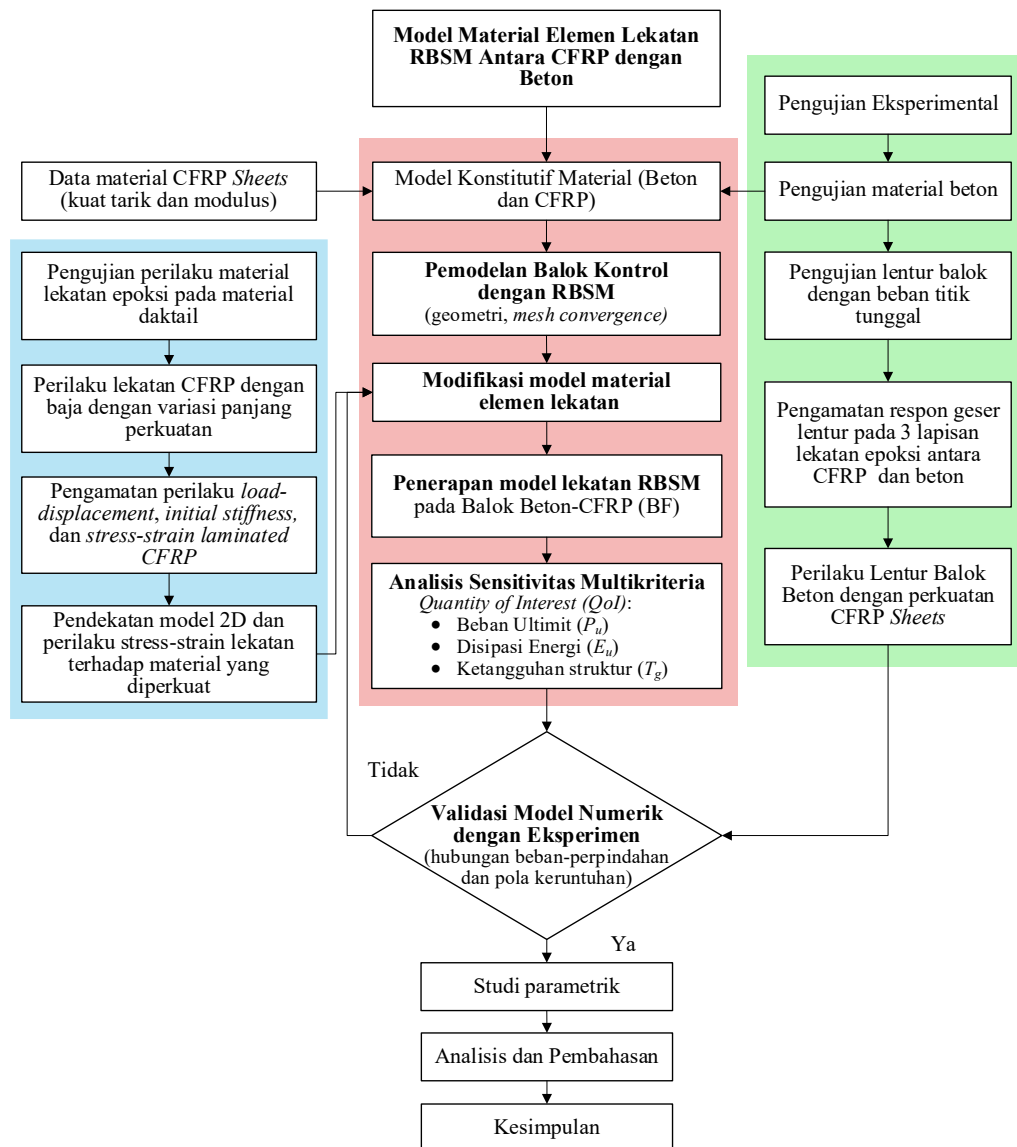


## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Pengembangan elemen lekatan dalam RBSM

Penelitian ini dikembangkan untuk mendapatkan model material lekatan antara CFRP *sheets* dan beton dalam pemodelan RBSM. Inovasi tersebut diimplementasikan dalam metode RBSM sehingga memperbaiki performa program dalam memodelkan material komposit modern antara beton dan CFRP *sheets*. Bagan alir penelitian disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Bagan alir penelitian

Perilaku material lekatan CFRP diamati melalui pengujian eksperimen untuk merumuskan model material lekatan menggunakan RBSM. Pengujian lentur dilakukan pada pelat baja yang diperkuat menggunakan CFRP *sheets*. Baja dipilih sebagai medium perkuatan dengan maksud untuk melihat performa lekatan dengan menghindari kerusakan pada material yang diperkuat.

Validasi model material lekatan CFRP dalam RBSM dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian eksperimental dan model RBSM. Pengujian eksperimen berupa mekanisme lentur balok beton tanpa tulangan dengan perkuatan CFRP *sheets*. Penggunaan balok beton tanpa tulangan dipilih untuk menghilangkan pengaruh baja tulangan sehingga perilaku lekatan antara material beton dan laminasi CFRP hanya dipengaruhi komponen beton dan CFRP. Model material lekatan selanjutnya diimplementasikan dalam pemodelan RBSM menggunakan kasus mekanisme lentur yang sama. Proses validasi dilakukan terhadap benda uji balok untuk menguji keabsahan dan ketelitian model, meliputi kapasitas beban, kekakuan, dan pola keruntuhannya.

