

ANALISIS NUMERIK PERILAKU DINDING BATAKO-KAIT DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

(NUMERICAL ANALYSIS OF INTERLOCKING-CONCRETE BLOCK MASONRY BEHAVIOR UTILIZING FINITE ELEMEN METHOD)

Vido Septa Hidayat¹, Mochamad Teguh²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
Email: 13511167@students.uui.ac.id

²Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
Email: m.teguh@uui.ac.id

Abstract *Interlocking concrete block masonry is a wall composed of brick that has hooks between the concrete block and used to strengthen non-structural buildings. There are two ways that can be used to study the behavior of concrete block masonry that is experimental research and analysis by numerical method using computer program to produce an approach of concrete block masonry behavior. The objective of this research is to know the behavior of concrete block unit and concrete block masonry with finite element method using Abaqus software. The behavior in question is the relationship between load and deflection at the time of loading. The result of modeling with finite element method will be validated with laboratory result. The results of this study indicate that the behavior of concrete block units and concrete block masonry modeled using finite element method has close proximity to the experimental results. From the analysis results obtained the largest maximum load of modeling GL, GV, GM and L respectively is 95.27%, 96.70%, 97.73% and 92.33%, while the percentage success of the maximum deflection are 99.12%, 99.12%, 99.09% and 94.76% respectively. The largest maximum load of I2SI and I2SO modeling were 82.01% and 86.59% respectively, while the maximum deflection respectively is 64.06% and 92.86%. The largest maximum load of I2TI and I2TO modeling is 92.89% and 93.34% respectively, with maximum deflection are 85.18% and 86.74%. Furthermore, the largest maximum load of I3TI and I3TO modeling are 99.32% and 98.62% respectively, whereas the maximum deflection is 99.56% and 99.95%. The largest maximum load of frame wall modeling is 99.98%, while its maximum deflection is 99.97%.*

Keywords: *Interlocking-Concrete Block, Finite elemen method, Abaqus, Load and displacement*

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade tersebut, bencana gempa di Indonesia bumi kerap kali menimbulkan kerusakan besar pada bangunan, infrastruktur, jembatan dan berbagai obyek vital lainnya. Adapun penyebab utama dari kerusakan dan kehancuran yang terjadi adalah tidak adanya kesadaran akan pentingnya bangunan tahan gempa di tengah masyarakat. (Teguh, 2011).

Perbedaan level kerusakan akibat pergerakan gempa dapat disebabkan oleh keadaan struktur suatu bangunan dalam menerima beban gempa. Adapun bangunan yang dimaksud adalah bangunan struktural dan non-struktural. Pada dasarnya, bangunan struktural memiliki kekuatan yang lebih baik. Pada gempa bumi yang lalu, penyebab utama daerah yang paling banyak mengalami kehancuran dan menewaskan banyak manusia adalah terjadinya keruntuhan pada konstruksi bangunan yang terbuat

dari bahan tradisional tanpa memperhatikan konsep desain bangunan tahan gempa.

Kerusakan komponen dinding pasangan bata merah dan batako biasanya berupa kerusakan akibat tegangan geser yang besar dan atau perpaduan dengan tegangan lentur pada saat kejadian gempa berlangsung. Gempa dapat memberikan beban horizontal pada gedung sehingga sering menimbulkan kerusakan baik pada komponen structural maupun non-struktural. Beban gempa yang terjadi pada sumbu kuat dinding dapat menyebabkan dinding mengalami perubahan bentuk geometris menjadi bentuk jajaran genjang (parallelogram). Perubahan geometri yang terjadi dapat menyebabkan kerusakan dan keruntuhan pada dinding, sedangkan pembebanan arah sumbu lemah dinding dapat menyebabkan dinding mengalami keruntuhan/terguling (Teguh, 2011).

Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap dinding batako dengan bentuk batako yang berbeda dari batako konvensional pada umumnya. Bentuk dan dimensi akan disesuaikan

sedemikian rupa, sehingga batako dapat berkait satu dengan yang lainnya (*interlocking*), yang kemudian disebut batako-kait. Dengan demikian diharapkan batako memiliki kekuatan yang lebih besar dan dapat menahan gaya yang terjadi.

Terdapat dua cara yang dapat dilakukan untuk mempelajari perilaku dinding batako-kait. Cara yang pertama yaitu melalui penelitian ekperimental yang akan menghasilkan perilaku aktual dari dinding batako-kait tersebut, namun memerlukan waktu dan biaya yang akan cukup besar, serta peralatan laboratorium khusus. Cara yang kedua adalah analisis dengan metode numerik, dengan menggunakan program komputer untuk menghasilkan suatu pendekatan dari perilaku dinding batako-kait.

Berlatar belakang dari permasalahan tersebut di atas, maka penelitian ini akan membahas pemodelan analisis numerik metode elemen hingga terhadap perilaku unit batako-kait dan dinding batako-kait. Unit batako-kait dimodelkan untuk mengetahui perilaku lentur, geser-lentur, geser murni dan geser-vertikal, sedangkan dinding batako-kait yang dimodelkan berupa dinding pasangan batako-kait susunan 2 lapisan dan 3 lapisan dengan variasi jenis siar tegak segaris dan siar tegak tidak segaris serta dengan pembebanan secara *in plane* dan *out of plane*. Serta dinding batako-kait dengan rangka beton bertulang dengan pembebanan aksial dan lateral. Pemodelan unit batako-kait dan dinding batako-kait dilakukan dengan bantuan salah satu *software finite element method*, yaitu *software Abaqus*. Objek pemodelan dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph. D.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai pemodelan numerik batako, baik itu batako konvensional maupun batako *interlocking* telah banyak dilakukan, seperti yang telah dilakukan Wang dkk (2015). Serta penelitian terkait pemodelan numerik menggunakan *software Abaqus* lainnya seperti penelitian yang dilakukan oleh Al-Osta dkk (2017).

