

ANALISIS DAMPAK UKURAN TERHADAP KEKUATAN GESER DINDING BETON BERTULANG

GHO Danny Wahyudi¹, David Ardhyans Sutanto², Jimmy Chandra³ dan Joko Purnomo⁴

ABSTRAK : Dampak ukuran telah diteliti secara komprehensif pada balok, tetapi pada elemen struktur lainnya (seperti dinding beton bertulang) penelitian akan dampak ukuran belum komprehensif sehingga perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut. Mengingat keterbatasan peralatan untuk melakukan penelitian eksperimental dengan dinding beton bertulang dengan ukuran besar maka untuk menganalisis dampak ukuran dilakukan menggunakan simulasi komputer dengan *macro-model* SFI-MVLEM. Data simulasi yang dilakukan telah mengkonfirmasi penelitian lainnya akan adanya dampak ukuran pada kekuatan geser dinding beton bertulang. Pada berbagai macam variasi perbandingan tinggi terhadap panjang dinding (H_w/L_w) dan rasio tulangan badan (ρ) terlihat akan adanya dampak ukuran. Ditemukan bahwa dampak ukuran terjadi paling signifikan pada dinding dengan nilai H_w/L_w 0,5. Selain itu, dinding beton bertulang dengan rasio tulangan badan melebihi batas peraturan mempunyai dampak ukuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan dinding beton bertulang dengan rasio tulangan badan minimal.

KATA KUNCI: dinding beton bertulang, kekuatan geser, dampak ukuran

1. PENDAHULUAN

Dalam perhitungan elemen struktur beton, pengaruh dampak ukuran terhadap kekuatan geser balok beton bertulang sudah dapat dibuktikan (Collins & Kuchma, 1999). Eurocode 2 (ECN, 2004) dan AASHTO (AASHTO, 2014) telah memperhitungkan dampak ukuran pada kekuatan geser balok beton. Namun di luar balok beton, penelitian akan dampak ukuran terhadap kekuatan geser elemen struktural lainnya masih terbatas. Salah satu elemen di mana penelitian akan dampak ukuran masih berada di tahap awal adalah dinding beton bertulang. Hal ini disebabkan karena keterbatasan dalam melakukan penelitian ekperimental (biaya eksperimen yang mahal dan juga keterbatasan alat yang digunakan untuk menguji dinding yang berukuran besar). Oleh karena itu, salah satu alternatif yang dipakai adalah menggunakan simulasi komputer. Penelitian yang dilakukan Rasoolinejad dan Bažant (2019) menggunakan simulasi komputer dengan *microplane* model M7, berhasil membuktikan adanya dampak ukuran pada dinding beton bertulang. Namun dalam penelitian tersebut, masih ada *scope* yang terbatas, seperti kurangnya variasi perbandingan tinggi terhadap panjang dinding (H_w/L_w), tidak ada variasi mutu beton (f'_c), dan variasi rasio tulangan badan (ρ) yang belum komprehensif. Penelitian ini mencoba memperluas penelitian dari Rasoolinejad dan Bažant (2019) dengan menggunakan *macro-model* SFI-MVLEM (Koložvari, Orakcal, & Wallace, 2015) dengan tujuan dapat memperluas penelitian dari Rasoolinejad dan Bažant (2019) untuk memverifikasi dampak ukuran secara definitif dalam dinding beton bertulang.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415074@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, davidardhyans@gmail.com

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, chandra.jimmy@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, jpurnomo@petra.ac.id