### **3.2 Pengujian Material Beton**

Pengujian material meliputi pengujian kuat tekan silinder beton ( $f_c$ ), pengujian tarik lentur beton ( $f_t$ ) dan modulus elastisitas ( $E$ ), dilakukan untuk mendapatkan properti awal material beton. Nilai properti material tersebut digunakan sebagai data *input* elemen beton dalam pemodelan RBSM.

#### **3.2.1 Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton**

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai dengan standar SNI 1974:2011 tentang “Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder”. Spesimen silinder tekan menunjukkan jenis keruntuhan yang tipikal yaitu pola kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar). Nilai kuat tekan silinder beton rata-rata adalah 33,6 MPa sementara itu nilai modulus elastisitas beton rata-rata didapatkan sebesar 24.079 MPa. Data uji material beton selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran A. Parameter mutu material beton digunakan sebagai properti *input* dalam model RBSM.

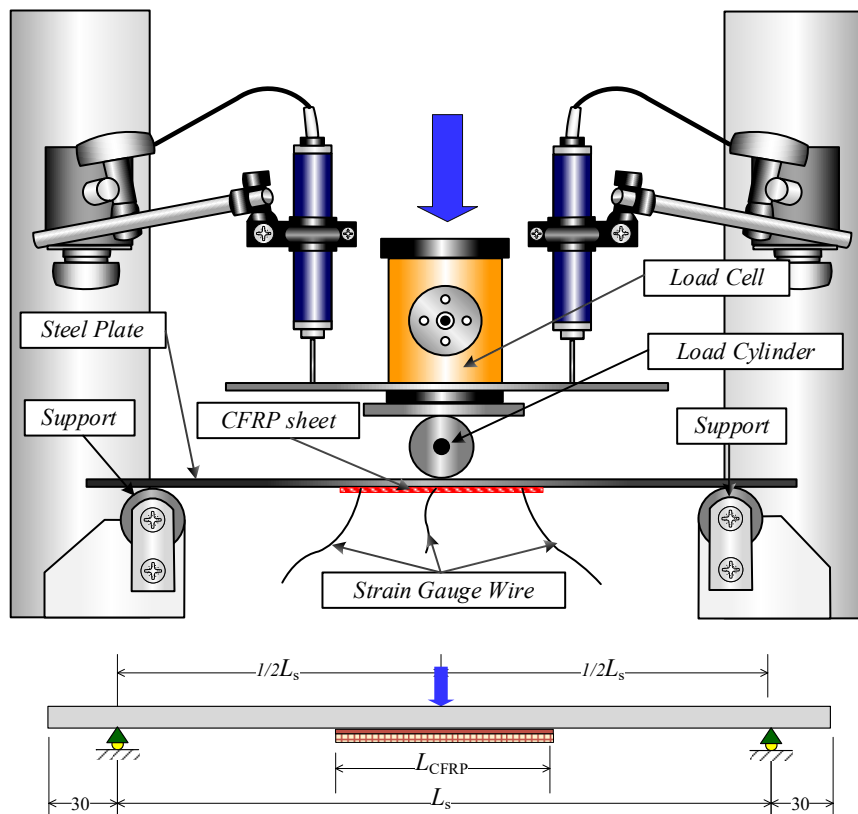
### 3.2.2 Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian kuat lentur beton dilakukan sesuai dengan standar SNI 4431:2011 tentang “Cara uji kuat lentur beton dengan dua titik pembebanan”. Parameter kuat tarik beton ( $f_t$ ) didapatkan dari pengujian balok beton berukuran 15x15x45 cm dengan dua titik beban yang berjarak 1/3 dari panjang balok. Pada pengujian kuat tarik lentur beton didapatkan nilai rata-rata sebesar 4,03 MPa. Hasil pengujian ini akan digunakan sebagai parameter awal kuat tarik lentur elemen beton dalam RBSM. Perilaku keruntuhan semua benda uji berupa kegagalan lentur pada daerah pusat beban (1/3 jarak titik perletakan bagian tengah). Hasil pengujian kuat tarik lentur selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran A.

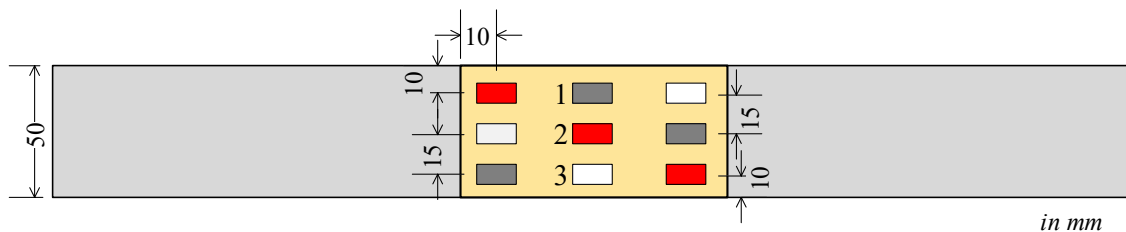
### 3.3 Pengujian Perilaku Material Epoksi

Pengamatan respons perilaku epoksi dilakukan melalui pengujian CFRP *sheets* yang dilekatkan pada pelat baja. Material komposit baja-CFRP diuji dengan respons lentur untuk mendapatkan hubungan tegangan-regangan epoksi dan CFRP. Studi literatur membuktikan bahwa beton memiliki potensi keruntuhan geser. Penggunaan baja sebagai media utama memungkinkan pengamatan perilaku epoksi dan CFRP secara efektif.