Wang dkk (2017), melakukan penelitian mengenai pemodelan numerik tentang respon dinding bata merah yang saling kait dengan kolomnya terhadap beban gempa. Pada penelitian tersebut bata yang digunakan adalah bata merah konvensional, namun pada saat pembuatan dinding dirancang sedemikian rupa, sehingga dinding bata saling mengikat dengan kolom. Selain itu pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan *software finite element*. Dari pengujian dan pemodelan tersebut didapat grafik *hysteresis-loop*, selanjutnya hasil dari pengujian laboratorium dibandingkan dengan hasil pemodelan numerik. Pada penelitian ini hasil penyelesaian numerik dapat mendekati hasil pengujian laboratorium, hal ini menunjukkan pemodelan numerik dengan metode elemen hingga dapat digunakan.

Al-Osta dkk (2017), melakukan penelitian tentang perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat menggunakan *ultra-high performance fiber (UHFP)*. Dalam penelitian ini balok beton bertulang diberi perkuatan dengan *UHFP* dengan tiga variasi yaitu merekatkan *UHFP* pada sisi bawah balok beton bertulang (RC-BOT SJ), pada sisi samping balok beton bertulang (RC-2 SJ) dan pada sisi dawah dan sisi samping balok beton bertulang (RC-3 SJ), yang kemudian akan dibandingkan dengan balok bertulang tanpa perkuatan *UHFP (RC-Control)*.

Selanjutnya dilakukan pengujian di laboratorium, sehingga mendapatkan hasil berupa grafik hubungan antara beban dan lendutan. Setelah itu dilakukan pemodelan menggunakan *Software Abaqus* untuk mendapatkan hasil dengan metode numerik. Setelah dilakukan pemodelan menggunakan *software Abaqus*, diperoleh hasil berupa grafik hubungan antara beban dan lendutan. Kemudian hasil dari pemodelan numerik dibandingkan dengan hasil eksperimen di laboratorium. Berdasarkan penelitian tersebut ternyata diperoleh hasil pemodelan numerik yang dapat mendekati hasil eksperimen di laboratorium.

3. LANDASAN TEORI

3.1 Batako

Batako merupakan salah satu bahan bangunan penyusun dinding pada bangunan atau gedung. Bata ini tidak terbuat dari tanah liat seperti umumnya bata merah, tetapi dibuat dari campuran pasir, semen dan air yang dalam keadaan *polen* (lekat) dicetak menjadi balok-balok dengan ukuran tertentu

(Supribadi, 1986). Bentuk dari batako tersebut terdiri dari dua jenis, yaitu batako yang dicetak berlubang (*hollow block*) dan batako yang dicetak tidak berlubang (*solid block*).

Sedangkan yang membedakan antara batako konvensional dengan batako-kait ialah bentuknya yang memiliki kait sehingga dapat berkaitan antara satu dengan lainnya. Untuk membentuk dinding pasangan batako-kait dibutuhkan mortar dengan komposisi 1 semen : 2 abu batu untuk merekatkan setiap unit batako-kait yang dipasang. Siar pasangan lazimnya dibuat horizontal datar dan vertikal tidak segaris.

3.2 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan ketelitian yang dapat diterima rekayasawan. Jika ada suatu struktur berbentuk sembarang yang ingin diketahui besarnya tegangan dan peralihan pada struktur tersebut, maka metode klasik akan menunjukkan bahwa masalah tersebut berupa persamaan diferensial parsial, akan tetapi tidak ada penyelesaian dari jawaban tersebut karena geometri dan pembebanan yang terlalu kompleks. Untuk itu diperlukan solusi numerik dan salah satu solusi terkini yang cukup memadai untuk menyelesaikan masalah tersebut adalah metode elemen hingga.

Dalam metode elemen hingga terdapat beberapa elemen yang dapat digunakan untuk memodelkan suatu struktur. Pemilihan elemen tersebut harus disesuaikan dengan kebutuhan pemodelan struktur. Elemen-elemen tersebut diantara adalah elemen 2D segitiga regangan konstan, elemen 2D segiempat dan elemen 3D Tetrahedral. Pada penelitian ini elemen yang digunakan untuk memodelkan dinding batako-kait adalah elemen 3D Tetrahedral.

3.3 Elemen 3-Dimensi Tetrahedral

Elemen dasar 3-Dimensi yang biasa digunakan dalam analisis adalah elemen tetrahedral yang selanjutnya digunakan untuk menentukan fungsi bentuk, matriks kekakuan, matriks beban yang dinyatakan dalam koordinat global. Salah satu contoh aplikasi dari elemen 3-dimensi adalah pada analisis bendungan, tabung berdinding tebal yang tertekan dan beberapa bagian dari industri otomotif dan alat-alat berat lainnya.

Sebuah elemen sangat kecil dalam sistem koordinat Cartesius berukuran dx , dy dan dz serta mengalami keadaan tegangan normal dan tegangan geser seperti terlihat pada Gambar 3.5. Jenis elemen seperti ini mempresentasikan kondisi tegangan pada

tiga buah bidang yang saling tegak lurus pada kondisi tegangan 3-dimensi. Tegangan normal tegak lurus terhadap bidang permukaannya dan dinyatakan dengan simbol σ_x , σ_y dan σ_z . Tegangan geser bekerja pada permukaan bidang elemen dan dinyatakan dengan simbol τ_{xy} , τ_{yz} dan τ_{zx} (Sofia, 2016).

Dengan demikian hanya ada tiga buah tegangan geser yang bersifat *independent* dan tiga buah tegangan normal pada sebuah elemen kecil. Hubungan antara tegangan dan regangan pada elemen dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.1-3.3.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.3)$$

Dalam Persamaan 3.18 di atas, u , v dan w merupakan perpindahan yang terjadi berturut-turut arah x , y dan z . Regangan geser yang terjadi dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.4-3.6.

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx} \quad (3.4)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy} \quad (3.5)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \quad (3.6)$$

Sama halnya dengan kondisi pada tegangan geser yang hanya memiliki tiga buah tegangan geser *independent*, regangan geser juga hanya tiga buah regangan yang *independent*. Tegangan dan regangan 3-dimensi dapat dinyatakan dengan matriks kolom seperti Persamaan 3.7-3.8.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

Hubungan tegangan dan regangan untuk material yang bersifat isotropik dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.9.

$$\{\sigma\} = [E]\{\epsilon\} \quad (3.9)$$

Dengan E merupakan matriks elastisitas yang dapat ditulis dengan Persamaan 3.10.

