

PERMODELAN LENTUR DINDING BETON UNTUK ANALISIS NON-LINIER

Kevin Cornelius Gondomartono¹, Sunardi Widjaja², Jimmy Chandra³, Joko Purnomo⁴

ABSTRAK : *Shear wall* merupakan salah satu komponen penting dalam bangunan tinggi karena memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Oleh karena itu *shear wall* diharapkan dapat menahan beban lateral (angin atau gempa) dan mengurangi deformasi lateral (*drift*) yang terjadi. Atas dasar fungsinya tersebut, maka diperlukan permodelan *shear wall* secara tepat dan efisien. Pada penelitian ini dilakukan validasi permodelan *shear wall* secara makroskopis menggunakan model *Shear-Flexure Interaction Multiple Vertical Line Element Model* yang digagas dalam penelitian oleh Kolozvari (2013) dengan ruang lingkup yang lebih luas. Validasi model SFI-MVLEM dilakukan terhadap beberapa spesimen *shear wall* yang telah dipakai dalam beberapa eksperimen. Spesimen yang digunakan merupakan spesimen yang mengalami kegagalan lentur tetapi dengan beragam konfigurasi. Validasi ini dilakukan dengan melakukan kalibrasi parameter-parameter material baja, beton, dan parameter penahan geser yang dipakai dalam eksperimen, yang kemudian dianalisis menggunakan *open source program* yaitu *OpenSees*. Hasil validasi model SFI-MVLEM ini menunjukkan bahwa SFI-MVLEM dapat digunakan untuk memprediksi perilaku *rectangular shear wall* dengan cukup tepat dibandingkan *shear wall* dengan penampang *barbell* dan *flange*. Model SFI-MVLEM dianggap belum mampu mensimulasi *local failure* yang terjadi pada eksperimen. Selain itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui korelasi antara parameter penahan geser dengan hasil permodelan SFI-MVLEM.

KATA KUNCI: *shear wall*, makroskopis, SFI-MVLEM, *OpenSees*

1. PENDAHULUAN

Shear wall merupakan komponen struktur yang sangat penting, terutama dalam bangunan tinggi, karena sangat efektif dalam menahan beban lateral seperti beban gempa dan beban angin (Kolozvari, 2013). Oleh karena itu sangat diperlukan suatu model yang dapat mewakili perilaku *shear wall* dengan tepat. Secara umum, model tersebut dapat digolongkan menjadi model mikroskopis dan model makroskopis. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya ditemukan bahwa model mikroskopis dapat memberikan hasil yang lebih akurat, sedangkan model makroskopis dianggap lebih efektif dan efisien tetapi tetap dapat memberikan hasil yang tepat (Jalali, 2010). Penelitian yang dilakukan oleh Kolozvari (2013) menghasilkan suatu model makroskopis yaitu *Shear-Flexure Interaction Multiple Vertical Line Element Model* (SFI-MVLEM) dimana model ini berbasis model sebelumnya yaitu *Multiple Vertical Line Element Model*. Perbedaan dari model sebelumnya adalah SFI-MVLEM mampu menangkap interaksi antara geser dan lentur. Dalam penelitian ini dilakukan validasi terhadap model SFI-MVLEM menggunakan spesimen-spesimen *shear wall* yang mengalami kegagalan lentur dalam eksperimen. Spesimen yang dipilih memiliki beragam konfigurasi sehingga mampu mewakili bentuk dan ukuran *shear wall* yang bermacam-macam.

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, corneliuskevin.98@gmail.com

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, sunardi_w@ymail.com

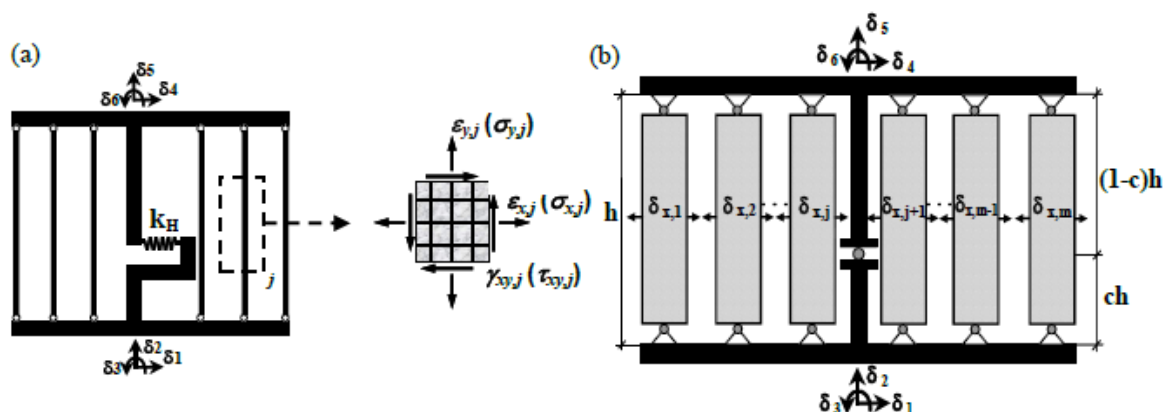
³Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, chandra.jimmy@petra.ac.id

