

# ANALISIS DINDING PASANGAN BATU BATA TERHADAP RESPON BEBAN BERULANG DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Christin Remayanti, Sri Murni Dewi, Alwafi Pujiraharjo  
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang  
Jl. MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia  
E-mail : may\_christin@yahoo.com

## ABSTRAK

Perilaku mekanik dari dinding pasangan batu bata atau *masonry* batu bata dipengaruhi oleh perilaku mekanik bahan penyusunnya yaitu batu bata dan spesi yang dapat diperoleh dengan melakukan penelitian di laboratorium. Selanjutnya hal tersebut dapat digunakan untuk mengetahui perilaku mekanik dinding pasangan batu bata secara komputasi. Salah satu cara untuk mengetahui perilaku *masonry* batu bata secara komputasi adalah dengan menggunakan metode elemen hingga. Teknik pemodelan dengan metode elemen hingga terdiri dari dua jenis model yaitu model makro dan model mikro. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perbedaan bentuk model mikro dan model makro pada analisis dinding pasangan batu bata terhadap respon beban berulang, mengetahui pengaruh penggunaan *bracing* pada dinding pasangan batu bata dan pengaruh penggunaan bambu sebagai bahan alternatif *bracing* bila dibandingkan dengan menggunakan *bracing* dari bahan baja. Penelitian dilakukan pada model makro dan mikro secara numerik sehingga didapatkan perpindahan, regangan dan tegangan yang terjadi akibat beban berulang. Penelitian ini menunjukkan bahwa model makro lebih sederhana daripada model mikro dan juga menunjukkan bahwa dengan penambahan *bracing* baik dari bahan baja maupun bambu pada dinding pasangan batu bata dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan dinding terhadap respon beban berulang.

**Kata kunci** : beban berulang, *masonry*, metode elemen hingga, model makro, model mikro,

## PENDAHULUAN

*Masonry* batu bata atau yang lebih sering dikenal sebagai dinding pasangan batu bata merupakan material komposit yang terdiri dari unit batu bata dan spesi sebagai material pengikatnya. Perilaku mekanik dari *masonry* batu bata dipengaruhi oleh perilaku mekanik bahan penyusunnya yaitu batu bata dan spesi (P. B Lourenco *et al*, 2006). Perilaku mekanik *masonry* batu bata dapat dilakukan dengan penelitian di laboratorium sehingga diperoleh data-data mekanik bahan penyusun (batu bata dan spesi). Selanjutnya data tersebut dapat digunakan untuk mengetahui perilaku mekanik *masonry* batu bata secara komputasi.

Salah satu cara untuk mengetahui perilaku *masonry* batu bata secara komputasi adalah dengan menggunakan metode elemen hingga. Metode ini untuk mendapatkan gambaran yang baik

mengenai perilaku mekanik *masonry* yaitu gaya-gaya dalam yang terjadi pada titik-titik yang diinginkan, dimana tidak dapat diketahui melalui penelitian laboratorium. Studi yang sedang berkembang saat ini adalah pemodelan *masonry* untuk material unit batu bata dan spesi yang dihomogenkan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan adalah analisis *masonry* batu bata dengan beban aksial (J. Bakhteri *et al*, 2004) dan analisis numerik homogen pada *masonry* batu bata (M. Kuczma *et al*, 2005).

Berdasarkan material bahan yang diasumsikan homogen, maka dilakukan analisis dengan metode elemen hingga untuk mengetahui perilaku *masonry*. Dengan adanya perbedaan penggunaan material (batu bata-spesi dan material homogen) pada metode elemen hingga akan diketahui perbedaan perilaku *masonry* antara kedua material tersebut.

Untuk mengetahui pemodelan metode elemen hingga baik dengan material batu bata-spesi (dikenal sebagai model mikro) maupun material homogen (dikenal sebagai model makro) maka dilakukan penelitian analisis *masonry* batu bata pada saat diberi beban berulang. Analisis dilakukan untuk mengetahui perpindahan, regangan dan tegangan yang terjadi pada *masonry*. Sebelum penelitian analisis dilakukan, telah dilakukan penelitian laboratorium dengan menggunakan model yang sama (L. Susanti, 2010). Akan tetapi, penelitian analisis ini memiliki kelebihan yaitu melakukan perhitungan gaya-gaya dalam pada titik-titik pengamatan yang lebih banyak daripada penelitian laboratorium. Selain itu pada *masonry* batu bata akan ditambahkan *bracing* untuk meningkatkan kemampuan *masonry*. Pada umumnya *bracing* menggunakan bahan baja, akan tetapi dapat juga digunakan bahan lain yang lebih murah serta dapat memberikan daya dukung yang baik sebagai bahan alternatif.

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah mengetahui perbedaan bentuk model mikro dan model makro pada analisis dinding pasangan batu bata terhadap respon beban berulang, mengetahui pengaruh penggunaan *bracing* pada dinding pasangan batu bata dan pengaruh penggunaan bambu sebagai bahan alternatif *bracing* bila dibandingkan dengan menggunakan *bracing* dari bahan baja.