2. STUDI PUSTAKA

2.1. Dampak Ukuran

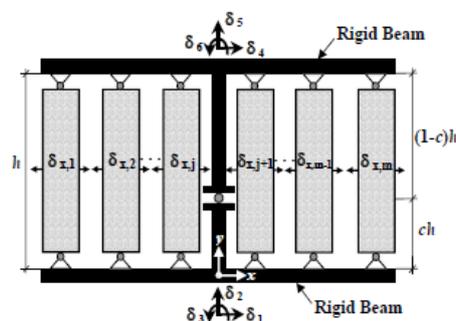
Dampak ukuran, atau yang dikenal dalam Bahasa Inggris sebagai *size effect*, merupakan suatu fenomena di mana kekuatan nominal relatif suatu benda semakin menurun sehubungan dengan bertambah besarnya ukuran benda tersebut. Sebelumnya, dampak ukuran diperkirakan sebagai sifat yang indeterministik, berasal dari ketidakseragaman material, tetapi penelitian yang dilakukan oleh Bazant (1999) menunjukkan bahwa dampak ukuran memiliki sifat deterministik sehingga bisa diperhitungkan dalam perumusan kekuatan bahan. Dalam dunia Teknik Sipil, dimana beton merupakan salah satu material *quasi-brittle* yang dipengaruhi oleh dampak ukuran, pengaruh dari dampak ukuran sudah diteliti secara konklusif untuk elemen balok beton dan sudah diperhitungkan dalam berbagai macam peraturan (Belarbi, Kuchma, & Sanders, 2017). Namun untuk elemen selain balok beton, penelitian akan dampak ukuran belum sekomprensif pada balok.

2.2. Dinding Beton Bertulang

Sebagai elemen struktur yang terbuat dari beton, dampak ukuran secara teoritis terjadi pada dinding beton bertulang. Eksperimen yang dilakukan sebelumnya memperkirakan adanya dampak ukuran tetapi belum ada yang memverifikasi secara konklusif (Chiou et al., 2003). Hal ini disebabkan akan sulitnya melakukan penelitian eksperimental akan dampak ukuran mengingat ukuran dinding beton bertulang yang harus diuji bisa melebihi kapasitas peralatan eksperimen yang ada. Mengingat hal tersebut, penelitian akan dampak ukuran dilakukan lewat simulasi komputer. Penelitian yang dilakukan menggunakan simulasi komputer menunjukkan adanya dampak ukuran secara konklusif (Rasoolinejad & Bazant, 2019). Namun penelitian tersebut masih baru, sehingga perlu dilakukan verifikasi akan penemuan tersebut, dan pada saat yang sama memperluas lingkup dari penelitian tersebut kepada variabel-variabel lain seperti variasi pada H_w/L_w , f'_c dan ρ yang lebih komprehensif.

2.3. Shear-Flexure Interaction Multiple Vertical Line Element Model (SFI-MVLEM)

SFI-MVLEM merupakan *macro-model* yang dikembangkan oleh Kolozvari dengan menggunakan *Multiple-Vertical-Line-Element-Model* sebagai basisnya (Orakcal, & Wallace, 2015). Karena sifatnya sebagai *macro-model*, ada simplifikasi *degree of freedom* (DOF) dibandingkan dengan permodelan *micro-model* yang digunakan oleh Rasoolinejad dan Bazant (2019). Skema permodelan SFI-MVLEM dapat dilihat pada **Gambar 1**. Namun secara teoritis, meskipun terjadi simplifikasi DOF model SFI-MVLEM dapat memodelkan dampak ukuran karena SFI-MVLEM menggunakan *Modified Fixed Angle – Softened Truss Model* (FA-STM) (Kolozvari et al., 2015). Selain karena sifat dasar dari FA-STM yang telah memperhitungkan kekuatan tarik beton, *Modified FA-STM* juga telah memperhitungkan *micro-behavior* dari beton seperti *shear aggregate interlock* dan *dowel action* sehingga *Modified FA-STM* dapat memodelkan perilaku tarik dari beton bertulang dengan baik. Mengingat bahwa permodelan kekuatan tarik beton yang baik merupakan salah satu kunci dari permodelan dampak ukuran (van Mier, 1995), SFI-MVLEM secara teoritis telah memenuhi persyaratan kunci tersebut.

