perbedaan susut yang terjadi pada dua material yang dipadukan ini dapat menimbulkan beberapa persoalan antara lain timbulnya retak ataupun terjadinya delaminasi dimana material perbaikan akan terlepas dari beton induk (Baluch *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2009; Turcry *et al.*, 2006).

Pemilihan material perbaikan yang diharapkan dapat kompatibel secara dimensi dengan beton induk menjadi isu penting. Dalam hal perubahan dimensi yang diakibatkan oleh susut, petunjuk yang dapat dijadikan pedoman dalam memilih material perbaikan antara lain dengan membatasi nilai susut yang diijinkan. Dasar dari pembatasan ini bertumpu pada anggapan bahwa material perbaikan dengan sifat susut yang rendah seharusnya tidak akan menimbulkan persoalan kompatibilitas dimensi. ASTM C928-00 (2000) mengisyaratkan perubahan panjang maksimum sampai umur 28 hari sebesar 0.15% (atau 1500 microstrain). Batasan perubahan panjang maksimum ini berlaku baik untuk kasus susut akibat berada dalam lingkungan yang kering maupun untuk kasus ekspansi akibat berada pada lingkungan air. Ferraro (2008) juga menggunakan batasan yang serupa dengan ASTM C928-00. Sementara ASTM C1600-07 (2007) memberi batasan perubahan panjang maksimum dalam rentang 0.06%-0.12% (atau 600-1200 microstrain) untuk material

perbaikan yang menggunakan semen jenis *rapid hardening*. Dokumen lain (McDonald *et al.*, 2000) menyebutkan susut kering maksimum pada umur 28 hari sebesar 400 microstrain dan setelah satu tahun tidak boleh melebihi 1000 microstrain.

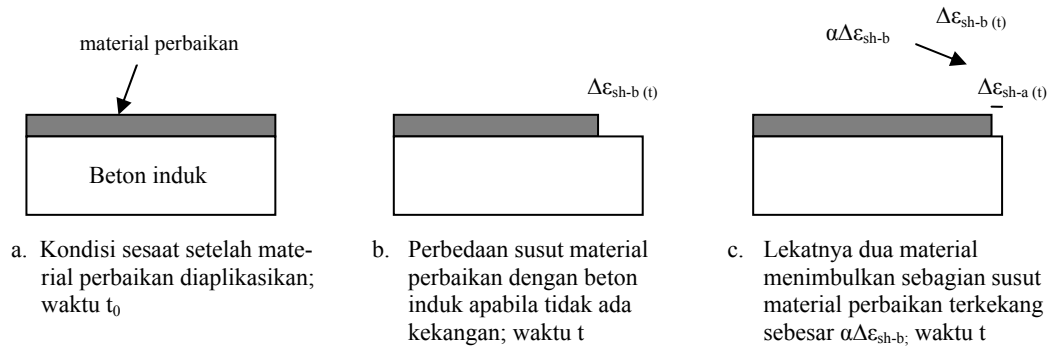
Pembatasan nilai susut material perbaikan tidak selalu menghasilkan kinerja di lapangan yang sesuai dengan harapan. Investigasi yang dilakukan oleh McDonald *et al.* (2000) menunjukkan bahwa secara umum tidak ada korelasi nyata antara pembatasan nilai susut dengan kinerja material di lapangan. Hal ini terjadi karena tidak ada landasan yang dapat dijadikan acuan dalam menghubungkan antara nilai susut dengan kinerja material perbaikan di lapangan, yang berarti dibutuhkan pendekatan lain .

Makalah ini menyajikan metode evaluasi kompatibilitas susut antara material perbaikan dengan beton induk. Kompatibilitas dievaluasi hanya dengan menggunakan data susut bebas yang diperoleh dari pengujian pada benda uji non-komposit serta data total deformasi yang diperoleh dari pengujian pada benda uji komposit. Berdasarkan data-data tersebut dapat dihitung riwayat susut terkekang yang terjadi saat material perbaikan disatukan dengan beton induk. Berdasarkan riwayat susut terkekang ini, maka dapat dikuantifikasi nilai koefisien penyimpangan M . Nilai M bersama dengan estimasi nilai susut ultimit material perbaikan dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya tegangan tarik yang timbul pada material perbaikan. Nilai tegangan tarik ini dibandingkan dengan kapasitas tarik dari material perbaikan sehingga dapat ditentukan retak tidaknya material. Apabila material diindikasikan retak, berarti material tersebut dianggap tidak kompatibel dan sebaliknya.

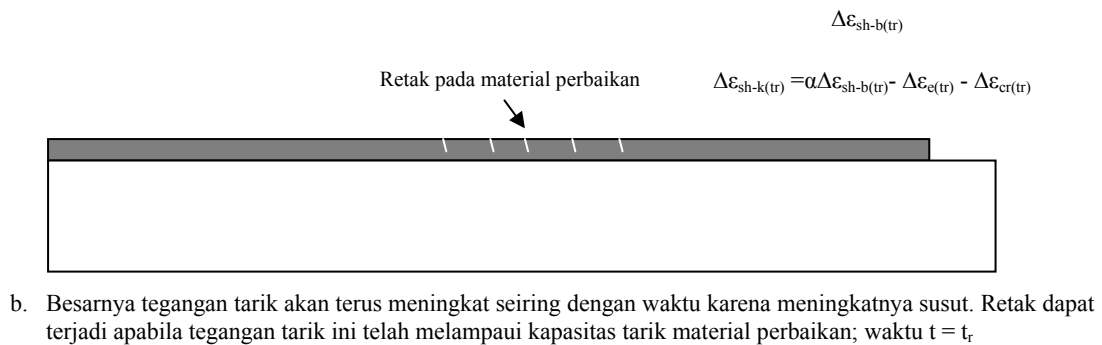
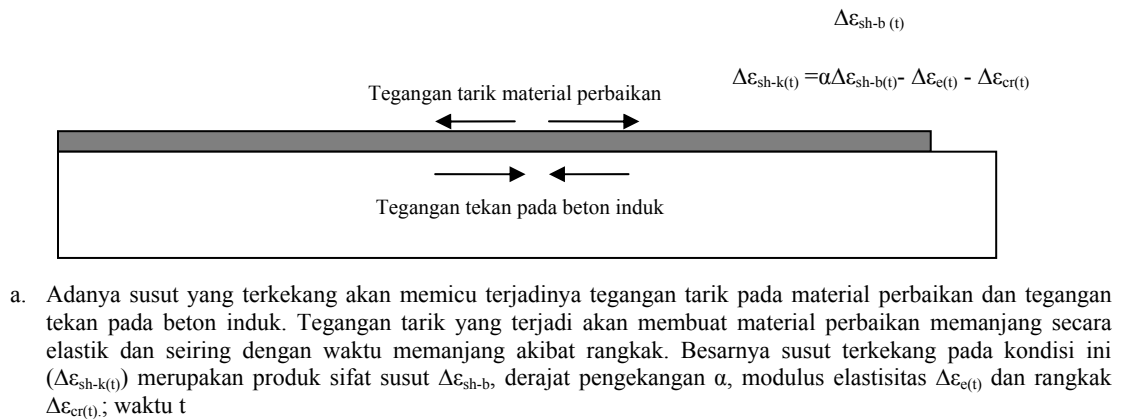
2. Pendekatan dalam Penentuan Kriteria Kinerja Susut Material Perbaikan

2.1 Faktor yang mempengaruhi retak pada kasus susut terkekang

Kelemahan parameter besaran susut maksimum sebagai indikator dalam memprediksi kinerja material perbaikan di lapangan dapat ditelusuri secara teoritis dari mekanisme terjadinya retak pada material perbaikan akibat perbedaan susut dengan beton induknya. Kristiawan (2003) telah mengidentifikasi bahwa retak tidaknya material perbaikan akibat perbedaan susut dengan beton induk tidak hanya tergantung dari besarnya susut pada material perbaikan, tetapi juga tergantung dari faktor lain seperti modulus elastisitas, rangkai, derajat pengekanan dan kapasitas tarik material perbaikan. Hal tersebut diilustrasikan pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**.