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

Keberagaman spesimen *shear wall* tersebut dibedakan berdasarkan bentuk penampang (kotak, *barbell*, dan *flange*), *aspect ratio*, pembebanan (monotonik dan siklik), dan beban *axial* yang mengalami kegagalan lentur seperti *bar buckling* dan *crushing* pada bagian tekan. Agar dapat memvalidasi model ini dengan tepat maka dilakukan permodelan serta kalibrasi terhadap parameter material beton, baja, dan penahan geser yang digunakan pada spesimen *shear wall*. Parameter tersebut kemudian dianalisis menggunakan *open source program* yaitu *OpenSees*.

2. STUDI LITERATUR

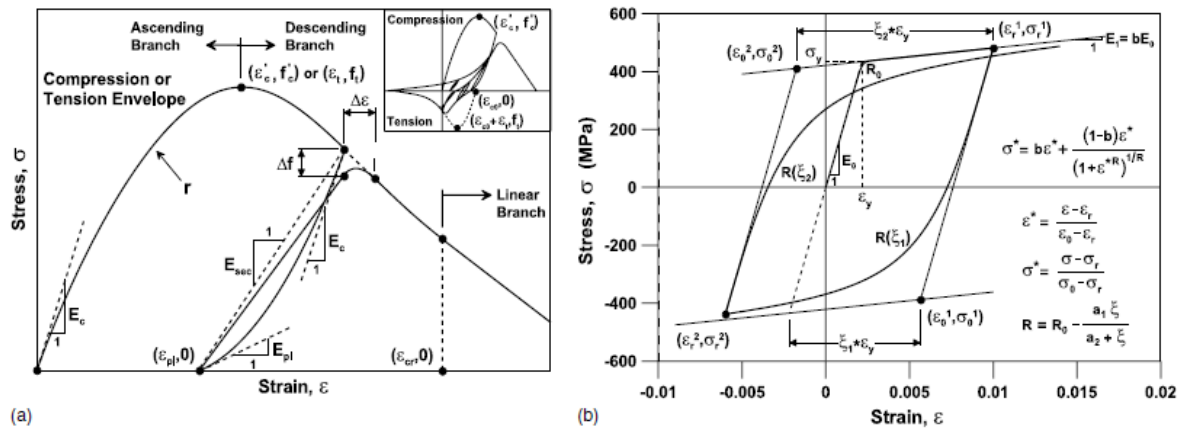
Pada penelitian oleh Kolozvari (2013) digagas suatu model makroskopis *Shear-Flexure Interaction Multiple Vertical Line Element Model* (SFI-MVLEM) yang berbasis model sebelumnya yaitu MVLEM (Vulcano, 1988). Perbedaan yang paling menonjol adalah kemampuan SFI-MVLEM dalam menangkap interaksi perilaku lentur dan geser. Model SFI-MVLEM mengganti *vertical line element* pada MVLEM dengan sebuah panel yang menggunakan prinsip *Fixed Strut Angle Model* seperti pada **Gambar 1**. Apabila pada model sebelumnya deformasi lentur dan geser ditangkap secara terpisah maka dengan menggunakan panel tersebut diharapkan deformasi lentur dan geser yang muncul secara bersamaan dapat ditangkap dengan baik. Regangan aksial arah vertikal ε_y dan regangan geser γ_{xy} dapat diperoleh melalui 6 buah derajat kebebasan yang terletak pada *rigid beam* atas maupun bawah, yang didasarkan pada asumsi bahwa penampang bidang tersebut tetap datar dan regangan geser yang terjadi terdistribusi secara merata sepanjang potongan melintang *shear wall*. Sementara itu, regangan aksial arah horizontal ε_x diperoleh melalui m (jumlah panel dalam satu model SFI-MVLEM) buah derajat kebebasan arah horizontal dengan syarat keseimbangan tegangan arah horizontal harus terpenuhi.



