

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Model Konstitutif Material

Model material konstitutif dalam penelitian disertasi ini meliputi model material *bond*, model material CFRP, model material beton, dan model material tulangan baja.

2.1.1. Model Material Konstitutif *Bond*

Model material konstitutif *bond* antara CFRP dan beton meliputi model Sato et al. (2000), model Dai et al. (2005) dan model Chen & Teng (2001).

2.1.1.1. Model Sato et al. (2000)

Model Sato et al. (2000) merupakan sebuah model *bond* empiris dengan memperhitungkan parameter panjang efektif *bond*, modulus elastisitas, tebal, dan lebar CFRP, serta parameter tegangan tekan ultimit beton. Model ini telah diimplementasikan dalam RBSM oleh Farah & Sato (2011) untuk menyimulasikan perilaku *tension stiffening* pada elemen struktur beton bertulang dengan CFRP. Hubungan tegangan *bond* geser-slip pada zona prabeban-puncak dan zona pascabeban-puncak diperlihatkan pada Persamaan (2.1) dan (2.2), serta slip pada tegangan *bond* maksimum dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2.3). Hasil simulasi menggunakan model ini menunjukkan kecenderungan lebih kaku dibandingkan hasil eksperimen.

$$\tau = \frac{148s}{1+1000\varepsilon} f_c'^{0,2} \quad (2.1)$$

$$\tau = \tau_{maks} \cdot e^{-10(s-s_1)} \quad (2.2)$$

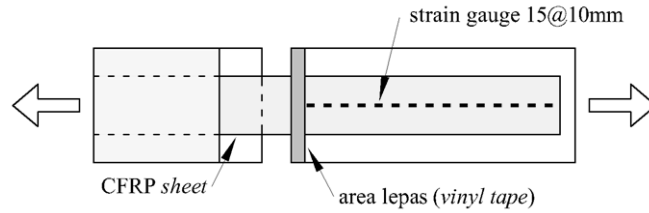
$$\tau_{maks} = 9,1 f_c'^{0,2} t E_f \times 10^{-5} \leq 3,49 f_c'^{0,2} \quad (MPa)$$

$$s_1 = 0,8 \times 10^{-2} (t_f E_f)^{0,4} f_c'^{0,2} \quad \begin{array}{ll} t_f E_f \leq 38,4 & GPa.mm \\ t_f E_f > 38,4 & GPa.mm \end{array} \quad (2.3)$$

$$s_1 = \frac{3100}{t_f E_f} f_c'^{0,2}$$

Metode pengujian respons *bond* geser model Sato et al. (2000) diperlihatkan pada Gambar 2.1. Metode pengujian yang digunakan adalah *single lap shear bond test*. Lembar CFRP dipasang pada dua blok beton dengan panjang *bond* berbeda. CFRP dengan

panjang *bond* pendek diberikan perkuatan CFRP yang dipasang melintang dengan tujuan kegagalan tidak terjadi pada lokasi tersebut. Pada lembar CFRP dengan lekatan lebih panjang dipasang *strain gauge* dalam jumlah banyak dan jarak berdekatan. Pengujian ini memerlukan ketelitian dalam persiapan instrumen (*setup*), ketelitian laju pembebanan, dan jumlah *strain gauge* yang banyak.



Gambar 2.1. Pengujian Respons *Bond* Geser Model Sato et al. (2000)