Gambar 1. Pengekangan susut pada material perbaikan



Gambar 2. Tegangan dan regangan-regangan yang terkait dengan peristiwa susut terkekang

Material perbaikan setelah diaplikasikan sebagai penambal kerusakan beton akan menyusut dengan laju yang relatif lebih cepat dibandingkan beton induknya. Perbedaan laju susut ini menyebabkan terjadinya perbedaan besaran susut antara material perbaikan $\epsilon_{sh-r(t)}$ dengan beton induk $\epsilon_{sh-c(t)}$. Jadi perbedaan susut tersebut sebesar $\Delta\epsilon_{sh-b(t)} = \epsilon_{sh-r(t)} - \epsilon_{sh-c(t)}$. Perbedaan besaran susut ini tidak akan menimbulkan persoalan apabila susut yang terjadi pada kedua material tidak terhalang atau dengan kata lain masing-masing bisa bebas bergerak. Namun, karena kedua material telah menyatu maka terjadi pengekangan sedemikian rupa sehingga susut yang terpantau saat waktu t pada material perbaikan tersisa $\Delta\epsilon_{sh-a(t)}$, sedangkan besarnya susut yang terkekang adalah $\alpha\Delta\epsilon_{sh-b(t)} = \Delta\epsilon_{sh-b(t)} - \Delta\epsilon_{sh-a(t)}$

(Gambar 1). Susut yang terkekang ini akan memicu timbulnya tegangan tarik pada material perbaikan dan tegangan tekan pada beton induk. Besarnya tegangan tarik ini setara dengan tegangan yang dibutuhkan untuk memanjangkan material perbaikan dari posisi Gambar 1.b ke 1.c. Pada saat tegangan tarik mulai timbul, maka tegangan tersebut sekaligus juga membuat material perbaikan bertambah panjang secara elastik dan seiring dengan waktu akan memanjang pula karena efek rangkak. Dalam hal ini perubahan panjang akibat sifat modulus elastisitas ($\Delta\epsilon_{e(t)}$) dan rangkak ($\Delta\epsilon_{cr(t)}$) akan menurunkan tegangan tarik. Dengan demikian maka besarnya tegangan tarik yang terjadi pada material perbaikan merupakan kombinasi dari efek susut terkekang dikurangi dengan tegangan akibat efek modulus elastisitas dan rangkak

(Gambar 2.a). Tegangan tarik ini akan terus meningkat seiring dengan waktu dengan laju yang menurun seiring dengan menurunnya laju susut pada material perbaikan. Apabila tegangan tarik ini mencapai kapasitas tarik dari material perbaikan maka akan menyebabkan retak. Waktu terjadinya retak didefinisikan sebagai $t = t_r$ (Gambar 2.b). Tegangan tarik ini akan terus meningkat seiring dengan waktu dengan laju yang menurun seiring dengan menurunnya laju susut pada material perbaikan. Apabila tegangan tarik ini mencapai kapasitas tarik dari material perbaikan maka akan menyebabkan retak. Waktu terjadinya retak didefinisikan sebagai $t = t_r$ (Gambar 2.b).

2.2 Prediksi tegangan tarik pada kasus susut terkekang

Hubungan tegangan dan regangan-regangan yang terjadi pada peristiwa susut terkekang tidaklah mudah untuk diformulasikan. Hal ini karena tegangan dan regangan-regangan tersebut saling mempengaruhi serta banyaknya parameter yang tidak secara langsung dapat diukur nilainya. Kesulitan-kesulitan tersebut dapat disebutkan sebagai berikut:

- Derajat pengekangan bukanlah suatu parameter yang bisa diukur secara langsung padahal derajat pengekangan ini akan menentukan seberapa besar susut terkekang yang akan memicu timbulnya tegangan tarik.
- Besarnya regangan elastik dan rangkai tergantung dari besarnya tegangan tarik; sebaliknya besarnya regangan elastik dan rangkai ini akan menentukan level tegangan tarik yang timbul.
- Modulus elastisitas dan rangkai yang terlibat dalam fenomena susut terkekang merupakan modulus elastisitas dan rangkai tarik, sementara tidak ada standar dalam penentuan modulus elastisitas tarik dan rangkai tarik. Banyak peneliti yang menggunakan modulus elastisitas tekan dan rangkai tekan dalam menyusun formulasi prediksi tegangan tarik akibat susut terkekang. Hal ini berarti mengasumsikan besarnya modulus elastisitas dan rangkai tarik setara dengan tekan.
- Kompleksitas persoalan formulasi prediksi tegangan tarik akibat susut terkekang bertambah karena faktor waktu juga menyebabkan berubahnya sifat-sifat bahan pada material perbaikan yang berbasis semen termasuk kekekatannya dengan beton induk yang selanjutnya mempengaruhi pengekangan. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa sejak material perbaikan diaplikasikan sebagai bahan penambal beton, proses hidrasi dari komponen semennya masih berlangsung dan baru mencapai hidrasi penuh setelah beberapa waktu kemudian.

Usaha telah dilakukan oleh beberapa peneliti untuk merumuskan hubungan tegangan dan regangan pada

kasus susut terkekang antara lain Baluch et al (2002) mengekspresikan tegangan tarik (σ) pada material perbaikan sebagai fungsi susut bebas (ϵ_{sh}), koefisien rangkai (ϕ) dan modulus elastisitas (E) dalam bentuk:

$$\sigma = \frac{E \epsilon_{sh}}{1 + E \phi} \quad (1)$$

dimana rangkai spesifik didefinisikan sebagai rangkai per regangan elastis. Dalam formulasi tersebut Baluch et al (2002) menyatakan nilai rangkai spesifik dapat diasumsikan setara rangkai tekan spesifik. Juga diindikasikan dari **Persamaan (1)** bahwa besarnya susut bebas seluruhnya terkekang sempurna sehingga besaran susut bebas ini digunakan dalam menghitung besarnya tegangan tarik.

Sementara itu Silfwerbrand (1997) mengembangkan metode perhitungan tegangan susut terkekang pada kasus *overlay*. Kasus susut terkekang pada *overlay* merupakan fenomena yang serupa dengan kasus penambalan (*patching*) dimana tegangan tarik yang timbul pada *overlay* dipicu oleh adanya perbedaan susut dan pengekangan serta melibatkan faktor rangkai dan modulus elastisitas. Perbedaan yang utama antara kasus *overlay* dengan *patching* hanyalah pada dimensi tetapi masalah dimensi ini dapat diselesaikan karena dalam Silfwerbrand's formula telah dikembangkan faktor untuk memperhitungkan dimensi ini. Dengan demikian metode yang dikembangkan oleh Silfwerbrand (1997) juga dapat diaplikasikan untuk menghitung tegangan tarik pada material perbaikan sebagai berikut:

$$\sigma = \mu \frac{E \epsilon_{sh}}{1 + \phi} \quad (2)$$

dimana μ menyatakan efek pengekangan, ϵ_{sh} dan ϕ masing-masing menyatakan susut bebas dan koefisien rangkai serta E adalah modulus elastisitas material perbaikan. Rangkai spesifik yang digunakan dalam **Persamaan (2)** juga diasumsikan setara dengan koefisien rangkai tekan. Nilai modulus elastisitas material perbaikan E dianggap tidak berubah. Sementara itu dalam penentuan besarnya efek pengekangan μ diasumsikan bahwa antara material perbaikan dan beton induk adalah dalam kondisi terkekang sempurna dan kemudian nilainya dimodifikasi untuk memperhitungkan faktor rasio modulus elastisitas serta rasio ketebalan (dimensi) antara kedua material. **Persamaan (2)** dimodifikasi lebih lanjut oleh Kristiawan et al (2009) untuk memperhitungkan modulus elastisitas dan rangkai yang diperoleh dari pengujian tarik serta dengan memasukkan pengaruh tipe pengekangan sebagai berikut:

$$\sigma = \tau \mu \frac{E \epsilon_{sh}}{1 + \phi} \quad (3)$$

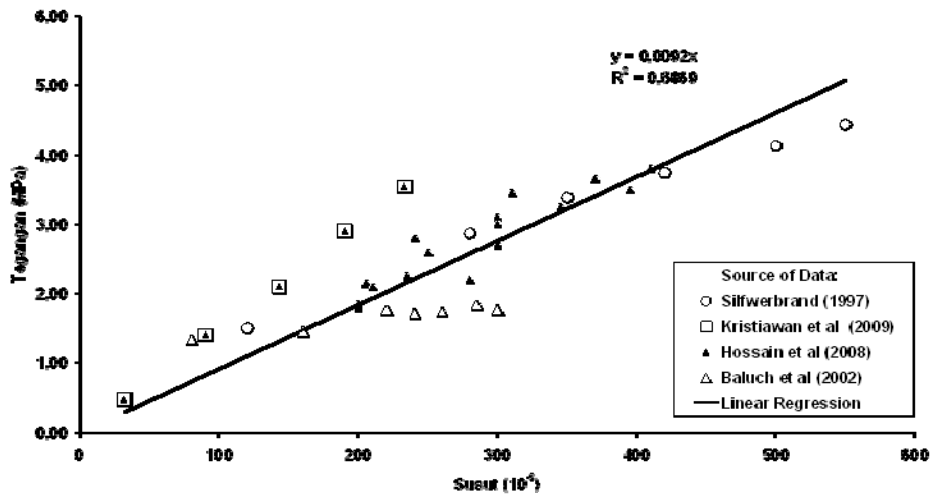
dimana nilai τ adalah 2.35 dan 1.80, masing-masing untuk tipe pengekangan penuh dan parsial. Tipe pengekangan penuh tidak sama artinya dengan pengekangan sempurna, tetapi mengindikasikan bahwa sekalipun antara material perbaikan dan beton induk diberi perlakuan tertentu untuk menghasilkan kelekatan yang sempurna tetapi pada kenyataannya tetap akan ada pergeseran antara material perbaikan dan beton induk. Sementara, tipe pengekangan parsial menunjukkan tidak adanya perlakuan khusus dalam rangka meningkatkan kelekatan antara kedua material.