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & \text{simetri} & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Pada Persamaan 3.10 nilai ν merupakan *poisson rasio* dan nilai E adalah elastisitas material. Sedangkan untuk mencari besarnya nilai regangan yang terjadi pada suatu elemen dapat diselesaikan menggunakan Persamaan 3.11.

$$[\epsilon] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

Dengan nilai u , v dan w merupakan perpindahan *nodal* yang terjadi berturut-turut arah x , y dan z . Untuk mendapatkan *nodal* terdapat beberapa langkah-langkah seperti berikut.

1. matriks kekakuan elemen

Matriks kekakuan elemen dapat diselesaikan menggunakan Persamaan 3.12.

$$[K] = [B]^T [E] [B] V \quad (3.12)$$

Pada Persamaan 3.12 nilai V merupakan matriks volume.

2. matriks konstanta B

Matriks konstanta B dapat dituliskan dengan Persamaan 3.13.

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 & \beta_4 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 & 0 & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 & 0 & 0 & \delta_4 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 & \gamma_4 & \beta_4 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 & 0 & \delta_4 & \gamma_4 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 & \delta_4 & 0 & \beta_4 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Pada Persamaan 3.13 nilai V merupakan volume dari elemen, sedangkan konstanta β , δ dan γ dapat ditulis dengan Persamaan 3.14-3.25.

$$\beta_1 = \begin{bmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\gamma_1 = \begin{bmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\delta_1 = \begin{bmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\beta_2 = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\gamma_2 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\delta_2 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\beta_3 = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\gamma_3 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\delta_3 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\beta_4 = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\gamma_4 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\delta_4 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad \text{volume dan elemen tersebut.} \quad (3.25)$$

Dengan nilai x , y dan z merupakan koordinat dari elemen tersebut, penomoran koordinat searah jarum jam.

3. Beban nodal ekuivalen.

Matriks beban nodal ekuivalen akibat *body force* dapat dituliskan dengan Persamaan 3.26.

$$\{f\} = \iiint_V [N]^T \{x\} dV \quad (3.26)$$

Matriks X berupa besarnya *body force* dapat dituliskan dengan Persamaan 3.27 dan matriks N dituliskan dalam Persamaan 3.28.

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_b \\ Y \\ Z_b \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dengan nilai N_1, N_2, N_3 dan N_4 seperti pada Persamaan 3.29-3.32.

$$N_1 = \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} \quad (3.29)$$

$$N_2 = \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V} \quad (3.30)$$

$$N_3 = \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} \quad (3.31)$$

$$N_4 = \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \quad (3.32)$$

Pada Persamaan 3.29 sampai Persamaan 3.32 nilai β, δ dan γ dapat ditulis dengan Persamaan 3.13 sampai dengan Persamaan 3.25, sedangkan nilai α seperti pada Persamaan 3.31- 3.34.

$$\alpha_1 = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\alpha_2 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\alpha_3 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\alpha_4 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

1. Nilai perpindahan nodal (*displacement*)
Setelah mengetahui nilai matriks kekakuan elemen dan matriks beban nodal ekuivalen, dapat dihitung besarnya nilai perpindahan nodal (*displacement*) menggunakan Persamaan 3.35 dengan nilai elastisitas (E) pada Persaman 3.10.

$$[K_g] \times \{u\} = \{F\} \quad (3.35)$$

Dengan adanya metode elemen hingga, pemodelan struktur-struktur dengan bentuk dan pembebanan yang sangat kompleks menjadi mungkin untuk diselesaikan, namun memerlukan waktu yang cukup lama untuk melakukan perhitungan. Untuk mempermudah dalam melakukan proses perhitungan numerik tentunya diperlukan *software*

sebagai bantuannya. Salah satu *software* yang dapat digunakan adalah Abaqus.

3.4 Abaqus

Abaqus adalah perangkat lunak untuk simulasi numerik berdasarkan metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi mulai dari pemodelan struktur teknik sipil yang kemudian dapat diverifikasi dengan hasil pengujian laboratorium. Abaqus memiliki dua analisis utama yaitu Abaqus/Standard dan Abaqus/Explicit (digunakan untuk memodelkan peristiwa dinamis menggunakan eksplisit dinamis formulasi elemen hingga). Abaqus/Standar menggunakan metode elemen hingga yang secara implisit memecahkan sistem persamaan pada setiap solusi “kenaikan” untuk analisis model *solid, shell, dan truss*. Program ini dapat digunakan untuk memecahkan kombinasi masalah statis dan dinamis serta *linear* dan *non-linear*.