Gambar 1. (a) MVLEM (Vulcano, 1988) (b) SFI-MVLEM (Kolozvari, 2013)

Perilaku *panel* pada SFI-MVLEM akibat *cyclic loading* didasari atas *Fixed Strut Angle Model* (FSAM). Namun model tersebut belum memasukkan faktor *shear aggregate interlock* (n_u) dan *dowel action* (α) karena adanya asumsi *zero shear stress* sepanjang retak yang terjadi yang menyebabkan *zero aggregate interlock*. Akibat dari asumsi tersebut adalah adanya *overestimation* deformasi geser dan *underestimation* kapasitas geser dari *shear wall*. Oleh karena itu model FSAM tersebut dimodifikasi dengan menambahkan faktor *shear aggregate interlock* dan pada penelitian oleh Kolozvari (2013) ditambahkan faktor *dowel action*. Adanya *shear aggregate interlock* akan menghasilkan gesekan di sepanjang retak yang terjadi ketika retakan tersebut tertutup (*crack closed*). Ketika retakan terbuka (*crack opened*) maka faktor tarikan tulangan atau disebut *dowel action* akan mempengaruhi kapasitas geser dari *shear wall*. Kedua parameter tersebut sangat mempengaruhi perilaku *shear wall* terutama perilaku geser dan sangat perlu untuk dikalibrasi untuk mendapatkan hasil yang mendekati perilaku sebenarnya. Perilaku atau *constitutive behavior* dari panel FSAM dideskripsikan dalam 3 tahapan dari material beton dan tulangan yang terbuat dari baja, yaitu *uncracked behavior*, *formation of the first crack behavior*, dan *formation of the second crack behavior*. Selain parameter *shear resisting system* (n_u dan α), parameter beton dan baja yang digunakan pada *shear wall* juga perlu didefinisikan perilakunya. *Constitutive material* baja menggunakan model nonlinier yang digagas oleh Menegotto dan Pinto (1973)

seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2(a)**. Model ini cukup akurat dalam memprediksi perilaku baja dengan adanya faktor *strain hardening* dan *tension stiffening*. Sedangkan *constitutive material* beton yang ditunjukkan pada **Gambar 2(b)** menggunakan model nonlinier yang digagas oleh Chang dan Mander (1994) yang mampu memprediksi perilaku beton baik *unconfined* dan *confined* serta mengalami tekan atau tarik dengan baik.



**Gambar 2. Constitutive Material (a) Baja (Menegotto dan Pinto, 1973)
(b) Beton (Chang dan Mander, 1994)**

3. KALIBRASI EKSPERIMEN DAN VALIDASI

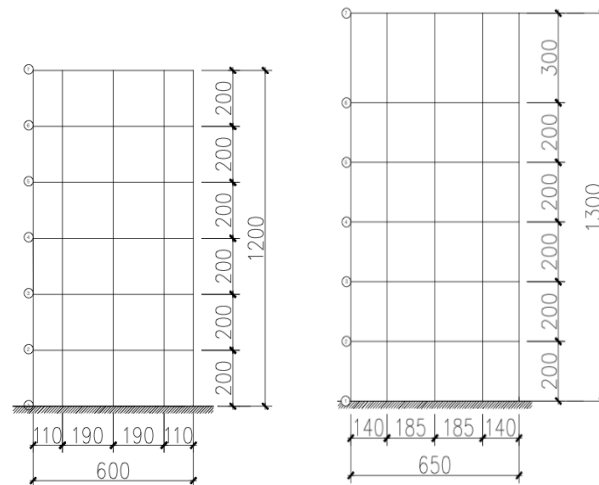
Validasi terhadap permodelan SFI-MVLEM dilakukan dengan membandingkan hasil permodelan terhadap beberapa hasil eksperimen yang telah dilakukan. Beberapa eksperimen tersebut adalah eksperimen yang dilakukan oleh Pilakoutas, et al. (1995), Salonikios, et al. (1999), Lefas, et al. (1990), Weizheng, et al. (2015) dan Oesterle, et al. (1976). Adapun spesimen *shear wall* yang digunakan memiliki keberagaman dari segi *aspect ratio* (h_w/l_w), bentuk penampang, fase pembebanan, dan beban aksial (P_u) untuk tiap masing-masing eksperimen. Secara garis besar spesimen yang digunakan memiliki bentuk penampang *rectangular*, *barbell* dan *flange* dengan *aspect ratio* 1 hingga 2.4 serta beban lateral yang diberikan secara monoton maupun siklus. Informasi untuk setiap spesimen dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Spesifikasi Spesimen