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan model dinding pasangan batu bata merah tanpa spesi penutup pada dinding.
2. *Bracing* dipasang pada arah diagonal dinding.
3. Bahan *bracing* menggunakan material baja dan bambu.

4. Pembebanan menggunakan beban siklik (monotonik bolak balik) dengan mengabaikan pengaruh waktu.

### **Model Komputasi untuk *Masonry***

*Masonry* merupakan salah satu bagian penting dalam struktur sehingga telah dilakukan banyak studi teori, eksperimen dan perhitungan komputasi untuk menambah pengetahuan mengenai *masonry*. Tujuan dari banyak penelitian tersebut adalah untuk menemukan model konstitutif yang dapat mensimulasi respon kompleks dari struktur *masonry* yang diberi beban statis dan dinamis.

Dua macam pendekatan dasar telah dikembangkan dengan tujuan untuk memformulasikan pendekatan yang sesuai untuk struktur *masonry*, yaitu *discrete model* dan *continuous model* (P.B Lourenco, 1996). *Discrete model* dapat disebut juga sebagai model heterogenesis dimana pada pemodelan ini, unit dan spesi diperhitungkan secara terpisah.

Terdapat dua model pendekatan dimana setiap elemen struktur *masonry* dipelajari dan distribusi blok dan join dapat diperhitungkan, yaitu (P. G. Riveccio):

#### *1. Detailed micro-modeling*

Pada pemodelan ini nilai modulus Young dan rasio Poisson dari unit dan spesi diperhitungkan.

#### *2. Simplified micro-modeling*

Pada pemodelan ini, unit yang diperlebar merupakan elemen kontinum dimana spesi dan *interface* unit-spesi menjadi satu sehingga terbentuk *interface* rata-rata. Pada model ini efek Poisson dari spesi tidak diperhitungkan.

Sedangkan *continuous model* dikenal juga sebagai model homogen atau dapat disebut sebagai pemodelan makro (*macro-modeling*) dimana pada pendekatan ini, unit, mortar dan *interface* unit-mortar dipresentasikan dengan kontinum yang ekuivalen. Beberapa

penelitian prosedur homogenisasi yang telah dilakukan salah satunya adalah prosedur homogenisasi oleh P.B. Lourenco dan A. Zucchini dimana langkah awal dari teknik ini adalah dengan mengambil RVE/sel dasar (P. B Lourenco *et al*, 2006) yang dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2** dimana sel dasar tersebut terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut (P. G. Riviuccio):

- *Head joint* (a dan g)
- *Cross joint* (c dan e)
- Unit (b dan f)
- *Bed joint* (d)

Dengan mengikuti langkah prosedur homogenisasi Lourenco tersebut maka Riviuccio dapat memperoleh matriks properti/bahan dari sel homogen sebagai berikut (P. G. Riviuccio):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & 0 \\ S_{1122} & S_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \quad (1)$$

dengan :  $x = 1, y = 2$

$$S_{1111} = S_{2222} = \frac{\frac{hl}{E_b} + \frac{hl}{E_f} + t_s \left( \frac{h}{E_a} + \frac{h}{E_g} + \frac{2l}{E_d} + \frac{2t_s}{E_c} + \frac{2t_s}{E_e} + \frac{2t_s}{E_e} \right)}{2(h+t_s)(l+t_s)}$$

$$S_{1122} = \frac{\frac{ht_s v_a}{E_a} + \frac{hl v_b}{E_b} + \frac{ht_s v_c}{E_c} + \frac{2(l-t_s)t_s v_d}{E_d} + \frac{2t_s^2 v_e}{E_e} + \frac{ht_s v_f}{E_f} + \frac{ht_s v_g}{E_g}}{2(h+t_s)(l+t_s)}$$

$$S_{1212} = \frac{1}{2G_y} = \frac{4G_b G_d h t_s (h+t_s) + E_d l (l+t_s) (G_d h + G_b t_s)}{2G_d (h+t_s) (E_d G_b l^2 + G_a (E_d l t_s + 4G_b h (l+t_s)))} + \frac{4G_d h (G_b t_s (l+t_s) + G_d (hl - t_s^2))}{2G_d (h+t_s) (E_d G_b l^2 + G_a (E_d l t_s + 4G_b h (l+t_s)))}$$

$$G = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$E_a = E_c = E_d = E_e = E_g =$  modulus Young spesi

