

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

*Fiber Reinforced Polymer* (FRP) merupakan material komposit yang banyak digunakan untuk metode perkuatan struktur. Kebutuhan akan perkuatan struktural, yang timbul akibat modifikasi penggunaan, pembaruan standar, deteriorasi material, identifikasi kerusakan fisik, serta berbagai aspek lain yang dapat mengakibatkan penurunan kinerja struktur (Naser, Hawileh and Abdalla, 2019; Panahi, Zareei and Izadi, 2021), menjadi unsur penting untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan bangunan. Penggunaan FRP sebagai material perkuatan eksternal semakin banyak digunakan, terutama pada daerah yang terdampak gempa bumi, karena kemampuannya dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas struktur beton bertulang (Hamrat *et al.*, 2020; Raza *et al.*, 2020; Arefian and Mostofinejad, 2021). Material perkuatan FRP memiliki berbagai macam keunggulan, di antaranya kekuatan tariknya yang tinggi, berat yang ringan (Naser, Hawileh and Abdalla, 2021; Zhang *et al.*, 2021), durabilitas yang baik (Junaid, Elbana and Altoubat, 2020; Chen *et al.*, 2021), dan kemudahan dalam aplikasinya (Wang *et al.*, 2020; Slaitas and Valivonis, 2021). Perkembangan material komposit ini telah banyak diteliti secara eksperimental, tetapi perlu dikembangkan lebih lanjut ke arah penelitian berbasis numerik, karena model numerik dapat menghemat waktu dan biaya, serta dapat memberikan informasi yang tidak dapat diperoleh dari pengamatan visual benda uji eksperimental (Rabczuk, Akkermann and Eibl, 2005; Berezhnoi, Laalai and Sekaeva, 2020)

Pengembangan analisis numerik mempunyai potensi yang kuat untuk mendukung penelitian eksperimental maupun desain struktural, khususnya dalam menangani variasi parameter yang luas dan ketidakpastian yang terkait. Pada konteks penelitian ilmiah, pemanfaatan pemodelan numerik dan pengujian eksperimental dikombinasikan sebagai pendekatan yang saling melengkapi. Luaran penelitian eksperimen memberikan data empiris, dan model numerik menawarkan pemahaman yang lebih dalam tentang mekanisme yang mendasarinya. Pemodelan numerik yang reliabel dapat mendukung penelitian eksperimen dalam memahami dan memprediksi hasil eksperimen,

mengoptimalkan desain eksperimental dan juga dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi waktu. Pemodelan numerik berbasis komputasi adalah sarana untuk melengkapi dan mengatasi data uji terbatas dan memungkinkan penyelidikan dilakukan di luar rentang parameter-parameter yang dapat dicakup oleh pengujian secara eksperimental (Meschke, Pichler and Rots, 2022). Pemodelan numerik juga dapat memberikan pandangan mengenai mekanisme yang mendasari kerusakan dan kegagalan suatu struktur serta membantu mengevaluasi prosedur eksperimen maupun desain berbasis fisik. Evaluasi pemodelan numerik secara komprehensif dapat dilakukan menggunakan beberapa kriteria utama (multi kriteria) agar hasilnya berkesesuaian dengan eksperimen.

Metode analisis berbasis numerik harus bekerja secara otomatis agar dapat digunakan secara efektif dalam ruang variabel yang lebih luas. Otomatisasi semacam ini tidak akan menggantikan kreativitas dan keterampilan teknik, melainkan akan memungkinkan peneliti maupun praktisi untuk fokus pada masalah pemodelan dan perilakunya (Bolander, Hong and Yoshitake, 2000).