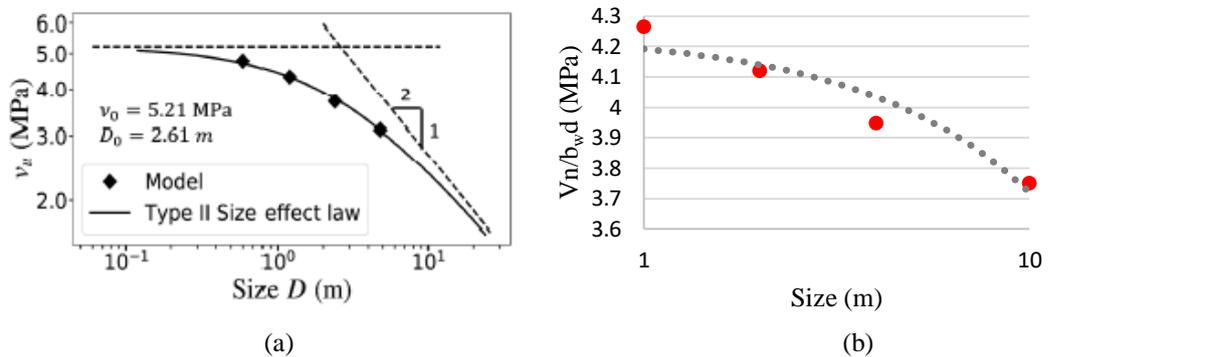


Gambar 1. Permodelan yang Dipakai Dalam SFI-MVLEM (Kolozvari et al., 2015)

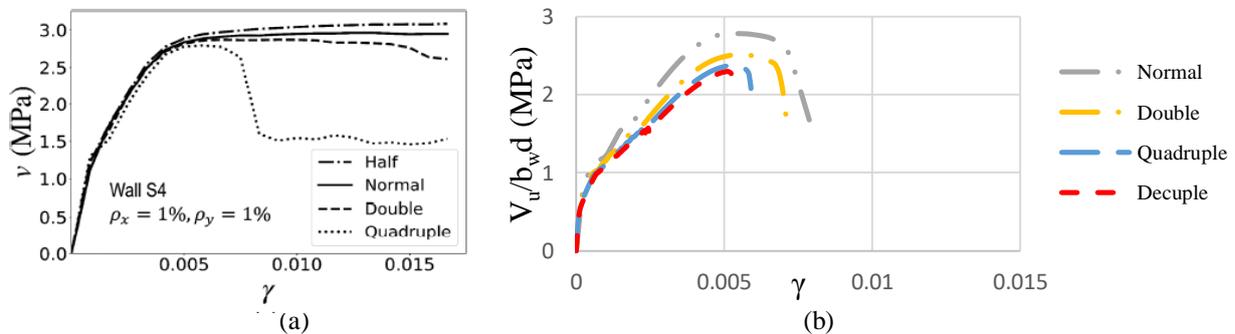
3. METODE PENELITIAN

3.1. Verifikasi Model SFI-MVLEM untuk Dampak Ukuran

Verifikasi model SFI-MVLEM terkait kemampuannya untuk menunjukkan dampak ukuran dilakukan dengan melakukan permodelan yang serupa dengan penelitian simulasi dampak ukuran yang dilakukan dengan permodelan yang lain (Rasoolinejad & Bažant, 2019). Dengan membandingkan sampel S4 Rasoolinejad dan Bažant (2019) dengan dua rasio tulangan yang berbeda. Dapat dilihat dari **Gambar 2** bahwa SFI-MVLEM menunjukkan terjadi penurunan kekuatan nominal dinding beton bertulang seiring membesarnya ukuran dinding beton bertulang seperti yang terjadi pada model M7 yang digunakan Rasoolinejad dan Bažant (2019). Dan dari **Gambar 3** dapat dilihat bahwa SFI-MVLEM menunjukkan hasil *load-drift* yang relatif sama dengan model M7 yang digunakan Rasoolinejad dan Bažant (2019). Dapat disimpulkan secara umum SFI-MVLEM dapat memodelkan dampak ukuran seperti bagaimana model Rasoolinejad dan Bažant (2019) dapat memodelkan dampak ukuran.