2.1.1.2. Model Dai et al. (2005)

Model Dai et al. (2005) merupakan model *bond-slip* yang diturunkan berdasarkan mekanika fraktur kemudian dikalibrasi terhadap hasil eksperimen *pulloff tensile bond test*. Kelebihan model ini adalah hanya dinyatakan dalam fungsi energi fraktur (G_f) dan parameter regresi (B) seperti diperlihatkan pada Persamaan (2.4) dengan tegangan *bond* geser maksimum menurut Persamaan (2.6). Meskipun fungsi relasi tegangan *bond* geser-slip dinyatakan dalam dua parameter tersebut, model ini telah memperhitungkan parameter CFRP, beton, maupun epoksi. Parameter CFRP meliputi modulus elastisitas, tebal, dan lebar. Parameter beton melibatkan kuat tekan beton, sedangkan epoksi diperhitungkan parameter modulus geser dan tebal. Model ini mampu memprediksikan secara akurat slip maksimum pada spesimen dengan mutu perekat normal sesuai eksperimen Nakaba et al. (2001), melalui formula pada Persamaan (2.5). Energi fraktur (G_f) dan koefisien regresi (B) dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2.7) dan (2.8).

$$\tau = 2BG_f(e^{-Bs} - e^{-2Bs}) \quad (2.4)$$

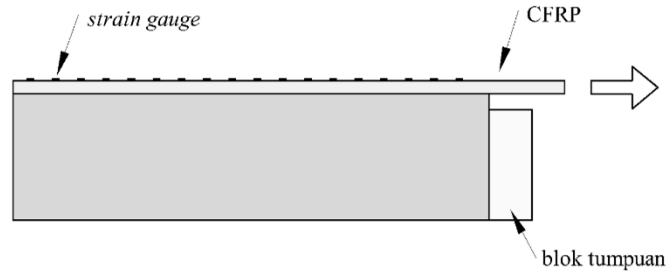
$$s_{maks} = \ln 2 / B \quad (2.5)$$

$$\tau_{maks} = 0,5BG_f \quad (2.6)$$

$$G_f = 0,446(G_a / t_a)^{-0,352} f_c^{0,236} (E_f t_f)^{0,023} \quad (2.7)$$

$$B = 6,846(E_f t_f)^{0,108} (G_a / t_a)^{0,833} \quad (2.8)$$

Gambar 2.2 menunjukkan pengujian respons *bond* geser model Dai et al. (2005) Spesimen diuji berdasarkan metode uji lekat geser tarik satu sisi. Lembar CFRP dilekatkan pada prisma beton tunggal yang ditumpu blok tumpuan. Ujung bebas CFRP diberikan beban tarik. Sejumlah banyak *strain gauge* dipasang dalam jarak rapat pada serat terluar CFRP.



Gambar 2.2. Pengujian Respons *Bond* Geser Model Dai et al. (2005)

2.1.1.3. Model Chen & Teng (2001)

Model Chen & Teng (2001) merupakan salah satu model kekuatan *bond* berbasis desain yang dikalibrasi terhadap basis data pengujian *single lap* dan *double lap shear bond test* dengan memperhitungkan pengaruh parameter CFRP dan beton. Parameter CFRP yang diperhitungkan meliputi panjang *bond*, panjang efektif *bond*, modulus elastisitas, tebal, dan lebar CFRP. Parameter beton yang diperhitungkan meliputi kuat tekan beton dan lebar beton. Model ini mampu memberikan estimasi beban ultimit maupun beban layan terhadap kriteria desain angkur CFRP, seperti diformulasikan dalam Persamaan (2.9) dan (2.13). Tegangan kontrol ultimit pada CFRP dapat diestimasi menurut Persamaan (2.14)

$$P_u = 0,315\beta_f\beta_L\sqrt{f'_c}b_fL_e \quad (2.9)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (2.10)$$

