

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perubahan pada standar desain struktur gedung membuat kebutuhan desain meningkat (Tudjono et al., 2017). Hal ini membuat struktur gedung yang telah berdiri memiliki kemungkinan tidak dapat memenuhi persyaratan kekuatan dalam standar desain yang baru sehingga diperlukan perkuatan struktur (Panahi et al., 2021). Tipe perkuatan yang umum dilakukan adalah perkuatan menggunakan struktur baja maupun beton. Namun, perkuatan menggunakan struktur baja maupun beton dapat mengurangi ruang gedung. Beberapa dekade belakangan ini, metode perkuatan menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) banyak ditinjau karena kelebihanannya dibandingkan metode sebelumnya (Gravina et al., 2012).

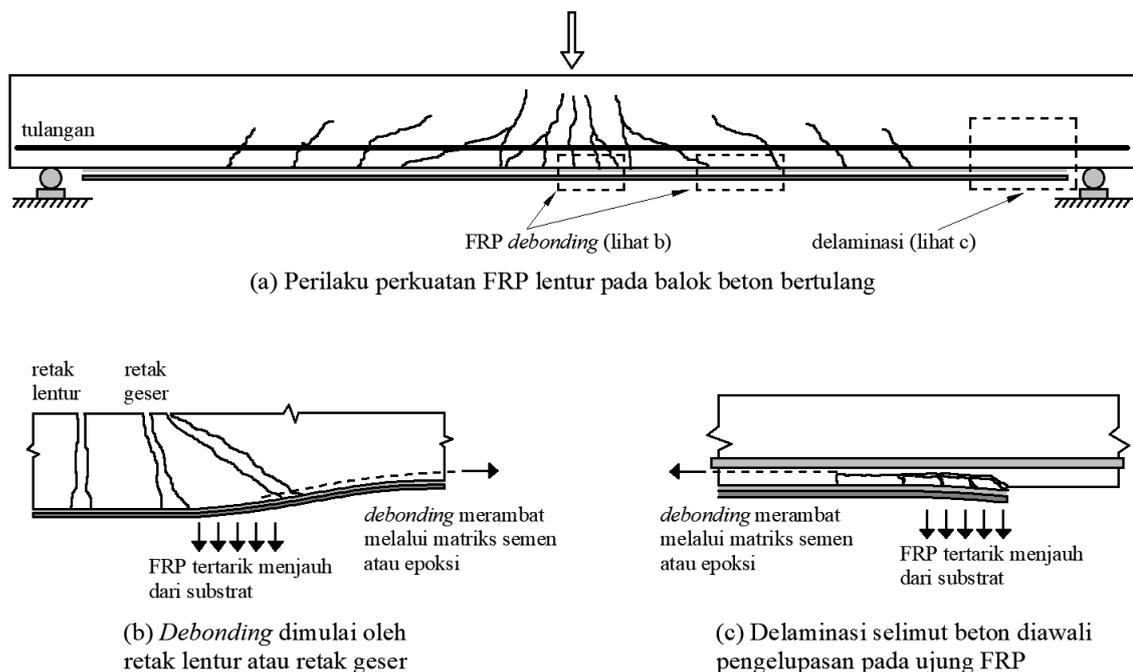
1.1.1. CFRP Sebagai Material Perkuatan Eksternal

FRP sangat efektif digunakan sebagai material perkuatan dalam menahan beban dinamis, seperti beban gempa, beban dampak, dan beban eksplosif (Yuan et al., 2020). Di antara metode perkuatan yang ada, perkuatan menggunakan FRP merupakan salah satu metode perkuatan yang sedang banyak diteliti (Gravina et al., 2012). Hal ini dikarenakan material FRP memiliki keunggulan, meliputi kapasitas tegangan tarik yang tinggi (Arefian & Mostofinejad, 2021; Hamrat et al., 2020), ringan (Naser et al., 2021; Zhang, Lv, et al., 2021), tahan korosi (Helal et al., 2020; Mhanna et al., 2021), durabilitas tinggi (Chen et al., 2021; Junaid et al., 2020), ketahanan *fatigue* tinggi (Han et al., 2018; Zhang, Hu, et al., 2021), dan kemudahan pengaplikasian (Slaitas & Valivonis, 2021; X. Wang et al., 2020).

Perkuatan menggunakan FRP dapat meningkatkan kapasitas pemikulan beban, kekakuan elemen struktur, dan daktilitas (Teng & Chen, 2009; Utomo et al., 2021). Salah satu jenis FRP yang sering digunakan sebagai material perkuatan adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dengan kelebihan memiliki kuat tarik tertinggi di antara jenis lainnya (Helal et al., 2020; Lam & Teng, 2003). Perkuatan menggunakan CFRP meliputi sistem serat kain (*sheet*), pelat (*plate*), batang tulangan (*rod*), dan garis (*strip*). Sistem

perkuatan serat kain, pelat, dan garis merupakan jenis perkuatan eksternal (*externally bonded reinforcement, EBR*), sedangkan sistem batang tulangan merupakan jenis perkuatan dekat muka beton (*nearly surface mounted, NSM*).

