

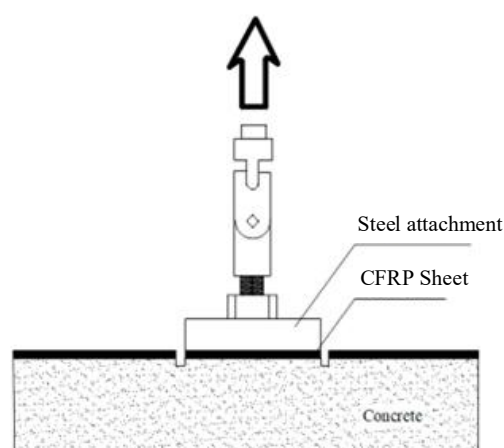
BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Penelitian mengenai lekatan (*bond*) antara CFRP dan beton merupakan aspek krusial dalam rekayasa struktur, yang secara garis besar terbagi menjadi dua tipe. Tipe lekatan yang pertama yaitu tarik normal (*normal tensile bond*), di mana gaya yang bekerja tegak lurus terhadap bidang lekatan, meninjau perilaku antarmuka saat ditarik secara normal. Sementara itu, tipe kedua mengkaji lekatan geser (*shear bond*), yang melibatkan gaya searah dengan bidang lekatan, seperti yang sering terjadi pada aplikasi perkuatan lentur atau geser struktur beton (ACI Committee 440, 2017). Pemahaman mendalam terhadap kedua mekanisme lekatan ini sangat krusial untuk memastikan kinerja struktural yang optimal pada sistem perkuatan eksternal beton menggunakan CFRP.

2.1 Studi Eksperimental Perilaku Lekatan Antara FRP dengan Beton

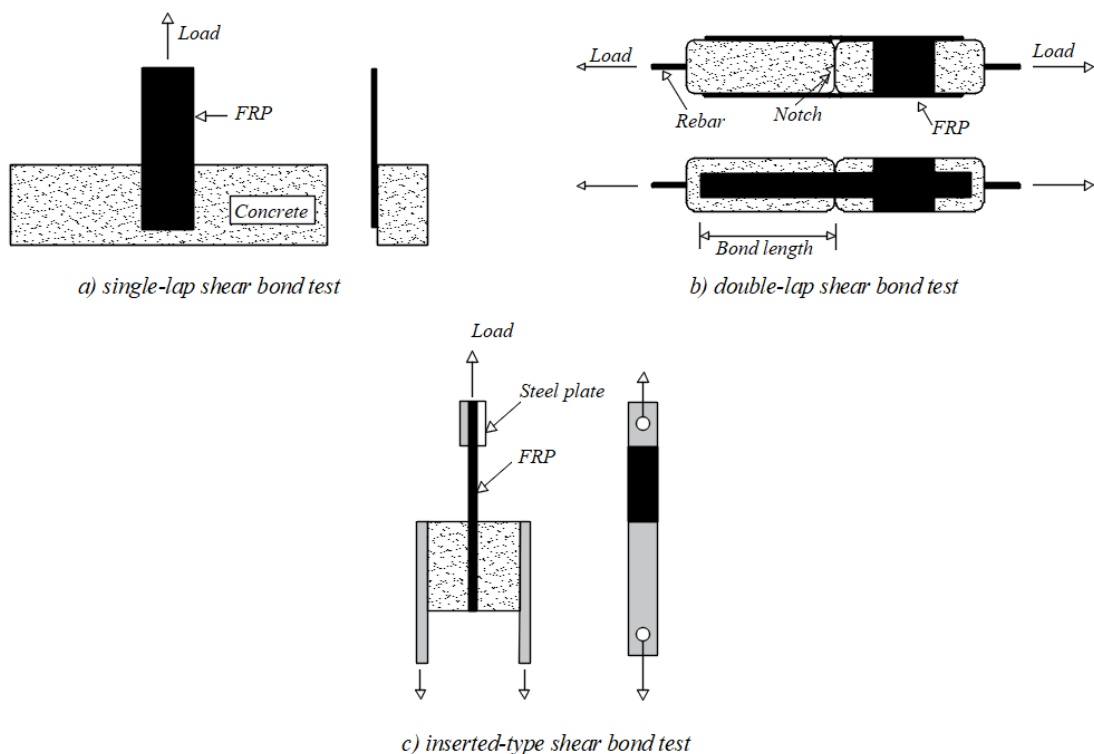
Perilaku tarik normal lekatan antara CFRP dengan beton secara eksperimen diperoleh melalui pengujian tarik langsung (*direct tensile test*) seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Ueda dan Dai (2005) mengadopsi prosedur pengujian tarik langsung lekatan CFRP dari '*Guideline on Upgrading of Concrete Structures with FRP Sheet*' yang diterbitkan oleh *Japan Society of Civil Engineering* (JSCE).



Gambar 2.1 Skema pengujian tarik normal pada lekatan antara beton dan CFRP *sheets*

Metode tersebut mudah diterapkan karena menghasilkan kualitas lekatan secara kualitatif, dengan mengamati adanya kegagalan yang terjadi pada beton, CFRP atau perekat epoksi. (Wang, Li and Hu, 2014) melakukan inovasi eksperimental untuk memperbaiki perilaku normal tarik lekatan antara CFRP dan beton dengan membuat pengasaran permukaan beton menggunakan agregat ringan berpori sebelum CFRP diaplikasikan pada permukaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan permukaan tersebut dapat meningkatkan kekuatan tarik normal akibat mekanisme *interlocking* struktur antarmuka lekatan.

Sato et al. (2000), Chen dan Teng (2001), Ueda dan Dai (2005) melakukan serangkaian pengujian geser langsung terhadap perilaku lekatan beton dengan FRP *sheets* dan *plate*. Pengujian yang dilakukan meliputi *single-lap shear bond test*, *double-lap shear bond test* dan *inserted-type shear bond test*, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema pengujian geser langsung pada lekatan beton dan CFRP *sheets* (Ueda et al., 2005)

Dari penelitian ini didapatkan spesifikasi material dan model analitis pendekatan dari perilaku lekatan berdasarkan hasil-hasil pengujian geser langsung. Pemahaman aksi

komposit antara beton dan FRP sangat diperlukan sehingga desain penguatan dapat didasarkan pada ketentuan berbasis kinerja.