$E_b = E_f =$  modulus Young batu bata

$\nu_a = \nu_c = \nu_d = \nu_e = \nu_g =$  rasio Poisson spesi

$\nu_b = \nu_f =$  rasio Poisson batu bata

$G_a = G_d =$  modulus Lamé spesi

$G_b =$  modulus Lamé batu bata

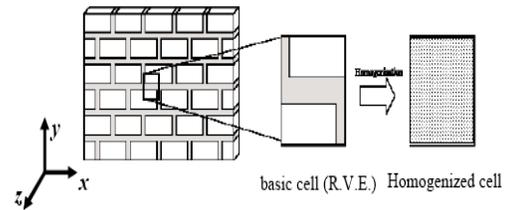
$h =$  ½ tinggi batu bata

$l =$  ½ lebar batu bata

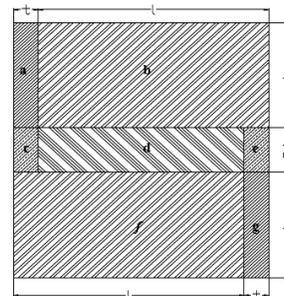
$t_s =$  ½ tebal spesi

### Pemodelan *Masonry* dengan Metode Elemen Hingga

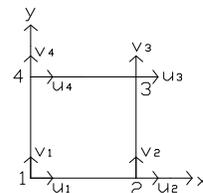
Dalam metode elemen hingga perlu ditetapkan fungsi perpindahan umum dan fungsi perpindahan interpolasi yang dinyatakan dalam perpindahan titik simpul. Pada pembebanan *in-plane*, fungsi interpolasi dinyatakan dalam perpindahan bidang ( $u, v$ ) dan untuk melakukan analisis digunakan model elemen hingga segi empat.



**Gambar 1.** Pengambilan sel dasar untuk proses homogenisasi (Sumber: Riviuccio, P. G.)



**Gambar 2.** Pembagian pada sel dasar (R.V.E) *masonry* (Sumber: Riviuccio, P. G.)



**Gambar 3.** Gambaran perpindahan  $u, v$

Kedelapan derajat bebas dapat dilihat pada **Gambar 3** dan memiliki medan peralihan terasumsi yang berbentuk sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \{a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8\}$$

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (2)$$

$$v(x, y) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy$$

$a_1$  sampai dengan  $a_8$  merupakan konstanta yang menunjukkan bahwa elemen segi empat memiliki empat simpul dan tiap titik simpul memiliki dua perpindahan sehingga elemen memiliki delapan derajat kebebasan (*degrees of freedom*).

Hubungan regangan dan perpindahan dalam mekanika kontinum adalah:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Kemudian  $u$  dan  $v$  disubstitusi dengan persamaan (2) sehingga persamaan (3) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\varepsilon = [B]\{d\} \quad (4)$$

Dengan matriks  $[B]$  adalah matriks hubungan regangan-perpindahan yang berukuran  $3 \times 8$ .

Hubungan tegangan-regangan untuk kondisi *plane stress* dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (5)$$

Dimana matriks bahan  $[E]$  sebagai berikut:

$$[E] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dengan:

$E$  = modulus Young

$\nu$  = rasio Poisson

Sehingga matriks kekakuannya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$[k] = \int_{-c}^c \int_{-b}^b [B]^T [E] [B] dV = \int_{-c}^c \int_{-b}^b [B]^T [E] [B] t dx dy \quad (7)$$

Sedangkan untuk mencari matriks kekakuan elemen *masonry* homogen maka matriks bahan  $[E]$  diganti dengan matriks bahan  $[S]$  dari persamaan (1), sehingga matriks kekakuannya menjadi:

$$[k] = \int_{-c}^c \int_{-b}^b [B]^T [S] [B] dV = \int_{-c}^c \int_{-b}^b [B]^T [S] [B] t dx dy \quad (8)$$

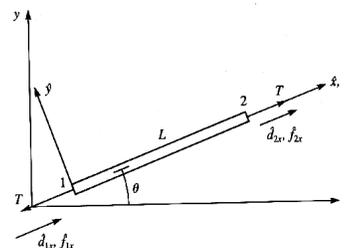
### Pemodelan *Bracing* dengan Metode Elemen Hingga

Untuk mencari kekakuan *bracing* maka untuk metode elemen hingga digunakan model elemen batang. Elemen batang diasumsikan prismatis, elastis linier, mempunyai hubungan sendi di ujung-ujungnya dan hanya mengalami gaya aksial. **Gambar 4** merupakan gambar batang yang diberi beban  $T$  dimana  $\hat{x}, \hat{y}$  adalah koordinat lokal dan  $\hat{d}_{1x}, \hat{d}_{2x}$  adalah perpindahan lokal (Logan, D.L. 1986).