2.3 Transformasi formulasi prediksi tegangan tarik pada kasus susut terkekang

Masih banyak lagi formulasi hubungan tegangan dan regangan yang diusulkan oleh peneliti lain yang pada dasarnya semua berusaha mengembangkan prediksi tegangan dengan memasukkan semua parameter-parameter yang terlibat dalam fenomena susut terkekang. Hal ini berarti kriteria yang harus digunakan untuk mengevaluasi kinerja material perbaikan tidak bisa hanya bertumpu pada nilai susut. Namun demikian persamaan-persamaan tersebut dapat ditransformasi menjadi persamaan semi-empiris dimana persamaan semi-empiris ini mengestimasi besarnya tegangan sebagai fungsi susut. Fungsi ini diturunkan dari perhitungan tegangan dengan menggunakan persamaan-persamaan seperti (1)-(3) maupun yang lainnya dengan sumber data dari referensi yang sesuai (Silfwerbrand, 1997; Baluch et al., 2002; Hossain et al., 2008 dan Kristiawan et al., 2009). Persamaan semi-empiris diperoleh dengan cara melakukan regresi linier hubungan tegangan dan susut (**Gambar 3**). Jadi nilai tegangan akibat susut terkekang pada suatu material perbaikan dapat diprediksi tanpa memerlukan masukan parameter derajat pengekangan, rangkai dan modulus elastisitas dengan formulasi:

$$\sigma = 0,0092\varepsilon_{sh} \tag{4}$$

dimana tegangan σ dalam satuan MPa dan susut ε_{sh}

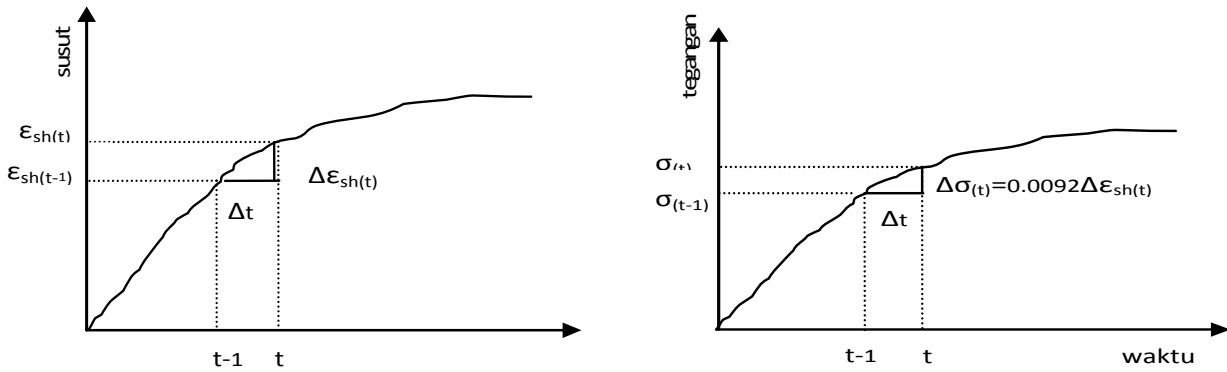


Gambar 3. Hubungan antara nilai susut dan tegangan yang ditimbulkannya pada kondisi terkekang

dalam microstrain (10^{-6}).

Sekalipun parameter-parameter derajat pengekangan, rangkai dan modulus elastisitas tidak dijadikan sebagai masukan, tetapi nilai-nilainya sebenarnya sudah terkandung dalam fungsi pada persamaan semi-empiris tersebut. Hal ini dikarenakan pada saat menghitung besarnya tegangan yang akan diplot di sumbu y, tetap menggunakan masukan parameter-parameter besarnya susut, derajat pengekangan, modulus elastisitas dan rangkai.

Selanjutnya **Persamaan (4)** ini dapat digunakan untuk menentukan batas kriteria kinerja material perbaikan berdasarkan nilai susutnya. Artinya apabila material perbaikan memiliki nilai susut tertentu maka dapat diprediksikan tegangan yang akan terjadi. Nilai tegangan ini dapat dibandingkan dengan kapasitas tegangan tarik yang dimiliki material perbaikan untuk menilai retak tidaknya material tersebut. **Persamaan (4)** akan menghasilkan prediksi tegangan yang lebih teliti apabila diaplikasikan pada susut dengan selang waktu yang lebih kecil dan nilai tegangan merupakan kumulatif dari nilai-nilai tegangan yang dihitung pada selang waktu sebelumnya seperti diilustrasikan pada **Gambar 4**. Pendekatan perhitungan dengan cara ini juga berarti memperhitungkan riwayat perbedaan susut antara material perbaikan dengan beton induk. Dalam aplikasinya untuk memprediksi tegangan dengan **Persamaan (4)**, harus diingat bahwa persamaan ini diturunkan dari perhitungan yang mengasumsikan bahwa susut yang terjadi pada material perbaikan dalam kondisi terkekang seluruhnya. Dengan kata lain diasumsikan bahwa susut yang terjadi pada beton induk diabaikan sehingga perbedaan susut antara material perbaikan dengan beton induk setara dengan susut material perbaikan itu sendiri. Apabila kasus yang ditinjau masih memperhitungkan susut pada beton induk, maka nilai susut yang digunakan dalam memprediksi tegangan pada **Persamaan (4)** adalah nilai perbedaan susut antara material perbaikan dengan beton induk atau $\Delta\varepsilon_{sh-b(t)}$.



(a) Perubahan susut setiap selang waktu

(b) Perubahan tegangan setiap selang waktu

Gambar 4. Perubahan nilai susut $\Delta \epsilon_{sh(t)}$ setiap selang waktu Δt menyebabkan perubahan tegangan sebesar $\Delta \sigma(t)$ dan besarnya tegangan pada waktu t $\sigma(t)$ merupakan kumulatif dari besarnya perubahan tegangan dalam setiap selang waktu Δt yang terjadi selama kurun waktu dari 0 sampai t

2.4 Korelasi antara koefisien penyimpangan M dengan tegangan tarik

Riwayat perbedaan susut material perbaikan dengan beton induk, yang merupakan pemicu timbulnya tegangan tarik pada material perbaikan, dapat dikuantifikasi sebagai koefisien penyimpangan M dengan persamaan berikut:

$$M = \frac{1}{\epsilon_{sh-r(t)}} \sum_{l=0}^{t=t} \left[\frac{(\epsilon_{sh-r(t)} - \epsilon_{sh-c(t)})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (5)$$

dimana:

- $\epsilon_{sh-r(t)}$ = susut material perbaikan
- $\epsilon_{sh-c(t)}$ = susut beton
- $\epsilon_{sh-rl(t)}$ = rerata nilai susut perbaikan dari waktu 0 hingga t
- n = jumlah data susut
- t = waktu pengukuran susut

Persamaan (5) ini pada mulanya dikembangkan sebagai alat untuk mengevaluasi besarnya penyimpangan antara nilai susut prediksi dengan nilai susut hasil eksperimen (Neville et al., 1983). Besar kecilnya penyimpangan menunjukkan seberapa dekat nilai yang terjadi antara susut prediksi dengan hasil eksperimen. **Persamaan (5)** ini secara umum mengkuantifikasi perbedaan susut dengan memperhatikan riwayat perbedaan yang terjadi sejak saat susut dimulai (t_0) hingga batas waktu tinjauan t . Hal yang sama juga diterapkan dalam mengevaluasi perbedaan susut antara material perbaikan dengan beton induk. Perbedaan susut selama kurun waktu t , tidak semata-mata dihitung dari besarnya susut material perbaikan dengan susut beton induk saat t itu saja ($\Delta \epsilon_{sh-b(t)} = \epsilon_{sh-r(t)} - \epsilon_{sh-c(t)}$), tetapi dikuantifikasi dengan memperhatikan riwayat perbedaan susut pada waktu sebelumnya sehingga penyimpangan M yang terjadi merupakan evaluasi perbedaan dari saat material perbaikan dilekatkan t_0 sampai batas waktu tinjauan t

yang diinginkan. Batas waktu tinjauan yang digunakan untuk evaluasi kompatibilitas material perbaikan dengan beton induk adalah waktu terjadinya retak t_r pada material perbaikan. Ini berarti koefisien penyimpangan M mengkuantifikasi riwayat perbedaan susut dari saat material perbaikan dilekatkan hingga material tersebut mengalami retak. Sementara itu selama kurun waktu t_0 sampai dengan t_r , perbedaan susut yang terjadi telah memicu timbulnya tegangan tarik yang terus meningkat seiring dengan waktu sampai akhirnya menyebabkan material perbaikan mengalami retak pada waktu t_r . Dengan demikian dapat dibuat hubungan antara nilai tegangan tarik yang mengakibatkan material perbaikan retak dengan koefisien penyimpangan M dari saat t_0 sampai t_r . Dari korelasi tersebut maka dapat diperoleh kriteria perbedaan susut (batasan nilai koefisien M) yang dapat digunakan sebagai evaluasi kinerja material perbaikan.

Korelasi antara nilai M dengan tegangan tarik yang timbul akibat perbedaan susut antara material perbaikan dan beton induk dapat diperoleh melalui studi parametrik. **Tabel 1** memperlihatkan contoh simulasi perhitungan nilai M dan tegangan tarik suatu material perbaikan yang memiliki perbedaan susut dengan beton induknya. Nilai susut material perbaikan $\epsilon_{sh-r(t)}$ diperoleh dari formulasi ACI 209R-92 dengan mengambil susut ultimit sebesar 1000 microstrain. Sedangkan nilai susut beton induk $\epsilon_{sh-c(t)}$ juga diperoleh dari formulasi yang sama hanya saja besaran nilai susutnya merupakan pertambahan susut setelah 365 hari, sebagai representasi bahwa material perbaikan dilekatkan pada beton induk pada saat beton induk tersebut sudah cukup tua. Seperti yang terlihat pada **Tabel 1**, laju susut beton induk sangat rendah apabila ditinjau setelah 365 hari. Pengekangan yang terjadi dianggap sempurna sehingga perbedaan susut yang terjadi merupakan representasi besarnya susut yang terkekang dan menimbulkan tegangan tarik. Perbedaan susut yang terjadi antara material perbaikan dan beton induk selama 26 hari

menghasilkan nilai koefisien penyimpangan M setara dengan 5,04 dan tegangan tarik σ sebesar 3,79 MPa. Dengan melakukan simulasi perhitungan untuk berbagai lama waktu susut serta variasi nilai susut ultimit, akan diperoleh korelasi antara nilai M dengan σ seperti dipresentasikan pada **Gambar 5**. Variasi nilai susut ultimit (600-1200) mewakili berbagai kecenderungan susut material perbaikan dari yang secara relatif rendah hingga tinggi.