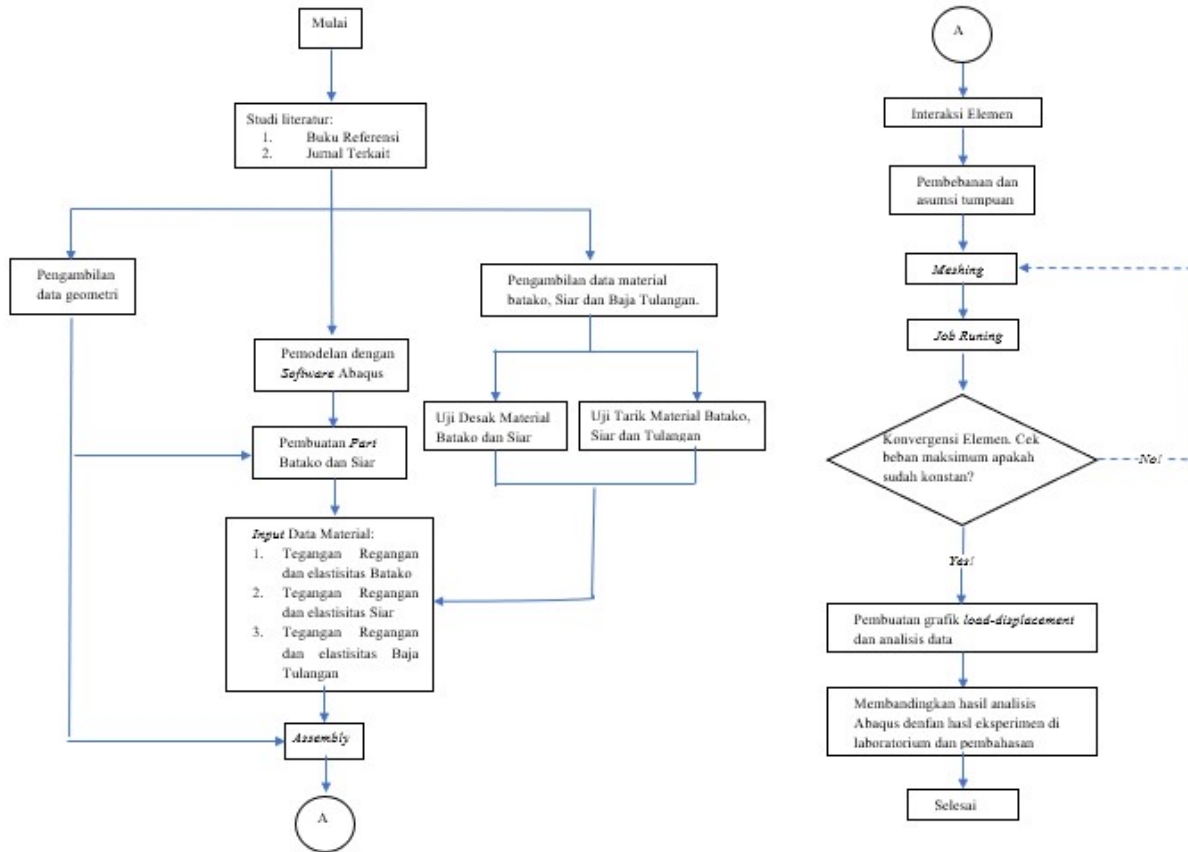
Abaqus memiliki banyak pilihan elemen yang dapat digunakan untuk memodelkan beton dan elemen struktur lainnya. Beberapa elemen yang disediakan dalam Abaqus adalah:

1. *two-dimensional solids,*
2. *three-dimensional solid,*
3. *cylindrical solids,*
4. *infinite elements,*
5. *warping elements,*
6. *beam element,*
7. *membrane elements, dan*
8. *Shell elements.*

Menurut Syafa'at (2010), keunggulan lain dari penggunaan *software* Abaqus Cae adalah hasil analisis bisa langsung dilihat dengan simulasi. Sedangkan pada metode analitik yang berupa formulasi angka-angka, disamping membutuhkan pemahaman konsep-konsep dasar dan penguasaan rumus dalam menganalisis sebuah kasus, hasil plot juga tidak bisa langsung terlihat sebagaimana analisis pada Abaqus.

4. METODOLOGI

Tahapan yang akan digunakan dalam menyelesaikan penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut ini.

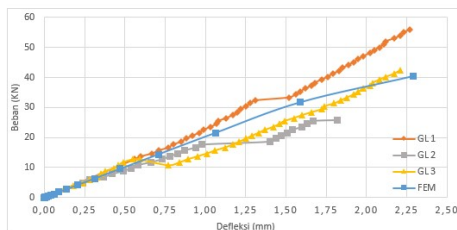


Gambar 1 Bagan atau alur penelitian

5. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Analisis dan Pembahasan Geser Lentur Unit Batako-kait

Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan geser lentur unit batako-kait, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.1.

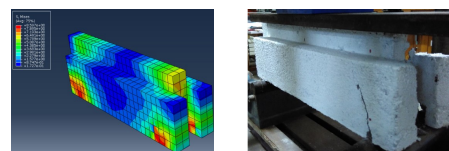


Gambar 5.1 Grafik Beban-Lendutan Pemodelan Geser Lentur

Dari Gambar 5.1 dapat diketahui bahwa hubungan beban-lendutan hasil pemodelan numerik mendekati hasil laboratorium. Kedekatan tersebut dapat dilihat dari kemiringan kurva respon beban

dan lendutan. Hingga beban mencapai 20 kN kurva respon beban dan lendutan hasil pemodelan numerik berhimpit dengan hasil pengujian di laboratorium. Nilai beban maksimum dan lendutan maksimum yang di dihasilkan mendekati dengan hasil eksperimen, kecuali pada beban maksimum benda uji GL2 yang cukup berbeda. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh ketidak seragaman mutu benda uji.

Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2



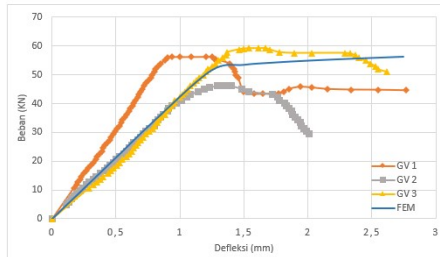
(a)

(b)

Gambar 5.2 (a) Pola Kerusakan Eksperimen GL, (b) Konsentrasi Tegangan GL

5.2 Hasil Analisis dan Pembahasan Geser Vertikal Unit Batako-kait

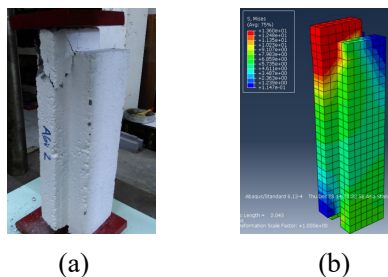
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan geser vertikal unit batako-kait, diperoleh hubungan beban-lendutan dan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Grafik Beban-Lendutan Pemodelan Geser Vertikal

Gambar 5.3 memperlihatkan tren yang sama (berhimpit) pada respon beban-lendutan unit pengujian dan pemodelan geser bertikal pada unit batako-kait GV2 dan GV3 hingga bebann 40 kN, kecuali benda uji GV1. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh tingkat kepadatan yang lebih besar dibandingkan yang lainnya.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.4.



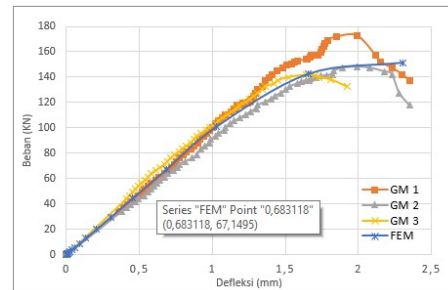
Gambar 5.4 (a) Pola Kerusakan Eksperimen GV, (b) Konsentrasi Tegangan GV

Dari Gambar 5.4 dapat dilihat kerusakan pada pengujian geser vertikal unit batako-kait terdapat retak pada bagian atasnya. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen. Hal tersebut

menunjukkan terdapat kesesuaian antara pemodelan numerik dengan hasil eksperimen.