Gambar 2. Perbandingan Hasil Analisis Rasoolinejad & Bažant (a) dan SFI-MVLEM (b) untuk Dinding Beton Bertulang S4 dengan ρ_v dan ρ_h 2%



Gambar 3. Perbandingan Hasil Analisis Rasoolinejad & Bažant (a) dan SFI-MVLEM (b) untuk Dinding Beton Bertulang S4 dengan ρ_v dan ρ_h 1%

3.2. Pembuatan Dinding Beton Bertulang Parametrik

Pembuatan dinding beton bertulang dilakukan secara parametrik dengan variabel-variabel analisis parametrik sebagai berikut: panjang dinding, perbandingan tinggi terhadap panjang, kekuatan beton, serta rasio tulangan vertikal dan horizontal pada badan dinding beton bertulang. Variabel-variabel lainnya seperti tebal dinding ataupun bentuk dari dinding dibuat seragam atau merupakan suatu faktor dari empat variabel tersebut. Parametrik yang dipakai dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter yang Digunakan dalam Pembuatan Dinding Beton Bertulang Parametrik

No	Parameter	Variasi
1	Panjang dinding (meter)	1 ; 2 ; 4 ; 10
2	Perbandingan tinggi terhadap panjang	0,5 ; 1,5 ; 2,5
3	Kekuatan beton (MPa)	23,7 ; 56,4 ; 110,7
4	Rasio tulangan vertikal dan horisontal	0,25% ; 1,00% ; 3,00%

Prosedur pembuatan dinding beton bertulang parametrik dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Panjang dinding didapatkan dari variasi parametrik panjang dinding.
2. Setelah panjang dinding didapatkan, maka tinggi dinding dihitung dengan mengalikan panjang dinding dengan perbandingan tinggi terhadap panjang.
3. Tebal untuk seluruh dinding (T_w) diambil sebesar 0,1 dari panjang dinding.
4. Mutu baja untuk tulangan badan diambil dengan nilai 440 MPa, terkecuali untuk mutu baja tulangan pada *boundary region* (0,1 L_w pada setiap sisi). Untuk daerah *boundary* mutu baja untuk tulangan diambil nilai 578 MPa.

3.3. Parameter Material Dinding Beton Bertulang Parametrik

Untuk memodelkan dinding beton bertulang, SFI-MVLEM memakai *constitutive* material baja dari persamaan Menegotto-Pinto (1973) dan permodelan *constitutive* material beton dari persamaan Chang-Mander (1994) (Kolozvari, Orakcal, & Wallace, 2015). Dalam permodelan *constitutive law* tersebut diperlukan beberapa parameter untuk mendefinisikan *stress-strain curve* sesuai dengan persamaan *constitutive law* tersebut. Untuk mengisi parameter-parameter yang dibutuhkan baik untuk *constitutive law* ataupun parameter SFI-MVLEM, penelitian ini menggunakan parameter dari penelitian-penelitian sebelumnya (Tifani et al., 2018, Gondomartono et al., 2018; Kolozvari et al., 2015).

3.4. Penamaan dan Analisis Dinding Beton Bertulang Parametrik

Dengan semua kombinasi variabel parametrik yang ada dihasilkan sebanyak 108 dinding beton bertulang yang dapat diklasifikasikan menjadi 27 set, dimana dalam semua set tersebut semua dinding memiliki variabel yang sama terkecuali variabel panjang dinding. Untuk mempermudah penelitian, digunakan sistem penamaan sebagai berikut:

F3_A_1

Dimana:

F3 = Kode yang dipakai untuk mengidentifikasi satu set semua dinding beton bertulang yang dihasilkan dalam kombinasi parameter yang disebutkan sebelumnya.