Material dikatakan kompatibel dengan beton induk apabila saat keduanya disatukan tidak akan berakibat pada retaknya material perbaikan yang dipicu oleh perbedaan susut antara keduanya. Retak terjadi manakala tegangan tarik yang timbul pada material perbaikan telah mencapai nilai kapasitas tariknya. Pada umumnya kapasitas tarik material perbaikan berada pada kisaran 3-5 MPa (Silfwerbrand, 1997; Baluch et al., 2002; Hosain et al., 2008 dan Kristiawan et al., 2009). Berdasarkan pada kisaran tersebut dan memperhatikan **Gambar 5**, maka potensi retak material perbaikan dapat dievaluasi dengan menarik garis horizontal pada sumbu y pada skala 3-5 MPa sampai memotong grafik yang sesuai (tergantung pada nilai ultimit susut material perbaikan) dan kemudian pada perpotongan grafik tersebut ditarik garis vertikal hingga memotong sumbu x . Perpotongan sumbu x ini menyatakan nilai koefisien penyimpangan M yang akan membuat material perbaikan mengalami retak. Berdasarkan **Gambar 5** dapat disimpulkan bahwa nilai M pada saat material perbaikan retak berada pada kisaran 3,75-6,62.

2.5 Pengukuran perbedaan susut di laboratorium

Pendekatan dalam mengevaluasi kompatibilitas susut antara material perbaikan dan beton induk telah dapat ditentukan sebagaimana tersebut di atas, maka selanjutnya dibutuhkan cara pengujian yang dapat mengukur besarnya perbedaan susut pada kondisi terkekang. Mengingat pengekangan terjadi karena menyatunya material perbaikan dengan beton induk, maka dalam penelitian ini benda uji yang digunakan dalam pengukuran perbedaan susut pada kondisi terkekang dibuat dalam bentuk benda uji komposit. Penggunaan benda uji komposit ini dapat merepresentasikan kondisi lapangan, dimana susut yang terjadi pada material perbaikan mengalami pengekangan oleh beton induk. Artinya derajat pengekangan tidak diasumsikan sempurna tetapi didekati dari pengamatan perbedaan susut yang terjadi pada material perbaikan dan beton induk saat keduanya bersatu sebagai sistem komposit. Walaupun demikian derajat pengekangan ini hanya dapat diidentifikasi apabila dilakukan juga pengukuran susut bebas yang diperoleh dari benda uji non-komposit. Selisih antara perbedaan susut material perbaikan dan beton induk dari pengamatan benda uji non-komposit dengan komposit akan menunjukkan seberapa besar pengekangan susut yang terjadi.

Penggunaan benda uji komposit tetaplah mengandung kelemahan yaitu tidaklah mungkin untuk membuat beton induk sampai umur tahunan baru kemudian dilapisi dengan material perbaikan sehingga terbentuk benda uji komposit. Pada penelitian ini benda uji komposit dibuat setelah beton induk berumur 28 hari. Ini berarti laju susut dari beton induk masih cukup tinggi sehingga perbedaan susut yang terjadi relatif kecil dibandingkan dengan kondisi yang seharusnya. Kondisi ini akan diremidiasi dengan menggunakan data pengukuran susut bebas yang diperoleh dari pengamatan pada benda uji non-komposit. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: dari data susut bebas dapat dihitung nilai susut ultimit yang selanjutnya nilai susut ultimit ini digunakan untuk menetapkan prediksi susut jangka panjang dengan formulasi ACI 209R-92. Nilai susut jangka panjang (setelah 365 hari) beton induk inilah yang nantinya dipakai dalam menentukan perbedaan susut antara material perbaikan dengan beton induk.

3. Material dan Metode

3.1 Material

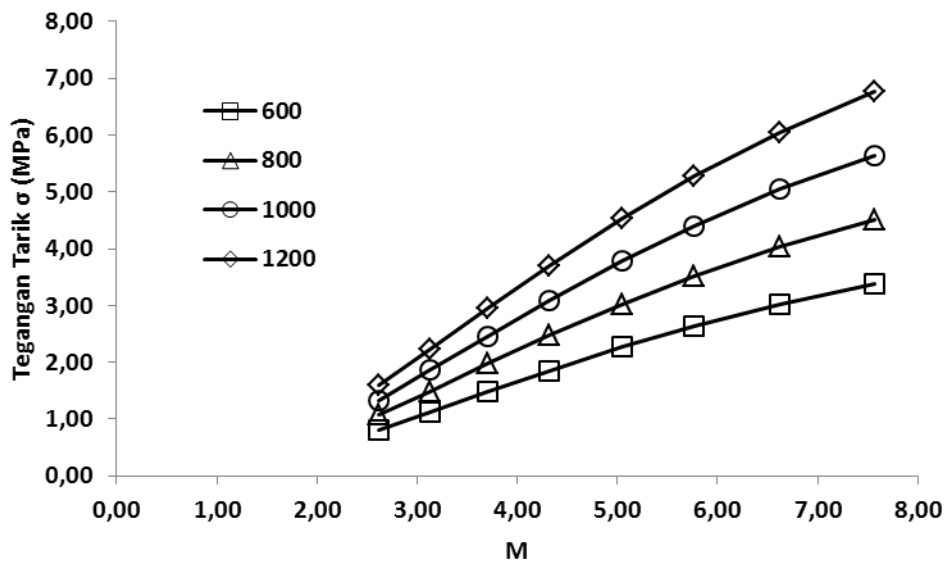
Material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari bahan dasar mortar dengan beberapa bahan tambah yang dimaksudkan untuk memodifikasi sifat material. Faktor air semen yang digunakan 0,35 sedangkan rasio semen dengan pasir sebesar 1:2. *Superlasticizer* sebesar 2% dari berat semen ditambahkan untuk menghasilkan campuran yang mudah diaduk secara manual. Sementara itu *accelerator* sebesar 5% digunakan untuk mempercepat pengerasan material perbaikan ini. Bahan lain yang juga ditambahkan adalah polymer dengan kadar antara 0-6%. Polymer ditambahkan ke dalam campuran material perbaikan untuk memodifikasi sifat fleksibilitas material. Selain material perbaikan dari bahan dasar mortar tersebut, juga dipakai material perbaikan yang disuplai dari industri. **Tabel 2** menunjukkan komposisi material perbaikan yang dihitung pada setiap 1m^3 campuran mortar (semen, pasir dan air) dan selanjutnya dari komposisi tersebut ditambahkan *superplasticizer*, *accelerator* serta polymer sesuai kebutuhan. **Tabel 2** juga menunjukkan sifat-sifat mekanik dari material perbaikan yang telah diuji sebelumnya. Sementara itu tidak diperoleh informasi mendetail mengenai komposisi dari material *prepackage* yang disuplai oleh industri (EN). Hanya saja berdasarkan brosur yang dikeluarkan oleh pihak manufaktur menyatakan bahwa EN mengandung semen, pasir, serat polymer dan bahan tambah khusus yang dimaksudkan untuk mereduksi kecenderungan retak akibat susut. Jumlah air campuran yang direkomendasikan berada pada kisaran 3,8-4,2 liter per 25 kg EN. Dalam penelitian ini air yang digunakan 4 liter per 25 kg EN. Dengan berat jenis sekitar $2,2\text{ t/m}^3$, maka dalam setiap 1m^3 EN dibutuhkan

air sebanyak 352 liter. Spesifikasi yang terkait dengan susut sendiri hanya menyatakan bahwa EN tidak akan retak setelah 180 hari berdasarkan pengujian *Coutinho Type Ring* maupun *DIN Type V-Channel*. Sementara itu bahan lain yang diperlukan dalam penelitian ini adalah beton induk sebagai representasi dari beton yang akan

diperbaiki. Komposisi beton yang digunakan dirancang untuk menghasilkan target kekuatan sekitar 30 MPa. Berdasarkan rancang campur yang telah dilakukan, maka untuk setiap 1 m³ beton dibutuhkan semen, pasir, kerikil serta air masing-masing sebesar 490 kg, 748 kg, 810 kg serta 250 kg.