5.3 Hasil Analisis dan Pembahasan Geser Murni Unit Batako-kait

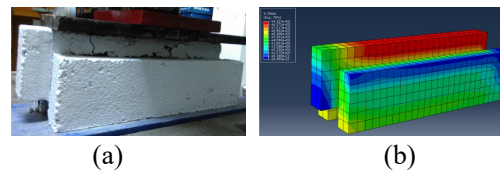
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan geser murni unit batako-kait, diperoleh hubungan beban-lendutan dan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Grafik Beban-Lendutan Pemodelan Geser Murni

Dari Gambar 5.84 diatas dapat dilihat bahwa hingga beban mencapai 140 kN hubungan respon beban-lendutan hasil numerik berhimpit dengan hasil pengujian. Tetapi setelah beban melebihi 140 kN hanya berhimpit dengan benda uji GM2. Benda uji GM1 mengalami kenaikan beban hingga mencapai beban maksimum sebesar 172.66 kN, sedangkan benda uji GM2 mengalami penurunan beban hingga benda uji hancur. Hal tersebut terjadi kemungkinan disebabkan oleh kepadatan material benda uji yang berbeda.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.6.



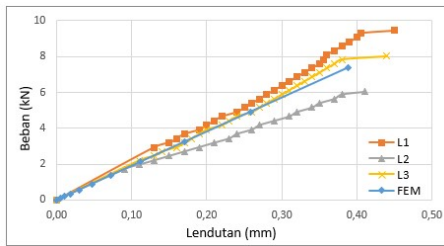
Gambar 5.6 (a) Pola Kerusakan Eksperimen GM, (b) Konsentrasi Tegangan GM

Berdasarkan Gambar 5.6 dapat dilihat kerusakan pada pengujian geser murni unit batako-kait

terdapat retak pada bagian atasnya. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen. Hal tersebut menunjukkan terdapat kesesuaian antara pemodelan numerik dengan hasil eksperimen.

5.4 Hasil Analisis dan Pembahasan Lentur Unit Batako-kait

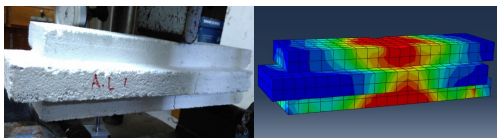
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan lentur unit batako-kait, diperoleh hubungan beban-lendutan dan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Grafik Beban-Lendutan Pemodelan Lentur

Gambar 5.7 menunjukkan kedekatan respon beban-lendutan antara hasil pemodelan numerik dengan pengujian lentur unit batako-kait di laboratorium. Kemiringan kurva respon beban-lendutan hasil numerik memiliki kedekatan yang cukup besar pada benda uji L1 dan L3, sedangkan benda uji L2 memiliki kemiringan yang lebih kecil dibandingkan dengan lainnya.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.8.

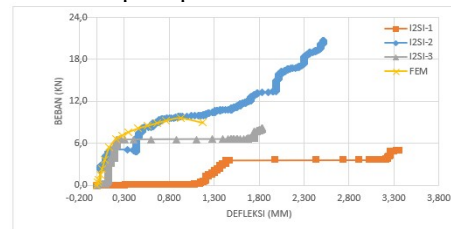


(a) (b)
Gambar 5.8 (a) Pola Kerusakan Eksperimen L,
(b) Konsentrasi Tegangan L

Pola kerusakan benda uji pengujian lentur yang ditunjukkan oleh Gambar 5.8 (a) terjadi pada tengah bendang. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.5 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I2SI

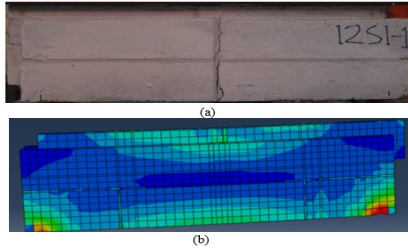
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I2SI, diperoleh hubungan beban-lendutan dan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Grafik Beban-Lendutan I2SI

Respon beban-lendutan yang terlihat pada Gambar 5.88 menunjukkan kedekatan hasil pemodelan numerik dengan benda uji I2SI-2 dan I2SI-3. Hingga beban mencapai 6 kN kurva respon beban-lendutan masih berhimpit dengan benda uji I2SI-2 dan I2SI-3. Sedangkan terdapat perbedaan yang cukup signifikan terhadap pengujian I2SI-1, hal tersebut terjadi kemungkinan dikarenakan tidak seragamnya kepadatan batako-kait atau tidak seragamnya material siar pasangan dinding. Untuk beban maksimum dan lendutan maksimum hasil pemodelan numerik memiliki kedekatan yang cukup besar dengan benda uji I2SI-3, dimana persentase keberhasilannya berturut-turut ialah 82.01% dan 64.06%.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.10.

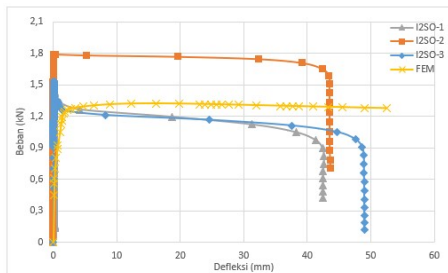


Gambar 5.10 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I2SI, (b) Konsentrasi Tegangan I2SI

Dari Gambar 5.10 dapat dilihat kerusakan pada pengujian unit pasangan dinding batako-kait I2SI terdapat retak pada bagian tengah bentang. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.6 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I2SO

Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga non-linier dengan program abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I2SO, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.11.