Perilaku geser langsung lekatan juga diteliti oleh Yao et al. (2005), dengan melakukan pengamatan langsung terhadap lekatan antara beton dengan FRP *strip*, dengan membandingkan hasil eksperimen dengan pendekatan nilai kuat lekatan oleh Chen et al. (2001). Variasi lebar dan panjang lekatan diterapkan pada pengujian. Terdapat tiga macam kegagalan yang mendominasi yaitu *debonding* antara beton dan epoksi, kegagalan pada substrat beton dan kegagalan beton berbentuk prisma.

Modifikasi setup pengujian telah dilakukan untuk memperbarui pengujian lekatan geser langsung antara CFRP dan beton. Pembaharuan ini melibatkan dua aspek utama yaitu penambahan tumpuan baja pada ujung benda uji beton, serta penerapan penjepit (*clamping*) di ujung CFRP yang letaknya jauh dari titik pembebanan (Mazzotti et al. 2009). Hal ini dilakukan untuk memperoleh perilaku kegagalan geser pada permukaan lekatan sekaligus menghindari *debonding* pada ujung CFRP. Pada penelitian tersebut juga diterapkan variasi perlakuan permukaan *sand blasting* dan *grinding*, di mana dengan jenis persiapan permukaan yang berbeda dapat memengaruhi lekatan dan energi fraktur antarmuka. Tudjono et al.(2017) melakukan pengamatan kuat geser langsung CFRP *sheets* dengan variasi alur (*grooving*) pada persiapan permukaan beton. Hasil menunjukkan penerapan *grooving* dapat meningkatkan kuat geser lekatan dengan dominasi kegagalan berupa *concrete-shear*.

Pengaruh kandungan agregat menjadi fokus utama dalam penelitian mengenai lekatan antara CFRP dan beton (Sanginabadi et al., 2021). Studi ini secara khusus dilakukan dengan mengamati bagaimana variasi kandungan agregat memengaruhi panjang lekatan efektif pada antarmuka kedua material tersebut. Penelitian terkait lekatan antara FRP dan dilakukan dengan mengamati pengaruh kandungan agregat terhadap panjang lekatan efektif. Penelitian ini melakukan pengamatan pengaruh lekatan antara FRP dengan beton, dengan melakukan variasi rasio volume agregat halus terhadap volume agregat total dalam beton, yang disebut konsep rasio pasir (*sand ratio*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang lekatan efektif meningkat seiring dengan peningkatan rasio pasir dari 0,30 sampai maksimum 0,65, yaitu dengan panjang efektif lekatan berkisar antara 66 – 102 mm. Penentuan panjang lekatan efektif dalam penelitian ini melibatkan kombinasi analisis kurva beban-*slip*, pengukuran kegagalan *slip*

menggunakan teknik *Particle Image Velocimetry* (PIV), dan identifikasi titik-titik kritis awal pelepasan lekatan. Metode ini bertujuan untuk menentukan panjang minimum yang diperlukan untuk mencapai kekuatan lekatan maksimum.

Kondisi bidang kontak antara CFRP *sheets* dan beton sangat memengaruhi mode kegagalan geser lekatan, dalam kasus beton yang diperkuat dengan CFRP (Han et al., 2018). Pada proses aplikasi, persiapan permukaan tambahan diperlukan untuk menghindari kegagalan *debonding*. CFRP *sheets* merupakan material yang sensitif terhadap metode aplikasinya.

2.2 Analisis Numerik Struktur Beton dengan Perkuatan Eksternal FRP menggunakan Metode Elemen Hingga

Lin dan Wu (2016) melakukan penyelidikan terkait perilaku antarmuka menggunakan metode elemen hingga (FEM). Teori keruntuhan plastis digunakan untuk memodelkan material beton dan dilakukan simulasi pengujian tarik langsung sambungan *externally bonded fiber-reinforced polymers* (EB-FRP) beton menggunakan FEM. Pengamatan dilakukan terhadap proses *debonding*, mekanisme kegagalan, distribusi kekuatan lekatan, dan karakteristik hubungan *bond-slip*. Pemodelan dilakukan dengan mengasumsikan kondisi *full-bond* pada lekatan antar muka FRP dan beton. Pelat FRP diasumsikan sebagai material elastis linier. Mode kegagalan yang dipertimbangkan pada penelitian ini yaitu saat terjadi kerusakan atau terlepasnya lapisan terluar beton. Mode kegagalan lain yang tidak diinginkan, seperti kegagalan *debonding* antara beton atau lembaran FRP dan kegagalan lapisan epoksi tidak dipertimbangkan, dengan menganggap efek dari kekakuan lapisan perekat sangat kecil dan dapat diabaikan. Studi ini berfokus pada kecenderungan perilaku *bond-slip*. Penelitian menunjukkan bahwa model yang diusulkan mampu menyimulasikan proses *debonding* dari uji *pull-off* sambungan EB-FRP. Kurva beban-*slip*, distribusi regangan FRP, dan pola kegagalan beton diperoleh dan divalidasi terhadap hasil eksperimental.

Tan et al. (2021) melakukan pengamatan secara numerik terhadap perilaku balok beton bertulang dengan perkuatan lentur CFRP *sheets*. Pengujian eksperimental dilakukan pada balok beton bertulang dengan dimensi 2000 x 120 x 300 mm, dengan skema pembebanan statik terpusat tunggal pada tengah bentang balok hingga mengalami kegagalan. Pemodelan numerik dengan FEM menerapkan material nonlinier dan

mengakomodasi perilaku *bond stress-slip* pada lekatan antara CFRP dengan beton. Hasil menunjukkan adanya kesesuaian perilaku antara pemodelan FEM dengan eksperimen, meskipun demikian masih terlihat adanya penyimpangan kekakuan antara FEM dan eksperimen, dan juga dalam model FEM perkembangan retak dan lebar retakan belum dapat tervisualisasikan dengan baik.

Pengembangan pengamatan lekatan pada ranah numerik sangat diperlukan untuk dapat memvisualisasikan kegagalan perkuatan eksternal beton menggunakan FRP dengan lebih baik, sekaligus dapat memperjelas perilaku dari lekatan FRP. Penggunaan metode FEM dalam pemodelan sistem komposit beton bertulang mempunyai kekurangan dalam memproduksi retakan pada material beton bertulang. Model elemen diskrit adalah metode yang sangat baik digunakan untuk analisis bahan granular. Keuntungan utamanya ketika diterapkan pada domain kontinu adalah kemampuannya untuk memprediksi jalur retak, yang berguna untuk mereproduksi dengan benar perilaku fraktur material seperti tanah, batuan, keramik, dan beton (Zárate dan Onate, 2015). Pemanfaatan pemodelan numerik dalam kasus ini memberikan keuntungan signifikan, yaitu kemampuannya untuk memperoleh informasi mendalam yang tidak dapat ditangkap secara langsung melalui pengamatan dalam pengujian eksperimental.