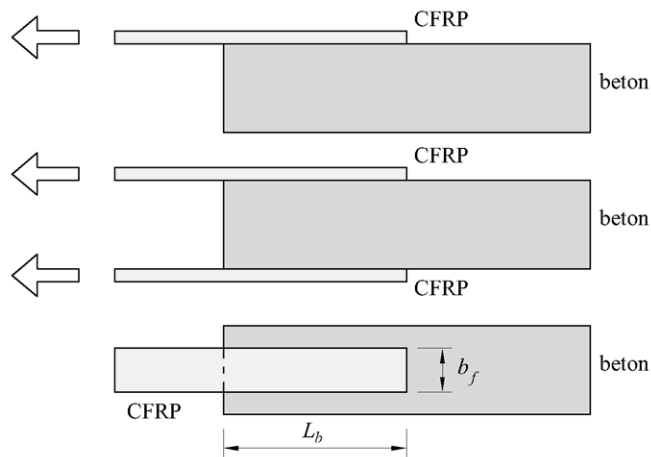
$$\beta_f = \sqrt{\frac{2 - b_f / b_c}{1 + b_f / b_c}} \quad (2.11)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & L_b \geq L_e \\ \sin \frac{\pi L_b}{2L_e} & L_b < L_e \end{cases} \quad (2.12)$$

$$P_u = 0,2\beta_f\beta_L\sqrt{f'_c}b_fL_e \quad (2.13)$$

$$f_{fu} = 0,427\beta_f\beta_L\sqrt{\frac{E_f\sqrt{f'_c}}{t_f}} \quad (2.14)$$

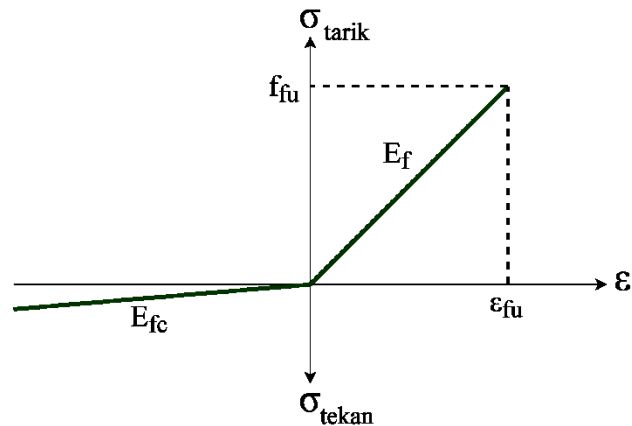
Gambar 2.3 memperlihatkan pengujian respons *bond* geser model Chen & Teng (2001). Pengujian dilakukan berdasarkan skema *single dan double lap shear bond test*. CFRP ditempelkan pada prisma beton dan ujung bebas diberikan gaya tarik. Model yang dihasilkan merupakan model kekuatan *bond* geser. Pada penelitian tersebut tidak digunakan *strain gauge*. Dalam pengujian ini, dimensi CFRP divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekuatan *bond*.



Gambar 2.3. Pengujian Respons *Bond* Geser Model Chen & Teng (2001)

2.1.2. Model Material Konstitutif CFRP

CFRP hanya dapat menerima aksi berupa beban tarik (Farah & Sato, 2007) dan menunjukkan perilaku elastis linier sebelum mengalami keruntuhan secara mendadak (Ahmed et al., 2020; Farah & Sato, 2007; Tran, 2020). Keruntuhan CFRP yang bersifat getas dapat diakomodasi dalam simulasi dengan memberikan kekakuan residu sangat kecil, meski kegagalan ini hanya bisa terjadi jika mutu material beton, tulangan, dan epoksi yang digunakan sangat tinggi. Model material CFRP diperlihatkan pada Gambar 2.4, di mana model memberikan respons untuk aksi tarik tetapi tidak untuk aksi tekan. Ketika aksi tekan terjadi, material dianggap gagal dan diberikan nilai kekakuan kecil.