Peneliti	Spesimen	Bentuk Penampang	h_w/l_w	Pembebanan	P_u (kN)
Pilakoutas, et al. (1995)	SW4	Rectangular	2	Siklik	-
	SW6	Rectangular	2	Siklik	-
	SW7	Rectangular	2	Siklik	-
	SW9	Rectangular	2	Siklik	-
Salonikios, et al. (1999)	LSW1	Rectangular	1	Siklik	-
	LSW2	Rectangular	1	Siklik	-
	MSW2	Rectangular	1.5	Siklik	-
Lefas, et al. (1990)	SW21	Rectangular	2	Monotonik	0
	SW22	Rectangular	2	Monotonik	182
	SW23	Rectangular	2	Monotonik	343
	SW24	Rectangular	2	Monotonik	0
	SW25	Rectangular	2	Monotonik	325
Weizheng, et al. (2015)	LW2	Flange	1.125	Siklik	420.223
	MW1	Flange	1.625	Siklik	420.223

Oesterle, et al. (1976)	R1	Rectangular	2.4	Siklik	-
	R2	Rectangular	2.4	Siklik	-
	B3	Barbell	2.4	Siklik	-
	B4	Barbell	2.4	Siklik	-

Pada SFI-MVLEM, model analitis spesimen dimodelkan seperti pada umumnya. Mengingat permodelan ini merupakan model makroskopis maka jumlah pembagian elemen tidak perlu dilakukan detail seperti pemodelan mikroskopis (*shell element*). Contoh permodelan analitis SFI-MVLEM untuk spesimen SW4 (Pilakoutas, 1995) dan SW24 (Lefas, 1990) dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Model Analitis Spesimen SW4 (Pilakoutas, 1995) dan SW24 (Lefas, 1990)

Untuk mendeskripsikan *constitutive material* dalam analisis non-linier diperlukan nilai dari beberapa parameter baja dan beton, namun karena adanya keterbatasan data yang didapatkan maka dilakukan beberapa asumsi dan perhitungan terhadap parameter tersebut. Adapun parameter yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 2** untuk material baja dan **Tabel 3** untuk material beton. Setelah dilakukan perhitungan terhadap parameter-parameter yang digunakan pada material baja dan beton, perlu dilakukan kalibrasi terhadap parameter penahan geser (*shear resisting system*), yaitu koefisien gaya gesek (n_u) pada beton dan aksi *dowel* (α). Hasil kalibrasi untuk tiap eksperimen dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 2. Parameter Constitutive Material Baja

Peneliti	Spesimen	Web Element				Boundary Element			
		Horizontal		Vertikal		Horizontal		Vertikal	
		f_y (MPa)	ρ_h (%)	f_y (MPa)	ρ_h (%)	f_y (MPa)	ρ_h (%)	f_y (MPa)	ρ_h (%)
Pilakoutas, et al. (1995)	SW4	550	0.393	550	0.496	475	0.785	500	6.85
	SW6	400	0.314	550	0.496	400	0.35	500	6.85
	SW7	550	0.393	550	0.589	550	0.7854	525	12.74
	SW9	400	0.56	400	0.496	550	0.63	525	7.14
Salonikios, et al. (1999)	LSW1	610	0.565	610	0.565	610	1.7	585	1.7
	LSW2	610	0.277	610	0.277	610	1	585	1.3
	MSW2	610	0.277	610	0.277	610	1	585	1.3
Lefas, et al. (1990)	SW21	520	0.8	470	2.5	420	1.1	470	3.3
	SW22	520	0.8	470	2.5	420	1.1	470	3.3
	SW23	520	0.8	470	2.5	420	1.1	470	3.3
	SW24	520	0.8	470	2.5	420	1.1	470	3.3
	SW25	520	0.8	470	2.5	420	1.1	470	3.3

	SW26	520	0.4	470	2.5	420	1.1	470	3.3
Weizheng, et al. (2015)	LW2	427	0.5	427	0.5	261	0.97	308	1.4
	MW1	427	0.277	427	0.5	261	0.97	308	1.4
Oesterle, et al. (1976)	R1	521.93	0.307	521.93	0.5	455.05	0.27	455.05	1.47
	R2	535.03	0.31	535.03	0.25	485.39	0.37	450.23	4
	B3	478.5	0.29	478.5	0.31	475.74	0.18	437.82	1.1
	B4	504.7	0.29	504.7	0.31	508.83	0.15	450.23	1.1