A = Kode yang dipakai untuk menandakan satu set dinding beton bertulang yang memiliki variabel parametrik yang sama, terkecuali variabel L_w

1 = Kode identifikasi dinding beton bertulang unik yang dimiliki oleh setiap model.

108 dinding parametrik yang sudah dibuat kemudian dianalisis menggunakan SFI-MVLEM dengan *software* OpenSees (McKenna, 2011). Dalam proses analisis, pembeban dinding dilakukan dengan memberikan *displacement monotonic* tanpa ada beban aksial hingga dinding gagal. Dalam setiap pemberian beban (yang disebut juga sebagai *load step*), *displacement* pada dinding paling atas dan reaksi perletakan jepit sempurna yang dipasang pada bagian paling bawah dinding dicatat. Setiap *load step* yang diberikan hingga dinding gagal kemudian dicatat untuk menghasilkan kurva *stress-strain*. Setelah hasil simulasi selesai didapatkan, kekuatan nominal dari setiap dinding beton bertulang dinormalisasi dengan menggunakan Persamaan 1.

$$\beta = \frac{V_n}{A_g \sqrt{f'_c}} \quad (1)$$

Dimana:

β = Kekuatan nominal yang sudah dinormalisasi

V_n = Kekuatan nominal dari dinding beton bertulang

A_g = Luas penampang dari dinding beton bertulang

f'_c = Mutu beton dinding beton bertulang

Selain itu, untuk mempermudah pembahasan akan pengukuran besarnya dampak ukuran, dalam penelitian ini digunakan Persamaan 2.

$$\Delta_{i-j}(\%) = \frac{\beta_i - \beta_j}{\beta_i} \quad (2)$$

Dimana β_i merupakan kekuatan nominal dinding yang sudah dinormalisasi dari dinding dengan panjang ukuran i pada satu set dinding beton bertulang dan β_j merupakan kekuatan nominal dinding yang sudah dinormalisasi dari dinding dengan panjang ukuran j pada set tersebut.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