2.3 Perkembangan Pemodelan Material Beton Menggunakan Metode Diskrit

Metode Elemen Diskrit (DEM) adalah suatu metode untuk analisis mekanika materi granular, serta untuk memodelkan situasi multifraktur pada material friksi seperti beton dan geomaterial. Kelebihan utama DEM dibandingkan dengan FEM terletak pada kemampuannya untuk mereproduksi situasi multifraktur dalam benda padat, khususnya dalam konteks material beton. (Zárate *et al.*, 2017).

Berbagai pendekatan telah diterapkan untuk memodelkan struktur maupun proses fraktur atau kegagalan beton, tetapi mayoritas gagal untuk menggambarkan perilaku zona *discontinuous* (Camborde *et al.*, 2000). Hakuno (2005) mengembangkan sebuah metode *Extended Distinct Element Method* (EDEM) untuk menyimulasikan kegagalan suatu struktur beton bertulang, tetapi untuk melihat karakteristik beton pada tingkat skala meso hasilnya tidak memuaskan. Wang *et al.* (2008) mengusulkan *beam-particle model* (BPM) untuk menyimulasikan proses fraktur beton akibat beban impak. Pemodelan ini dapat menyimulasikan fraktur elemen dengan baik, akan tetapi elemen *elastic-brittle* yang

digunakan dalam BPM tidak sesuai untuk mendeskripsikan hubungan antar elemen di dalam beton.

Nagai et al. (2004) mengembangkan *Rigid Body Spring Model* (RBSM) untuk menyimulasikan kegagalan mortar dan beton akibat beban uniaksial atau beban biaksial. Hasil analisis metode numerik ini menunjukkan kesesuaian yang tinggi. Pemodelan mampu memvisualisasikan kegagalan struktur dengan baik, dan sangat tepat diterapkan dalam menyelesaikan masalah yang melibatkan deformasi kecil.

Metode *coupled* RBSM-Voronoi diusulkan oleh Shu et al., (2022). Metode ini secara efisien dan akurat dapat menganalisis proses fraktur beton, terutama untuk komponen di bawah beban geser tekan. Penggunaan *grid* voronoi acak pada metode ini dapat mengurangi sensitivitas *grid mesh* pada hasil pemodelan numerik.

2.4 Pemodelan Struktur Komposit Beton dengan Perkuatan Eksternal CFRP Menggunakan *Rigid Body Spring Model* (RBSM)

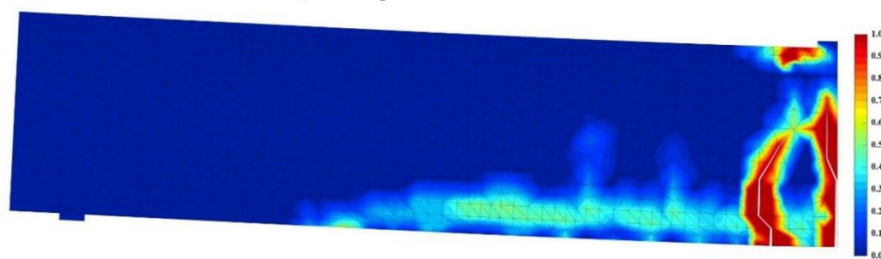
Farah and Sato (2011) menggunakan analisis nonlinier dua dimensi dengan metode RBSM untuk menyimulasikan perilaku tarik uniaksial material beton bertulang dengan perkuatan CFRP *sheets*. Pada penelitian ini model bond empiris Sato, Asano and Ueda (2000) diimplementasikan dalam pemodelan RBSM. Perilaku beton tarik diasumsikan elastis linier, dengan modulus elastisitas sama dengan modulus tangen awal tekan. Konstitutif beton pasca tarik dimodelkan sebagai *stress softening curve*, dengan tegangan yang menurun seiring penambahan lebar retak. Material baja dimodelkan secara tri-linier, sementara itu CFRP dimodelkan sebagai material elastis linier. Hasil simulasi numerik menggunakan model tersebut menunjukkan kecenderungan yang lebih kaku dibandingkan hasil eksperimen.

Purnomo et al. (2023) mengembangkan RBSM untuk meneliti perilaku lentur balok-T beton bertulang akibat respons momen negatif, yang diperkuat dengan lembaran CFRP *sheets* dan *rod*. Hasil pemodelan tersebut dikalibrasi terhadap pengujian eksperimen. Teknik pemodelan yang tepat dengan menggunakan RBSM digunakan untuk menyimulasikan sifat mekanik non-linier beton, baja tulangan, serta lembaran dan batang CFRP. Pada penelitian ini dilakukan kalibrasi secara sistematis yang dikombinasikan dengan rekomendasi berdasarkan kriteria berbasis energi untuk mengevaluasi hasil kalibrasi pada kurva beban-perpindahan. Pengujian dilakukan pada balok dengan beban

titik tunggal pada tengah bentang yang dapat merepresentasikan kondisi momen dan gaya geser ultimit. Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb yang dimodifikasi digunakan untuk mengakomodasikan kombinasi tegangan normal dan tegangan geser beton dan elemen tegangan bidang ortotropik ekuivalen tulangan baja. RBSM dapat memodelkan sistem komposit beton, baja dan CFRP dengan baik, hal tersebut terlihat dari kesesuaian perilaku balok dan pola keruntuhan, antara model RBSM (Gambar 2.3b) dan hasil eksperimen balok-T (Gambar 2.3a).



a) Pola keruntuhan eksperimen balok-T



b) Visualisasi kegagalan balok-T pada RBSM

Gambar 2.3 Visualisasi hasil eksperimen vs model RBSM (Purnomo et al., 2023)

Purnomo (2023) mengembangkan *bond* antara CFRP dengan beton menggunakan RBSM. Pengujian lentur balok beton dengan CFRP dan pengujian *pull-off* pelat beton dengan CFRP digunakan untuk mengukur properti material *bond* geser dan *bond* normal tarik. Pengembangan program berbasis RBSM dilakukan dengan mengimplementasikan model *bond* geser dan *bond* normal tarik, serta material CFRP. Pada penelitian ini model konstitutif *bond* disimulasikan berdasarkan model konstitutif beton dan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb termodifikasi. Pada penelitian ini, digunakan model konstitutif beton termodifikasi dengan rasio kekakuan terhadap beton sebesar 30%, untuk dapat menghasilkan mode kegagalan *concrete peeling* yang sesuai dengan hasil pengujian eksperimental. Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa *bond* geser memiliki perilaku kekakuan bilinear, sementara *bond* normal tarik berperilaku linier.