Sistem perkuatan EBR, khususnya menggunakan serat kain maupun pelat, sangat tergantung pada lekatan (*bond*) antara sistem perkuatan dengan permukaan beton. Kapasitas ultimit sistem perkuatan FRP menggunakan metode ini sering tidak dapat tercapai karena terjadi *debonding*, yaitu lepasnya FRP dari permukaan beton. Mode kegagalan yang mungkin terjadi pada sistem perkuatan ini di antaranya adalah kegagalan lentur akibat *FRP rupture, compressive concrete crush*, kegagalan geser (*shear failure*), *concrete cover separation (concrete peeling)*, *plate end debonding*, dan *intermediate crack debonding* (Smith & Teng, 2003; Teng et al., 2003). Kegagalan akibat *debonding* terjadi pada sistem perkuatan lentur, di mana FRP diaplikasikan pada serat tarik beton (Teng et al., 2003), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Kegagalan *Debonding* pada Sistem Perkuatan Lentur FRP

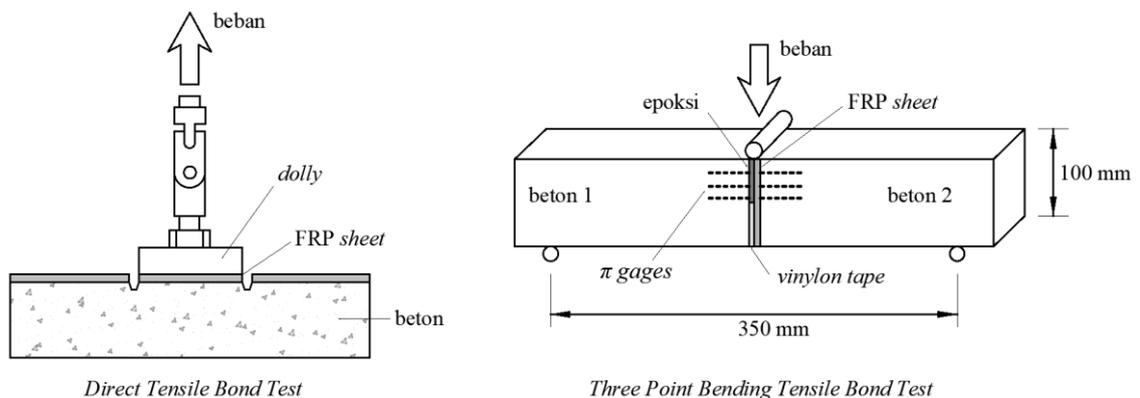
(ACI-Committee-440, 2017)

1.1.2. Tinjauan Model Lekatan (*Bond*) antara FRP dan Beton

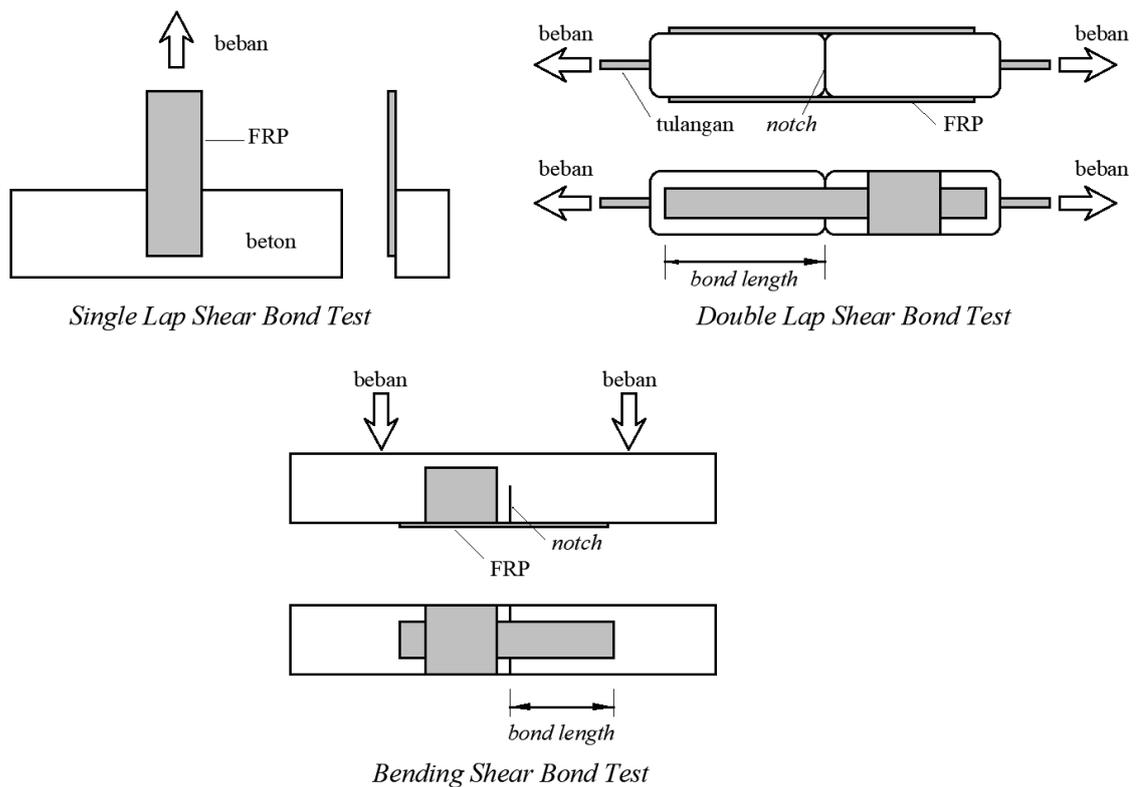
Risiko kegagalan *debonding* harus diminimalkan agar kapasitas sistem perkuatan FRP dapat tercapai secara optimal (ACI-Committee-440, 2017). Penelitian mengenai model