Pada elemen batang, fungsi perpindahannya diasumsikan sebagai perpindahan linier sepanjang bidang  $\hat{x}$  pada batang sehingga hubungan regangan-perpindahan dan tegangan-regangan dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon_x = \frac{\hat{d}u}{\hat{d}x} = \frac{\hat{d}_{2x} - \hat{d}_{1x}}{L} \quad (9)$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (10)$$



**Gambar 4.** Batang diberi gaya  $T$ ; node perpindahan dan gaya-gaya (Sumber: Logan, D.L. , 1986)

Setelah dilakukan substitusi dengan persamaan yang lain maka akan diperoleh matriks kekakuan elemen yang dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$[\hat{k}] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kemudian matriks kekakuan elemen akan ditransformasikan untuk mencari matriks kekakuan global. Dengan menggunakan hubungan antara komponen gaya lokal dan gaya global serta hubungan antara komponen perpindahan lokal dan perpindahan global maka dapat dicari matriks kekakuan global melalui hubungan transformasi. Selanjutnya dapat diketahui matriks kekakuan global elemen batang adalah sebagai berikut:

$$[k] = \begin{bmatrix} g_1 & g_3 & -g_1 & -g_3 \\ g_3 & g_2 & -g_3 & -g_2 \\ -g_1 & -g_3 & g_1 & g_3 \\ -g_3 & -g_2 & g_3 & g_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

dengan:

$$g_1 = \frac{AE}{L} (\cos \theta)^2$$

$$g_2 = \frac{AE}{L} (\sin \theta)^2$$

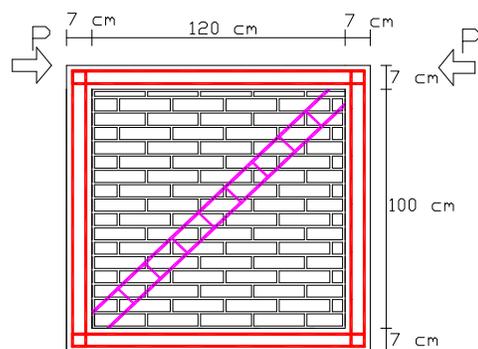
$$g_3 = \frac{AE}{L} (\cos \theta \cdot \sin \theta)$$

A = luas penampang *bracing*

E = modulus elastisitas *bracing*

L = panjang *bracing*

$\theta$  = sudut kemiringan *bracing*



**Gambar 5.** Model dinding pasangan batu bata dengan *bracing*

## METODE

Pada penelitian ini, model dinding *masonry* memiliki ukuran panjang 134 cm, lebar 114 cm. Sedangkan batu bata yang digunakan berukuran panjang 10 cm, lebar 7 cm dan tinggi 5 cm. Spesi yang digunakan mencapai ketebalan 1 cm. Model penelitian dapat dilihat pada **Gambar 5**.

Jumlah nodal yang akan diberi beban adalah 2 yaitu nodal yang berada di ujung atas kanan dan kiri. Beban nodal akan diberikan secara bergantian dari ujung kiri terlebih dahulu kemudian ujung kanan. Beban yang diberikan terdiri dari beberapa tahap. Sebesar 20% beban runtuh (diperoleh dari data penelitian) untuk tahap 1, Selanjutnya 40% untuk tahap 2 dan seterusnya hingga mencapai beban runtuh. Sebagai contoh: pada tahap 1, beban awal adalah 0 kemudian diberi beban  $\frac{1}{2}$  dari 20% beban runtuh kemudian beban naik menjadi 20% beban runtuh, selanjutnya beban turun kembali menjadi  $\frac{1}{2}$  dari 20% beban runtuh dan akhirnya menjadi 0.

Sesuai dengan tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui pemodelan elemen hingga *masonry* baik secara makro maupun mikro, maka model *masonry* akan menjadi dua model yaitu model makro dan model mikro. Model akan didiskretisasi sesuai dengan kondisi masing-masing model yaitu pada model makro, batu bata dan spesi menjadi material homogen sedangkan pada model mikro, batu bata dan spesi diperhitungkan masing-masing. Kemudian analisis untuk mencari perpindahan, regangan dan tegangan pada dinding pasangan batu bata baik tanpa *bracing* maupun dengan *bracing* dilakukan secara numerik.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada analisis data secara numerik akan digunakan data-data material yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Data material untuk analisis

Bahan	Modulus Elastisitas (Mpa)	Poisson ratio	Luas penampang (mm <sup>2</sup> )
Batu Bata	386.3	0.2	
Baja	200000		35.27
Bambu	30000		64
Beton	17647.6	0.16	
Spesi	879.3	0.2	

Sumber : data penelitian, 2010

Sedangkan data beban yang digunakan diperoleh dari penelitian sebelumnya adalah:

- $P_{maks}$  tanpa *bracing* = 16200 N
- $P_{maks}$  dengan *bracing* baja = 18360 N
- $P_{maks}$  dengan *bracing* bambu = 19980 N

Analisis dinding pasangan batu bata dilakukan secara numerik dan kemudian terjadi juga penambahan *bracing* pada dinding pasangan batu bata dengan dua material yang berbeda yaitu baja dan bambu dan pembebanan diberikan pada ujung nodal secara bergantian. Sehingga model yang dianalisis terdiri dari enam jenis, yaitu model makro tanpa *bracing*, model makro dengan *bracing* baja, model makro dengan *bracing* bambu, model mikro tanpa *bracing*, model mikro dengan *bracing* baja dan model mikro dengan *bracing*.