Jiang et al. (2023) melakukan pemodelan RBSM 2D untuk menyimulasikan kegagalan *debonding* lekatan pada proses geser langsung, dengan menerapkan faktor rasio lebar antara FRP dengan beton. Pendekatan nilai lekatan (*bond strength*) pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan kuat tarik beton pada permukaan luar, di mana CFRP diaplikasikan. Simulasi kegagalan *debonding* dapat divisualisasi dengan baik, sementara itu faktor lebar tidak memengaruhi peningkatan lekatan saat mencapai rasio lebar ultimit. Penelitian lanjutan dilakukan pada mekanisme serupa, dengan pengembangan geometri model 3D (Jiang, Avadh and Nagai, 2024). Hasil simulasi menunjukkan kesesuaian bentuk kurva beban perpindahan dan kekakuan awal dengan baik, sementara itu kemiringan kedua model RBSM mempunyai kecenderungan nilai yang lebih tinggi. Distribusi regangan pada kondisi elastis mendekati eksperimen, sementara pada kondisi *debonding* terdapat penyimpangan akibat dari kompleksitas bentuk elemen 3D.

Pengembangan yang telah dilakukan menjelaskan bahwa penyesuaian pada model lekatan pada RBSM antara CFRP dengan beton, dapat memperbaiki program dalam menyimulasikan perilaku elemen struktur. Meskipun demikian model konstitutif lekatan pada RBSM perlu diteliti lebih lanjut, mengingat adanya perbedaan perilaku material beton dan material lekatan, begitu pula terhadap kriteria keruntuhan antara kedua material tersebut. Inovasi pada elemen lekatan RBSM ini mampu mengembangkan metode ini dalam menyimulasikan material komposit modern beton dengan CFRP.

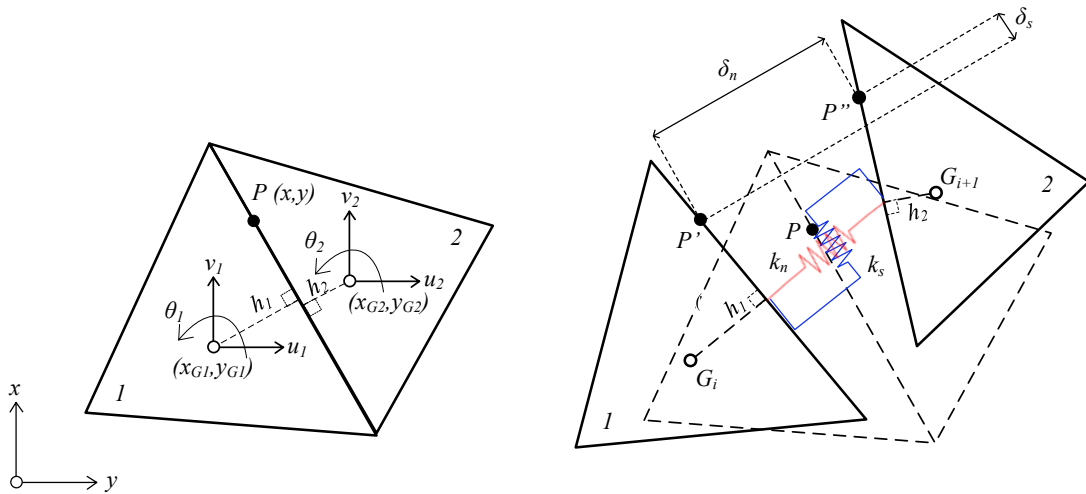
2.5 Pemodelan Numerik menggunakan 2D Rigid Body Spring Model (RBSM)

Rigid Body Spring Model (RBSM) merupakan metode berbasis elemen diskrit, dimana suatu struktur geometri dibagi menjadi elemen-elemen kaku (*rigid body*) yang dihubungkan pegas-pegas antara titik pusat elemen yang berdampingan. Pada pemodelan RBSM 2D elemen dimodelkan dengan *isotropic planes stress* maupun *orthotropic plane stress*. Elemen *isotropic* dan *orthotropic* merujuk pada sifat mekanik dari material yang digunakan untuk merepresentasikan struktur fisik. Elemen *isotropic* memiliki sifat mekanik yang sama di semua arah. Artinya, kekuatan, kekakuan, dan sifat elastis lainnya dari material tersebut seragam ke segala arah. Sebaliknya, elemen *orthotropic* memiliki sifat mekanik yang berbeda-beda tergantung pada arahnya. Kekuatan dan kekakuan material ini lebih tinggi pada arah tertentu dibandingkan arah lainnya.

Pada pemodelan RBSM, elemen *isotropic planes stress* diimplementasikan sebagai elemen dasar (*base*), sementara itu elemen *orthotropic plane stress* diimplementasikan sebagai elemen lapisan (*layer*). Pada pemodelan balok menggunakan RBSM material beton akan dimodelkan sebagai *isotropic planes stress* menjadi material elemen dasar (*base*) sementara itu CFRP dimodelkan sebagai *orthotropic plane stress* menjadi elemen lapisan (*layer*).

2.5.1 Elemen *Isotropic Plane Stress*

Model 2D RBSM memodelkan material *rigid* menjadi elemen *isotropic plane stress*, dengan kinematika perpindahan titik-titik pada elemen, yang dapat dilihat pada Gambar 2.4. Masing-masing elemen memiliki tiga derajat kebebasan, yaitu translasi horizontal (u_i), translasi vertikal (v_i), dan rotasi (θ_i). Titik pusat elemen dinotasikan sebagai (x_{Gi}, y_{Gi}) . Titik P merupakan titik sembarang pada sisi kontak antar elemen. Ketika elemen mengalami perpindahan, maka titik P terpisah menjadi P' dan P'' yang masing-masing melekat pada sisi elemen 1 dan 2.