bond, baik dalam bentuk model kekuatan *bond* (*bond strength*) maupun model tegangan-regangan/*slip bond* (*bond stress-strain/slip*), terus dilakukan beberapa dekade belakangan ini. Model lekatan yang dikaji umumnya dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yaitu model empiris, model mekanika fraktur, dan model berbasis desain (Chen & Teng, 2001) . Model empiris merupakan model yang didasarkan pada sejumlah besar hasil pengujian spesimen dan diolah melalui analisis regresi. Model mekanika fraktur merupakan model yang didasarkan pada prinsip-prinsip dalam mekanika fraktur, di mana model dikontrol melalui parameter energi fraktur. Kategori model ketiga adalah model yang ditujukan untuk keperluan desain sehingga dapat merupakan kombinasi antara dua model sebelumnya dan pada umumnya tingkat kompleksitas formula direduksi dan diberikan faktor keamanan untuk memberikan hasil desain yang konservatif.

Berdasarkan karakter responsnya, model *bond* dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu model kekuatan *bond* dan model tegangan-regangan *bond*. Model kekuatan *bond* dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas tegangan *bond* maupun *slip* maksimum. Sementara itu, model tegangan-regangan *bond* dapat memberikan respons histeresis tegangan *bond* dan *slip* yang bersesuaian. Dengan demikian, model ini dapat digunakan untuk memodelkan perilaku sesungguhnya dari masalah yang dimodelkan. Masing-masing model dapat dikembangkan melalui pengujian *bond*, meliputi uji *bond* geser satu lapis (*single lap shear bond test*), uji *bond* geser dua lapis (*double lap shear bond test*), uji *bond* geser lentur (*bending shear bond test*), dan uji *bond* normal tarik (*pulloff tensile bond test*) (Ueda & Dai, 2005), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.2. dan Gambar 1.3.



Gambar 1.2. Metode Pengujian *Bond* Normal Tarik (Ueda & Dai, 2005)



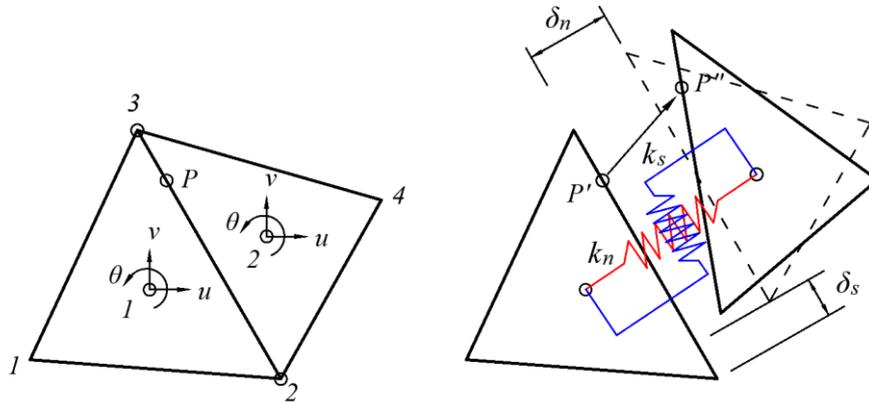
Gambar 1.3. Metode Pengujian *Bond* Geser (Ueda & Dai, 2005)

Selain menggunakan metode pengujian eksperimental, model *bond* juga dapat diformulasi berdasarkan studi parametrik menggunakan metode *Finite Element Model* (FEM). Beberapa model *bond* antara tulangan baja dan beton dapat diaplikasikan sebagai model *bond* antara FRP dan beton (Cosenza et al., 1997). Beberapa model tegangan-regangan lekat beton dan FRP yang telah diimplementasikan pada FEM dapat ditemukan pada beberapa penelitian (Lu, Ye, et al., 2005; Sasmal et al., 2012).