Penggunaan metode numerik dalam pemodelan menuntut adanya pengembangan dan inovasi, khususnya pada model konstitutif material-material konstruksi terbaru yang berkembang pesat, salah satunya adalah penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Dalam studi mengenai perkuatan struktur beton bertulang menggunakan material CFRP, pemodelan numeris perilaku lekatan antara CFRP dan beton selama ini seringkali mengasumsikan kondisi *fullbond* atau lekatan sempurna. Asumsi idealisasi ini, meskipun menyederhanakan proses analisis, berpotensi mengakibatkan ketidakakuratan dan *over*-estimasi terhadap kekakuan maupun kapasitas aktualnya. Oleh karena itu, pengembangan pendekatan pemodelan yang mempertimbangkan perilaku *non-fullbond* pada antarmuka beton-CFRP menjadi penting untuk menghasilkan model numeris yang lebih representatif dan sesuai dengan hasil uji eksperimental. Pendekatan ini mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme struktural antara CFRP dan beton.

Pemodelan sistem komposit tersebut perlu dikembangkan lebih lanjut mengingat adanya tiga material yang terkait, yaitu beton, CFRP dan epoksi perekatnya. Penelitian ini mengembangkan suatu model material lekatan CFRP dalam penggunaannya sebagai model konstitutif pada pemodelan numerik berbasis elemen diskrit menggunakan *Rigid Body Spring Model* (RBSM)

### 1.1.1 Perkembangan Pemodelan Numerik Material Beton

*Finite element method* (FEM) merupakan metode numerik yang banyak digunakan dalam analisis masalah mekanika struktural. Metode ini sangat baik diterapkan untuk material yang bersifat kontinu dan homogen, namun demikian metode ini memiliki kelemahan dalam pemodelan material heterogen dan granular. Beton merupakan material heterogen yang memiliki variasi sifat mekanik di seluruh struktur mikroskopisnya. Homogenisasi pada material beton sering mengakibatkan FEM kurang efektif dalam menangkap kegagalan lokal serta propagasi retak terhadap pengaruh diskretisasi bentuk elemen maupun properti materialnya. Oleh karena itu, memodelkan keruntuhan material seperti beton yang cenderung mengalami retakan dan fraktur kompleks merupakan tantangan dalam pemodelan FEM. FEM sangat sensitif terhadap jenis dan ukuran *mesh*, hal tersebut dapat menyebabkan potensi ketidakakuratan dalam prediksi kegagalan atau perilaku keruntuhan. Jika ukuran *mesh* terlalu besar, FEM tidak dapat menangkap detail lokal atau retakan kecil. Di sisi lain, elemen yang terlalu kecil dapat meningkatkan kompleksitas perhitungan dan memerlukan daya komputasi yang lebih besar.

*Discrete element method* (DEM) merupakan metode numerik yang pada mulanya digunakan untuk menganalisa mekanika material granular, dan berkembang untuk material heterogen seperti beton (Cundall and St, 1979; Cundall and Hart, 1992). Metode ini memiliki keunggulan dalam memodelkan kegagalan lokal berdasarkan retakan diskrit dan perambatan retak pada struktur beton (Ma'Arif, Gao and Li, 2020). Keunggulan lain dari metode diskrit ini adalah proses *meshing* yang lebih sederhana, di mana pada FEM proses *meshing* menjadi tantangan terutama jika berhadapan dengan permasalahan perambatan retak, sambungan, atau geometri yang kompleks (Sharafisafa and Nazem, 2014). Pada pemodelan DEM hubungan antara partikel diskrit dimodelkan menggunakan gaya kontak (*contact forces*) (Gao, Koval and Chazallon, 2019).

DEM dan RBSM merupakan dua teknik numerik yang berbeda yang digunakan untuk menyimulasikan perilaku material secara diskrit. Simulasi DEM memperlakukan partikel sebagai entitas yang dapat berubah bentuk atau berdeformasi, sementara dalam RBSM menyederhanakan koneksi antar partikel sebagai benda kaku yang dihubungkan oleh kontak pegas. Perbedaan mendasar ini menghasilkan keuntungan yang signifikan dari RBSM dibandingkan DEM. Penggunaan DEM, terlepas dari keakuratannya, sering kali membutuhkan sumber daya komputasi yang besar, karena perhitungan rumit yang