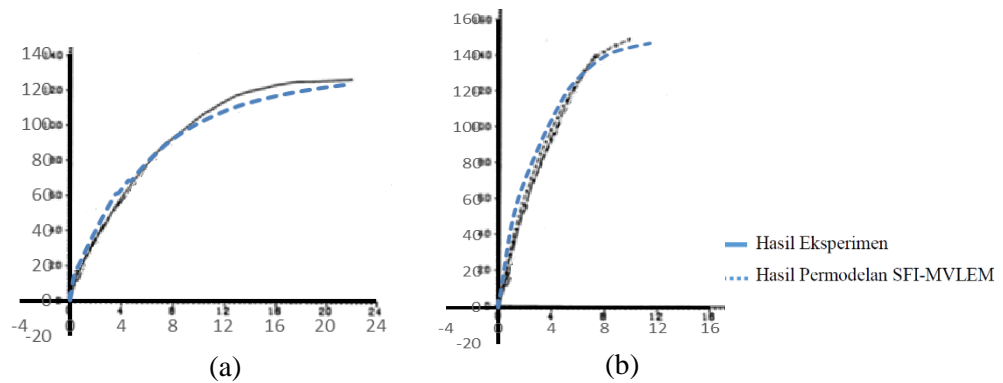
Tabel 3. Parameter Constitutive Material Beton

Peneliti	Spesimen	Unconfined Concrete					Confined Concrete		
		f_c' (MPa)	ϵ_c	f_t (MPa)	ϵ_t	E (MPa)	f_{cc}' (MPa)	ϵ_{cc}	E_{cc} (MPa)
Pilakoutas, et al. (1995)	SW4	36.9	0.0021	1.883	0.00008	31728.44	37.72	0.002382	31992.21
	SW6	38.6	0.0022	1.926	0.00008	32268.89	38.7	0.002195	32299.42
	SW7	32	0.0021	1.754	0.00008	30077.73	32.31	0.00217	30187.5
	SW9	38.9	0.0022	1.933	0.00008	32362.72	41.84	0.002993	33259.5
Salonikios, et al. (1999)	LSW1	22.2	0.0019	1.46	0.00008	26223.84	40.74	0.00978	33366.15
	LSW2	21.6	0.0019	1.44	0.00008	25955.78	39.64	0.009715	33025.08
	MSW2	26.2	0.0019	1.57	0.00008	27904.67	35.508	0.00545	31675.09
Lefas, et al. (1990)	SW21	35.51	0.0021	1.85	0.00008	31278.4	36.23	0.00233	31510.6
	SW22	41.98	0.0022	2	0.00008	33305.61	43.23	0.00228	33375.73
	SW23	39.67	0.0022	1.953	0.00008	32601.55	39.9	0.00225	32674.25
	SW24	40.1	0.0022	1.965	0.00008	32729.41	40.33	0.00225	32801.12
	SW25	37.35	0.0022	1.896	0.00008	31817.9	37.58	0.00217	31947.31
	SW26	25	0.0019	1.55	0.00008	27417.3	25.24	0.00204	27514.2
Weizheng, et al. (2015)	LW2	41.6	0.0019	1.994	0.00008	33187.45	45.03	0.0031	34612.77
	MW1	41.2	0.0022	1.989	0.00008	33067.42	44.55	0.0031	34496.82
Oesterle, et al. (1976)	R1	44.75	0.0022	2.06	0.00015	34107.19	68.42	0.005037	39468.07
	R2	46.54	0.0023	2.115	0.00008	34612.89	71.46	0.006	40652.18
	B3	47.3	0.0023	2.14	0.0001	34823.43	66.35	0.005	39537.02
	B4	45.02	0.0022	2.082	0.00008	34185.65	64.88	0.0052	39202.9