1.1.3. Metode *Rigid Body Spring Model* (RBSM)

Rigid Body Spring Model (RBSM) merupakan sebuah metode analisis, di mana domain model dibagi menjadi elemen-elemen kaku (*rigid*) yang dihubungkan pegas-pegas pada titik pusat elemen (Kawai, 1977), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.4. Metode ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode FEM, meliputi dimensi matriks kekakuan lokal lebih kecil (Kawai, 1977), *running time* lebih singkat (Kawai & Toi, 1977), dan dapat menyimulasikan retak secara langsung (Kawai, 1978). Pada awal pengembangannya, metode ini telah banyak digunakan untuk berbagai analisis, seperti analisis batas elemen struktur (Kawai, 1977), vibrasi elemen struktur dan struktur portal

sederhana (Kawai, 1978), simulasi perambatan retak (Kikuchi et al., 1992), analisis struktur fondasi (Kawai & Takeuchi, 1997), serta simulasi patahan lempeng tektonik (Kawai, 1978).



Gambar 1.4. Kinematika Perpindahan Elemen dalam RBSM

Dalam perkembangan selanjutnya, RBSM banyak digunakan untuk menyimulasikan berbagai perilaku material dan elemen struktur beton. Terkait perilaku *bond* geser, RBSM telah diimplementasikan untuk memodelkan *bond*, baik antara tulangan baja dengan beton maupun antara FRP dan beton. Nagai & Eddy (2016) dan Eddy et al. (2020) memodelkan pengaruh angkur mekanis dalam meningkatkan kapasitas *joint* balok-kolom. Inoue & Nagai (2011) mengimplementasikan model *bond* Shima et al. (1987) untuk menyimulasikan pola retak beton dan performa angkur pada beton. Siamakani et al. (2020) mengimplementasikan material perekat pada simulasi perilaku angkur pascacor.

Pemodelan *bond* antara FRP dan beton dalam RBSM untuk menyimulasikan perilaku perkuatan elemen struktur beton menggunakan FRP telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Farah & Sato (2007) menggunakan model *bond* (Dai et al., 2005) untuk memodelkan perilaku perkuatan balok beton bertulang menggunakan lembaran FRP dengan variasi jumlah lapis perkuatan. Berdasarkan hasil simulasi, model RBSM mampu memperlihatkan mode kegagalan *debonding*. Farah & Sato (2011) mengadopsi model *bond stress-slip* Sato et al. (2000) untuk memodelkan spesimen tarik beton dengan FRP sebagai pengembangan metode pengujian *double lap shear bond test*. Kedua penelitian tersebut dilakukan dengan mengimplementasikan model *bond* antara FRP dan beton

berdasarkan *shear bond test*, sehingga pengaruh perilaku normal tarik dari *bond* tidak secara eksplisit ditinjau.

1.1.4. State of the Art

Rangkuman penelitian yang telah dilakukan mengenai model *bond* antara FRP dan beton diperlihatkan dalam Tabel 1.1. Metode pengujian yang umum digunakan untuk mengukur respons *bond* geser meliputi *single lap shear bond test*, *double lap shear bond test*, dan *bending shear bond test*, sedangkan untuk mengukur respons *bond* normal tarik dapat digunakan *pulloff tensile bond test*. Pengujian menggunakan *peeling bond test* (Karbhari & Engineer, 1996) untuk mendapatkan respons *bond* geser jarang dilakukan oleh para peneliti lain karena pengaturan instrumen pengujian yang kompleks. Pengujian menggunakan empat metode sebelumnya lebih umum digunakan.

Masing-masing model *bond* dalam Tabel 1.1 dikembangkan berdasarkan pengukuran respons *bond* geser antara FRP dan beton. Pengukuran tersebut umumnya didapatkan dengan cara menempatkan serangkaian *strain gauge* dalam jumlah banyak dan ditempatkan dalam jarak dekat pada sisi terluar sistem perkuatan FRP. Dai et al. (2005) menggunakan LVDT untuk mengukur perpindahan relatif antara FRP dan beton dalam menentukan respon *bond* geser. Metode pengukuran yang telah dilakukan, baik menggunakan *strain gauge* maupun LVDT, mengukur respons geser secara tidak langsung lapisan *bond* melalui respons terluar sistem. Pengukuran secara langsung dapat dilakukan dengan menempatkan *strain gauge* pada epoksi yang digunakan sebagai material perekat antara FRP dan beton.

Dalam Tabel 1.1, metode kalibrasi model dapat digolongkan berdasarkan regresi data eksperimen, FEM, maupun RBSM. Keberhasilan model yang didasarkan pada metode regresi data sangat tergantung jumlah data yang digunakan. Namun, model kekuatan *bond* seperti rumusan oleh Chen & Teng (2001) merupakan salah satu model yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar desain. Metode lain untuk melakukan kalibrasi model adalah menggunakan FEM. Model hasil kalibrasi menggunakan FEM merupakan model tegangan-regangan *bond* sehingga dapat menggambarkan secara realistis perilaku sistem perkuatan struktur menggunakan FRP. RBSM sebagai metode kalibrasi model tegangan-regangan *bond* antara FRP dan beton dilakukan oleh Farah &

Sato (2007, 2011). Namun, model yang digunakan dalam penelitian tersebut tidak memperhitungkan respons *bond* normal tarik.