Gambar 2.4. Model Konstitutif Material CFRP

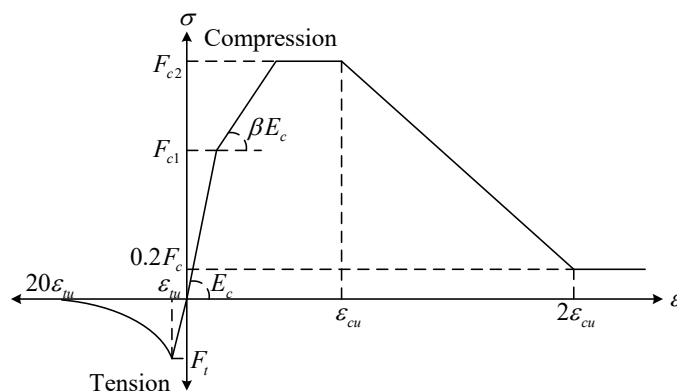
2.1.3. Model Material Konstitutif Beton

Berbagai model *hardening/softening* beton baik untuk pegas normal tarik, normal tekan, dan geser telah banyak diterapkan dalam RBSM. Model pegas normal tarik meliputi model elastis dan model elastis-*softening* linier. Model tarik elastis (Mendoza et al., 2017) mengindikasikan tidak pernah terjadi kegagalan pada pegas, sedangkan model elastis-*softening* linier (Jiradilok et al., 2020; Kambayashi et al., 2020; Nakamura et al., 2020; Usman et al., 2020; Yang et al., 2020) mengakomodasi kegagalan dengan penurunan kapasitas tarik secara linier. Model pegas normal tarik linier-*softening* eksponensial digunakan dalam penelitian ini karena dapat memberikan respons pelemahan pegas secara halus.

Model pegas normal tekan meliputi model elastis, model elastis-*softening* bilinier, dan model non-linier-*softening* linier. Model tekan elastis (Hayashi et al., 2017; Jiradilok et al., 2020; Sasano et al., 2020; Thilakarathna et al., 2020; Z. Wang et al., 2019) tidak memberikan kemungkinan kegagalan pegas, sedangkan model elastis-*softening* bilinier (Farooq et al., 2020; Karam, 2019; Karam et al., 2020; Ogura et al., 2019; Sasano & Maruyama, 2019) dapat memberikan respons kegagalan di daerah pasca beban puncak secara akurat. Di sisi lain, model non-linier-*softening* linier (Amalia et al., 2018; Nakamura et al., 2020; Qiao et al., 2015; Yang et al., 2019, 2020) dapat memberikan respons akurat di daerah prabeban-puncak serta masih dapat mengakomodasi *softening* pasca puncak. Penelitian ini mengambil model elastis bilinier-*softening* linier dengan residu yang bertujuan menangkap perilaku prabeban-puncak mendekati model nonlinier

serta menggunakan *softening* linier dengan tingkat keakuratan cukup untuk daerah pascabeban-puncak. Respons residu tegangan dimaksudkan agar model stabil secara numerik.

Model pegas geser meliputi model elastis-plastis sempurna, model elastis-*softening* linier, model elastis-*hardening* linier. Model elastis-plastis sempurna (Eddy et al., 2018; Gong et al., 2017; Hayashi et al., 2017; Jiradilok et al., 2020) memungkinkan adanya fraktur pada pegas geser dengan nilai tegangan setelah leleh selalu sama dengan tegangan geser maksimum. Model elastis-*softening* linier (Kambayashi et al., 2020; Karam et al., 2020; Khmurovska & Stemberk, 2018; Miura et al., 2020; Yang et al., 2020) dapat memberikan respons penurunan kekakuan pegas geser setelah terjadi fraktur. Model elastis-*hardening* linier (Mendoza et al., 2017, 2018) dapat menyimulasikan peningkatan kekakuan pegas pascafraktur. Pada penelitian ini digunakan model pegas geser elastis-plastis sempurna. Model material konstitutif pegas normal dan geser untuk beton diperlihatkan pada Gambar 2.5.