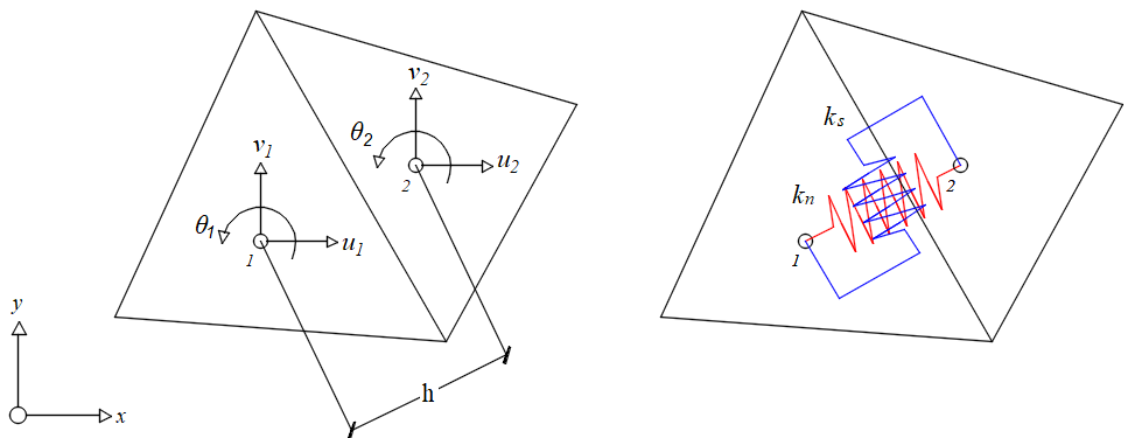
terlibat dalam deformasi partikel dan interaksi kontak. Sebaliknya, pendekatan RBSM yang disederhanakan secara signifikan mengurangi waktu komputasi, sehingga lebih efisien untuk simulasi skala besar. Selain itu, kemampuan RBSM untuk menangani geometri dan kondisi batas yang kompleks dengan lebih mudah, bila dibandingkan dengan DEM, terutama dalam skenario pemodelan interaksi kontak.

Kawai (1977) memperkenalkan alternatif konsep pemodelan diskrit bernama *Rigid Body Spring Model* (RBSM). RBSM merupakan metode yang sangat sesuai untuk memodelkan material beton secara diskrit, baik dalam skala makro maupun skala mikro (Nagai *et al.*, 2002; Nagai, Sato and Ueda, 2004). Perbedaan mendasar RBSM dengan metode DEM yaitu terkait hubungan antar elemen pada model. DEM melibatkan pemodelan interaksi di tingkat partikel individual dengan deskripsi geometri kontak yang lebih detail dan penggunaan hukum kontak material yang lebih kompleks, sementara itu RBSM menyederhanakan kontak sebagai interaksi antar elemen-elemen *rigid-body* yang dihubungkan menggunakan pegas (*springs*) yang terkoneksi pada titik pusat masing-masing elemen untuk merepresentasikan resultan perpindahan dan gaya. Perbedaan konektivitas tersebut membuat RBSM dapat dimodelkan secara lebih mudah dan sangat efisien secara komputasi numeris dalam menyimulasikan deformasi antar partikel. Interaksi pegas pada RBSM memungkinkan simulasi retak dan kegagalan material yang lebih realistis dibanding metode kontak tradisional.

### **1.1.2 Pemodelan Menggunakan Rigid Body Spring Model (RBSM)**

RBSM merupakan sebuah metode numerik di mana model dibagi-bagi menjadi elemen-elemen kaku (*rigid*) yang dihubungkan oleh pegas-pegas pada titik pusat elemen (Kawai, 1977), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.1.

Nilai  $k_n$  dan  $k_s$  merepresentasikan modulus elastis pegas normal dan geser, dengan  $h$  sebagai jarak antara pusat kedua elemen. Setiap elemen dalam RBSM memiliki dua derajat kebebasan translasi ( $u$  dan  $v$ ) dan satu derajat kebebasan rotasi ( $\theta$ ) yang terletak pada pusat titik beratnya. Elemen-elemen pada RBSM dapat bergerak secara relatif ke arah geser dan ke arah normal tarik-tekan.