Tabel 1.1. State of the Art

Kategori Model	Peneliti	Jenis FRP	Metode Persiapan	Metode Pengujian	Instrumen	Model Bond
Model Empiris	(Bizindavyi & Neale, 1999)	CG sheet	sand blast, air blast	single lap shear bond test	strain gauge dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	perhitungan tegangan geser hasil eksperimen dilakukan <i>curve fitting</i> terhadap fungsi kubik.
	(Yao et al., 2005)					-
	(Dai et al., 2005)	C sheet	-	bending shear bond test pulloff tensile bond test	strain gauge dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	-
Model Fraktur Mekanis	(Dai et al., 2005)	ACG sheet	sand blast	single lap shear bond test	LVDT pada ujung bebas dan ujung dibebani untuk mengukur perpindahan relatif antara FRP dan beton	model <i>bond stress-slip</i> geser berdasarkan energi fraktur dan indeks daktilitas
	(Täljsten, 1997)	C plate	-		strain gauge dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	model <i>bond</i> geser berdasarkan asumsi material homogen dan linier, serta memperhitungkan ketebalan lapisan epoksi
	(Leung, 2001)					-
	(Karbhari & Engineer, 1996)	C sheet	-	peeling bond test	teoritis tanpa strain gauge, 2 plies FRP	model <i>bond</i> geser berdasarkan kontribusi

						energi fraktur mode I (<i>opening</i>) dan mode II (<i>shear</i>)
	(Brosens & Gemert, 1997)		-	<i>single lap shear bond test</i>	<i>strain gauge</i> dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	model <i>bond strength</i> berdasarkan parameter kekakuan relatif FRP dan beton, dan energi fraktur
	(De Lorenzis et al., 2001)		<i>grinding, mech. abrasion, sand blast</i>	<i>bending shear bond test</i>		model <i>bond stress-slip</i> geser berdasarkan energi fraktur
	(Ueda & Dai, 2005)		-	<i>single lap shear bond test</i>	LVDT pada ujung bebas dan ujung dibebani untuk mengukur perpindahan relatif antara beton dan FRP	model <i>bond stress-slip</i> geser berdasarkan energi fraktur dan indeks daktilitas model <i>bond stress-slip</i> tarik dengan <i>exponential softening</i>
Model Basis Desain	(Chen & Teng, 2001)	CG sheet	-	<i>single lap shear bond test</i> <i>double lap shear bond test</i>	data literatur	model <i>bond strength</i> dengan memperhitungkan parameter mutu material dan pengaruh geometris
FEM	(Lu, Teng, et al., 2005)	C plate	-	<i>single lap shear bond test</i>	data literatur	model <i>bond stress-slip</i> berdasarkan simulasi FEM; <i>precise model, bilinear model, simplified model</i>
	(Lu, Ye, et al., 2005)		-			model <i>bond stress-slip</i> berdasarkan simulasi FEM; meninjau <i>linear</i> dan <i>bilinear softening</i>

RBSM	(Farah & Sato, 2007)	C sheet	-	<i>bending shear bond test</i>	<i>strain gauge</i> dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	implementasi model <i>bond stress-slip</i> Dai et al. (2005)
	(Farah & Sato, 2011)		-	<i>double lap shear bond test</i>	<i>strain gauge</i> dipasang pada jarak rapat di muka terluar FRP	implementasi model <i>bond stress-slip</i> Sato et al. (2000)
	Penelitian Pengembangan Model Bond Antara CFRP dan Beton Menggunakan Rigid Body Spring Model		<i>grinding</i>	<i>bending shear bond test</i> <i>pulloff tensile bond test</i>	<i>strain gauge</i> dipasang pada lapisan epoksi antara FRP dan beton untuk spesimen <i>bending shear bond test</i> <i>crack clip</i> dipasang pada spesimen <i>pulloff tension bond test</i>	Dikembangkan

Catatan :

A = *aramid fiber reinforced polymer* (AFRP), C = *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP),

G = *glass fiber reinforced polymer* (GFRP)