Tabel 4. Hasil Kalibrasi Parameter Penahan Geser

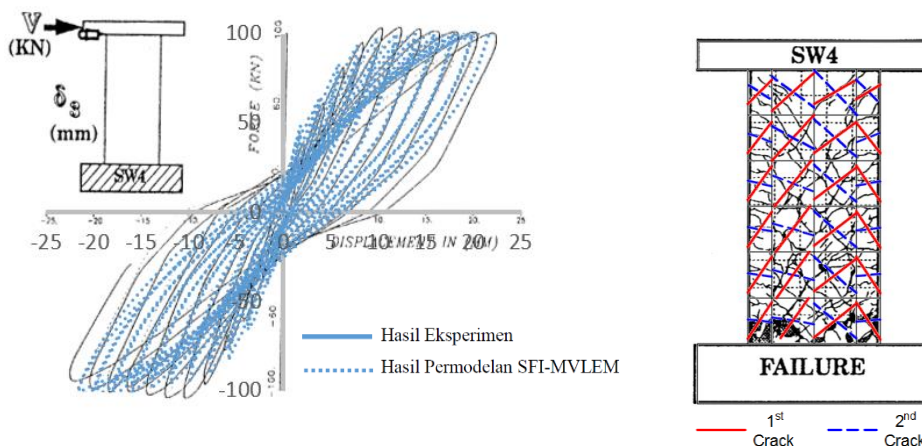
Peneliti	Spesimen	n_u	α
Pilakoutas, et al. (1995)	SW4	0.2	0.01
	SW6	0.2	0.01
	SW7	0.2	0.01
	SW9	1.2	0.006
Salonikios, et al. (1999)	LSW1	0.3	0.005
	LSW2	0.2	0.003
	MSW2	0.3	0.005
Lefas, et al. (1990)	SW21	0.2	0.012
	SW22	0.2	0.012
	SW23	0.2	0.03
	SW24	0.2	0.012
	SW25	0.2	0.02
	SW26	0.2	0.012
Weizheng, et al. (2015)	LW2	0.3	0.005
	MW1	0.3	0.003
Oesterle, et al. (1976)	R1	0.4	0.008
	R2	0.2	0.012
	B3	0.4	0.01
	B4	0.4	0.005

Secara garis besar ada beberapa poin penting yang perlu diperhatikan dalam perbandingan hasil permodelan SFI-MVLEM terhadap hasil eksperimen, sehingga pembahasan akan dijabarkan sesuai dengan poin-poin tersebut. Diawali dengan hasil permodelan SFI-MVLEM terhadap beban monotonik, permodelan yang dilakukan terhadap spesimen SW21 dan SW25 (Lefas, 1990) menghasilkan grafik hysteresis (**Gambar 4**) yang sesuai dengan hasil eksperimen. Selain itu pada percobaan ini ditemukan bahwa SW25 yang diberi beban aksial memiliki nilai aksi *dowel* (α) yang lebih tinggi dibandingkan dengan SW21 yang tidak diberi beban aksial.



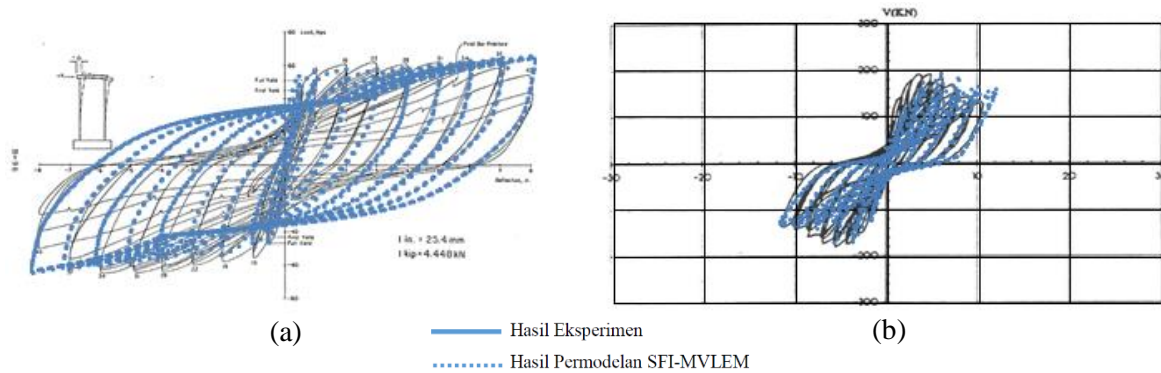
Gambar 4. Validasi Spesimen (a) SW21 dan (b) SW25

Setelah validasi dilakukan terhadap beban monoton, maka dilanjutkan validasi terhadap beban siklus. Permodelan dilakukan terhadap eksperimen Pilakoutas, et al. (1995) yang menggunakan *shear wall* jenis *rectangular* dengan *aspect ratio* 2.0. Diwakili dengan spesimen SW4, permodelan dapat memberikan hasil grafik histeresis yang sesuai dengan hasil percobaan (**Gambar 5**), serta didukung dengan kesesuaian *cracking angle* yang dihasilkan oleh Model SFI-MVLEM. Namun bila dilihat secara lebih teliti, ternyata didapat sedikit perbedaan yang disebabkan tidak adanya degradasi hasil permodelan seperti halnya yang terjadi pada hasil eksperimen. Hal ini dapat dikarenakan beton yang seharusnya telah mengalami *crushing* di akhir pembebanan dan mengalami penurunan kekuatan tidak dapat diprediksi dengan baik oleh SFI-MVLEM.