Gambar 1.1 Konektivitas dua elemen RBSM

Pemodelan berbasis elemen diskrit dengan idealisasi elemen *rigid* atau kaku secara fundamental membatasi terjadinya tumpang tindih antar partikel dan mengabaikan potensi kehancuran elemen tunggal akibat interaksi. Pada pemodelan ini pengaturan bentuk *mesh* perlu diperhatikan, karena dapat memengaruhi arah retakan model, di mana retakan dimulai dan merambat di sepanjang permukaan batas elemen. Metode ini sangat sesuai digunakan untuk mengamati perilaku struktur dengan deformasi kecil dan karakteristik tersebut sesuai dengan material beton.

RBSM memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode FEM yaitu dimensi matriks kekakuan lokal yang lebih kecil (Kawai, 1977), dan dapat menyimulasikan kegagalan (*crack/failure*) serta perambatan retak secara langsung (Kawai, 1978; Kikuchi, Kawai and Suzuki, 1992; Shu, Li and Shen, 2022). Metode ini juga banyak digunakan untuk berbagai analisis struktur beton, di antaranya analisis struktur fondasi (Kawai and Takeuchi, 1997). analisis tiang jembatan (Bolander, Hong and Yoshitake, 2000), dan analisis balok-T dengan perkuatan eksternal CFRP (Purnomo *et al.*, 2023).

Dalam perkembangan selanjutnya RBSM juga digunakan dalam menyimulasikan perilaku mekanis *bond* antara beton dengan angkur (Inoue and Nagai, 2011; Eddy and Nagai, 2016) dan perilaku kegagalan geser langsung antara beton dengan material perkuatan eksternal *fiber reinforced polymer* (FRP) (Farah and Sato, 2011; Jiang, Avadh and Nagai, 2023).

Keunggulan RBSM tersebut menjadikan metode ini sesuai untuk memodelkan struktur beton dengan perkuatan eksternal CFRP. Meskipun demikian, pendekatan model konstitutif lekatan beton-CFRP dalam RBSM yang mengakomodasi respons *non-*

*fullbond* dan validasi eksperimental berbasis lentur masih sangat terbatas. Pengembangan model konstitutif elemen lekatan antara beton dan CFRP diperlukan agar model numerik dengan RBSM dapat mengaktualisasikan perilaku struktur dengan lebih sesuai.

### 1.1.3 Elemen Lekatan Antara Beton dan CFRP

Kinerja suatu elemen antara beton dengan perkuatan eksternal CFRP membutuhkan transfer tegangan dan regangan antara beton dan CFRP melalui lekatan epoksi. Performa suatu lekatan sangat penting untuk menjamin integrasi mekanis antar elemen dan kinerja dari sistem komposit tersebut (*compatibility*). Pemahaman karakter dan prediksi perilaku zona lekatan merupakan hal yang sangat menantang, dikarenakan adanya kompleksitas tegangan-regangan pada bidang lekatan, perilaku elemen yang inelastis dan berbagai parameter-parameter material beserta konfigurasinya. Studi eksisting umumnya mengasumsikan kondisi *full-bond* antara CFRP dan beton, sehingga mengabaikan efek *debonding* dan kerusakan beton yang progresif. Hal ini berpotensi menyebabkan perkiraan berlebih (*over-estimation*) kapasitas lekatan dalam simulasi numerik. Perkembangan model lekatan diperlukan dalam mendukung inovasi pemodelan numerik pada permasalahan ini.

Pendekatan permasalahan kegagalan lekatan dilakukan dengan menitikberatkan pada respons geser antara CFRP *sheets* dan epoksi. Pada kondisi lentur, respons arah normal kurang berpengaruh karena bidang lekatan dalam keadaan tertekan, sehingga respons lekatan geser akan menentukan mode kegagalan dan menentukan kapasitas struktur tersebut (Budipriyanto, Lie Han and Hu, 2018; Han, Gan and Budipriyanto, 2018).