Gambar 2.4 Kinematika perpindahan pada elemen *isotropic plane stress* 2D

Berdasarkan teori deformasi kecil, posisi titik-titik pada elemen setelah mengalami perpindahan dapat direpresentasikan dengan Persamaan 2.1. Elemen *plane stress* ini digunakan untuk mengakomodasi material beton, lekatan dan CFRP *sheets*.

$$U_i = u_i - (y - y_{Gi})\theta_i, \quad V_i = v_i - (x - x_{Gi})\theta_i \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 dapat dituliskan kembali dalam bentuk umum seperti pada Persamaan 2.2, di mana Q_i dinyatakan dalam Persamaan 2.3.

$$U_i = Q_i u_i \quad (2.2)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_{G1}) \\ 0 & 1 & (x - x_{G1}) \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_{G2}) \\ 0 & 1 & (x - x_{G2}) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dengan menggunakan matriks rotasi R , perpindahan titik-titik pada elemen terhadap garis kontak elemen 1 dan 2 dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.4. Matriks rotasi dihitung berdasarkan Persamaan 2.5.

$$\bar{U}_i = R U_i = R Q_i u_i \quad (2.4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(n, x) & \cos(n, y) \\ \cos(s, x) & \cos(s, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Perpindahan total (δ) titik P dapat dihitung berdasarkan Persamaan 2.6, dengan M_i merupakan matriks pencerminan, dan B_i adalah matriks perpindahan elemen. Matriks pencerminan M_i direpresentasikan dalam Persamaan 2.7. Matriks perpindahan elemen B_i ditunjukkan dalam Persamaan 2.8, di mana l_i dan m_i merupakan *cosinus* arah matriks transformasi pada Persamaan 2.5.

$$\delta = \sum_i^2 M_i \bar{U}_i = \sum_i^2 M_i R Q_i u_i = \sum_i^2 B_i u_i \quad (2.6)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -l_1 & -m_1 & \{l_2(y - y_{G1}) - m_1(x - x_{G1})\} \\ -l_2 & -m_2 & \{l_2(y - y_{G1}) - m_2(x - x_{G1})\} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & \{-l_1(y - y_{G2}) + m_1(x - x_{G2})\} \\ l_2 & m_2 & \{-l_2(y - y_{G2}) + m_2(x - x_{G2})\} \end{bmatrix}$$

Persamaan 2.9 menunjukkan hubungan regangan normal (ϵ) dan regangan geser (γ) dengan perpindahannya, dengan δ_n merupakan perpindahan relatif normal dan δ_s merupakan perpindahan relatif geser, h_i adalah panjang garis tegak lurus dari pusat gravitasi elemen ke garis batas antar elemen. Hubungan tegangan-regangan elemen dinyatakan dalam Persamaan 2.10, dengan D_e merupakan matriks konstitutif material, k_n dan k_s merupakan kekakuan pegas normal dan pegas geser. Tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) dinyatakan dalam Persamaan 2.12 dengan E merupakan modulus

elastisitas elemen dan ν adalah nilai rasio Poisson, sehingga kekakuan pegas normal dan geser dapat dihitung berdasarkan Persamaan 2.13.

$$\varepsilon = \frac{\delta_n}{h} = \frac{\delta_n}{h_1 + h_2}, \quad \gamma = \frac{\delta_s}{h} = \frac{\delta_s}{h_1 + h_2} \quad (2.9)$$

$$\sigma = D_c \cdot \delta_n = D_c \cdot \varepsilon \cdot h, \quad \tau = D_c \cdot \delta_s = D_c \cdot \gamma \cdot h \quad (2.10)$$

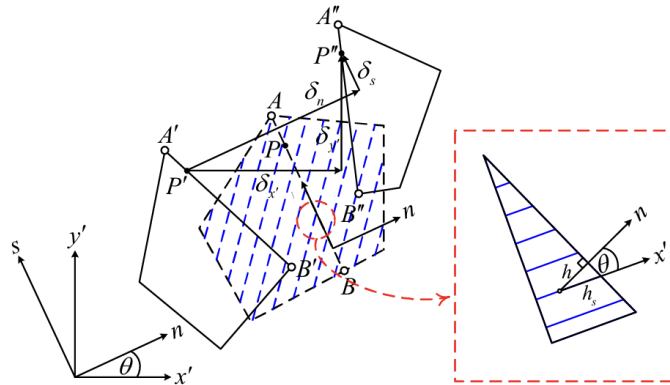
$$D_c = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\sigma = k_n \cdot \varepsilon, \quad \tau = k_s \cdot \gamma \quad (2.12)$$

$$k_n = \left(\frac{E_{elemen}}{1 - \nu_{elemen}} \right) \frac{1}{h}, \quad k_s = \left(\frac{E_{elemen}}{1 + \nu_{elemen}} \right) \frac{1}{h} \quad (2.13)$$

2.5.2 Elemen *Orthotropic Plane Stress*

Kinematika perpindahan titik pada elemen *orthotropic* dapat dilihat pada Gambar 2.5. Sistem sumbu n - s merupakan sumbu orientasi normal-geser berdasarkan sisi kontak antar elemen, dan sumbu x' - y' merupakan sumbu orientasi arah material *orthotropic*. Sudut θ merupakan sudut antara kedua sistem sumbu.



Gambar 2.5 Kinematika perpindahan pada elemen *orthotropic plane stress* 2D (Takeuchi, 2005)

Hubungan tegangan-regangan pada elemen *orthotropic* dinyatakan pada Persamaan 2.14 di mana dalam sistem sumbu material *orthotropic*, $\sigma_{x'}$ menyatakan tegangan normal, $\tau_{x'y'}$ menyatakan tegangan geser, E_s menyatakan modulus elastisitas tulangan baja, β_s merupakan faktor pengaruh aksi *dowel*, serta $\varepsilon_{x'}$ dan $\gamma_{x'y'}$ merupakan regangan normal dan regangan geser. Nilai faktor β_s dihitung berdasarkan Persamaan

2.15, dengan d adalah diameter tulangan dan a_m adalah panjang pengaruh aksi. Tegangan dan regangan dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 2.16, di mana D_s menunjukkan matriks material yang didefinisikan oleh Persamaan 2.17.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \tau_{x'y'} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_s & 0 \\ 0 & \beta_s E_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \gamma_{x'y'} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