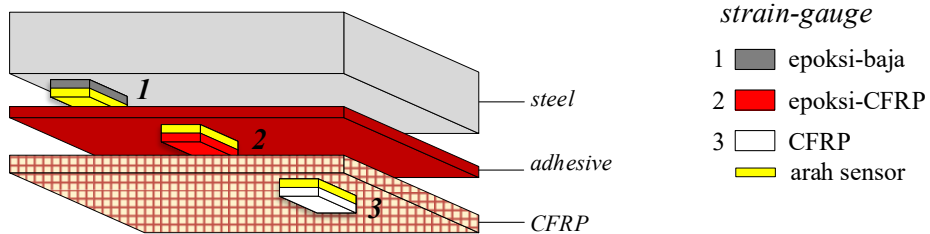
Perkuatan eksternal CFRP *sheets* menggunakan variasi panjang 40, 60, 80, 100 dan 120 mm diterapkan ditengah bentang suatu pelat baja dengan dimensi 300x50x5 mm. Penamaan benda uji menggunakan kode CS-*i*, dengan *i* adalah nilai panjang CFRP yang digunakan. Pengujian lentur dengan beban monotonik tunggal diterapkan pada benda uji, dengan detail yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Pengasaran permukaan benda uji dilakukan dengan metode *grinding* untuk memastikan lekatan epoksi dan CFRP yang sempurna. Dalam pengujian dilakukan pengamatan respons regangan menggunakan *strain gauge* tipe GFLAB-3-50 dengan panjang *gauge* 3 mm, lebar 2,3 mm, dan resistansi 120  $\Omega$  yang dilekatkan pada setiap lapisan: antarmuka epoksi-struktur, antarmuka epoksi-CFRP, dan CFRP yang terimpregnasi epoksi, dengan konfigurasi seperti terlihat dalam Gambar 3.3. *Load cell* berkapasitas 50 kN digunakan untuk merekam respons beban, yang dikombinasikan dengan dua *linear variable differential transformers* (LVDT) dengan panjang maksimum 10 cm untuk mengukur perpindahan vertikal. Pembebanan dilakukan dengan laju perpindahan sebesar 70–100  $\mu\text{m/detik}$ , sementara itu pembacaan semua instrumen dimonitor menggunakan *data logger* dan komputer.



Gambar 3.2 *Setup* pengujian lentur baja-CFRP



a. Tampak bawah



b. Visualisasi 3D

Gambar 3.3 Konfigurasi penempatan *strain gauge*

Pengamatan nilai regangan pada lekatan dan CFRP dilakukan menggunakan *strain gauge*, sementara tegangan dihitung menggunakan parameter nilai momen akibat pembebanan ( $M$ ), parameter inersia penampang komposit ( $I_k$ ) dan jarak terhadap titik berat penampang komposit ( $y_k$ ), seperti pada Persamaan 3.1.

$$\sigma = \frac{M \cdot y_k}{I_k} \quad (3.1)$$

Pengamatan perilaku material lekatan epoksi melalui pengujian ini digunakan sebagai data dalam penentuan nilai respons geser model material lekatan pada pemodelan menggunakan RBSM. Pengamatan respons geser pada sepanjang lekatan dilakukan untuk mengetahui perilaku kegagalan lekatan.

### 3.4 Pengujian Eksperimental Balok Beton Dengan Perkuatan CFRP Sheets

Pengujian eksperimental lekatan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pengujian lentur balok beton dengan dimensi 2000x150x250 mm. Material beton menggunakan kuat rencana 35 MPa, sedangkan parameter material CFRP *sheets* merujuk pada *product data sheets*. Pengujian lentur balok beton dengan CFRP *sheets* dilakukan untuk mendapatkan respons geser lentur lekatan. Pengujian lentur balok beton dengan CFRP *sheets* dilakukan pada penelitian ini, dengan menerapkan panjang perkuatan CFRP sebesar 80 cm pada tengah bentang balok, atau dengan rasio panjang perkuatan terhadap panjang bentang balok sebesar 0,4. Pembatasan panjang perkuatan CFRP pada balok beton dilakukan untuk menghindari kegagalan *spalling* pada beton dan kompleksitas kegagalan lain di area sepanjang lekatan.