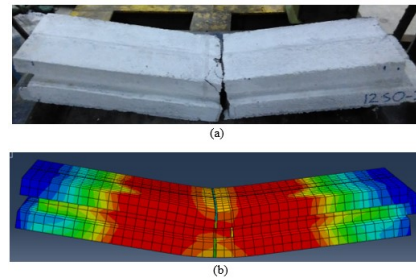


Gambar 5.11 Grafik Beban-Lendutan I2SO

Gambar 5.11 menunjukkan tren respon beban-lendutan yang sama (berhimpit) antara hasil pemodelan numerik dengan hasil pengujian di laboratorium hingga beban 1,2 kN. Setelah itu kurva beban-lendutan hasil pemodelan, benda uji unit dinding pasangan batako-kait I2SO-1 dan I2SO-3 tidak mengalami penambahan beban namun lendutan semakin bertambah. Sedangkan benda uji I2SO-2 mengalami pertambahan beban hingga mencapai 1,79 kN. Nilai beban maksimum dan lendutan maksimum hasil pemodelan numerik juga memiliki kedekatan dengan hasil pengujian di laboratorium.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil

analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.12.

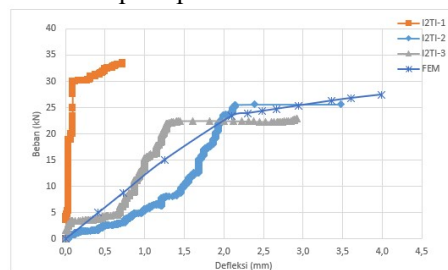


Gambar 5.12 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I2SO, (b) Konsentrasi Tegangan I2SO

Dari Gambar 5.12 dapat dilihat kerusakan pada pengujian unit dinding pasangan batako-kait I2SO terdapat retak pada bagian tengah bentang. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.7 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I2TI

Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I2TI, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.13.

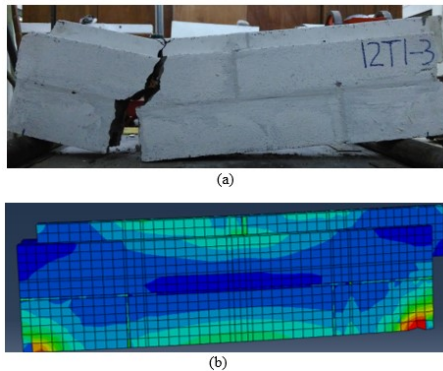


Gambar 5.13 Grafik Beban-Lendutan I2TI

Tren respon beban-lendutan yang ditunjukkan pada Gambar 5.13 terlihat hasil pemodelan berhimpit dengan hasil pengujian benda uji I2TI-2 pada beban 25 kN hingga benda uji hancur. Sedangkan pada saat beban 0 sampai 20 kN tidak terjadi kedekatan antara hasil pemodelan dan hasil eksperimen, namun tren pemodelan numerik masiberada diantara tren hasil pengujian I2TI-2 dan I2TI-3. Hal tersebut terjadi kemungkinan karena pada saat pengujian *increment* beban yang diberikan tidak stabil, sehingga kurva beban-lendutan yang dihasilkan tidak halus. Sedangkan terhadap benda

uji I2TI-1 terdapat perbedaan tren yang cukup signifikan, hal tersebut terjadi kemungkinan karena berbedanya kepadatan benda uji. Meskipun demikian, nilai beban maksimum dan lendutan maksimum antara pemodelan numerik dengan hasil pengujian di laboratorium cukup memiliki kedekatan kecuali pada benda uji I2TI-1.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.14.

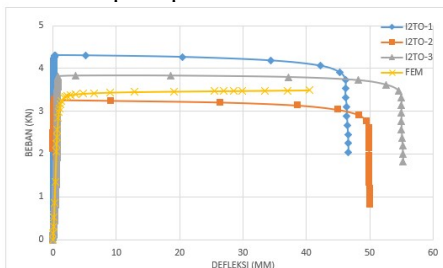


Gambar 5.14 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I2TI, (b) Konsentrasi Tegangan I2TI

Gambar 5.14 (a) menunjukkan pola kerusakan benda uji I2TI terjadi pada sambungan atau pada siar benda uji tersebut. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat konsentrasi tegangan terbesar ditandai dengan warna biru muda terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.8 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I2TO

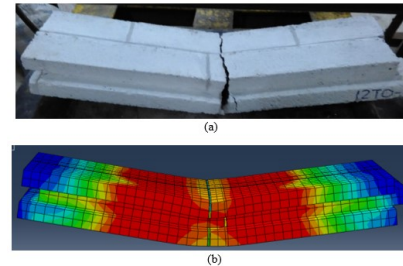
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I2TO, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.94.



Gambar 5.15 Grafik Beban-Lendutan I2TO

Respon beban-lendutan yang ditunjukkan pada Gambar 5.15 terlihat tren yang sama pada hasil pemodelan numerik dengan hasil pengujian di laboratorium hingga beban mencapai 3 kN. Setelah beban melebihi 3 kN hasil pemodelan dan benda uji I2TO-2 mengalami penambahan beban tidak signifikan tetapi lendutan semakin bertambah besar. Sementara itu benda uji I2TO-1 mengalami penambahan beban hingga mencapai 4.31 kN dan benda uji I2TO-3 hingga 3.83, setelah itu mengalami hal yang sama seperti benda uji I2TO-2. Meski demikian, tren respon beban lendutan pemodelan numerik setelah beban 3 kN masih berada di antara tren hasil pengujian di laboratorium.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.16.

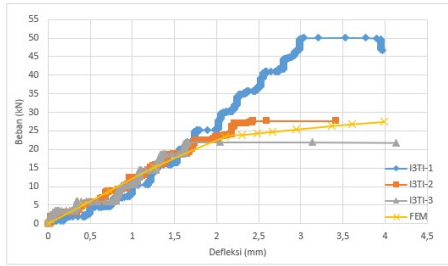


Gambar 5.16 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I2TO, (b) Konsentrasi Tegangan I2TO

Dari Gambar 5.16 dapat dilihat kerusakan pada pengujian unit dinding pasangan batako-kait I2TO terdapat retak pada bagian tengah bentang. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.9 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I3TI

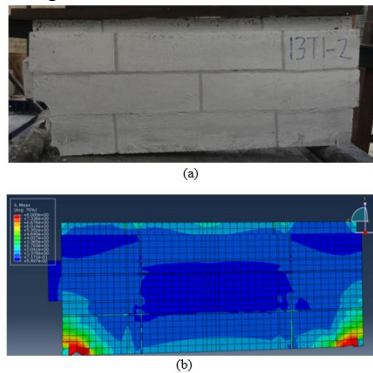
Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga non-linier dengan program Abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I3TI, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.17.