Berdasarkan Tabel 1.1 terlihat bahwa pengembangan model *bond* untuk respons geser dan normal tarik, serta dikalibrasi menggunakan model RBSM masih belum banyak dikaji. Metode pengukuran respons *bond* geser secara langsung pada lapisan epoksi antara CFRP dan beton juga belum dilakukan. Dalam penelitian disertasi ini, pengembangan model dikhususkan pada *bond* antara FRP jenis karbon (CFRP) dan beton dengan mempertimbangkan respons geser dan normal tarik, serta dikalibrasi menggunakan *Rigid Body Spring Model*. Selanjutnya dalam naskah digunakan istilah CFRP untuk menggantikan istilah umum FRP.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, masalah-masalah terkait penelitian disertasi pengembangan model *bond* antara CFRP dan beton dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Pengukuran respons *bond* antara CFRP dan beton pada umumnya dilakukan melalui pengujian *single/double lap shear bond test*. Instrumen *strain gauge* umum ditempatkan pada serat terluar CFRP serta dipasang dalam jumlah banyak dan jarak berdekatan. Penempatan *strain gauge* pada serat terluar CFRP dapat menimbulkan

bias pengukuran karena respons yang diukur merepresentasikan perilaku keseluruhan sistem perkuatan CFRP mencakup CFRP, epoksi, serta beton itu sendiri. Bias pengukuran ini dapat diminimalkan melalui pengukuran langsung respons *bond* antara CFRP dan beton dengan menempatkan *strain gauge* dua lapis pada lapisan epoksi primer antara CFRP dan beton.

2. Metode *Rigid Body Spring Model* umum diformulasikan untuk menganalisis struktur beton bertulang. Program berbasis metode ini perlu dikembangkan untuk dapat mengimplementasikan model *bond* dan model material CFRP agar dapat menyimulasikan perilaku elemen struktur balok beton dengan CFRP.
3. Model *bond* antara CFRP dan beton pada umumnya diformulasikan terhadap aksi geser. Dalam simulasi, elemen *bond* dimungkinkan menerima kombinasi aksi geser dan normal tarik. Agar dapat mengakomodasi mekanisme tersebut, formulasi model *bond* perlu dikembangkan untuk dapat merepresentasikan aksi geser maupun normal tarik beserta dengan kombinasinya.
4. Dalam pemodelan elemen struktur beton dengan perkuatan CFRP, lekatan antara CFRP dan beton dapat dimodelkan secara lekat penuh (*full bond*) maupun dengan menggunakan elemen *bond*. Pemodelan menggunakan *full bond* secara umum akan menghasilkan perilaku menyimpang dengan kekakuan awal model lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian eksperimental. Elemen *bond* dapat dikembangkan dan diimplementasikan dalam *Rigid Body Spring Model*. Performa setelah dikembangkan dengan menambahkan model *bond* perlu dievaluasi atau dikalibrasi terhadap hasil pengujian eksperimental.
5. Model yang dikembangkan dapat digunakan sebagai instrumen (*tools*) dalam studi parametrik untuk mendapatkan hasil yang dapat diaplikasikan secara langsung. Salah satu parameter penting dalam studi parametrik yang dapat dilakukan adalah variasi luasan penampang CFRP terhadap peningkatan kapasitas balok beton dengan CFRP.
6. Metode *Rigid Body Spring Model* merupakan metode dengan beberapa kelebihan dibandingkan metode sejenis seperti *Finite Element Model*. Pemahaman mendalam mengenai metode ini diperlukan agar dapat menentukan model yang optimal. Oleh karena itu, analisis sensitivitas model diperlukan untuk mempelajari pengaruh parameter seperti properti material beton, densitas elemen, tahapan pembebanan, dan pengaruh simetri struktur *mesh* terhadap respons model. Model optimal yang

didapatkan dari hasil analisis sensitivitas ini dapat digunakan sebagai model acuan dalam analisis lebih lanjut.

1.3. Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dipaparkan, perumusan masalah dalam penelitian disertasi ini ditetapkan sebagai berikut.

1. Bagaimana mengukur properti *bond* geser dan *bond* normal tarik antara CFRP dan beton melalui pengujian eksperimental?
2. Bagaimana mengembangkan program berbasis *Rigid Body Spring Model* sehingga dapat mengakomodasi model *bond* geser dan *bond* normal tarik, serta material CFRP?
3. Bagaimana memformulasikan model *bond* geser dan *bond* normal tarik antara CFRP dan beton.
4. Bagaimana mengevaluasi performa pemodelan setelah model *bond* geser dan *bond* normal tarik diimplementasikan?
5. Bagaimana pengaruh variasi parameter lebar CFRP terhadap kapasitas balok beton yang diperkuat dengan CFRP?
6. Bagaimana mengevaluasi sensitivitas model terhadap parameter material beton, densitas elemen, tahap pembebanan, dan pengaruh simetri struktur *mesh*?

1.4. Maksud dan Tujuan

Penelitian disertasi ini bermaksud mengembangkan model *bond* antara CFRP dan beton menggunakan metode *Rigid Body Spring Model*. Untuk dapat mencapai maksud tersebut, beberapa tujuan penelitian ditetapkan.