#### 3.4.1 Detail Pengujian Balok Beton-CFRP

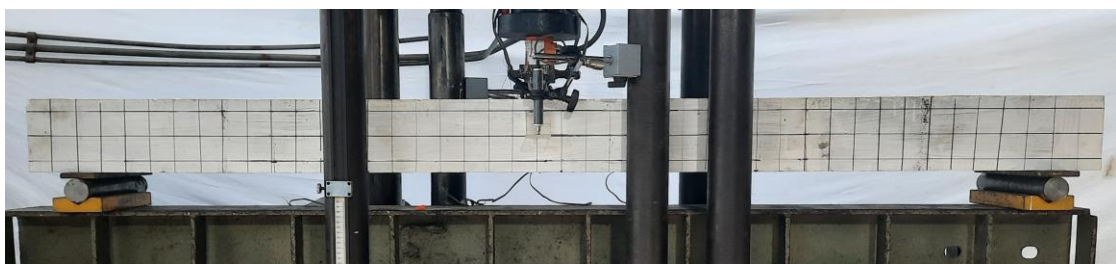
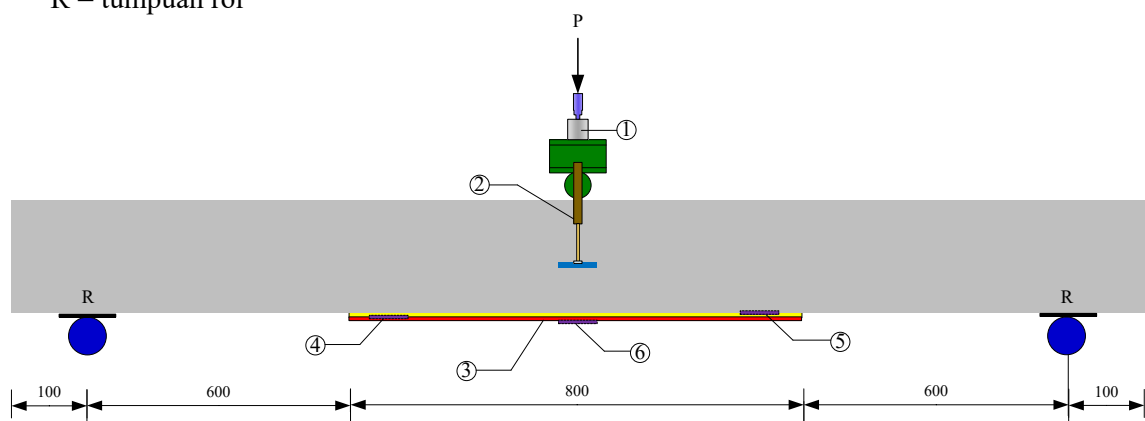
Pengujian lentur menerapkan pembebanan titik tunggal pada tengah bentang. *Setup* pengujian spesimen balok beton dengan CFRP *sheets* diperlihatkan pada Gambar 3.4. Pembacaan beban dilakukan menggunakan *load cell* berkapasitas 100 kN. Perpindahan vertikal balok diukur menggunakan *LVDT* 50 mm yang diletakkan pada tengah bentang di kedua sisi balok. Pembebanan dilakukan dengan laju perpindahan sebesar 1-6  $\mu\text{m}/\text{detik}$

Pengujian eksperimental dilakukan terhadap dua tipe balok yaitu balok kontrol (BK) dan balok dengan perkuatan CFRP (BF), yang masing-masing terdiri atas dua buah benda uji. Balok kontrol merupakan balok beton polos tanpa tulangan, sementara pada

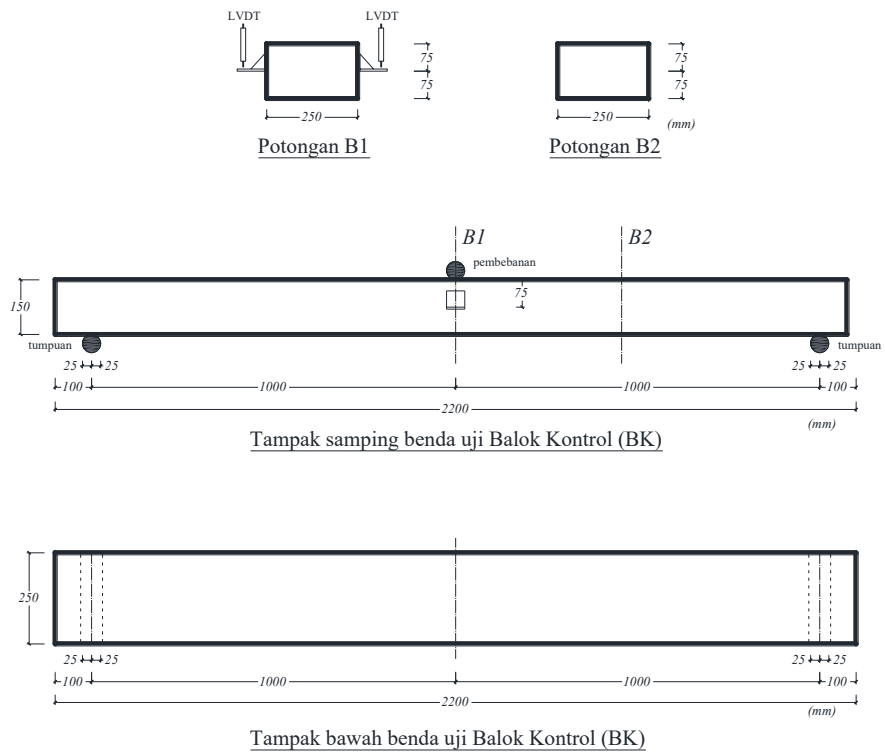
balok beton-CFRP dilakukan penambahan perkuatan CFRP sepanjang 80 cm pada tengah bentang. Penggunaan balok beton polos dilakukan untuk mengamati kontribusi perkuatan CFRP dalam struktur komposit beton-CFRP dengan lebih maksimal dan meniadakan pengaruh dari material perkuatan lain, Detail benda uji selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.