Tabel 1. Perhitungan M dan σ akibat perbedaan susut material perbaikan dan beton induk

t (hari)	$\epsilon_{sh-r(t)}$ (microstrain)	$\epsilon_{sh-c(t)}$ (microstrain)	$\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$	$\{1/n(\Delta\epsilon_{sh-b(t)})^2\}^{1/2}$	$\Delta\epsilon_{sh(t)} = \Delta\epsilon_{sh-b(t)} - \Delta\epsilon_{sh-b(t-1)}$	$\Delta\sigma(t)$ (MPa)	$\sigma(t)$ (MPa)
0	0	0,0	0	0,0		0	0
1	28	0,2	28	5,4	28	0,25	0,25
2	54	0,4	54	10,5	26	0,24	0,49
3	79	0,7	78	15,4	25	0,23	0,72
4	103	0,9	102	19,9	23	0,22	0,94
5	125	1,1	124	24,3	22	0,20	1,14
6	146	1,3	145	28,4	21	0,19	1,33
7	167	1,5	165	32,4	20	0,19	1,52
8	186	1,7	184	36,2	19	0,18	1,70
9	205	1,9	203	39,7	18	0,17	1,86
10	222	2,1	220	43,2	17	0,16	2,02
11	239	2,3	237	46,4	17	0,15	2,18
12	255	2,5	253	49,6	16	0,15	2,33
13	271	2,8	268	52,6	15	0,14	2,47
14	286	3,0	283	55,5	15	0,14	2,60
15	300	3,2	297	58,2	14	0,13	2,73
16	314	3,4	310	60,9	14	0,12	2,86
17	327	3,6	323	63,4	13	0,12	2,97
18	340	3,8	336	65,9	12	0,11	3,09
19	352	4,0	348	68,2	12	0,11	3,20
20	364	4,2	359	70,5	12	0,11	3,31
21	375	4,4	371	72,7	11	0,10	3,41
22	386	4,6	381	74,8	11	0,10	3,51
23	397	4,8	392	76,8	10	0,10	3,60
24	407	5,0	402	78,8	10	0,09	3,70
25	417	5,1	412	80,7	10	0,09	3,79
$\epsilon_{sh-r(t)} =$	244		$\Sigma =$	1230,4			
			M =	5,04			



Gambar 5. Korelasi antara nilai M dan σ pada berbagai kecenderungan susut material perbaikan (nilai susut ultimit 600-1200 microstrain)

Tabel 2. Komposisi material perbaikan serta sifat mekaniknya

Identifikasi Benda Uji	Komposisi Dasar Mortar (kg/m ³)			Komposisi Bahan Tambah (kg)			f' _c (MPa)	MOR (MPa)
	Semen	Pasir	Air	Superplasticizer *	Accelerator**	Polymer*		
M-B	593	1185	207	11,86	0	0	34	4,29
MP-0%	593	1185	207	11,86	10,35	0	36	5,29
MP-2%	593	1185	207	11,86	10,35	11,86	36	5,24
MP-4%	593	1185	207	11,86	10,35	23,72	38	4,34
MP-6%	593	1185	207	11,86	10,35	35,58	30	3,88
EN			352				31	4,28

Keterangan: * dihitung dari berat semen; ** dihitung dari berat air.



Gambar 6. Pencetakan benda uji komposit

3.2 Benda uji

Benda uji yang dipakai dalam pengukuran susut berupa silinder dengan diameter 75 mm dan panjang 275 mm. Dimensi benda uji ini mengikuti Neville et al., (1983). Masing-masing komposisi material perbaikan sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2 dituang ke dalam cetakan silinder untuk dibuat 3 buah benda uji. Demikian juga dibuat 3 buah benda uji dari bahan beton. Setelah berumur 1 hari, benda uji tersebut dikeluarkan dari cetakan. Benda uji-benda uji ini diidentifikasi sebagai benda uji non-komposit. Sementara itu benda uji komposit dibuat dengan prosedur sebagai berikut: mula-mula setengah cetakan silinder diisi dengan bahan beton dan dibiarkan hingga berumur 28 hari (tanpa perawatan). Setelah itu material perbaikan dituangkan di setengah cetakan silinder sisanya (Gambar 6).

3.3 Pengukuran susut

Pada permukaan benda uji non-komposit ditempelkan 4 pasang *demec point* dengan jarak antar pasangan *demec point* ekuivalen dengan 90 derajat. Sementara itu jarak satu *demec point* dengan *demec point* pasangannya sebesar 200 mm. Jarak sebesar 200 mm ini akan digunakan sebagai acuan dalam menghitung perubahan panjang benda uji akibat susut. Pada benda uji komposit, jumlah *demec point* hanya dua pasang yang mana satu pasang terletak pada sisi material perbaikan dan satunya lagi pada sisi beton.

Perubahan panjang yang terjadi pada benda uji diukur dari perubahan jarak *demec point* dengan alat *demec gauge* yang memiliki ketelitian hingga skala micron (Gambar 7). Nilai susut diperoleh dari besarnya perubahan panjang dibagi dengan panjang jarak *demec point* mula-mula (200 mm). Susut diukur setelah benda uji berumur satu hari dan berlangsung selama 84 hari. Untuk benda uji komposit, pengukuran deformasi dimulai satu hari setelah setengah material perbaikan dicetak dan pengukuran juga berlangsung sampai 84 hari. Pengukuran susut beton (non-komposit) dilakukan pada umur 29 hari bersamaan dengan pengukuran pada benda uji komposit.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Susut pada benda uji non-komposit

Hasil pengukuran susut pada benda uji non-komposit (rata-rata dari 3 buah benda uji) diperlihatkan pada Gambar 8. Perilaku susut pada material perbaikan tergantung pada komposisi bahannya. Penggunaan polymer mempercepat laju susut pada umur awal tetapi setelah 25 hari penambahan susutnya relatif kecil bahkan cenderung tidak bertambah lagi. Peningkatan konsentrasi polymer ke dalam material perbaikan juga menambah laju dan besaran susut. Namun demikian susut ulitimit pada material perbaikan yang mengandung polymer diperkirakan setara dengan susut pada material perbaikan yang tidak mengandung polymer. Hal ini didasarkan pada fakta bahwa setelah 84 hari pengamatan, maka besarnya susut pada material perbaikan yang mengandung polymer 2%, 4% dan 6% (atau MP-2%, MP-4% dan MP-6%) masing-masing setara dengan besarnya susut pada mortar MB, material perbaikan dengan kandungan polymer 0% (MP-0%) dan material perbaikan yang disuplai oleh industri (EN).

Besarnya susut pada material perbaikan berada dalam kisaran 1,2-1,9 kali lebih tinggi daripada susut pada beton (BN). Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa susut pada BN diukur setelah beton tersebut berumur 29 hari sehingga selama waktu tersebut BN telah mengalami pengeringan. Dengan demikian laju susut

yang teramati pada benda uji BN merupakan laju susut setelah 29 hari. Selain itu perbedaan susut antara material perbaikan dan beton ini juga dapat disebabkan oleh faktor jumlah komponen semen dan agregat. Sebagaimana diketahui bahan dasar material perbaikan adalah mortar dimana pasta semen merupakan komponen yang menyusut sementara agregat (pasir) bersifat *inert* dan berperan sebagai pengekang penyusutan pasta semen. Dengan volume semen lebih besar dan agregat yang lebih kecil daripada yang terdapat pada beton, maka terdapat dua faktor yang menyebabkan susut material perbaikan lebih tinggi yaitu: tingginya volume semen memicu tingginya susut sementara di lain pihak fungsi pengekangan yang diberikan oleh agregat pada mortar juga akan lebih kecil dibandingkan yang diberikan oleh agregat pada beton. Konsekuensi logisnya adalah susut yang teramati pada mortar cenderung lebih tinggi daripada beton.

Berdasarkan batasan susut maksimum yang diijinkan pada umur 28 hari menurut ASTM C928-00 (2000), maka nilai susut material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini masih memenuhi syarat (<1500 *microstrain*). Namun bila dipakai pedoman lain (McDonald et al., 2000), maka seluruh material perbaikan ini tidak memenuhi persyaratan susut pada umur 28 hari (>400 *microstrain*). Pertanyaan yang muncul bagi praktisi yang bergerak di bidang perbaikan beton adalah apakah material perbaikan ini dapat digunakan sebagai penambal kerusakan beton atau tidak. Pertanyaan ini tidak dapat dijawab secara langsung hanya dengan melihat pada besarnya susut sebagaimana sebelumnya telah disebutkan oleh McDonald et al., (2000) yang menyatakan bahwa tidak ada korelasi langsung antara pembatasan besaran susut dengan kinerjanya di lapangan. Oleh karena itu, harus dicari pendekatan lain yang dapat menghubungkan sifat susut material perbaikan dengan kinerjanya di lapangan. Pendekatan yang dimaksud telah dijelaskan sebelumnya dan lebih lanjut akan diaplikasikan untuk mengevaluasi material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada bagian 4.3.