1. Mengukur properti material *bond* geser dan *bond* normal tarik melalui pengujian eksperimental.
2. Mengembangkan program berbasis *Rigid Body Spring Model* sehingga dapat mengakomodasi pemodelan *bond* geser dan *bond* normal tarik, serta material CFRP.
3. Memformulasikan model *bond* geser dan *bond* normal tarik antara CFRP dan beton.
4. Mengevaluasi performa pemodelan setelah model *bond* geser dan *bond* normal tarik diimplementasikan.

5. Mengevaluasi pengaruh variasi parameter lebar CFRP terhadap kapasitas balok beton diperkuat dengan CFRP.
6. Mengevaluasi sensitivitas model terhadap parameter material beton, densitas elemen, tahap pembebanan, dan pengaruh simetri struktur *mesh*.

1.5. Kebaruan (*Novelties*)

Berdasarkan hasil analisis *state of the art* penelitian terkait pemodelan *bond* antara CFRP dan beton, kebaruan (*novelties*) dalam penelitian disertasi ini meliputi:

1. Pengembangan model *bond* geser dan *bond* normal tarik antara CFRP dan beton menggunakan elemen *isotropic plane stress* 2D dalam metode berbasis *Rigid Body Spring Model*.
2. Pengukuran respons *bond* geser melalui penempatan *strain gauge* dua lapis pada lapisan epoksi primer dalam pengujian lentur balok.
3. Hubungan rasio lebar CFRP/beton terhadap peningkatan kapasitas perkuatan lentur CFRP pada balok beton polos.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian disertasi ini diharapkan dapat memberikan manfaat, baik secara akademis maupun praktis.

1. Secara akademis penelitian disertasi ini memberikan informasi mendalam mengenai perilaku elemen struktur balok beton yang diperkuat dengan CFRP. Informasi yang diperoleh berupa perilaku beban-perpindahan, pola retak, kontur tegangan, kontur regangan, serta kontur indeks plastis.
2. Secara praktis penelitian disertasi ini dapat menjadi alat (*tools*) untuk mengestimasi beban ultimit dan perpindahan maksimum elemen struktur balok beton yang diperkuat dengan CFRP. Studi parametrik dalam penelitian disertasi ini dapat digunakan sebagai informasi mengenai peningkatan kapasitas balok beton yang diperkuat CFRP dengan persentase luasan tertentu.

1.7. Pembatasan Masalah

Ruang lingkup penelitian disertasi ini dibatasi sesuai dengan butir-butir berikut.

1. Material beton dimodelkan sebagai model bilinear dalam aksi tekan dan linier dalam aksi tarik.
2. Material CFRP dimodelkan sebagai model linier.
3. Material epoksi (elemen *bond*) dimodelkan sebagai model bilinear.
4. Material tulangan baja dimodelkan sebagai model elastis-plastis sempurna.
5. Model menggunakan elemen *isotropic plane stress 2D* dan *orthotropic plane stress 2D*.
6. Spesifikasi material beton didasarkan pada hasil pengujian eksperimental.
7. Spesifikasi material CFRP didasarkan pada spesifikasi teknis Sikawrap-231C.
8. Spesifikasi material epoksi didasarkan pada spesifikasi teknis Sikadur-330.
9. Struktur *mesh* merupakan kombinasi elemen segitiga dan segi empat.
10. Model dikalibrasi terhadap spesimen uji lentur balok beton dengan CFRP.
11. Pengembangan program *Rigid Body Spring Model* menggunakan MATLAB.

1.8. Sistematika Penulisan

Disertasi ini dijabarkan dalam enam bab, meliputi Pendahuluan, Kajian Pustaka, Metode Penelitian, Hasil dan Analisis Data, Pembahasan Hasil Penelitian, serta Kesimpulan dan Saran. Deskripsi singkat masing-masing bab sebagai berikut.

Bab 1 Pendahuluan

Pendahuluan meliputi latar belakang, identifikasi masalah, perumusan masalah, maksud dan tujuan, kebaruan (*novelties*), manfaat penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Latar belakang memaparkan kajian singkat mengenai material CFRP sebagai material perkuatan eksternal, kajian mengenai tinjauan model *bond* antara CFRP dan beton, kajian mengenai metode *Rigid Body Spring Model*, yang diakhiri dengan pemaparan *state of the art* penelitian disertasi ini. Masalah-masalah yang ada diidentifikasi serta dirumuskan. Maksud dan tujuan penelitian ditetapkan untuk menyelesaikan permasalahan yang telah diidentifikasi. Kebaruan (*novelties*) dalam penelitian disertasi ini dipaparkan beserta dengan manfaat penelitian bagi dunia akademis maupun praktis. Pembatasan masalah ditetapkan untuk membatasi ruang lingkup penelitian dan menjaga fokus penelitian. Sistematika penulisan memaparkan gambaran secara singkat isi masing-masing bagian dalam naskah disertasi.