### Model Makro dan Model Mikro

Setelah dilakukan diskretisasi pada model benda uji sesuai dengan definisi model makro dan model mikro yang telah dijabarkan sebelumnya, maka jumlah elemen dan nodal pada model mikro bertambah besar. Penambahan jumlah elemen tersebut akan mempengaruhi hasil yang akan keluar (*output*) karena semakin banyak jumlah elemen dan jumlah nodal maka *output* yang dihasilkan akan semakin teliti. Selain itu dibutuhkan waktu dan memori yang lebih banyak untuk menyelesaikan analisis model mikro Perbedaan antara model makro dan model mikro setelah dilakukan diskretisasi dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Perbedaan model makro dan model mikro setelah diskretisasi model benda uji

No.	Keterangan	Model makro	Model mikro
1	Jumlah elemen	672	1739
2	Jumlah nodal	725	1824
3	Jumlah derajat kebebasan ( <i>d.o.f</i> )	1450	3648

Sumber: hasil analisis, 2011

### Analisis Model Makro

Analisis yang pertama kali dilakukan adalah analisis dengan menggunakan model makro tanpa *bracing*, model makro dengan *bracing* baja, model makro *bracing* bambu. Hasil analisis yang didapat (*output*) merupakan perpindahan, tegangan dan regangan yang dihasilkan tiap titik nodal. Pada pembahasan ini hanya akan diambil satu titik nodal pengamatan saja sebagai perwakilan dari hasil analisis yang lain. Hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 6** dimana menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan *bracing* maka kekuatan dan kekakuan dinding pasangan batu bata bertambah.

Melalui **Tabel 3** dapat diketahui bahwa perpindahan arah x model makro tanpa *bracing* dengan beban maksimum ( $P_{maks}$ ) 16.2 KN mencapai 1.4731 mm sedangkan model makro *bracing* baja dengan  $P_{maks}$  18.36 KN mencapai 1.0403 mm dan model makro *bracing* bambu dengan  $P_{maks}$  19.98 KN mencapai 1.5686 mm. Hal ini berarti dengan adanya penambahan *bracing* dan kondisi beban maksimum yang berbeda maka perpindahan arah x model makro *bracing* baja 29.38% lebih kecil daripada model makro tanpa *bracing* baja dan perpindahan arah x model makro *bracing* bambu lebih besar 6.48% daripada model makro tanpa *bracing*.

Perpindahan arah y model makro tanpa *bracing* mencapai -0.1331 mm, model makro *bracing* baja mencapai -0.1432 mm (7.59% lebih kecil daripada perpindahan model makro tanpa *bracing*)

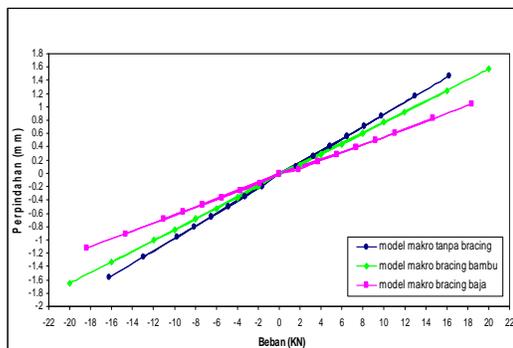
dan model makro *bracing* bambu mencapai -0.1423 mm (lebih kecil 6.91% daripada perpindahan model makro tanpa *bracing*).

Dengan besar pembebanan yang sama yaitu 16.2 KN maka diperoleh hasil analisis yang dapat dilihat pada **Tabel 4**. Melalui **Tabel 4** dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan *bracing* baja, perpindahan arah x mencapai 0.9101 mm yaitu 38.22% lebih kecil daripada perpindahan arah x makro tanpa *bracing*. Sedangkan dengan menggunakan bambu sebagai bahan *bracing*, perpindahan arah x mencapai 1.2640 mm yaitu 14.19% lebih kecil daripada model makro tanpa *bracing*.

**Tabel 3.** Hasil analisis model makro dengan beban berulang pada nodal 564

Jenis pengujian	Hasil
<b>Model makro tanpa <i>bracing</i></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	1.4731 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	-0.1331 mm
<b>Model makro dengan <i>bracing</i> baja</b>	
▪ Beban maksimum	18.36 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	1.0403 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	-0.1432 mm
<b>Model makro dengan <i>bracing</i> bambu</b>	
▪ Beban maksimum	19.98 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	1.5686 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	-0.1423 mm

Sumber : hasil analisis, 2011



**Gambar 6.** Grafik Hubungan Beban Perpindahan Arah x Model Makro pada Titik Nodal 564

**Tabel 4.** Hasil analisis model makro dengan beban yang sama pada nodal 564

Jenis pengujian	Hasil
<b>Model makro tanpa <i>bracing</i></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	1.4731 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	0.1331 mm
<b>Model makro dengan <i>bracing</i> baja</b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	0.9101 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	-0.1396 mm
<b>Model makro dengan <i>bracing</i> bambu</b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	1.2640 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	-0.1331 mm