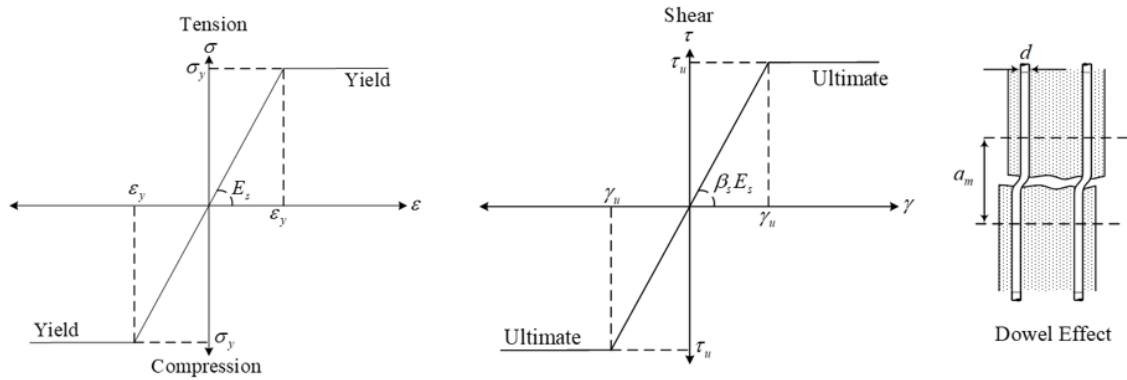


Gambar 2.5. Model Material Konstitutif Beton

2.1.4. Model Material Konstitutif Tulangan Baja

Model tulangan baja dalam RBSM meliputi model elastis-plastis sempurna dan model elastis-*hardening* linier yang berlaku untuk semua jenis pegas baik normal tarik, normal tekan, maupun geser. Model elastis-plastis sempurna (Jiradilok et al., 2020; Qiao et al., 2015; L. Wang & Bao, 2015) memungkinkan adanya leleh dengan tegangan maksimum sebesar tegangan leleh. Sementara itu, model elastis-*hardening* linier (L. Wang & Bao, 2015) juga memungkinkan pelelehan dengan peningkatan tegangan mengikuti gradien kekakuan pascaleleh. Model elastis-plastis sempurna seperti diperlihatkan pada Gambar

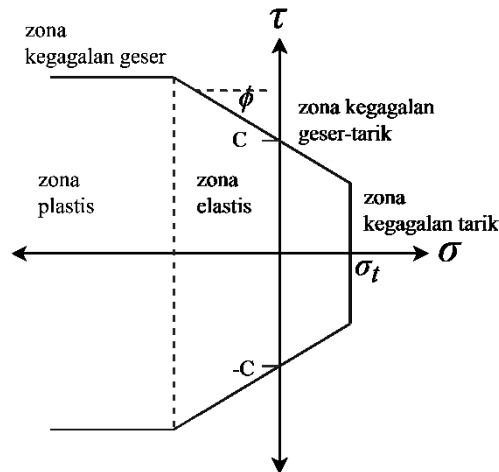
2.6 dipilih untuk merepresentasikan kekakuan pegas normal dan geser tulangan. Model ini dipilih karena relatif lebih sederhana dibandingkan model elastis-*hardening* linier tanpa mengurangi akurasi hasil simulasi secara signifikan.



Gambar 2.6. Model Konstitutif Material Tulangan Baja

2.2. Kriteria Kegagalan Material

Kegagalan material akibat interaksi aksi geser dan normal didasarkan pada kriteria Mohr-Coulomb termodifikasi, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.7. Pada zona kegagalan tarik, batas tegangan normal tarik dinyatakan dalam σ_t . Pada zona kegagalan geser-tarik, nilai interaksi dibatasi kurva dengan kemiringan sudut friksi beton (ϕ) dan perpotongan tegangan kohesi beton (c). Pada zona tegangan normal tekan, zona dibagi menjadi dua bagian yaitu zona elastis dan plastis. Pada zona plastis, batas tegangan geser diambil sebagai nilai konstan. Berdasarkan kriteria tersebut, kekakuan pegas normal dan geser dalam model diperbarui. Kondisi leleh ditentukan ketika fungsi leleh dalam Persamaan (2.15) terpenuhi.