4.2 Susut pada kondisi terkekang dari benda uji komposit

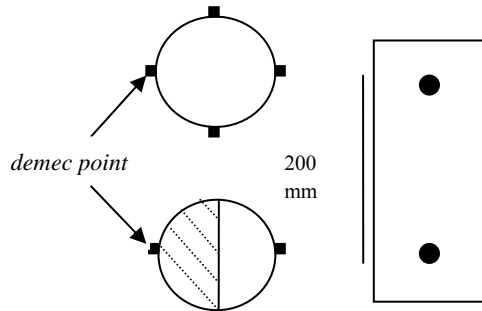
Gambar 9 dan **10** menunjukkan masing-masing total deformasi yang terukur pada bagian beton (setelah 28 hari pengeringan) dan bagian material perbaikan dari benda uji komposit sebagai akibat dari susut baik pada material perbaikan maupun beton induk. Di sini regangan yang terjadi pada benda uji komposit akibat susut diistilahkan sebagai total deformasi karena besarnya regangan tersebut tidak semata-mata berasal dari susut tetapi merupakan produk dari efek susut yang terkekang sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Menyimak lebih lanjut pada **Gambar 9** maka dapat disimpulkan bahwa total deformasi pada bagian beton dari benda uji komposit dipengaruhi oleh

jenis material perbaikan yang digunakan sebagai pembentuk komposit tersebut. Besaran deformasinya juga berbeda dibandingkan dengan susut beton hasil pengukuran dari benda uji non-komposit (**Gambar 8**). Besarnya total deformasi pada bagian beton benda uji komposit cenderung meningkat seiring dengan semakin tingginya sifat susut material perbaikan. Hal yang sebaliknya terjadi pada material perbaikan. Besaran total deformasi pada bagian material perbaikan benda uji komposit (**Gambar 10**) cenderung lebih kecil apabila dibandingkan dengan susut yang terukur pada benda uji non-komposit (**Gambar 8**). Naiknya besaran deformasi beton dan turunnya deformasi material perbaikan benda uji komposit dari nilai referensi sifat susut aslinya (yang terukur pada benda uji non-komposit) dapat dijelaskan sebagai berikut: mengingat material perbaikan memiliki sifat susut yang lebih tinggi daripada beton, maka ketika keduanya dipadukan akan menghasilkan efek pengekangan susut pada material perbaikan. Pengekangan ini menyebabkan deformasi yang terukur pada bagian material perbaikan dari benda uji komposit lebih kecil dibandingkan susut pada benda uji non-komposit yang tanpa efek pengekangan. Pengekangan selain membatasi pergerakan susut, juga berakibat pada munculnya tegangan tarik pada sisi material perbaikan dan tegangan tekan pada sisi beton. Tegangan tekan yang terjadi pada beton memberi pengaruh terhadap peningkatan deformasi yang teramati pada bagian beton. Jadi peningkatan nilai deformasi beton yang terukur pada benda uji komposit sebenarnya bukan semata-mata merupakan perubahan dimensi akibat sifat susut betonnya itu sendiri, tetapi juga sebagai akibat adanya regangan tekan sekunder sebagai hasil dari efek pengekangan.

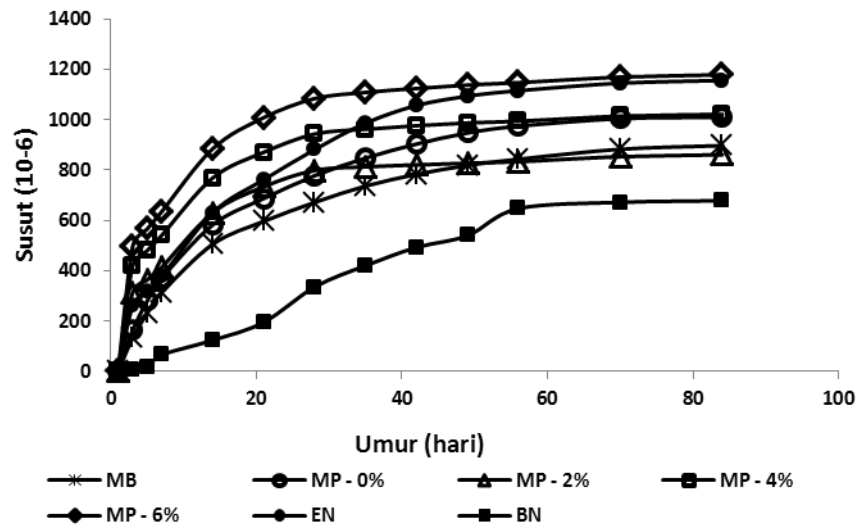
Besarnya perbedaan susut bebas antara material perbaikan dan beton induk dapat dihitung dari selisih nilai susut keduanya pada pengukuran benda uji non-komposit. Besarnya perbedaan susut bebas ini merupakan nilai susut yang secara potensial dapat terkekang dan menimbulkan tegangan tarik. Namun demikian pada saat keduanya disatukan sebagai sistim komposit, maka terdapat faktor lain yang menyebabkan nilai susut yang terkekang tidak setara dengan besaran tersebut. Faktor yang dimaksud adalah tidak sempurnanya pengekangan dan terjadinya deformasi tambahan akibat efek pengekangan sebagaimana telah dikemukakan sebelumnya. Kedua faktor ini dapat diidentifikasi dari fakta bahwa perbedaan susut antara material perbaikan dan beton induk masih terjadi saat keduanya menjadi sistim komposit. Ini berarti dalam menentukan besarnya susut terkekang ($\Delta\varepsilon_{sh-k(t)}$) yang akan diperhitungkan sebagai pemicu timbulnya tegangan tarik, maka harus dikalkulasi dari perbedaan susut bebas ($\Delta\varepsilon_{sh-b(t)}$) dikurangi dengan perbedaan susut antara material perbaikan dan beton induk yang diperoleh dari pengukuran pada benda uji komposit ($\Delta\varepsilon_{t-b(t)}$) (**Tabel 3**). Perhitungan yang serupa dengan **Tabel 3**

dapat dilakukan pada keseluruhan benda uji yang diteliti dan hasilnya dipresentasikan pada **Gambar 11**. Besarnya susut terkekang seiring dengan waktu terlihat naik sampai 21 hari setelah itu menunjukkan

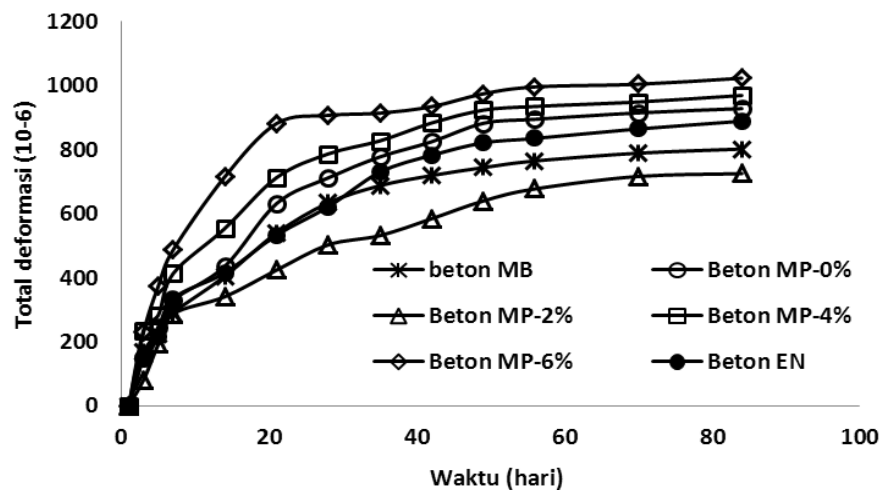
kecenderungan menurun. Hal ini disebabkan oleh laju susut material perbaikan yang relatif tinggi di awal dan kemudian menurun dengan cepat sementara susut beton induk cenderung naik dengan laju yang tidak terlalu drastis penurunannya.



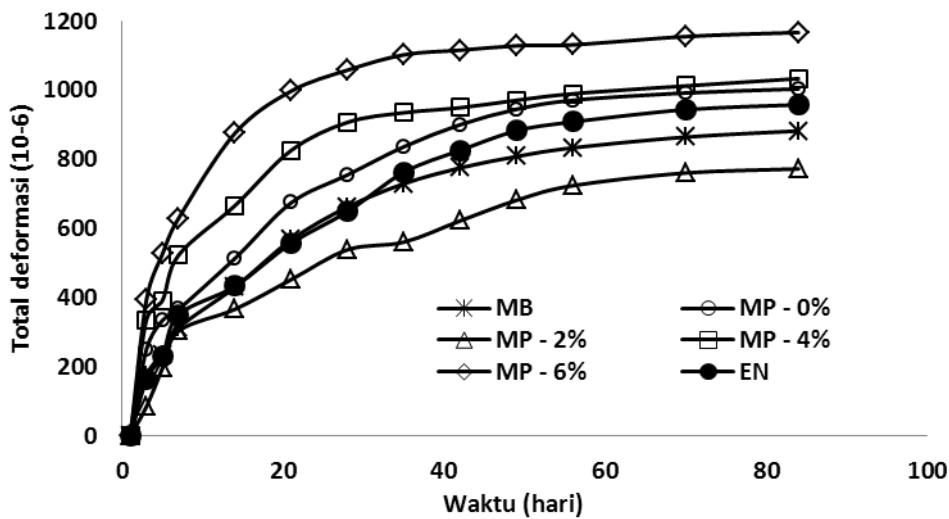
Gambar 7. Susunan *demec point* pada benda uji non-komposit dan komposit (tampak atas) serta pelaksanaan pengukuran susut pada benda uji



Gambar 8. Susut pada material perbaikan dan beton yang diperoleh dari pengamatan pada benda uji non-komposit



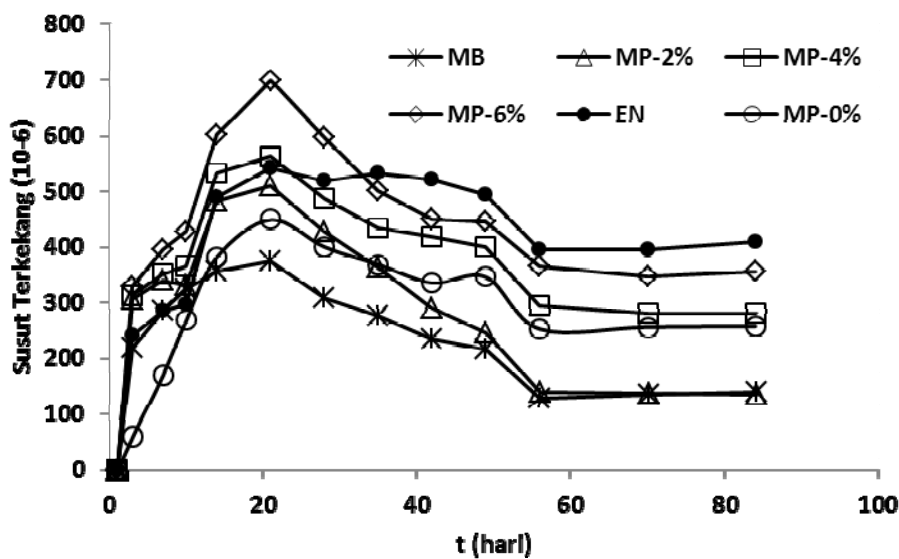
Gambar 9. Susut pada bagian beton yang diperoleh dari pengamatan pada benda uji komposit