Sumber : hasil analisis, 2011

Pada nodal 564, nilai regangan dan tegangannya bernilai 0, sehingga untuk mengetahui hasil analisis regangan dan tegangan model makro maka diambil nilai regangan terbesar yang terjadi pada nodal 224. Nilai regangan dan tegangan yang terjadi pada nodal tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5**. Penambahan *bracing* baja memberikan tambahan kekuatan sehingga regangan dan tegangan yang terjadi pada model makro *bracing* baja memiliki nilai yang lebih kecil daripada model makro tanpa *bracing* dengan rata-rata sebesar 93.64% untuk regangan dan 90.41% untuk tegangan.

### Analisis Model Mikro

Dengan menggunakan model mikro maka dapat diketahui gaya-gaya dalam yang terjadi pada tiap titik pertemuan (*interface*) antara material yang satu dengan yang lain. Seperti halnya dengan model makro, hasil analisis model mikro hanya akan diambil satu titik nodal pengamatan saja sebagai perwakilan dari hasil analisis yang lain.

Hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 7**.

**Tabel 5.** Hasil regangan dan tegangan model makro pada nodal 224

Jenis pengujian	Hasil
<b><u>Model makro tanpa bracing</u></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Regangan arah x maksimum	$3.3569 \times 10^{-4}$ mm
▪ Regangan arah y maksimum	$1.5259 \times 10^{-4}$ mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$3.3569 \times 10^{-4}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	$-9.8930 \times 10^{-9}$ MPa
▪ Tegangan arah y maksimum	$-2.7700 \times 10^{-9}$ MPa
▪ Tegangan arah xy maksimum	$1.8741 \times 10^{-8}$ MPa
<b><u>Model makro dengan bracing baja</u></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Regangan arah x maksimum	$-1.5259 \times 10^{-5}$ mm
▪ Regangan arah y maksimum	$1.5259 \times 10^{-5}$ mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$-1.5259 \times 10^{-5}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	$5.3074 \times 10^{-10}$ MPa
▪ Tegangan arah y maksimum	$-5.3074 \times 10^{-10}$ MPa
▪ Tegangan arah xy maksimum	$-7.9611 \times 10^{-10}$ MPa
<b><u>Model makro dengan bracing bambu</u></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Regangan arah x maksimum	$-3.7384 \times 10^{-4}$ mm
▪ Regangan arah y maksimum	$-1.1444 \times 10^{-4}$ mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$-3.7384 \times 10^{-4}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	$1.1380 \times 10^{-8}$ MPa
▪ Tegangan arah y maksimum	$1.2861 \times 10^{-9}$ MPa
▪ Tegangan arah xy maksimum	$-2.0870 \times 10^{-8}$ MPa

Sumber : hasil analisis, 2011

Dengan menggunakan model mikro, perpindahan arah x maksimum yang terjadi pada model tanpa *bracing* dengan beban maksimum 16.2 KN adalah 0.2071 mm. Sedangkan perpindahan yang terjadi pada model mikro *bracing* baja dengan beban maksimum 18.36 KN adalah 0.1676 mm sehingga besar perpindahan tersebut lebih kecil 19.07% daripada model mikro tanpa *bracing*. Penggunaan bambu sebagai bahan *bracing* pada model mikro *bracing* bambu dengan beban maksimum 19.98 KN mengalami perpindahan sebesar 0.2063 mm yaitu 0.39% lebih kecil daripada model mikro tanpa *bracing*.

**Tabel 6.** Hasil analisis model mikro dengan beban berulang pada nodal 1460

Jenis pengujian	Hasil
<b><u>Model mikro tanpa bracing</u></b>	
▪ Beban maksimum	16.2 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	0.2071 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	0.1830 mm
<b><u>Model mikro dengan bracing baja</u></b>	
▪ Beban maksimum	18.36 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	0.1676 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	0.1403 mm
<b><u>Model mikro dengan bracing bambu</u></b>	
▪ Beban maksimum	19.98 KN
▪ Perpindahan arah x maksimum	0.2063 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	0.1800 mm

Sumber : hasil analisis, 2011

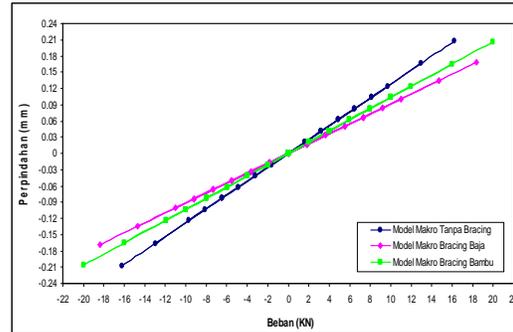
Pemberian beban yang sama yaitu 16.2 KN pada model mikro maka diperoleh hasil analisis yang dapat dilihat pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Hasil analisis model mikro dengan beban yang sama pada nodal 1460