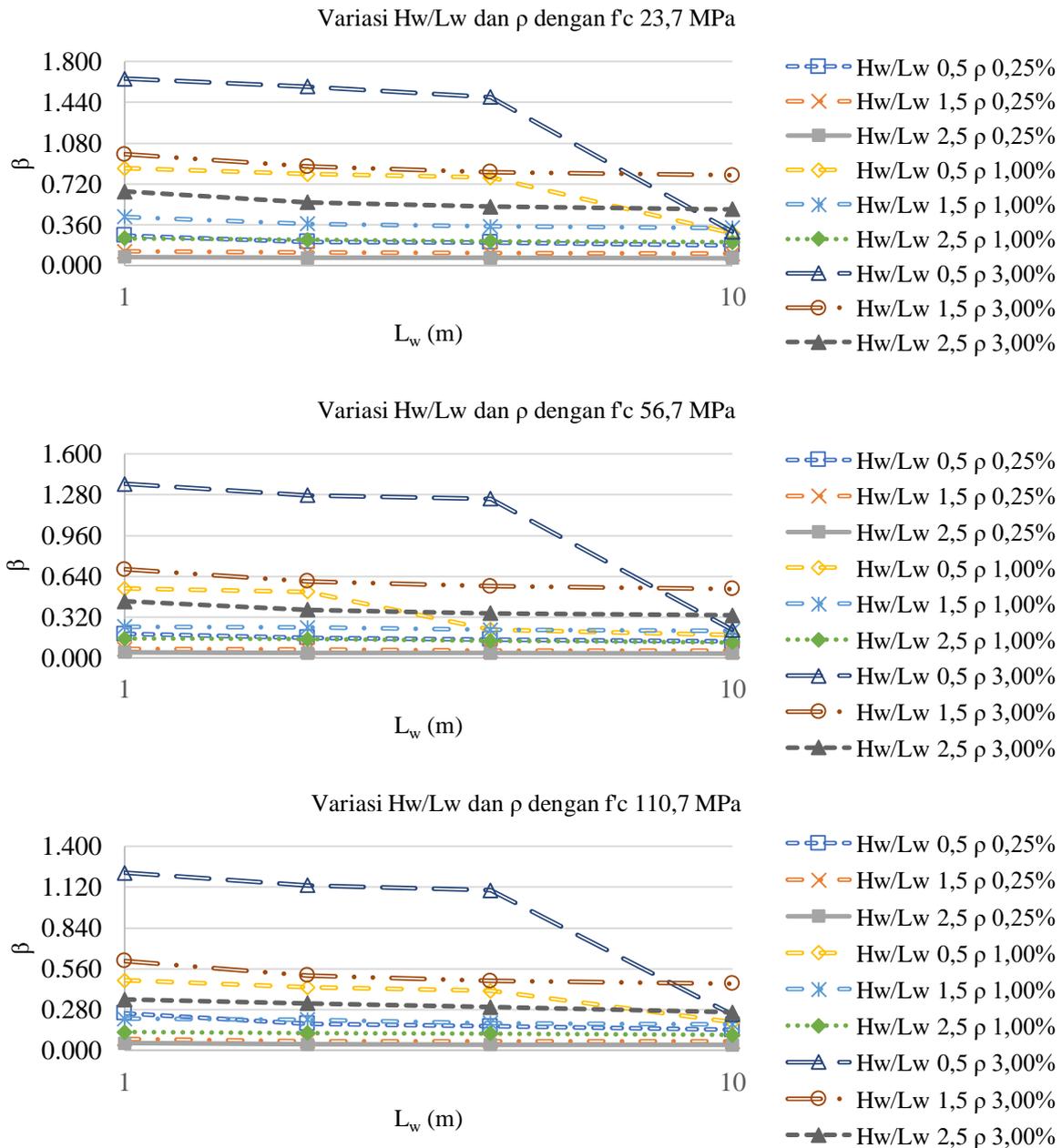
Hasil analisis parametrik terhadap 108 dinding beton bertulang yang dikelompokkan menjadi 27 set dan dapat dilihat pada **Tabel 4**. Dapat diamati bahwa dalam setiap set dengan variasi H_w/L_w , f'_c dan ρ terjadi penurunan kekuatan nominal untuk dinding dengan panjang terbesar apabila dibandingkan dengan dinding dengan panjang terkecil dalam satu set tersebut. Secara khusus, dampak ukuran paling terlihat pada dinding beton bertulang yang memiliki rasio H_w/L_w dengan nilai 0,5. Hal ini disebabkan pada dinding beton bertulang dengan rasio H_w/L_w 0,5 kegagalan geser merupakan faktor dominan dalam kegagalan dinding sehingga kapasitas geser dari dinding beton bertulang menjadi faktor utama. Kapasitas geser dari dinding beton bertulang dalam kasus tersebut didominasi oleh kekuatan dari material beton, yang mengalami dampak ukuran. Meningkatkan rasio H_w/L_w cenderung mengubah kegagalan dinding beton bertulang dari gagal geser menjadi gagal lentur ataupun kombinasi gagal geser-lentur sehingga mengurangi dampak ukuran. Efek dari meningkatnya H_w/L_w yang mengurangi dampak ukuran dapat dilihat pada semua set (seperti F3_A dan F3_J)