Model lekatan empiris dikemukakan oleh Sato *et al.* (2000) dengan memperhitungkan faktor panjang efektif lekatan. Model ini digunakan untuk menyimulasikan perilaku *tension stiffening* pada perkuatan beton dengan CFRP. Kelemahan dalam simulasi model ini adalah kecenderungannya yang lebih kaku dibandingkan hasil eksperimen. Chen dan Teng (2001) merumuskan model kekuatan lekatan berbasis desain yang dikalibrasi terhadap basis data eksperimen dengan memperhitungkan pengaruh parameter CFRP dan beton. Batasan model yaitu untuk mendapatkan nilai pendekatan beban ultimit ( $P_u$ ) maupun beban layan ( $P_s$ ) dari suatu lekatan.

Pemahaman yang baik tentang sifat lekatan antara beton dengan CFRP dapat membantu tidak hanya untuk meningkatkan prediksi kapasitas beban dan perilaku

deformasi struktur, tetapi juga dapat digunakan untuk menemukan material lekatan yang sesuai, yang dapat menawarkan karakteristik lekatan yang sesuai untuk mengoptimalkan kinerja strukturnya. Penelitian ini mengembangkan model lekatan berbasis respons geser lentur, yang belum dieksplorasi dalam literatur RBSM sebelumnya.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, masalah-masalah yang perlu dicermati dalam penelitian ini meliputi :

1. Model konstitutif lekatan antara beton dengan CFRP *sheets* saat ini belum terdefinisi, khususnya dalam pendekatan ke arah pemodelan numerik. Hal ini perlu dikembangkan, sehingga model elemen lekatan beton dan CFRP *sheets* dapat memberikan luaran yang tepat dengan ketelitian tinggi.
2. Penerapan model lekatan dengan mengakomodasikan respons *non-fullbond* antara beton dan CFRP *sheets* dalam RBSM masih sangat terbatas. Pendekatan model konstitutif lekatan menggunakan mekanisme geser lentur belum pernah dilakukan dalam pemodelan RBSM.
3. Pendekatan analisis sensitivitas multikriteria untuk kasus perkuatan beton menggunakan CFRP belum dilakukan. Pendekatan ini dapat memberikan informasi terkait perilaku bond dan mengetahui parameter yang paling berpengaruh dalam pemodelannya menggunakan RBSM.

## 1.3 Perumusan Masalah

Dari identifikasi masalah yang ada di atas maka dapat dirumuskan permasalahannya sebagai berikut :

1. Bagaimana memformulasikan model konstitutif lekatan antara beton dan CFRP *sheets* dengan mempertimbangkan kondisi *non-fullbond*, untuk digunakan dalam suatu pendekatan numerik?
2. Bagaimana menganalisis kesesuaian respons dalam RBSM dalam memodelkan perkuatan eksternal beton dengan CFRP *sheets* dengan menerapkan model konstitutif tegangan-regangan lekatan?
3. Bagaimana analisis sensitivitas multikriteria pada pemodelan RBSM dapat mengidentifikasi parameter yang memengaruhi perilaku lekatan beton-CFRP dan meningkatkan akurasi prediksi?

#### 1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Perkuatan eksternal beton menggunakan CFRP, khususnya *sheets*, perlu dikembangkan lanjut ke arah pemodelan numerik menggunakan metode RBSM, untuk menghasilkan instrumen analisis yang mampu memprediksi maupun memvalidasi perilaku struktur komposit beton dengan CFRP *sheets* dengan cepat dan akurat. Berikut penjabaran dari tujuan penelitian ini :

1. Merumuskan model konstitutif lekatan beton-CFRP berbasis RBSM yang mengakomodasi respons *non-fullbond* dan validasi eksperimental.
2. Membuat pemodelan RBSM struktur beton dengan perkuatan eksternal CFRP *sheets* dengan menerapkan model material lekatan, untuk mencapai akurasi >90% dalam beban ultimit dan kesesuaian pola keruntuhan dibanding hasil eksperimen.
3. Menerapkan analisis sensitivitas multikriteria pada pemodelan RBSM untuk mengidentifikasi parameter kunci yang memengaruhi perilaku lekatan beton-CFRP dan meningkatkan akurasi prediksi model numerik terhadap hasil eksperimental.