**Keterangan:**

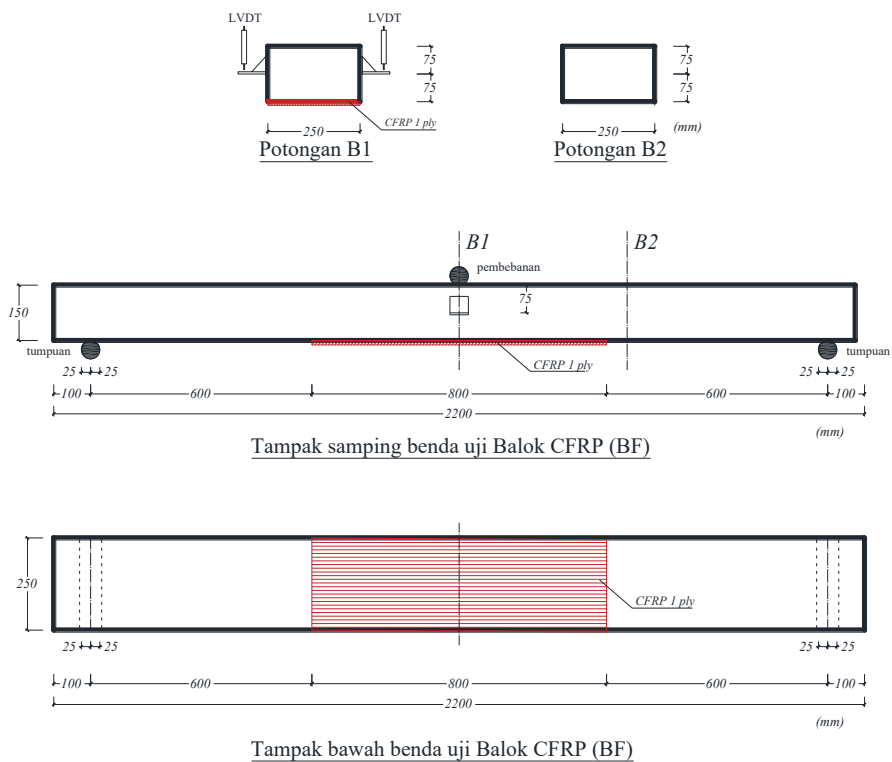
- 1 = *Load cell*
- 2 = *LVDT tengah bentang*
- 3 = *CFRP Sheets*
- 4 = *Strain gauge* antara epoksi dan CFRP
- 5 = *Strain gauge* antara epoksi dan beton
- 6 = *Strain gauge* pada serat luar CFRP
- P = beban titik tunggal
- R = tumpuan rol