Tabel 4. Nama Set, Variabel Serta Δ_{1-10} dari Set yang Dianalisis

Nama Set	H_w/L_w	f'_c (MPa)	ρ (%)	Δ_{1-10} (%)
F3_A	0,5	23,7	0,25	32,59
F3_B	0,5	56,4	0,25	30,82
F3_C	0,5	110,7	0,25	44,67
F3_D	0,5	23,7	1,00	66,59
F3_E	0,5	56,4	1,00	66,53
F3_F	0,5	110,7	1,00	59,66
F3_G	0,5	23,7	3,00	81,88
F3_H	0,5	56,4	3,00	83,91
F3_I	0,5	110,7	3,00	79,66
F3_J	1,5	23,7	0,25	14,85
F3_K	1,5	56,4	0,25	19,39
F3_M	1,5	110,7	0,25	22,36
F3_N	1,5	23,7	1,00	22,34
F3_L	1,5	56,4	1,00	13,33
F3_O	1,5	110,7	1,00	17,39
F3_P	1,5	23,7	3,00	18,94
F3_Q	1,5	56,4	3,00	22,12
F3_R	1,5	110,7	3,00	25,34
F3_S	2,5	23,7	0,25	15,13
F3_T	2,5	56,4	0,25	21,82
F3_U	2,5	110,7	0,25	24,34
F3_V	2,5	23,7	1,00	13,16
F3_W	2,5	56,4	1,00	20,07
F3_X	2,5	110,7	1,00	15,00
F3_Y	2,5	23,7	3,00	23,68
F3_Z	2,5	56,4	3,00	24,58
F3_AA	2,5	110,7	3,00	24,85

Melihat kembali dari **Tabel 4**, dapat diamati bahwa meningkatkan rasio tulangan dapat mengurangi dampak ukuran (seperti pada set F3_K dan F3_L) dan dalam beberapa kasus lainnya dapat meningkatkan dampak ukuran (seperti pada F3_M dan F3_R). Hal ini memiliki alasan yang sama dengan terjadinya dampak ukuran paling besar dalam kasus dinding beton bertulang dengan rasio H_w/L_w dengan nilai yang relatif kecil. Dampak ukuran terjadi ketika kegagalan beton merupakan faktor dominan dalam dinding beton bertulang, dan meningkatkan rasio tulangan terlalu berlebihan akan mengubah tipe kegagalan menjadi *web crushing*. Namun dapat dilihat bahwa kenaikan rasio tulangan dari 0,25% menjadi 1,00% mengurangi dampak ukuran (seperti pada set F3_M dan F3_O). Dalam kasus tersebut diperkirakan bahwa dinding tidak gagal akibat *web crushing* sehingga kenaikan rasio tulangan memberikan kontribusi dalam mengurangi terjadinya dampak ukuran. Perlu dicatat bahwa untuk H_w/L_w 0,5 peningkatan rasio tulangan dalam semua tingkatan yang diuji meningkatkan terjadinya dampak ukuran. Hal ini disebabkan karena pada dinding dengan H_w/L_w 0,5 kemungkinan besar terjadi *direct strut* sehingga kontribusi menjadi sangat dominan dan efek penambahan rasio tulangan tidak dapat mengurangi dampak ukuran.

Dari **Tabel 4** dapat dilihat juga bahwa tidak ada pola yang konklusif akibat perubahan f'_c kepada dampak ukuran. Dalam beberapa kasus (set F3_J, F3_K, dan F3_M), meningkatnya mutu beton membuat dampak ukuran meningkat sementara dalam kasus lainnya (set F3_D, F3_E, dan F3_F) meningkatnya mutu beton membuat dampak ukuran mengecil. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk dapat mencapai suatu konklusi akan pengaruh f'_c terhadap dampak ukuran.