Gambar 2.7. Kriteria Kegagalan Mohr-Coulomb Termodifikasi

(Kawai & Takeuchi, 1997)

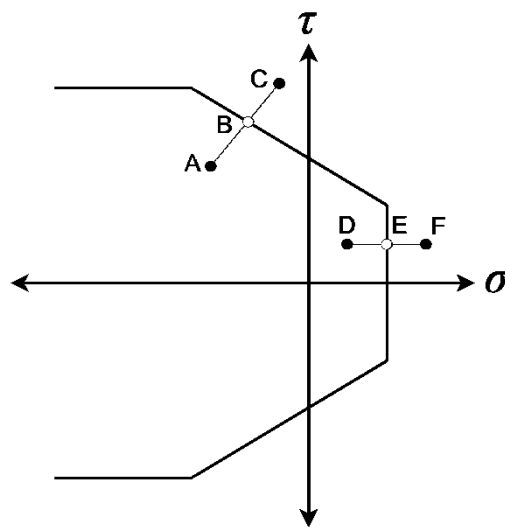
$$f(\sigma) = 0 \quad (2.15)$$

Berdasarkan model interaksi normal-geser dalam kriteria kegagalan Mohr-Coulomb terdapat kondisi pelemahan dan penguatan akibat interaksi tersebut. Pada kasus interaksi tegangan normal tarik dan geser, kemiringan kurva interaksi mengindikasikan pelemahan. Hal ini memberikan arti kapasitas material menurun ketika mengalami aksi interaksi normal tarik dan geser. Hal sebaliknya terjadi pada interaksi normal tekan dan geser. Berdasarkan kurva, semakin besar tegangan normal tekan, tegangan geser yang mampu dipikul juga meningkat. Dengan demikian, kapasitas material meningkat ketika terjadi interaksi tegangan normal tekan dan geser.

2.3. Prosedur Analisis Non-linier

Prosedur analisis non-linier dilakukan berdasarkan metode r_{min} , di mana laju pertambahan beban untuk melelehkan elemen dengan kondisi tegangan paling ekstrem dihitung berdasarkan distribusi tegangan dan pertambahan beban pada tahap pembebanan berjalan (Yamada et al., 1968). Gambar 2.8 menunjukkan skema laju penambahan beban pada kasus kegagalan akibat kombinasi geser-normal (A-B-C) maupun normal murni (D-E-F). Pada kasus kegagalan akibat kombinasi geser-normal, titik A merupakan kondisi tegangan pada tahap pembebanan sebelumnya, sedangkan titik C merupakan kondisi tegangan pada tahap berjalan. Kondisi tegangan pada titik C mengakibatkan tegangan internal dan eksternal tidak setimbang sehingga penambahan pembebanan harus

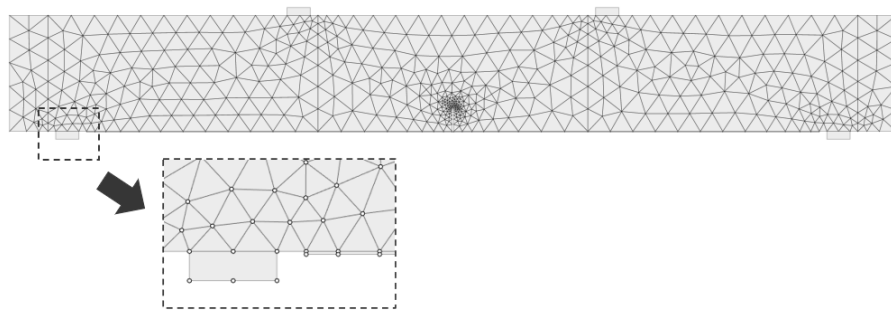
dihentikan pada titik B, yaitu kondisi batas kurva kriteria kegagalan material. Dalam kondisi tersebut, nilai laju penambahan beban r dapat dihitung berdasarkan perbandingan jarak AB terhadap AC, yaitu $|AB/AC|$. Prosedur yang sama berlaku pada kasus kegagalan akibat aksi tarik murni. Ketika kondisi tegangan telah berada pada kurva kegagalan material, pergerakan tegangan mengikuti aturan aliran plastis sampai terjadi pelepasan beban (*unloading*). Nilai laju pertambahan beban r diperhitungkan untuk semua elemen, di mana nilai minimum (r_{min}) diambil sebagai faktor pengali beban pada tahap selanjutnya.