Gambar 3.4 *Setup* pengujian eksperimen balok beton-CFRP

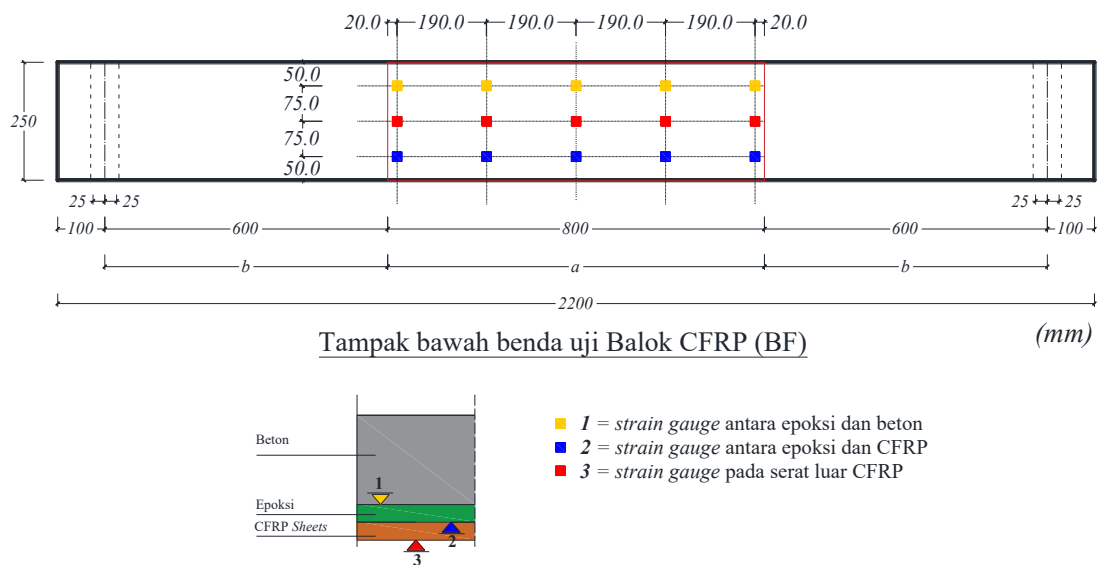


Gambar 3.5 Detail benda uji balok kontrol



Gambar 3.6 Detail benda uji balok dengan CFRP sheets

Pada pengujian dilakukan pengamatan respons regangan menggunakan *strain gauge* pada tiga lokasi esensial untuk pengukuran respons geser yaitu lapisan epoksi bagian atas (lekatan antara epoksi ke beton), lapisan epoksi bagian bawah (lekatan antara epoksi ke CFRP) dan serat luar CFRP *sheets*. Aplikasi CFRP pada balok dilakukan setelah beton mencapai umur rencana kekuatan beton, yaitu 28 hari. Proses tersebut didahului oleh persiapan permukaan beton melalui metode *grinding*. Penempatan *strain gauge* pada benda uji dilakukan untuk mengamati respons geser di area momen maksimum, serta memperhatikan potensi kegagalan lekatan pada area tepi luar CFRP yang berpotensi terjadi kegagalan *debonding*. Konfigurasi penempatan *strain gauge* dapat pada uji eksperimental disajikan pada Gambar 3.7. Data pembacaan beban, perpindahan dan regangan yang terjadi direkam secara digital menggunakan *data logger* yang terhubung dengan perangkat komputer.



Gambar 3.7 Konfigurasi penempatan *strain gauge*

### 3.5 Pemodelan RBSM

Pengembangan perangkat lunak dengan menerapkan metode analisis batas diskritisasi, diwujudkan dalam program bernama RBSM (Takeuchi, 2005). Program komputasi ini dirancang dengan struktur dua bagian yang terpisah dan terintegrasi, yang terdiri dari modul *pre-processor* dan *post-processor*. Dalam penelitian ini, program tersebut dimanfaatkan secara spesifik untuk melakukan analisis data numeris.

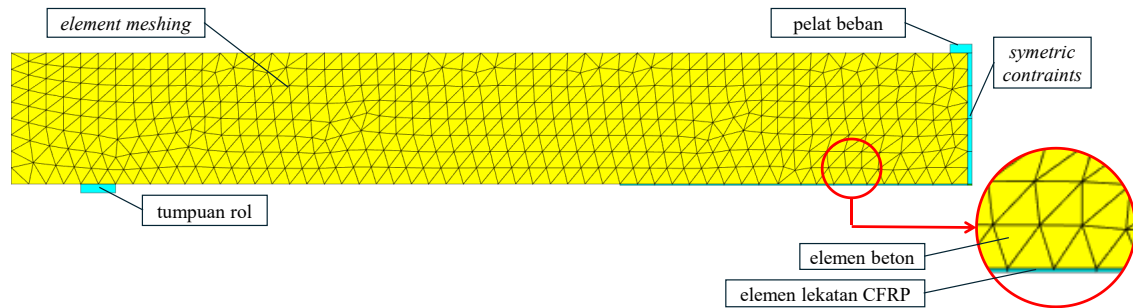
Pada tahap *pre-processor* digunakan program RBSMF, yang bertanggung jawab penuh atas pemasukan data awal dan pelaksanaan proses analisis. Agar analisis dapat berjalan dengan baik, program ini memerlukan sejumlah data masukan. Data masukan mencakup data umum, seperti jumlah titik, jumlah elemen, dan jumlah jenis material; data geometri, yang merinci koordinat titik dan konektivitas elemen; dan data material, yang mendefinisikan properti material yang dimodelkan. Masukan data kondisi batas (*constraint*) diperlukan untuk menetapkan kekangan sistem untuk mencegah pergerakan badan bebas serta menyimulasikan kondisi tumpuan aktual. Selanjutnya masukan data beban diperlukan untuk menentukan detail penerapan beban pada setiap tahapan pemodelan.

Program RBSPP adalah tahap *post-processor* yang digunakan untuk menyajikan dan menginterpretasikan luaran dari analisis yang telah dilakukan. Pada tahap ini, hasil simulasi disajikan dalam berbagai bentuk, termasuk nilai numerik, kurva grafik, dan visualisasi kontur model. Hasil utama yang dihasilkan oleh program RBSM adalah besaran perpindahan, regangan, dan tegangan pada model. Data perpindahan elemen dimanfaatkan untuk menghasilkan citra visual yang menunjukkan deformasi model setelah dikenai beban. Untuk visualisasi kontur, nilai regangan dan tegangan yang awalnya dihitung pada pegas normal dan pegas geser pada sisi kontak antar elemen, didistribusikan secara merata ke titik-titik konektivitas di sepanjang sisi kontak tersebut. Analisis kurva menyediakan representasi grafik seperti kurva beban-perpindahan keseluruhan dan kurva tegangan-regangan yang spesifik terjadi pada pegas. Visualisasi kontur memungkinkan pengguna untuk melihat secara spasial distribusi tegangan, regangan, dan indeks plastis pada model.