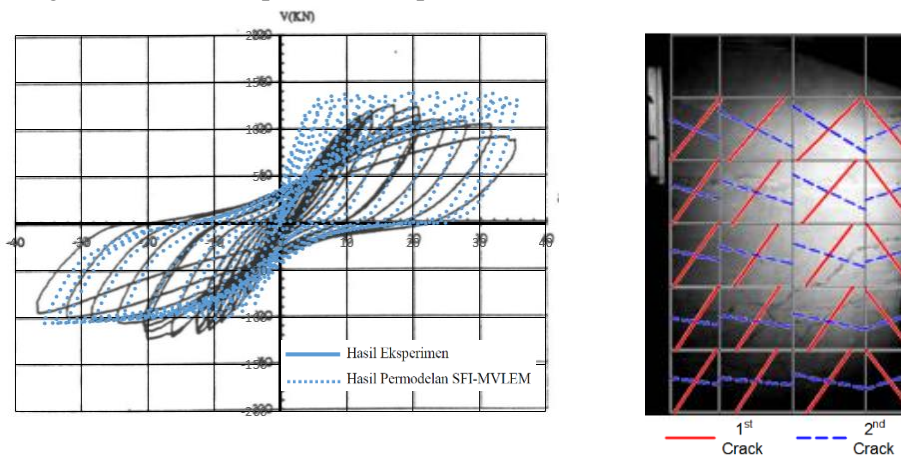
Gambar 5. Validasi dan Cracking Angle Spesimen SW4

Peristiwa serupa juga dialami oleh hasil permodelan terhadap spesimen LSW2 (Salonikios, 1999) dan spesimen B3 (Oesterle, 1976). Pada kedua spesimen tersebut juga didapat hasil yang sama dari sisi kapasitas gaya dan perpindahan, namun perbedaan juga disebabkan oleh tidak adanya degradasi hasil permodelan, yang dapat dilihat pada **Gambar 6** untuk spesimen LSW2 dan spesimen B3. Pada spesimen LSW2, permasalahan tersebut disebabkan permodelan tidak dapat mensimulasi kapasitas material baja saat spesimen mengalami *bar buckling*.



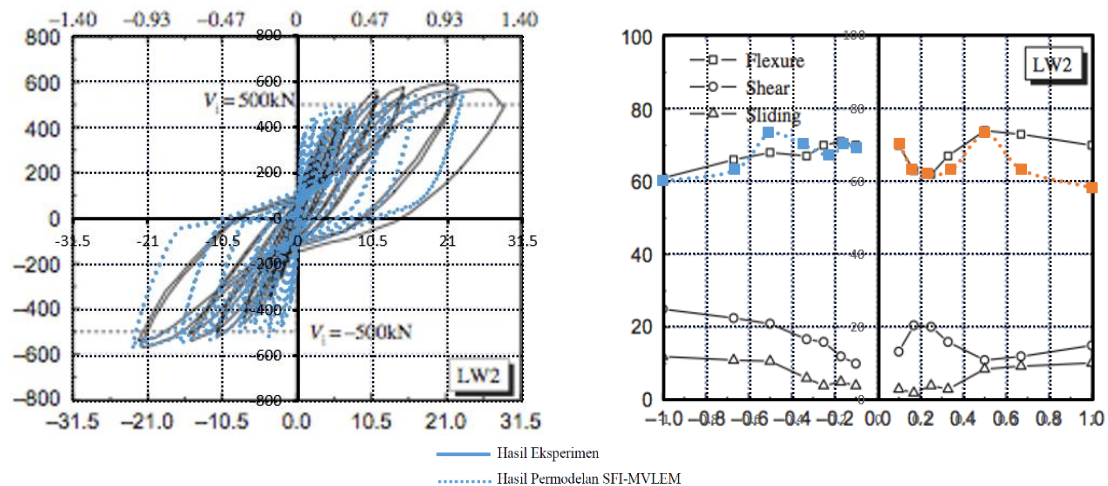
Gambar 6. Validasi Spesimen (a) B3 (Oesterle, 1976) dan (b) MSW2 (Salonikios, 1999)

Selain permasalahan mengenai tidak terdegradasinya hasil permodelan, ternyata juga didapati adanya permasalahan mengenai tidak didapati hasil yang simetri pada sisi(+) dan sisi (-) pada grafik histeresis. Hal tersebut dijumpai saat melakukan permodelan terhadap spesimen MSW2 yang bila dilihat pada **Gambar 7**. Hasil grafik histeresis didapati menyerupai hasil eksperimen pada saat berada di sumbu (-), namun tidak pada sumbu (+). Permasalahan tersebut disebabkan oleh panel FSAM, panel dengan FSAM menghasilkan dan mengasumsikan sudut retakan (*cracking angle*) yang selalu sama untuk setiap siklus. Namun, dalam eksperimen ditunjukkan adanya perubahan sudut atau munculnya retakan baru pada siklus tertentu, yang mengakibatkan adanya perbedaan sudut retakan yang dihasilkan oleh permodelan dengan sudut retakan pada saat eksperimen (**Gambar 7**).