Jenis pengujian	Hasil
<b>Model mikro tanpa bracing</b>	
▪ Beban maksimum	
▪ Perpindahan arah x maksimum	16.2 KN 0.2071 mm
▪ Perpindahan arah y maksimum	0.1830 mm
▪ Regangan arah x maksimum	$1.6093 \times 10^{-6}$ mm
▪ Regangan arah y maksimum	$2.9802 \times 10^{-6}$ mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$1.6093 \times 10^{-6}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	
▪ Tegangan arah y maksimum	$9.5939 \times 10^{-6}$ MPa
▪ Tegangan arah xy maksimum	$3.5634 \times 10^{-6}$ MPa
<b>Model mikro dengan bracing baja</b>	
▪ Beban maksimum	
▪ Perpindahan arah x maksimum	
▪ Perpindahan arah y maksimum	16.2 KN 0.1479 mm
▪ Regangan arah x maksimum	0.1805 mm
▪ Regangan arah y maksimum	$2.0862 \times 10^{-7}$ mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$-2.0862 \times 10^{-7}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	
▪ Tegangan arah y maksimum	$-1.6987 \times 10^{-7}$ mm
▪ Tegangan arah xy maksimum	$9.5939 \times 10^{-7}$ MPa
<b>Model mikro dengan bracing bambu</b>	
▪ Beban maksimum	
▪ Perpindahan arah x maksimum	$-3.9061 \times 10^{-7}$ MPa
▪ Perpindahan arah y maksimum	
▪ Regangan arah x maksimum	16.2 KN 0.1673 mm
▪ Regangan arah y maksimum	0.1823 mm
▪ Regangan arah xy maksimum	$1.3411 \times 10^{-6}$ mm
▪ Tegangan arah x maksimum	
▪ Tegangan arah y maksimum	$5.6624 \times 10^{-7}$ mm
▪ Tegangan arah xy maksimum	$1.3411 \times 10^{-6}$ mm
	$8.3604 \times 10^{-6}$ MPa
	$4.7970 \times 10^{-6}$ MPa
	$3.0837 \times 10^{-6}$ MPa

Model mikro *bracing* baja menerima tambahan kekuatan dari baja sehingga perpindahan yang terjadi mencapai 0.1479 mm yaitu 28.59% lebih kecil daripada perpindahan yang terjadi pada model mikro tanpa *bracing*. Dengan menggunakan bambu sebagai bahan

*bracing* maka perpindahan model mikro *bracing* bambu mencapai 0.1673 mm (19.22% lebih kecil daripada perpindahan model mikro tanpa *bracing*) dan hasil perpindahan yang diberikan oleh *bracing* baja dan bambu memiliki perbedaan sebesar 13.12%.



**Gambar 7.** Grafik Hubungan Beban-Perpindahan Arah x Model Mikro pada Titik Nodal 1460

*Bracing* baja memberikan tambahan kekuatan dan kekakuan sehingga regangan yang terjadi lebih kecil 89.83% dan tegangan yang terjadi lebih kecil 84.17% daripada model mikro tanpa *bracing*. Sedangkan regangan yang dicapai model mikro *bracing* bambu lebih kecil 16.67% dan tegangannya lebih kecil 12.86% daripada model mikro tanpa *bracing*.

### Perbandingan Hasil Eksperimen dan Hasil Analisis

Banyak faktor yang menyebabkan perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil analisis. Pendekatan yang dilakukan dengan cara eksperimen di laboratorium dapat menggambarkan perilaku pembebanan berulang yang lebih baik daripada pendekatan hasil analisis.

Pembebanan yang diberikan secara berulang dapat menyebabkan struktur mengalami dissipasi energi, kelelahan struktur, perubahan modulus elastisitas bahan yang menyebabkan struktur mengalami perpindahan lebih besar.

Perbedaan hasil eksperimen dan hasil analisis dapat dilihat pada **Tabel 8**.

**Tabel 8.** Perbandingan nilai perpindahan

Jenis benda uji	Keterangan	Perpindahan (mm)		Rasio Analisis Eksperimen
		Pendekatan analisis	Pendekatan eksperimen	
Model tanpa <i>bracing</i>	20% P maks (3.24 KN)	0.6674	0.979	0.6817
	40% P maks (6.48 KN)	0.9282	2.2731	0.4083
	60% P maks (9.72 KN)	1.1889	4.43827	0.2679
Model <i>bracing</i> Baja	20% P maks (3.672 KN)	0.7406	1.64	0.4516
	40% P maks (7.344 KN)	0.9245	3.6698	0.2519
	60% P maks (11.016 KN)	1.1083	6.408	0.1730
	80% P maks (14.688 KN)	1.2921	7.4853	0.1726
Model <i>bracing</i> bambu	20% P maks (3.996 KN)	0.7230	2.0507	0.3526
	40% P maks (7.992 KN)	0.9989	4.2859	0.2331
	60% P maks (11.988 KN)	1.2748	6.7911	0.1877
	80% P maks (15.984 KN)	1.5507	8.1544	0.1902