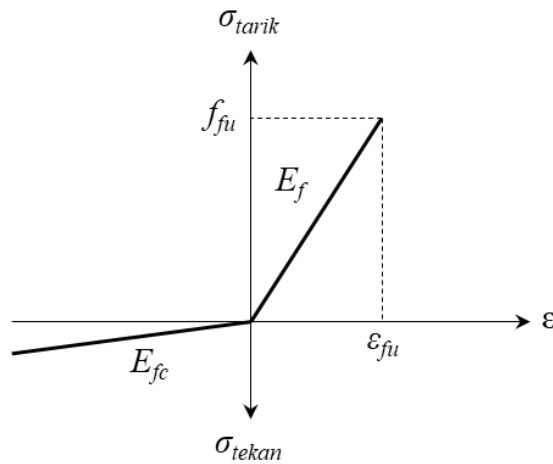
$$\beta_s = \frac{3}{4} \left(\frac{d}{a_m} \right)^2, \quad (2.15)$$

$$\sigma_s = D_s \cdot \varepsilon_s \quad (2.16)$$

$$D_s = E_s \cos^2 \theta \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + \beta_s \sin^2 \theta & (\beta_s - 1) \cos \theta \sin \theta \\ (\beta_s - 1) \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta + \beta_s \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.5.3 Model Konstitutif dan Kriteria Keruntuhan RBSM

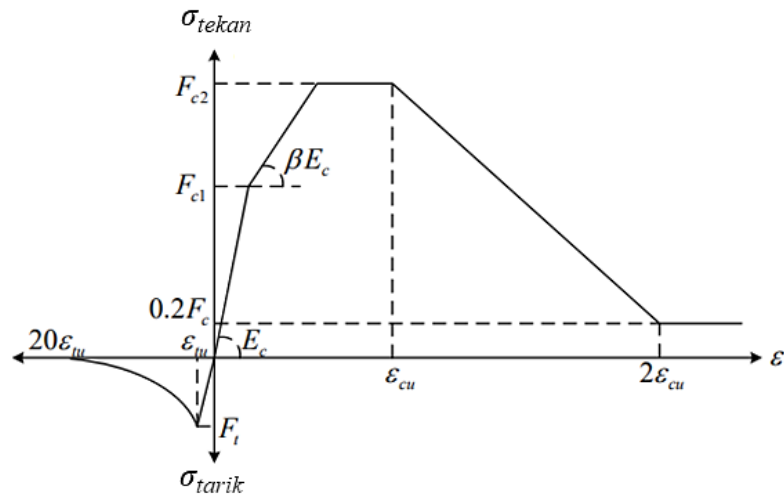
CFRP *sheets* dimodelkan sebagai elemen yang hanya dapat menerima aksi berupa beban tarik dan menunjukkan perilaku elastis linier sebelum mengalami keruntuhan (Farah et al., 2011). Model material CFRP *sheets* ditunjukkan pada Gambar 2.6, di mana model memberikan respons yang dominan terhadap aksi tarik, sementara kontribusi aksi tekan dianggap tidak signifikan.



Gambar 2.6 Model konstitutif CFRP *sheets*

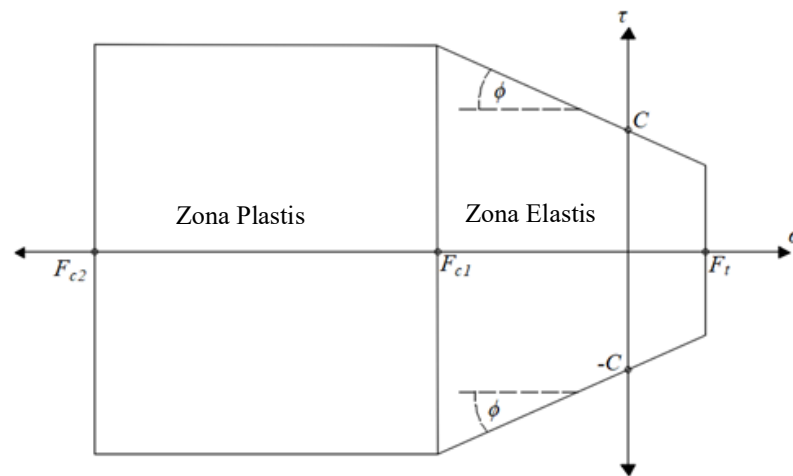
Model konstitutif beton dapat dilihat pada Gambar 2.7. Model pegas normal tarik pada beton dimodelkan secara linier-*softening* eksponensial, untuk dapat memberikan respons pelemahan pegas secara halus. Model pegas normal tekan dimodelkan secara elastis bilinear-*softening* linier dengan residu, yang bertujuan untuk menangkap perilaku

pra-beban puncak mendekati model nonlinier, serta menggunakan *softening* linier dengan tingkat keakuratan cukup untuk daerah pasca-beban puncak. Respons residu tegangan dimaksudkan agar model stabil secara numerik. Sementara itu pegas geser dimodelkan berperilaku secara *elasto-plastic*.



Gambar 2.7 Model konstitutif beton

Pada pemodelan RBSM keruntuhan material beton menggunakan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb termodifikasi seperti yang terlihat pada Gambar 2.8. Tegangan tarik, tegangan tekan 1, dan tegangan tekan 2 dinotasikan sebagai F_t , F_{c1} , dan F_{c2} . Nilai F_t didasarkan pada kuat tarik material (f_t). Nilai F_{c1} dan F_{c2} diambil sebesar 50% dan 95% kuat tekan material (f_c).



Gambar 2.8 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb termodifikasi

Tegangan kohesi dan sudut geser dinotasikan sebagai c dan ϕ . Zona elastis material dalam aksi tegangan normal tekan dibatasi oleh tegangan F_{c1} . Jika melebihi nilai tersebut, maka suatu material memasuki zona plastis. Interaksi tegangan normal (σ) dan tegangan (τ) geser dalam kriteria Mohr-Coulomb dinyatakan dalam Persamaan 2.18. Pada pemodelan RBSM, fungsi leleh suatu interaksi tegangan normal dan tegangan geser dinyatakan dalam Persamaan 2.19.