Gambar 2.8. Laju Penambahan Beban
(Kawai & Takeuchi, 1997)

2.4. Struktur Mesh

Tingkat akurasi hasil simulasi model tergantung pada reliabilitas struktur *mesh* yang digunakan (Bhatti, 2005), di mana akurasi meningkat dengan penggunaan *mesh* yang lebih halus di daerah dengan konsentrasi tegangan. Pada naskah disertasi ini elemen yang digunakan dalam pembentukan struktur *mesh* merupakan kombinasi elemen segitiga dan segi empat. Elemen batas pada model disesuaikan terhadap jumlah elemen yang ditumpu. Secara tipikal, elemen batas dapat berupa elemen segi empat dengan empat sampai sepuluh titik bergantung pada jumlah elemen yang memiliki kontak dengan elemen batas. Contoh struktur *mesh* yang digunakan dalam disertasi ini diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Struktur Mesh

2.5. Kerangka Berpikir

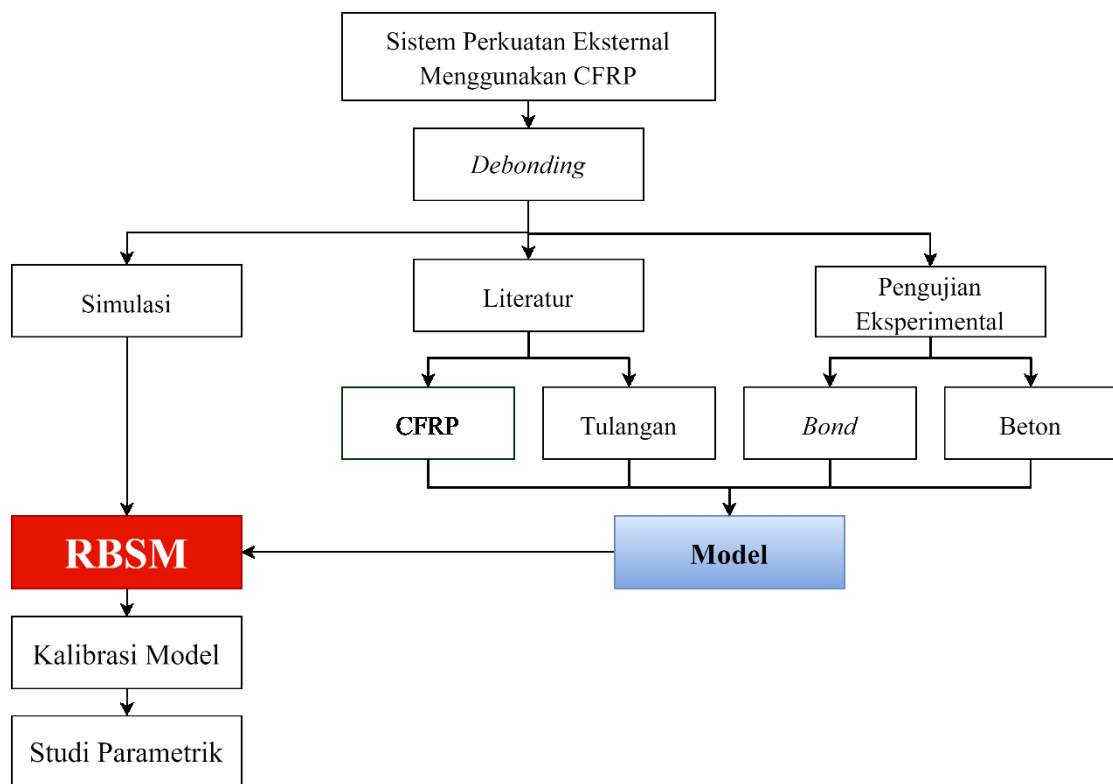
Penelitian mengenai perkuatan eksternal menggunakan CFRP banyak diteliti karena berbagai keunggulannya. Kapasitas optimal sistem perkuatan menggunakan CFRP sering tidak dapat tercapai karena kegagalan *debonding*. Penelitian mengenai model *bond* antara CFRP dan beton diteliti secara intensif. Pada umumnya respons *bond* ditinjau terhadap aksi geser. Respons tersebut diukur menggunakan skema pengujian *single/double lap shear bond test* dengan menempatkan sejumlah banyak *strain gauge* pada jarak dekat di serat terluar sistem perkuatan.