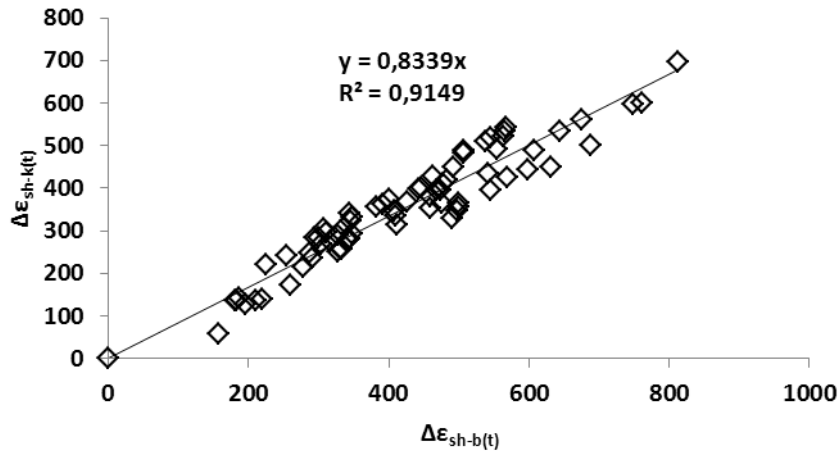
Gambar 10. Susut pada bagian material perbaikan yang diperoleh dari pengamatan pada benda uji komposit

Tabel 3. Perhitungan susut terkekang pada benda uji MB

t (hari)	Benda uji Non-komposit			Benda Uji Komposit			
	$\epsilon_{sh-r(t)}$ (10^{-6})	$\epsilon_{sh-c(t)}$ (10^{-6})	$\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$ (10^{-6})	$\epsilon_{t-r(t)}$ (10^{-6})	$\epsilon_{t-c(t)}$ (10^{-6})	$\Delta\epsilon_{t-b(t)}$ (10^{-6})	$\Delta\epsilon_{sh-k(t)}$ (10^{-6})
1	0	0	0	0	0	0	0
3	231	6	225	174	168	6	219
7	314	20	294	234	224	11	283
10	412	66	346	312	289	23	323
14	505	124	381	430	404	26	356
21	596	195	401	567	539	28	373
28	672	336	336	662	634	28	308
35	736	421	316	729	688	42	274
42	783	493	291	776	719	56	234
49	818	540	278	808	744	64	215
56	843	647	196	833	765	68	128
70	883	672	211	864	789	75	136
84	897	678	219	882	802	80	139



Gambar 11. Perkembangan susut terkekang seiring dengan waktu



Gambar 12. Korelasi antara perbedaan susut bebas dengan susut terkekang

Besarnya susut terkekang merupakan fraksi dari nilai perbedaan susut bebas. Korelasi antara keduanya ditunjukkan pada **Gambar 12**. Korelasi ini diperoleh dari memplotkan pada sumbu x dan y masing-masing nilai $\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$ dan $\Delta\epsilon_{sh-k(t)}$ dari semua benda uji dalam penelitian ini. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa besarnya susut terkekang setara dengan 84% dari nilai perbedaan susut bebas.

Harus pula dicatat di sini bahwa besarnya susut terkekang yang telah dihitung seperti tersebut di atas relatif lebih kecil dibandingkan dengan kondisi yang seharusnya. Ini dikarenakan susut terkekang tersebut diperoleh dari kondisi penyatuan material perbaikan dan beton induk sebagai sistem komposit saat beton induk berumur 28 hari. Dengan demikian beton induk masih memiliki laju susut yang tinggi yang berakibat pada lebih rendahnya nilai perbedaan susut dengan material perbaikan. Kondisi ini dapat diremiasi dengan memprediksi susut jangka panjang beton induk dengan formulasi ACI 209R-92. Dari formulasi ini dapat diestimasi perbedaan susut bebas antara material perbaikan dengan beton induk apabila penambalan dilakukan saat beton induk sudah mencapai umur 365

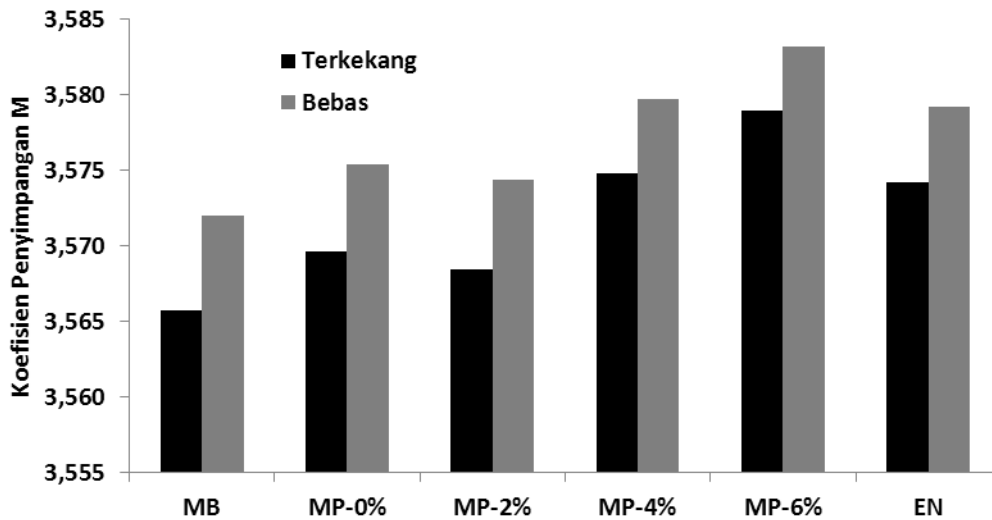
hari. Hasil simulasi perhitungan ini selanjutnya dipakai untuk menentukan susut terkekang dengan asumsi bahwa fraksi susut yang terkekang setara dengan 84% dari perbedaan susut bebas dan hasilnya dipresentasikan pada **Tabel 4**.

4.3 Koefisien penyimpangan susut sebagai alat evaluasi kompatibilitas

Riwayat perbedaan nilai susut (**Tabel 4**), yang merupakan faktor utama penyebab timbulnya masalah retak pada aplikasi material perbaikan, dapat dievaluasi dengan mengkuantifikasi koefisien penyimpangan (M) susut antara material perbaikan dengan beton induk menggunakan **Persamaan (5)**. Mengingat perbedaan susut yang menimbulkan tegangan tarik hanyalah perbedaan susut yang dkekang, maka koefisien penyimpangan M juga harus dihitung dari fraksi perbedaan susut yang terkekang ini. Hasil analisis koefisien penyimpangan M yang dimaksud ditunjukkan pada **Gambar 13**, yang sekaligus memperlihatkan koefisien penyimpangan M yang dihitung dari riwayat perbedaan nilai susut bebas.

Tabel 4. Nilai estimasi perbedaan susut bebas dan susut terkekang pada kondisi penambalan setelah umur beton induk 365 hari

t (hari)	Estimasi Perbedaan Susut Bebas $\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$						Estimasi Susut Terkekang $\Delta\epsilon_{sh-k(t)}$					
	MB	MP-0%	MP-2%	MP-4%	MP-6%	EN	MB	MP-0%	MP-2%	MP-4%	MP-6%	EN
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	231	162	313	418	496	259	194	136	263	351	416	218
7	312	278	363	478	564	317	262	234	305	402	474	267
10	410	368	412	539	633	376	345	309	346	453	532	316
14	503	580	628	766	882	628	422	487	527	643	741	528
21	593	683	730	867	1004	758	498	574	613	728	843	637
28	666	772	794	938	1079	876	560	649	667	788	906	736
35	730	841	806	956	1102	980	613	707	677	803	926	823
42	776	896	813	969	1117	1049	652	753	683	814	938	881
49	810	939	819	979	1129	1085	680	789	688	822	949	911
56	834	965	824	985	1138	1106	700	810	692	827	956	929
70	871	992	841	1002	1157	1133	732	833	707	842	972	952
84	883	996	847	1008	1165	1142	742	837	712	846	978	959



Gambar 13. Nilai koefisien penyimpangan M pada kondisi perbedaan susut bebas dan terkekang

Tabel 5. Perkiraan nilai susut ultimit

Material Perbaikan	Susut ultimit $\epsilon_{sh} \cdot 10^{-6}$	Penyimpangan Prediksi
MB	894	0,325
MP-0%	1029	0,312
MP-2%	961	0,173
MP-4%	1152	0,187
MP-6%	1330	0,199
EN	1167	0,371