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (2.18)$$

$$f = \tau^2 + (c - \sigma \tan \phi)^2, \quad (2.19)$$

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan model material lekatan antara CFRP *sheets* dan beton melalui pengukuran respons geser dari hasil pengujian perilaku lekatan baja-CFRP. Perilaku lekatan yang didapatkan dalam eksperimen diterapkan sebagai model material lekatan dalam RBSM dan hasilnya divalidasi dengan pengujian eksperimen balok beton-CFRP.

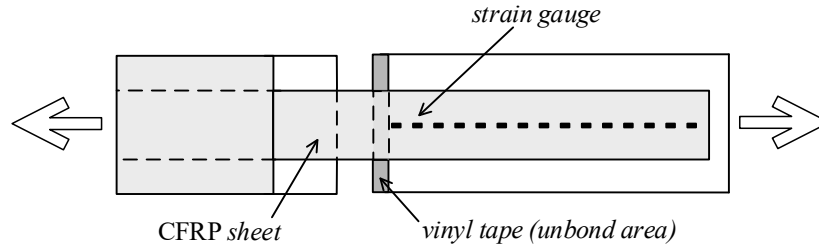
2.6 Model interaksi antara beton dan CFRP

Sato et al., (2000) mengemukakan sebuah persamaan empiris lekatan antara beton dan CFRP dengan memperhitungkan faktor panjang efektif lekatan, modulus elastisitas, tebal, dan lebar CFRP, serta parameter tegangan tekan ultimit beton. Model ini digunakan untuk menyimulasikan perilaku *tension stiffening* pada elemen struktur beton bertulang dengan CFRP. Hubungan tegangan *bond* geser-*slip* pada zona pra beban puncak dan zona pasca beban puncak diperlihatkan pada Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.21. Hasil simulasi menggunakan model ini menunjukkan kecenderungan lebih kaku dibandingkan hasil eksperimen. Mekanisme pengujian geser Sato et al. (2000) diperlihatkan pada Gambar 2.9. Metode pengujian yang dipakai adalah *single lap shear bond test*, di mana CFRP *sheets* dipasang pada dua blok beton dengan panjang *bond* yang berbeda.

$$\tau = \frac{148s}{1+1000\varepsilon} f_c'^{0,2} \quad (2.20)$$

$$\tau = \tau_{\max} e^{-10(s-s_1)}, \quad (2.21)$$

$$\tau_{\max} = 9,1 f_c'^{0,2} t E_f \cdot 10^{-5} \leq 3,49 f_c'^{0,2} (MPa)$$

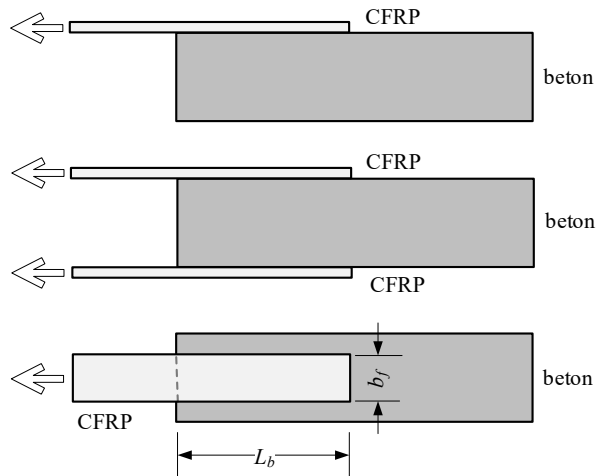


Gambar 2.9 Pengujian respons geser (Sato, Asano and Ueda, 2000)

Chen dan Teng (2001) merumuskan kekuatan lekatan berbasis desain yang dikalibrasi terhadap basis data pengujian *single lap* dan *double lap shear bond test* dengan memperhitungkan pengaruh parameter CFRP dan beton. Mekanisme pengujian seperti terlihat pada Gambar 2.10. Parameter CFRP yang diperhitungkan meliputi panjang *bond* (L_b), panjang efektif *bond* (L_e), modulus elastisitas, tebal, dan lebar CFRP. Parameter beton yang diperhitungkan meliputi kuat tekan beton dan lebar beton. Model ini mampu memberikan estimasi beban ultimit (P_u) maupun beban layan (P_s) terhadap kriteria desain angkur CFRP, seperti diformulasikan dalam Persamaan 2.22 dan Persamaan 2.23.

$$P_u = 0,315\beta_P\beta_L\sqrt{f'_c}b_P L_e \quad (2.22)$$

$$P_s = 0,2\beta_P\beta_L\sqrt{f'_c}b_P L_e \quad (2.23)$$



Gambar 2.10 Pengujian respons geser (Chen and Teng, 2001)

2.7 State of the Art

State of the art penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1, menunjukan perkembangan pengamatan interaksi antara CFRP dengan beton baik secara eksperimental maupun

numerik. Dari penelitian-penelitian terdahulu tampak bahwa pengembangan mengenai mekanisme lekatan CFRP dalam RBSM masih sangat terbatas, sementara itu model material lekatan pada RBSM antara CFRP dan beton menggunakan model konstitutif laminasi epoksi-CFRP pada mekanisme geser-lentur belum pernah dilakukan, sehingga hal tersebut menjadi suatu celah (*gap*) yang diisi melalui penelitian ini.