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil analisis maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Model mikro memiliki jumlah elemen dan derajat kebebasan yang lebih banyak daripada model makro dimana pada model mikro, modulus elastisitas dan *poisson ratio* dari batu bata dan spesi diperhitungkan, sedangkan pada model makro digunakan persamaan yang mewakili kedua bahan tersebut. Dengan adanya jumlah elemen dan derajat kebebasan yang lebih besar daripada model makro, model mikro membutuhkan waktu dan memori yang lebih banyak untuk menyelesaikan suatu analisis. Kondisi ini menyebabkan model mikro tidak praktis digunakan untuk model dengan dimensi besar, sehingga dapat digunakan model makro sebagai alternatif model analisis. Akan tetapi model mikro juga memiliki keuntungan daripada model makro yaitu hasilnya lebih teliti dibandingkan dengan model makro dan dapat mengetahui gaya-gaya dalam yang terjadi pada daerah terhubungnya (*interface*) batu bata dan spesi.
2. Penambahan *bracing* pada dinding pasangan batu bata dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan dinding terhadap respon beban berulang. Hal ini terjadi karena *bracing* yang menggunakan bahan baja ataupun bambu memberikan tambahan kekuatan dalam menahan gaya tarik yang disebabkan oleh beban berulang. Dinding pasangan batu bata memiliki sifat yang sama seperti beton yaitu kuat menahan tekan tapi lemah dalam menahan tarik sehingga dengan adanya penambahan *bracing* maka dapat mengatasi kelemahan tersebut.
3. Bambu merupakan bahan yang cukup efektif untuk digunakan sebagai bahan alternatif pengganti baja sebagai bahan *bracing*. *Bracing* bambu dapat memberikan sumbangan kekuatan yang baik sama seperti *bracing* baja pada dinding pasangan batu bata walaupun memiliki perbedaan yaitu pada perilaku tegangan-regangan baja dan bambu dimana dalam hal ini baja memberikan tambahan kekuatan yang lebih baik daripada bambu.
4. Nilai perpindahan dari hasil pengujian beban berulang pendekatan analisis dan pendekatan eksperimen pada saat

beban awal tidak berbeda jauh yaitu perpindahan akibat beban 20% pada hasil analisis adalah 0.6674 dan hasil eksperimen adalah 0.979. Hal ini disebabkan karena adanya asumsi yang hampir sama antara kedua pendekatan yaitu kondisi awal struktur yang masih kompak dan dengan beban awal kondisi tersebut belum berubah banyak. Akan tetapi seiring dengan bertambahnya beban maka hasil antara kedua pendekatan tersebut memiliki perbedaan yang sangat jauh. Perbedaan besar tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan kondisi eksperimen di laboratorium dan kondisi analisis dimana kondisi model di laboratorium yang sudah menerima beban berulang yang semakin besar sehingga struktur mengalami kelelahan struktur yang dapat mengurangi kekuatan dan kekompakan model dimana hal tersebut tidak dapat dirasakan oleh model analisis.

### Saran

1. Perlu adanya kajian teoritis yang lebih banyak dan teliti pada model makro dengan bahan batu bata dan spesi yang dihomogenkan sehingga dapat diketahui perumusan-perumusan homogen lainnya yang dapat digunakan dalam analisis.
2. Penelitian dapat dikembangkan dengan penggunaan *bracing* silang sehingga dapat diketahui perbedaan penggunaan *bracing* diagonal dengan *bracing* silang pada dinding pasangan batu bata.

### DAFTAR PUSTAKA

- Bakhteri J., Makhtar, A. M., Sambasivam S. 2004. Finite Element Modeling of Structural Clay Brick Masonry Subjected to Axial Compression. *Jurnal Teknologi*. 41(B). 57-68
- Kuczma, M. , Wybranowska, K. 2005. Numerical Homogenization of Elastic Brick Masonry. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 1. 136-152
- Logan, D.L. 1986. A First Course In The Finite Element method. PWS Publishers. Boston
- Lourenco, P. B., Alberto Z., Gabriele M. and Antonio T. 2006. Homogenisation Approaches for Structural Analysis of Masonry Buildings. *Structural Analysis of Historical Constructions*
- Lourenco, P. B. 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. Delf University Press. Netherlands.
- Rivieccio, P. G. Homogenization Strategies and Computational Analysis for Masonry Structures Via Micro-Mechanical Approach. Tesis. University of Napoli Federico II
- Susanti, L. 2010. Pengaruh Penggunaan Pengekang (*Bracing*) Pada Dinding Pasangan Batu Bata Terhadap Respon Gempa. Tesis. Program Magister Universitas Brawijaya, Malang