Bab 2 Kajian Pustaka

Kajian Pustaka memuat tinjauan pustaka mengenai model konstitutif material, kriteria kegagalan material, prosedur analisis non-linier, struktur *mesh*, kerangka berpikir, dan hipotesis penelitian. Model material konstitutif meliputi model *bond*, material CFRP, material beton, dan material tulangan baja. Kriteria kegagalan menjelaskan mengenai kriteria Mohr-Coulomb termodifikasi yang digunakan dalam pengembangan model. Prosedur analisis non-linier memuat gambaran metode yang digunakan dalam menyelesaikan iterasi non-linier. Struktur *mesh* membahas mengenai metode dan elemen yang digunakan untuk membagi domain kasus yang ditinjau. Kerangka berpikir menguraikan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan yang ada dalam mencapai tujuan penelitian disertai. Hipotesis penelitian memuat dugaan dalam penelitian terkait tujuan penelitian yang kemudian dijawab dalam kesimpulan.

Bab 3 Metode Penelitian

Metode Penelitian meliputi pengujian material beton, desain penelitian, *Rigid Body Spring Model*, pengujian eksperimental, dan pemodelan. Pengujian material beton merupakan penelitian eksperimental dasar untuk mendapatkan properti material beton. Desain penelitian menjelaskan mengenai kerangka metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penelitian. *Rigid Body Spring Model* menjelaskan mengenai perumusan elemen-elemen yang digunakan serta implementasi dalam pengembangan program. Pengujian eksperimental menguraikan mengenai jenis pengujian yang digunakan untuk mendapatkan respons *bond* geser dan normal tarik yang digunakan dalam pemodelan. Pemodelan meliputi penjelasan mengenai model-model yang digunakan dalam analisis sensitivitas, metode kalibrasi model terhadap hasil pengujian eksperimental, dan model yang digunakan dalam studi parametrik.

Bab 4 Hasil dan Analisis Data

Hasil dan Analisis Data memuat kompilasi hasil penelitian, meliputi hasil pengujian eksperimental, model *bond*, hasil analisis sensitivitas, hasil kalibrasi model dan hasil studi parametrik. Hasil pengujian eksperimental mencakup hasil pengujian lentur balok beton dengan CFRP dan pengujian *pulloff* pelat beton dengan CFRP yang digunakan untuk mendapatkan respons *bond* geser dan *bond* normal tarik. Respons *bond* yang telah didapatkan dari pengujian eksperimental kemudian diformulasikan menjadi model *bond* dan diimplementasikan ke dalam program yang telah dikembangkan. Hasil analisis sensitivitas memuat sensitivitas model terhadap berbagai parameter meliputi modulus elastisitas beton, tegangan tarik beton, regangan tarik beton, faktor *tension softening* beton, densitas elemen, tahap pembebanan, serta pengaruh simetri struktur *mesh*. Hasil kalibrasi model memaparkan mengenai rasio properti material terkalibrasi terhadap nilai awal, di mana nilai tersebut dapat digunakan sebagai parameter dalam analisis sejenis menggunakan program yang telah dikembangkan. Studi parametrik memuat hasil penggunaan program untuk mempelajari pengaruh parameter lebar CFRP terhadap kapasitas balok beton dengan perkuatan CFRP.

Bab 5 Pembahasan Hasil Penelitian

Pembahasan Hasil Penelitian menguraikan secara lebih luas hasil yang telah dipaparkan pada Bab Hasil dan Analisis Data. Bab ini memuat pembahasan mengenai hasil pengujian eksperimental, pembahasan hasil analisis sensitivitas, pembahasan hasil kalibrasi model, pembahasan hasil model parametrik, pengujian hipotesis, serta pembahasan mengenai keterbatasan model dan program. Dalam pembahasan hasil pengujian eksperimental dibahas mengenai kendala yang dihadapi serta peluang studi eksperimental di masa mendatang. Pembahasan hasil analisis sensitivitas ditekankan pada pengaruh densitas elemen, pengaruh tahap pembebanan, serta pengaruh simetri struktur *mesh*. Pembahasan hasil kalibrasi model meliputi diskusi lebih luas dalam hal mode kegagalan, kurva beban-perpindahan, serta distribusi regangan pada elemen *bond*. Pembahasan hasil model parametrik memuat diskusi singkat mengenai keselarasan hasil studi parametrik dengan penelitian yang sudah dipublikasikan serta potensi pengembangan model di masa mendatang. Pengujian hipotesis menguraikan keberhasilan kompilasi analisis hasil penelitian dalam menjawab hipotesis penelitian yang diajukan.

Keterbatasan model dan program menguraikan mengenai keterbatasan model *bond* yang digunakan, keterbatasan *Rigid Body Spring Model*, serta keterbatasan program yang dikembangkan.

Bab 6 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan Saran terdiri dari subbab Kesimpulan dan subbab Saran. Kesimpulan memuat butir-butir penting yang menjadi temuan dalam penelitian disertasi ini terkait dengan permasalahan, tujuan, dan hipotesis penelitian. Saran meliputi aspek-aspek yang dapat dikembangkan pada penelitian di masa mendatang.