Tabel 2.1 *State of the art* penelitian

No	Penulis	Judul	DOI	Topik	Metode	Temuan
1	Sato et al. (2000), Chen et al. (2001)	<i>Fundamental study on bond mechanism of carbon fiber sheet, Anchorage Strength Models For FRP and Steel plates Bonded to Concrete</i>	10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784)	Studi eksperimental <i>bond</i> antara CFRP (<i>Sheet and Plate</i>) dan beton	<i>Shear bond test</i> , eksperimen	Persamaan analitis respons geser dari suatu uji eksperimen
2	Nagai et al. (2004)	<i>Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D</i>	10.3151/jact.2359	Simulasi kegagalan mortar dan beton	pengujian tekan dan tarik langsung, RBSM	Kesesuaian hasil dan visualisasi keruntuhan skala meso
3	Ueda and Dai (2005)	<i>Interface bond between FRP Sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour</i>	10.1002/pse.187	Studi eksperimental <i>bond</i> antara CFRP <i>sheets</i> dan beton	<i>Shear bond test</i> , <i>Direct tension test</i> , <i>Wedging splitting test</i> , eksperimen	Persamaan analitis respons geser dan normal dari uji eksperimen
4	Mazzotti et al. (2009)	<i>A new single-shear set-up for stable debonding of FRP-concrete joints</i>	10.1016/j.conbuildmat.2008.04.003	Studi eksperimental geser lekatan dengan <i>clamping</i> pada ujung lekatan	<i>single shear bond test</i> , eksperimen	Pengembangan metode eksperimental geser langsung dengan <i>clamping</i>
5	Farah and Sato (2011)	<i>Uniaxial Tension Behavior of Reinforced Concrete Members Strengthened with Carbon Fiber Sheets</i>	10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000175	Perilaku tarik uniaksial beton bertulang dengan perkuatan CFRP	Pemodelan <i>double lap shear bond test</i> , RBSM	implementasi model <i>bond stress-slip</i> Sato et al. (2000) pada perkuatan tarik uniaksial
6	Wang et al. (2014)	<i>Bond behavior of roughing FRP sheet bonded to concrete substrate</i>	10.1016/j.conbuildmat.2014.09.057	Pengaruh perlakuan permukaan terhadap perilaku normal tarik <i>bond</i>	<i>Direct tension test</i> , eksperimen	Perlakuan permukaan dengan <i>lightweight aggregate</i> meningkatkan kuat tarik normal <i>bond</i>
7	Lin and Wu (2016)	<i>Numerical Analysis of Interfacial Bond Behavior of Externally Bonded FRP-to-Concrete Joints</i>	10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000678	Simulasi perilaku geser langsung FRP dan beton dengan metode FEM	<i>shear bond test</i> , FEM	Implementasi model <i>bond stress-slip</i> pada FEM

Tabel 2.1 *State of the art* penelitian

No	Penulis	Judul	DOI	Topik	Metode	Temuan
8	Sanginabadi et al (2021)	<i>Effect of aggregate content on the CFRP-concrete effective bond length: An experimental and analytical study</i>	10.1016/j.compstruct.2021.114044	Pengaruh komposisi agregat pada lekatan CFRP dan beton	<i>single shear bond test</i> , eksperimen	Panjang lekatan efektif meningkat seiring dengan peningkatan rasio pasir dari 0,30 sampai maksimum 0,65
9	Purnomo et al. (2022)	<i>Systematic calibration procedure for CFRP Sheets and rods strengthened RC T-beams by using RBSM</i>	10.1080/15376494.2022.2111483	Kalibrasi model numerik RBSM pada perilaku lentur balok T dengan perkuatan CFRP rod dan sheet	Pengujian lentur balok T, pemodelan RBSM	Kesesuaian perilaku balok dan perkembangan retak pada model RBSM
10	Jiang, Avadh and Nagai (2023)	<i>A mesoscale simulation of the FRP-to-concrete interfacial debonding propagation process by 3D RBSM</i>	10.1016/j.compstruct.2022.116336	Simulasi 2D <i>debonding</i> FRP-beton dengan RBSM pada mekanisme tarik uniaksial	Pengujian tarik uniaksial	Lekatan dimodelkan menggunakan modifikasi konstitutif beton permukaan.
11	(Jiang, Avadh and Nagai, 2024)	<i>3D-RBSM: A New Mesoscale Discrete Approach for FRP-Concrete Interfacial Simulation</i>	10.1007/978-981-99-3362-4_33	Simulasi 3D <i>debonding</i> FRP-beton dengan RBSM pada mekanisme tarik uniaksial	Pengujian tarik uniaksial	RBSM dapat menyimulasikan <i>debonding</i> secara 3D pada kasus tarik uniaksial
12	Penelitian disertasi	Model Material Elemen Lekatan RBSM Antara CFRP Sheets dengan Beton	-	Pemodelan elemen lekatan pada RBSM dengan validasi eksperimental	Inovasi model material lekatan RBSM pada mekanisme geser-lentur	Model material lekatan dan integrasi analisis sensitivitas multikriteria dalam RBSM

2.8 Kerangka Berpikir

Penelitian mengenai perkuatan eksternal struktur beton menggunakan CFRP *sheets* banyak dilakukan karena keunggulan dari material komposit tersebut. Meskipun demikian kapasitas perkuatan ini belum dapat diprediksi dengan akurat secara analitikal maupun numerikal, dikarenakan permasalahan kegagalan *debonding* yang terjadi pada lekatan komposit material ini belum terdefinisi secara teliti dan jelas. Respons lekatan sebagian besar didapatkan melalui respons geser langsung dan tarik normal dalam pengujian eksperimental, tetapi aplikasi dalam pemodelan numerik masih sangat terbatas. Pemodelan numerik masih banyak menggunakan konsep lekatan penuh (*full-bond*) maupun menggunakan parameter respons geser langsung.

Penelitian ini melakukan pengembangan model material lekatan secara numerik, berdasarkan respons geser-lentur lekatan yang diuji secara eksperimental. Respons lekatan antara CFRP *sheets* dan beton didapatkan melalui skema pengujian lentur balok tanpa tulangan dengan perkuatan CFRP. Perkuatan CFRP *sheets* diterapkan secara terbatas pada area tengah bentang balok, untuk memaksimalkan kontribusi lekatan pada area momen ultimit, agar kegagalan lekatan dapat teramati dengan baik. Respons geser lentur lekatan diukur menggunakan sensor regangan (*strain gauge*) pada tiga lokasi esensial, yaitu lapisan epoksi bagian atas (lekatan antara epoksi ke beton), lapisan epoksi bagian bawah (lekatan antara epoksi ke CFRP) dan serat luar CFRP *sheets*. Pengukuran respons geser lentur diolah dan dikembangkan sebagai suatu model elemen lekatan yang baru dalam pemodelan numerik menggunakan *Rigid Body Spring Model* (RBSM). Pengembangan dilakukan pada model konstitutif elemen lekatan menggunakan RBSM, dan hasilnya diimplementasikan sebagai material yang mewakili perkuatan eksternal beton menggunakan CFRP *sheets*.

Analisis sensitivitas multikriteria dilakukan pada model RBSM untuk mengidentifikasi parameter kunci yang memengaruhi perilaku lekatan beton-CFRP dan memungkinkan penangkapan perilaku *debonding* dengan lebih akurat. Intergrasi pengembangan model lekatan beton-CFRP disertai analisis sensitivitas multikriteria dilakukan untuk meningkatkan akurasi prediksi model numeris terhadap hasil eksperimental.