Gambar 4. Grafik Kekuatan Nominal dengan Ukuran untuk Berbagai Macam H_w/L_w dengan Kombinasi f'_c dan ρ

5. KESIMPULAN & SARAN

Gambar 4 merupakan hasil keseluruhan dari penelitian, dan hasil analisa penelitian ini menunjukkan bahwa dampak ukuran ada dalam dinding beton bertulang dan faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya dampak ukuran konsisten dengan teori dampak ukuran yang sudah ada (Rasoolinejad & Bazant, 2019) dan dengan hasil penelitian sebelumnya (Rasoolinejad & Bazant, 2019), yaitu bahwa dampak ukuran terjadi pada dinding beton bertulang dengan variasi nilai H_w/L_w dan ρ yang berbeda-beda. Penelitian ini menemukan bahwa semakin kecil H_w/L_w maka dampak ukuran akan semakin membesar dan pemasangan tulangan dengan rasio 0,25% hingga 1,00% merupakan *range* yang bisa mengurangi terjadinya dampak ukuran pada dinding beton bertulang. Pemasangan tulangan yang berlebihan justru dapat meningkatkan dampak ukuran karena mengubah tipe kegagalan dinding menjadi *web crushing*. Dan dari hasil penelitian ini, belum dapat disimpulkan secara konklusif pengaruh dari f'_c terhadap dampak ukuran pada dinding beton bertulang. Oleh sebab itu, untuk penelitian berikutnya disarankan untuk melakukan penelitian yang menganalisis pengaruh f'_c secara lebih mendetail. Selain itu, disarankan dilakukan analisis pembebanan

pure shear pada dinding beton bertulang, sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya *flexural failure*, dan digunakan variasi parametrik yang lebih banyak, baik dalam rasio ukuran maupun rasio tulangan yang berbeda hingga bentuk geometri dinding yang berbeda.

6. DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2014). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, U.S. Customary Units*. Retrieved from <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAASHTO6E/aashto-lrfd-bridge>
- Bazant, Z. P. (1999). Size Effect on Structural Strength: a Review. *Archive of Applied Mechanics*, 69(9), 703–725. <https://doi.org/10.1007/s004190050252>
- Belarbi, A., Kuchma, D. A., & Sanders, D. H. (2017). Proposals for New One-Way Shear Equations for the 318 Building Code. *ACI Concrete International*, 39(9).
- Chang, G. A., & Mander, J. B. (1994). *Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part 1 - Evaluation of Seismic Capacity*. 230.
- Chiou, Y. J., Mo, Y. L., Hsiao, F. P., Liou, Y. W., & Sheu, M. S. (2003). Experimental and Analytical Studies on Large-Scale Reinforced Concrete Framed Shear Walls. *ACI Special Publication*, 211. <https://doi.org/10.14359/12591>
- Collins, M. P., & Kuchma, D. (1999). How Safe Are Our Large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings? *Structural Journal*, 96(4). <https://doi.org/10.14359/684>
- ECN. (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*
- Gondomartono, K. C., Widjaja, S., Chandra, J., & Purnomo, J. (2018). Permodelan Lentur Dinding Beton untuk Analisis Non-Linier. *Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 7(1), 211–218.
- Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. (2015). *Shear-Flexure Interaction Modeling for Reinforced Concrete Structure Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading* (No. PEER Report No. 2015/12). Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- McKenna, F. (2011). OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of Analysis of Cyclically Loaded RC Plane Frames including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Normal Force and Bending. *Preliminary Report IABSE*, 13.
- Rasoolinejad, M., & Bazant, Z. (2019). *Size Effect of Squat Shear Walls Extrapolated by Microplane Model M7*. <https://doi.org/10.14359/51714478>
- Rasoolinejad, M., & Bazant, Z. P. (2019). Size Effect of Squat Shear Walls Extrapolated by Microplane Model M7. *Structural Journal*, 116(3). <https://doi.org/10.14359/51714478>
- Tifani, T., Effendy, K., Chandra, J., & Purnomo, J. (2018). Permodelan Geser Dinding Geser Beton untuk Analisis Non-Linear. *Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 7(1), 327–344.
- van Mier, J. G. M. (1995). Fracture Mechanics of Concrete: Will Applications start to Emerge? *HERON*, 40(2), 147–162.