Gambar 5.17 Grafik Beban-Lendutan I3TI

Gambar 5.17 menunjukkan tren respon beban-lendutan yang sama antara hasil pemodelan dengan hasil pengujian unit dinding batako-kait I3TI hingga beban 25 kN, setelah itu beban tidak bertambah secara signifikan dan lendutan semakin bertambah kecuali benda uji I3TI-1. Setelah beban diatas 25 kN, tren respon beban-lendutan hasil pemodelan berada diantara tren benda uji I3TI-2 dan I3TI-3, sedangkan benda uji I3TI-1 bertambah terus hingga beban mencapai 50.14 kN. Nilai beban maksimum dan lendutan maksimum hasil pemodelan memiliki kedekatan yang cukup baik pada benda uji I3TI-2 dan I3TI3.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.18.

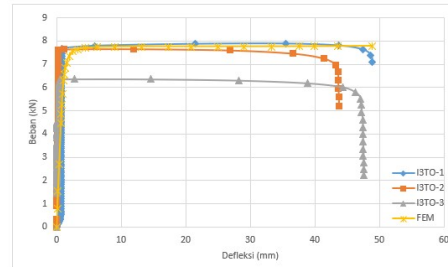


Gambar 5.18 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I3TI, (b) Konsentrasi Tegangan I3TI

Dari Gambar 5.18 dapat dilihat kerusakan pada pengujian unit dinding pasangan batako-kait I3TI terdapat retak pada bagian tumpuan. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar yang ditandai dengan warna biru muda terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.10 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Pasangan Batako-kait I3TO

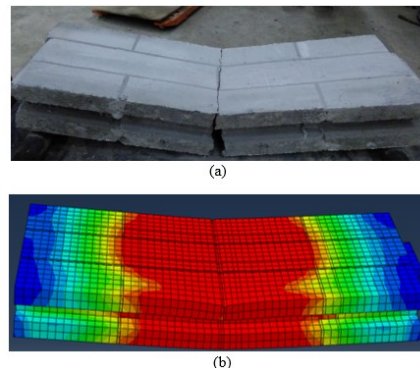
Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan dinding pasangan batako-kait I3TO, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.19.



Gambar 5.19 Grafik Beban-Lendutan I3TO

Gambar 5.19 memperlihatkan tren yang sama (berhimpit) terhadap respon beban-lendutan pada unit pasangan dinding batako-kait I3TO-1 dan I3TO-2 hingga benda uji hancur. Sedangkan untuk benda uji I3TO-3 kurva beban-lendutan berhimpit hingga beban mencapai 6 kN. Hal tersebut terjadi kemungkinan dikarenakan kepadatan benda uji yang berbeda dengan lainnya. Nilai beban maksimum dan lendutan hasil pemodelan memiliki kedekatan yang cukup baik dengan hasil pengujian di laboratorium.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.20.



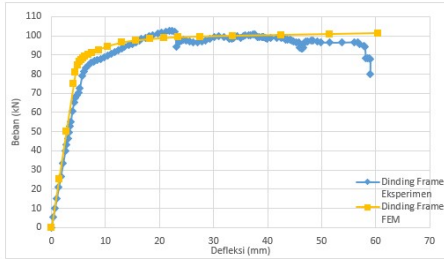
Gambar 5.20 (a) Pola Kerusakan Eksperimen I3TO, (b) Konsentrasi Tegangan I3TO

Dari Gambar 5.99 dapat dilihat kerusakan pada pengujian unit dinding pasangan unit batako-kait terdapat retak pada bagian tengah bentang. Hal yang sama terjadi pada pemodelan numerik yang dapat dilihat dimana konsentrasi tegangan terbesar

yang ditandai dengan warna merah terdapat pada daerah yang sama dengan hasil eksperimen.

5.11 Hasil Analisis dan Pembahasan Dinding Frame

Berdasarkan hasil analisis dengan metode elemen hingga non-linier menggunakan program Abaqus pada pemodelan dinding *frame* pasangan batako, diperoleh hubungan beban-lendutan dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium seperti pada Gambar 5.21.



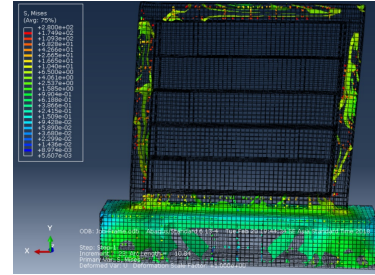
Gambar 5.21 Grafik Beban-Lendutan Dinding Frame

Gambar 5.21 menunjukkan tren respon beban-lendutan yang memiliki kedekatan antara hasil pengujian di laboratorium dengan hasil pemodelan numerik, meskipun hasil pemodelan numerik memiliki tren yang lebih kaku dibandingkan dengan hasil eksperimen. Meskipun demikian, hasil yang ditunjukkan pada Gambar 5.21 cukup membuktikan bahwa pemodelan dapat dilakukan dengan pemodelan numerik. Nilai beban maksimum dan lendutan maksimum antara pemodelan numerik dengan hasil eksperimen memiliki kedekatan yang baik.

Selain nilai beban dan lendutan, pola kerusakan dari eksperimen di laboratorium dapat dibandingkan dengan visualisasi konsentrasi tegangan hasil analisis numerik yang menunjukkan pola kerusakan pada pemodelan numerik. Pola kerusakan hasil pengujian di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 5.21, dan hasil pemodelan numerik pada Gambar 5.22.



Gambar 5.22 Gambar Pola Kerusakan Eksperimen Dinding Frame



Gambar 5.23 Gambar Konsentrasi Tegangan Dinding Frame

Gambar 5.22 menunjukkan pola kerusakan pada benda uji dinding *frame* dalam pengujian di laboratorium. Kerusakan benda uji terjadi pada kolom prakti yang berada dibawah bidang pembebanan. Kerusakan tersebut memiliki pola yang sama dengan hasil pemodelan numerik yang ditunjukkan oleh konsentrasi tegangan pada daerah yang sama seperti pada Gambar 5.23.