Gambar 7. Validasi dan Cracking Angle Spesimen MSW2

Poin penting lainnya diperoleh ketika dilakukan permodelan terhadap spesimen LW2 (Weizheng, 2015) yang berpenampang *flange*. Hasil grafik histeresis yang didapat sesuai dengan eksperimen dilihat dari sisi kapasitas (**Gambar 8**). Hal ini didukung dengan hasil persentase lentur dan geser yang sesuai (**Gambar 8**). Bila diamati lebih lanjut, tampak adanya perbedaan pada bentuk *pinching* pada grafik histeresis hasil permodelan SFI-MVLEM. Pada perpindahan 0 hingga 5.5 mm, hasil permodelan SFI-MVLEM menghasilkan bentuk *pinching* yang mirip dengan eksperimen, namun ketika mencapai perpindahan yang lebih besar didapati adanya perbedaan bentuk *pinching* dengan hasil eksperimen. Hal ini disebabkan oleh parameter *gap close* pada SFI-MVLEM. Parameter *gap close* berfungsi untuk mengontrol retakan pada material beton. Bila saat terjadi retakan material beton tertutup maka kapasitas geser *shear wall* akan bertambah dan grafik histeresis akan lebih *pinch*. Sebaliknya, bila saat terjadi retakan material beton tidak saling menutup kapasitas geser dari *shear wall* akan berkurang dan mengurangi *pinching* pada grafik histeresis.



Gambar 8. Validasi dan Persentase *Flexure* dan *Shear* Spesimen LW2

4. KESIMPULAN

Hasil validasi model SFI-MVLEM terhadap spesimen *shear wall* menunjukkan hasil yang baik untuk *shear wall* dengan penampang *rectangular* baik ketika dibebani secara monotonik maupun siklik. Spesimen dengan penampang *flange* dan *barbell* belum memberikan hasil yang cukup memuaskan jika dibandingkan dengan spesimen *rectangular*, sehingga diperlukan studi lebih lanjut dengan menambah elemen kolom. Model SFI-MVLEM ini tidak mampu memprediksi *local failure* yang terjadi pada eksperimen seperti *bar buckling* dan *crushing* pada bagian tekan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, nilai optimal untuk n_u adalah 0.2-0.4 sedangkan nilai α belum dapat diketahui sangat pasti karena parameter α sangat sensitif dan dipengaruhi oleh konfigurasi *shear wall* seperti rasio tulangan, *aspect ratio* dan beban *axial*.

5. DAFTAR REFERENSI

- Chang, G.A., Mander, J.B. (1994). "Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part 1 – Evaluation of Seismic Capacity." *Technical Report NCEER-94-0006*.
- Jalali, A., Dashti, F. (2010). "Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Using Macroscopic and Microscopic Models." *Engineering Structures*. 2959-2968.
- Kolozvari, K. (2013). *Analytical Modeling of Cyclic Shear - Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. PhD Dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles.
- Lefas I.D., et al. (1990). "Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls: Strength, Deformation Characteristics, Failure Mechanism." *ACI Structural Journals*, vol. 87, 23-31.
- Menegotto, M., Pinto, P.E. (1973). "Method of analysis for cyclically loaded R.C plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending." *IABSE Reports*. 15-22.
- Oosterle R.G., et al. (1976). "Earthquake Resistant Structural Walls - Test of Isolated Walls". *National Science Foundation Report*.
- Pilakoutas K., Elnashai A. (1995). "Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls, Part 1: Experimental Results." *ACI Structural Journals*, vol. 92, 271-281.
- Salonikios T.N., et al. (1999). "Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Design Basis and Test Results." *ACI Structural Journals*, vol. 96, 649-660.
- Weizheng X., et al. (2015). "Experimental Evaluation of Seismic Performance of Squat RC Structural Walls with Limited Ductility Reinforcing Details." *Journal of Earthquake Engineering*, vol 19.313-331