### **3.5.1 Pemodelan Geometri dan *Input* Material**

Pemodelan dilakukan menggunakan program RBSM. Geometri model RBSM dibuat menyesuaikan informasi data spesimen seperti pada Gambar 3.8. Kondisi pembebanan yang simetris memungkinkan model dibuat setengah bentang panjang balok, hal ini untuk mengatasi perbedaan perilaku model akibat sensitivitas bentuk dan kerapatan *meshing* elemen. Pemodelan setengah bentang dalam RBSM dilakukan untuk menghindari konfigurasi bentuk elemen model yang tidak simetris. Studi parametrik kerapatan *meshing* elemen dilakukan untuk mendapatkan model geometri yang berkesesuaian.

Pendekatan dua dimensi (2D) dilakukan pada model dan dikonfirmasi melalui hasil pengujian perilaku material lekatan (sub-bab 3.3).



Gambar 3.8 Model geometri balok RBSM

Tumpuan didefinisikan sebagai *roll* dengan *constraint* ke arah sumbu vertikal ( $Y$ ) dan memungkinkan elemen untuk berotasi ( $\theta$ ). Batas simetris dan pelat beban dimodelkan sebagai elemen yang hanya dapat berdeformasi ke arah sumbu vertikal ( $Y$ ). Elemen batas simetris (*symmetric constraints*), tumpuan dan pelat pembebanan dimodelkan sebagai elemen segiempat dengan properti elemen beton yang diperkuat, sehingga tidak terjadi kegagalan pada elemen tersebut.

Beton dimodelkan sebagai elemen segitiga dengan properti kuat tekan ( $f_c$ ) dan kuat tarik ( $f_t$ ) diperoleh secara eksperimental dari hasil pengujian material sesuai dengan standar SNI (sub-bab 3.2). Sementara itu, Poisson *ratio* ( $\nu$ ), kohesi ( $c$ ) dan sudut geser ( $\phi$ ) diambil dari nilai rujukan analisis parameter keruntuhan beton pada RBSM (Yamamoto, 2008). CFRP dimodelkan sebagai elemen segiempat dengan properti merujuk pada *product data sheet*. Properti material model selengkapnya disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Properti material model

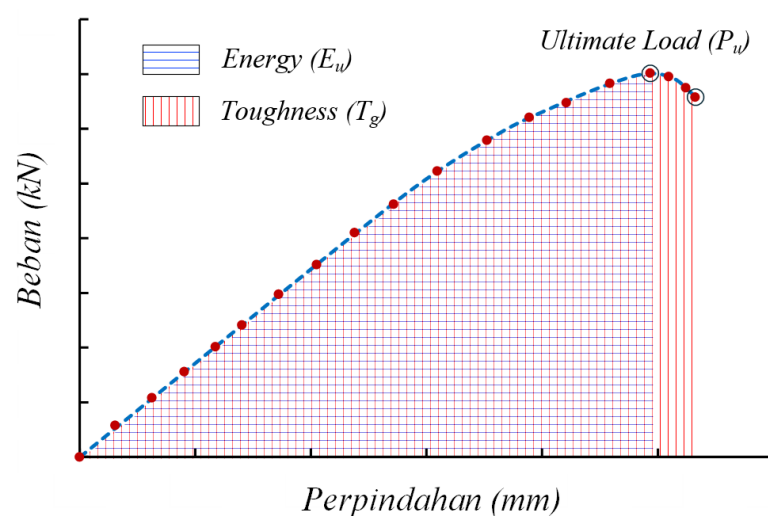
| Properti                                         | Nilai   |
|--------------------------------------------------|---------|
| <b>Beton</b>                                     |         |
| Kuat tekan beton, $f_c$ (MPa)                    | 33,6    |
| Kuat tarik beton, $f_t$ (MPa)                    | 4,03    |
| Modulus elastisitas beton, $E_c$ (MPa)           | 24.079  |
| Regangan ultimit tekan beton, $\varepsilon_{cu}$ | 0,003   |
| Regangan ultimit tarik beton, $\varepsilon_{tu}$ | 0,0002  |
| Rasio Poisson, $\nu_c$                           | 0,2     |
| Kohesi beton, $c$ (MPa)                          | 1,75    |
| Sudut geser, $\phi$ ( $^\circ$ )                 | 37      |
| <b>CFRP</b>                                      |         |
| Tegangan ultimit CFRP, $f_{fu}$ (MPa)            | 3.500   |
| Modulus elastisitas CFRP, $E_f$ (MPa)            | 235.000 |

### 3.5.2 Analisis Sensitivitas Multikriteria

Suatu model numerik yang dapat merepresentasikan respons beban-perpindahan eksperimental secara akurat, merupakan alat yang bermanfaat dalam menganalisis suatu masalah dengan berbagai macam variabel. Model yang presisi dapat memberikan informasi yang tidak tersedia dari proses pengamatan visual eksperimen di laboratorium.