Model *bond* antara CFRP dan beton, selain diteliti menggunakan pengujian eksperimental, juga pada umumnya dilakukan melalui simulasi berbasis FEM. Beberapa penelitian telah mengimplementasikan model *bond* antara CFRP dan beton menggunakan metode RBSM, di mana respons *bond* yang dipertimbangkan terbatas hanya terhadap aksi geser.

Model *bond* dengan mempertimbangkan respons terhadap aksi geser maupun normal tarik berpeluang besar menghasilkan hasil simulasi yang lebih akurat. Respons *bond* geser diukur melalui skema *bending shear bond test*, di mana *strain gauge* dua lapis ditempatkan pada lapisan epoksi primer di antara CFRP dan permukaan beton. Sensor *strain gauge* ditempatkan menghadap pada epoksi sebagai lapisan perekat CFRP dan beton sehingga hasil pengukuran secara langsung respons *bond* bisa didapatkan. Sementara itu, respons *bond* normal tarik didapatkan melalui skema *pulloff tensile bond test*.

Model *bond* yang merepresentasikan respons *bond* geser dan normal tarik antara CFRP dan beton diimplementasikan dalam RBSM sebagai elemen penghubung antara elemen CFRP dan elemen beton. Epoksi sebagai material perekat memiliki kekakuan

yang jauh lebih rendah dibandingkan CFRP sehingga perilaku sistem perkuatan akan melemah setelah pengimplementasian model tersebut ke dalam RBSM. Model tersebut diharapkan memiliki tingkat akurasi tinggi untuk digunakan dalam proses kalibrasi model terhadap hasil pengujian eksperimental. Model yang telah terkalibrasi terhadap hasil pengujian eksperimental dapat digunakan untuk menyimulasikan kasus sejenis dalam studi parametrik. Model juga dapat digunakan sebagai instrumen untuk melakukan studi parametrik pada kasus sistem perkuatan eksternal struktur beton bertulang menggunakan CFRP. Kerangka berpikir penelitian disertasi diperlihatkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Kerangka Berpikir Penelitian Disertasi

2.6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis dalam penelitian disertasi ini sebagai berikut.

1. Pengujian lentur balok beton dengan CFRP dan pengujian *pulloff* pelat beton dengan CFRP dapat digunakan untuk mendapatkan respons *bond* geser dan *bond* normal tarik antara CFRP dan beton.
2. Metode *Rigid Body Spring Model* dapat digunakan untuk menyimulasikan kekakuan awal spesimen berdasarkan properti material terkalibrasi.

3. Pengimplementasian model *bond* geser dan *bond* normal tarik dalam *Rigid Body Spring Model* dapat menurunkan kekakuan awal model dibandingkan model dengan kondisi lekatan *full bond*.