Nilai M seperti ditunjukkan pada Gambar 13 ini selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi apakah material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini kompatibel atau tidak dengan beton induk. Untuk maksud ini maka digunakan Gambar 5 sehingga dapat diestimasi tegangan tarik yang akan timbul apabila material perbaikan ini diaplikasikan untuk menambal kerusakan beton. Masukan yang diperlukan untuk dapat memperkirakan nilai tegangan tarik yang timbul selain nilai M juga dibutuhkan nilai susut ultimit. Formulasi ACI 209R-92 dapat digunakan untuk mengestimasi nilai susut ultimit, hanya saja paruh waktu susut yang digunakan harus dimodifikasi untuk merepresentasikan kecenderungan susut material perbaikan yang diteliti. Dengan mencermati Gambar 8 akan terlihat bahwa paruh waktu susut terjadi sekitar umur 7 hari. Apabila nilai 7 hari ini digunakan sebagai modifikasi formulasi ACI 209R-92, maka nilai susut ultimit untuk setiap jenis material perbaikan dapat dihitung dan nilainya ditunjukkan pada Tabel 5. Pada Tabel 5 juga diberikan nilai penyimpangan antara prediksi dengan formulasi ACI 209R-92 dengan data susut material perbaikan yang diperoleh dari pengujian dalam penelitian ini. Penyimpangan berada dalam kisaran 1.7-3.7 atau 17-37% yang mana penyimpangan dalam kisaran ini masih dianggap wajar (Neville *et al.*, 1983). Selanjutnya dengan data nilai susut ultimit (Tabel 5) dan M (Gambar 13) dapat diperkirakan nilai tegangan tarik

yang timbul yakni berada pada kisaran 1.8-2.3 MPa. Tegangan ini masih di bawah nilai kapasitas tarik dari material perbaikan yang berdasarkan pengujian MOR memiliki nilai 3.88-5.29 MPa (Tabel 2). Apabila analisis dilanjutkan hingga waktu t lebih dari 84 hari, diperkirakan tegangan tarik yang terjadi masih belum akan melampaui kapasitas tarik material perbaikan. Hal ini didasari oleh kenyataan bahwa nilai susut material perbaikan cenderung tidak secara signifikan bertambah setelah 84 hari (Gambar 8). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini kompatibel dengan beton induk ditinjau dari susut.

4.4 Prosedur evaluasi kompatibilitas susut

Evaluasi kompatibilitas susut antara material perbaikan dan beton induk telah ditunjukkan hanya dengan menggunakan informasi susut tanpa harus menguji parameter-parameter yang lain. Berdasarkan pembahasan sebelumnya, maka kompatibilitas susut antara material perbaikan dan beton induk dapat dievaluasi dengan prosedur berikut:

- Tentukan nilai $\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$ dari hasil pengujian susut material perbaikan dan beton induk pada benda uji non-komposit.
- Tentukan nilai $\Delta\epsilon_{t-b(t)}$ dari hasil pengujian total defromasi material perbaikan dan beton induk pada benda uji komposit.
- Hitung besarnya susut terkekang $\Delta\epsilon_{sh-k(t)} = \Delta\epsilon_{sh-b(t)} - \Delta\epsilon_{t-b(t)}$.
- Korelasikan antara nilai $\Delta\epsilon_{sh-k(t)}$ dan $\Delta\epsilon_{sh-b(t)}$ untuk mendapatkan perkiraan fraksi pengekangan.
- Gunakan formulasi ACI 209R-92 untuk

memperkirakan nilai susut jangka panjang dari beton induk misalnya setelah 365 hari ($\epsilon_{sh-c(365+t)}$).

- f) Estimasi nilai perbedaan susut bebas apabila aplikasi material dilakukan setelah 365 hari dengan rumus $\Delta\epsilon_{sh-b(365+t)} = \epsilon_{sh-r(t)} - [\epsilon_{sh-c(365+t)} - \epsilon_{sh-c(365)}]$
- g) Gunakan korelasi d) untuk memperkirakan nilai susut terkekang apabila aplikasi material perbaikan dilakukan setelah 365 hari ($\Delta\epsilon_{sh-k(365+t)}$).
- h) Hitung nilai M dari riwayat perbedaan susut terkekang dengan **Persamaan (5)**.
- i) Estimasi nilai susut ultimit $\epsilon_{sh\sim}$ material perbaikan dengan formulasi ACI 209R-92. Lakukan modifikasi nilai paruh waktu bila perlu agar sesuai dengan kecenderungan susut material perbaikan.
- j) Dengan masukan nilai M dan $\epsilon_{sh\sim}$, perkirakan nilai tegangan tarik yang timbul akibat susut terkekang dengan menggunakan **Gambar 5**.
- k) Bandingkan nilai tegangan tarik yang diestimasi dari langkah j) dengan kapasitas tarik dari material perbaikan.

5. Kesimpulan

1. Kompatibilitas susut antara material perbaikan dengan beton tidak bisa semata-mata ditentukan dengan pembatasan besaran susut maksimum. Evaluasi kompatibilitas susut lebih tepat didekati dengan cara merelasikan sifat susut dengan kinerjanya di lapangan.
2. Melalui penelusuran riwayat perbedaan susut maka dapat diperkirakan besarnya tegangan tarik yang timbul serta koefisien penyimpangan susut antara material perbaikan dan beton induk.
3. Metode evaluasi kompatibilitas susut yang didasarkan pada nilai koefisien penyimpangan telah diusulkan dalam penelitian ini. Dalam aplikasinya untuk mengevaluasi kompatibilitas susut, metode yang diusulkan hanya memerlukan data susut bebas yang diperoleh dari pengujian pada benda uji non-komposit serta data total deformasi yang diperoleh dari pengujian pada benda uji komposit.
4. Metode yang dikembangkan ini telah diterapkan untuk mengevaluasi berbagai material perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini dan menghasilkan kesimpulan bahwa material perbaikan yang digunakan kompatibel dengan beton induk.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat, Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah memberikan dukungan dana pada penelitian ini melalui skema Hibah Bersaing dengan kontrak kerja nomor 2881/H27/KU/2010.

Daftar Pustaka

- ACI Committe 209, 2002, *Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure*, Farmington Hill, MI, American Concrete Institute, 209R-92.
- ASTM C928-00, 2000, *Standard Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs*, United States: West Conshohocken, PA 19428-2959.
- ASTM C1600-07, 2007, *Standard Test Method for Rapid Hardening Hydraulic Cement*, United States: West Conshohocken, PA 19428-2959.
- Baluch, M.H., Rahman, M.K., and Al-Ghadib, A.H., 2002, Risks of Cracking and Delamination in Patch Repair, *Journal of Materials in Civil Engineering*, July-August, pp 293-302.
- European Standard ENV 1504-9, 1997, *Product and System for the Protection and Repair of Concrete Structures-Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity-Part 9:General Principles for the Use of Product and System*, Commite' Europeen de Normalisation, Bruxelles.
- Ferraro, C.C., 2008, *Investigation of Concrete Repair Materials*, Florida, United States: Structural Materials Laboratory, Florida Department of Transportation.
- Hossain, A.B., Fonseka, A and Bullock, H., 2008, Early Age Stress Development, Relaxation and Cracking in Restrained Low W/B Ultrafine Fly Ash Mortars, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6 No. 2, pp. 261-271.
- International Concrete Repair Institute, 1996, *Guide for Selecting and Specifying Materials for Repair of Concrete Surfaces*, Technical Guidelines No. 03733, Virginia, United States: the International Concrete Repair Institute.
- Jumaat, M.Z., Kabir, M.H., and Obaydullah, M., 2006, A Review of the Repair of Reinforced Concrete Beams, *Journal of Applied Science Research*, 2 (6), pp 317-326.

- Kristiawan, S.A., 2003, *Restrained Shrinkage Cracking of Concrete*, UK: PhD Dissertation, School of Civil Engineering, University of Leeds.
- Kristiawan, S.A., Mahmudah, A.M.H., and Sunarmasto, 2009, Cracking Resistance of Concrete Overlays as Predicted from the Development of Shrinkage Stress, Padua, Italia: In *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete Repair*, 29 June - 3 July, pp. 157-160.
- McDonald, J.C., Vaysburd, A.M., and Poston, R.W., 2000, Performance Criteria for Dimensionally Compatible Patch Repair Materials, *HPM&S Bulletin* 00-1, Jan, pp 1-13.
- Neville, A.M., Dilger, and Brooks, J.J., 1983, *Creep of Plain and Structural Concrete*, London, United Kingdom: Construction Press.
- Park, D.C., Ahn, J.C., Oh, S.G., Song, H.C., and Noguchi, T., 2009, *Drying Effect of Polymer Modified Cement for Patch-Repaired Mortar on Constraint Stress*, *Construction and Building Materials* 23, pp 434-447.
- Pattnaik, R.R., 2006, *Investigation Into Compatibility Between Repair Materials and Substrate Concrete Using Experimental and Finite Element Methods*, University, United States: PhD Dissertation, Graduate School of Clemson.
- Sahamitmongkol, R., Suwathanangkul, S., Phoothong, P., and Kato, Y., 2008, Flexural Behaviour of Corroded RC Member with Patch Repair-Experiments and Simulation, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6 (2), pp 317-336.
- Silfwerbrand, J., 1997, *Differential Shrinkage in Normal and High Strength Concrete Overlays*, Nordic Concrete Research, Publication No. 19, pp 55-68.
- Turcry, P., Loukili, A., Haidar, K., Pijaudier-Cabot, G., and Belarbi, A., 2006, Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Jan-Feb, pp 46-54.