Analisis Sensitivitas Multikriteria (ASM) dilakukan pada pemodelan dengan RBSM sehingga model dapat merepresentasikan perilaku beban-perpindahan dari spesimen identik yang telah diuji di laboratorium. Analisis ini diperlukan untuk mendapatkan model yang sesuai, yang dapat digunakan pada tahap studi parametrik maupun validasi model. Hal ini juga digunakan dalam mengakomodir ketidaksempurnaan suatu benda uji eksperimen dan nilai parameter-parameter material yang terbatas.

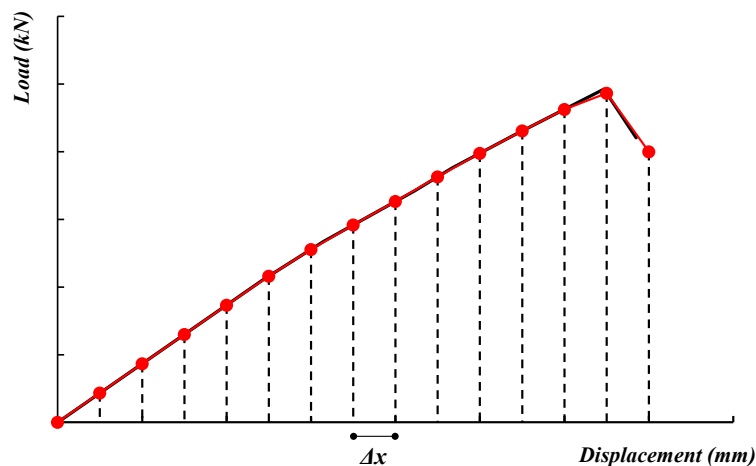
Multikriteria dalam analisis ini berupa suatu *Quantity of Interest* (QoI) yang akan dievaluasi sensitivitasnya terhadap variasi parameter *input* yang memengaruhi luaran simulasi numerik. Pemilihan kriteria ASM didasarkan pada karakteristik perilaku hubungan beban-perpindahan model yang dapat dikuantifikasikan. Tiga QoI yang menjadi pertimbangan dalam penelitian ini adalah beban ultimit ( $P_u$ ), energi yang dibutuhkan dalam mencapai beban ultimit ( $E_u$ ), dan ketangguhan (*toughness*) struktur yaitu energi yang dibutuhkan hingga struktur mengalami keruntuhan ( $T_g$ ), seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 QoI analisis sensitivitas balok kontrol

Nilai kriteria beban ultimit diambil dari maksimum beban pada pemodelan RBSM, sementara itu perhitungan nilai energi dan ketangguhan (*toughness*) struktur dilakukan melalui proses integrasi numerik menggunakan *Composite Trapezoidal Rule*. Metode ini mengaproksimasi integral definit suatu fungsi dengan membagi interval integrasi menjadi beberapa sub-interval sama lebar, seperti terlihat pada Gambar 3.10. Pada setiap sub-interval, area di bawah kurva fungsi didekati oleh luas trapesium yang dibentuk oleh garis lurus yang menghubungkan nilai fungsi pada kedua ujungnya. Akurasi perkiraan nilai integral akan meningkat seiring dengan semakin banyaknya sub-interval atau dengan kata lain semakin kecil lebar setiap pias, sehingga menghasilkan aproksimasi kurva yang lebih baik oleh serangkaian garis lurus.

Untuk memastikan akurasi perkiraan luas kurva melalui integrasi numerik ini, khususnya untuk kurva beban-perpindahan yang didapatkan dari eksperimen, interpolasi linier diterapkan pada data dengan interval variabel independen ( $x$ ) yang tidak seragam. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan sebaran data dengan interval yang konsisten dan sesuai dengan kebutuhan algoritma integrasi numerik selanjutnya. Interpolasi linier dipilih sebagai pendekatan awal yang sederhana dan efektif untuk memperkirakan nilai variabel dependen ( $y$ ) pada titik-titik  $x$  yang baru dengan interval seragam. Interval perpindahan ( $\Delta x$ ) ditetapkan sebesar 0.01, untuk memastikan validitas dan konsistensi perhitungan integral area di bawah kurva.



Gambar 3.10 Perhitungan integrasi metode *Composite Trapezoidal Rule*

Pada penelitian ini ASM dilakukan pada balok beton-CFRP (BF-RBSM), untuk menemukan model yang berkesesuaian dengan perilaku eksperimen (BF-EXP). Meskipun mutu beton mewakili mutu material homogen, tetapi pada kondisi aktual beton

merupakan material yang sangat heterogen. Heterogenitas ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain kondisi fisik agregat, komposisi material penyusun (*mix design*), proses pembuatan (*concreting*), dan proses perawatan (*curing*). Model material beton ditinjau pada parameter-parameter utama yaitu tegangan tarik beton ( $F_t$ ), regangan tarik ultimit beton ( $\epsilon_{tu}$ ), koefisien tegangan tarik sisa ( $c$ ), dan modulus elastisitas ( $E_c$ ).