#### 1.5 Kebaruan

Penelitian ini merupakan inovasi perumusan model konstitutif elemen lekatan pada beton dengan perkuatan eksternal CFRP *sheets*, yang selama ini diasumsikan sebagai *fullbond*. Inovasi dilakukan dengan mengakomodasi respons *non-fullbond* pada lekatan antara beton dan CFRP *sheets* dalam merumuskan model konstitutif lekatan, sehingga meningkatkan akurasi pemodelan RBSM dengan validasi eksperimen. Respons geser lekatan diukur menggunakan sensor regangan (*strain gauge*) pada tiga lokasi esensial, yaitu lekatan antara epoksi ke beton, lekatan antara epoksi ke CFRP *sheets* dan pada serat terluar CFRP *sheets*, pada pengujian lentur balok.

Analisis sensitivitas multikriteria pada model RBSM dikembangkan untuk merepresentasikan perilaku beban-perpindahan spesimen identik, yang diuji secara eksperimental di laboratorium. Evaluasi secara multikriteria pada model RBSM dilakukan untuk mengakomodasi ketidaksempurnaan benda uji eksperimental, sehingga didapatkan respons numerik yang berkesesuaian terhadap perilaku aktual spesimen. Evaluasi multikriteria yang dilakukan mencakup analisis sensitivitas terhadap tiga *Quantity of Interest* (QoI), yaitu kriteria beban puncak (*peak load*), disipasi energi dari kurva beban-perpindahan sebelum beban puncak (*energy*), dan ketangguhan struktur

melalui analisis energi yang dibutuhkan hingga struktur mengalami keruntuhan (*toughness*). Berbeda dengan model empiris Sato *et al.* (2000) yang kaku atau model Chen & Teng (2001) yang terbatas pada prediksi beban ultimit, penelitian ini mengintegrasikan kriteria keruntuhan Modified Mohr-Coulomb dan analisis sensitivitas multikriteria. Pendekatan baru ini memungkinkan penangkapan perilaku *debonding* progresif dengan lebih akurat.

## 1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk memperoleh model material lekatan epoksi antara beton dengan CFRP *sheets*, yang dapat diterapkan sebagai model konstitutif pada pemodelan numerik menggunakan RBSM. Penerapan model konstitutif yang merepresentasikan perilaku material perkuatan eksternal baru, seperti CFRP *sheets*, turut mengembangkan RBSM sebagai metode numerik yang semakin handal, terutama dalam konteks pemodelan elemen struktur beton komposit. Model konstitutif lekatan ini dapat diimplementasikan pada bahasa pemrograman lain, dengan dasar perilaku konektivitas pegas yang serupa.

## 1.7 Pembatasan Masalah

Beberapa batasan masalah pada penelitian ini antara lain :

1. Karakteristik mekanis dan spesifikasi material CFRP *sheets* beserta perekat epoksi yang digunakan dalam penelitian ini diringkas dalam Tabel 1.1, dengan dokumentasi teknis selengkapnya tersedia pada Lampiran C.

Tabel 1.1 Properti material CFRP

|                                    | CFRP <i>sheets</i> | Epoxy resin |
|------------------------------------|--------------------|-------------|
| <i>Modulus of elasticity</i> (MPa) | 235.000            | 4500        |
| <i>Tensile strength</i> (MPa)      | 3500               | 30          |
| <i>Thickness</i> (mm)              | 0,331              | -           |

2. Persiapan permukaan beton sebelum aplikasi CFRP *sheets* dilakukan dengan metode *grinding*.
3. Model material RBSM didasarkan pada kontribusi lekatan lembaran CFRP *sheets* dalam mendukung perilaku geser-lentur. Validasi model dilaksanakan melalui pengujian balok lentur menggunakan metode pembebanan tiga titik (*three-point loading*), dengan spesimen balok beton polos berkekuatan tekan ( $f_c$ ) 33,6 MPa.

4. Simulasi numerik dua dimensi (2D) menggunakan *Rigid Body Spring Model* (RBSM) menggunakan elemen *isotropic plane stress*.
5. *Residual strain* yang diakibatkan oleh berat sendiri maupun beban layan awal (*initial service load*) diabaikan dalam proses pengujian eksperimental dan pemodelan RBSM.