6.1 Simpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian unit batako-kait dan dinding pasangan batako-kait yang dimodelkan dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Abaqus terhadap perilakunya adalah sebagai berikut.

1. Dari hasil pemodelan numerik terhadap unit batako-kait menunjukkan perilaku yang mendekati hasil pengujian terhadap benda uji di laboratorium. Persentase keberhasilan beban maksimum terbesar dari pemodelan GL, GV, GM dan L berturut-turut ialah 95.27%, 96.70%, 97.73% dan 92.33%. Sedangkan persentase keberhasilan lendutan maksimum berturut-turut sebesar 99.12%, 99.12%, 99.09% dan 94.76%.
2. Dilihat dari tren respon beban-lendutannya, pemodelan I2SO lebih memiliki kedekatan dengan hasil pengujian di laboratorium dibandingkan dengan pemodelan I2SI. Persentase keberhasilan beban maksimum terbesar dari pemodelan I2SI dan I2SO berturut-turut sebesar 82.01% dan 86.59%, sedangkan lendutan maksimumnya sebesar 64.06% dan 92.86%.
3. Pada pemodelan I2TI tren respon beban-lendutan hasil pemodelan memiliki kedekatan dengan benda uji I2TI-2 dan I2TI-3, sedangkan pada pemodelan I2TO kedekatan terjadi pada semua benda uji. Persentase keberhasilan beban maksimum terbesar dari pemodelan I2TI dan I2TO berturut-turut sebesar 92.89% dan 93.34%, sedangkan lendutan maksimumnya sebesar 85.18% dan 86.74%.

4. Hasil pemodelan I3TI dan I3TO menunjukkan tren respon beban-lendutan yang sama dengan hasil peengujian di laboratorium. Beban maksimum dan lendutan maksimum dari kedua pemodelan tersebut juga memiliki kedekatan yang cukup baik. Persentase keberhasilan beban maksimum terbesar dari pemodelan I3TI dan I3TO berturut-turut sebesar 99.32% dan 98.62%, sedangkan lendutan maksimumnya sebesar 99.56% dan 99.95%.
5. Hasil pemodelan dinding *frame* menunjukkan tren respon beban-lendutan yang sama dengan hasil peengujian di laboratorium. Beban maksimum dan lendutan maksimum dari kedua pemodelan tersebut juga memiliki kedekatan yang cukup baik. Persentase keberhasilan beban maksimum sebesar 99.98%, sedangkan lendutan maksimumnya sebesar 99.97.

6.2 Saran

1. Tidak lengkapnya data *material properties* yang didapatkan akan mengakibatkan hasil pemodelan tidak sesuai dengan hasil eksperimen. Oleh sebab itu harus mencari data-data material yang diperlukan dalam pemodelan.
2. Dalam penelitian ini ikatan antara batako-kait dan siar dimodelkan sebagai *tie function*, hal tersebut belum sepenuhnya mewakili kondisi asli di laboratorium. Oleh karena itu perlu dilakukan pengujian kuat lekat antara batako-kait dan siar yang digunakan.
3. Perlu dilakukannya penelitian serupa menggunakan *software finite element* lain, sehingga dapat membandingkan hasil yang didapat.

Daftar Pustaka

- Anonim. 2012. *SNI 03-0349-1989 Bata Beton untuk Pasangan Dinding*. Penerbit Badan Standarisasi Nasional (BSN). Jakarta
- Anonim, 1982, *Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI – 1982)*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung.
- Al-Osta, M.A., Isa, M.N., Baluch, M.H., dan Rahman, M.K. *Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*. Elsevier. Saudi Arabia. 31 Desember 2016.
- Bambang, S. 2000. *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Cook, D. Robert. (1990), *Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Terjemahan oleh Bambang Suryoatmono. 1990. PT. Eresco. Bandung.
- Darmono, 2009, *Aplikasi Teknologi Produksi Bahan Bangunan Berbahan Pasir Sebagai Salah Satu Wujud Model Pendidikan Kecakapan Hidup Berbasis Masyarakat Pedesaan*, Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- Dassault Systemes. 2011. *Abaqus Analysis User's Manual*. RI, USA Dassault Systemes Dassaults System Corp.
- Echols, John M dan Shadily, Hassan (1995). *Kamus Inggris Indonesia*, PT. Gramedia, Jakarta.
- Haach, Vladimir G., Vasconcelos, G., dan Lourenco, Paulo B. *Numerical Analysis of Concrete Block Masonry Beams Under Three Point Bending*. Elsevier. Portugal. 23 September 2011.
- Hela, B., Liman, O., Aidi, M., dan Jelidi, A. *Experimental and Numerical Study of Interlocking Stabilized Earth Block Mechanical Behavior*. Elsevier. Tunisia. 22 Juni 2016.
- Kurniawan, S.C.M. *Analisis Numerik Perilaku Sambungan Balok-Kolom Beton Pracetak Tipe SRPM-PB2*. Tesis. (Tidak Diterbitkan). Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Lorenzo, M., Angelo, G., Patrick, F., dan Muller, Urs. *Experimental Testing and Finite Element Modeling of Earth Block Masonry*. Elsevier. Berlin. 3 Oktober 2015.
- Supribadi, 1986, *Dinding Panel Kering (Paving Block)*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Sofia, W. Alisjahbana. 2016. *Metode Elemen Hingga*. Teknosain. Yogyakarta.
- Teguh, M. (2011), *Sharing Experience and Lessons and Learned in Disaster Management System in Indonesia*. Asian Transaction on Engineering. Vol. 01 (Issue 05): pp. 35-44.
- Teguh, M. Makrup, L, Suharyatmo (2018), *Inovasi Batako-kait Sebagai Alternatif Dinding Pasangan Rumah Sederhana Tahan Gempa*. Laporan Penelitian. DPPM Universitas Islam Indonesia.
- Wang, G., Yingmin, Li., Nina, Z., dan Ingham, J. *Testing and Modeling the In-plane Seismic Response of Clay Brick Interlocking Blocks*. Elsevier. China. 2 November 2016.