

PEMODELAN PERSAMAAN *BONDING* TULANGAN LONGITUDINAL PADA KERUNTUHAN GESER *SIZE EFFECT* BALOK BETON BERTULANG

Yenny Untari Liucius¹, Daniel Christianto^{2*}, Yoseph Yoga Perkasa³, dan Mohammad Ragil Irianto⁴

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
yenny@ft.untar.ac.id

^{2*}Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
danielc@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
yoseph.325180141@stu.untar.ac.id

⁴Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
mohammad.325180111@stu.untar.ac.id

Masuk: 11-10-2022, revisi: 21-11-2022, diterima untuk diterbitkan: 23-11-2022

ABSTRACT

The design of construction with reinforced concrete structures has undergone changes to get better results in innovative ways, which is by eliminating the use of coarse aggregate from concrete mixture. The use of concrete without coarse aggregate is based on premise that in high strength concrete, coarse aggregate is the weakest point of high strength concrete. In this study, we'll discuss the size effect, it's the variation of ratio h/b on reinforced concrete beams to shear stress of concrete beams without coarse aggregate and without transverse reinforcement using the finite element method. The purpose of this study was to evaluate the changes pattern in shear stress on variations in beam height changes using the MIDAS FEA. The study shows that result from the finite element method agree well with the result from laboratory experiment. The beam capacity value obtained based on finite element analysis with theoretical calculations based on ACI 318M-19 and results of experiments that have been carried out in laboratory has a relatively small difference, % difference between finite element analysis and theoretical calculations obtained is 1,87% and % difference between finite element analysis and results of experiments conducted in laboratory obtained is 3,35% on the 3B test object.

Keywords: *high strength concrete; longitudinal reinforcement; transverse reinforcement; concrete shear strength; size effect; finite element method*

ABSTRAK

Perancangan konstruksi dengan struktur beton bertulang sudah mengalami perubahan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dengan cara yang inovatif, salah satunya adalah dengan meniadakan penggunaan agregat kasar dari campuran beton. Penggunaan beton tanpa agregat kasar didasari pemikiran bahwa pada beton mutu tinggi, agregat kasar menjadi titik terlemah dari beton mutu tinggi. Dalam penelitian ini akan membahas mengenai *size effect*, yaitu variasi rasio h/b pada balok beton bertulang terhadap tegangan geser balok beton tanpa agregat kasar dan tanpa tulangan transversal menggunakan *finite element method*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pola perubahan tegangan geser terhadap variasi perubahan tinggi balok dengan menggunakan program MIDAS FEA. Berdasarkan analisis dengan *finite element* menunjukkan hasil yang cukup baik mendekati hasil pengujian di laboratorium. Nilai kapasitas balok yang didapat berdasarkan analisis *finite element* dengan perhitungan teoritis berdasarkan ACI 318M-19 dan dengan hasil percobaan yang telah dilakukan di laboratorium memiliki selisih yang relatif kecil, % selisih antara analisis *finite element* dengan perhitungan teoritis yang didapat sebesar 1,87% dan % selisih antara analisis *finite element* dengan hasil percobaan yang telah dilakukan di laboratorium yang didapat sebesar 3,35% pada balok benda uji 3B.

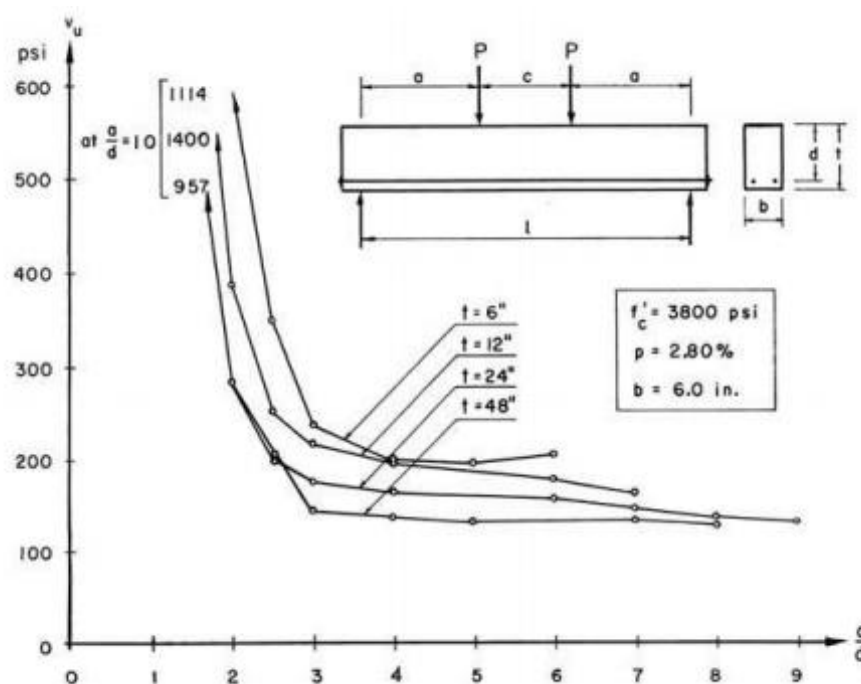
Kata kunci: *beton mutu tinggi; tulangan longitudinal; tulangan transversal; kuat geser beton; size effect; finite element method*

1. PENDAHULUAN

Perancangan konstruksi dengan struktur beton bertulang sudah mengalami perubahan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dengan cara yang inovatif, salah satunya adalah dengan meniadakan penggunaan agregat kasar dari campuran beton. Beton tanpa agregat kasar bersifat homogen (seragam), oleh karena itu beton memiliki *compactibility* atau pepadatan yang baik. Penggunaan beton tanpa agregat kasar didasari pemikiran bahwa pada beton mutu tinggi, agregat kasar menjadi titik terlemah dari beton mutu tinggi (Christianto et al., 2018).

Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk mempelajari tentang sifat mekanis dari beton tanpa menggunakan agregat kasar. Contohnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Christianto et al. (2021) mengenai pengaruh tulangan longitudinal terhadap kapasitas geser balok beton tanpa agregat kasar. Selanjutnya ada penelitian yang dilakukan oleh Christianto et al. (2022) mengenai *size effect* terhadap tegangan geser balok beton tanpa agregat kasar. Namun penelitian menggunakan cara numerik seperti *finite element method* mengenai perilaku keruntuhan geser *size effect* dari beton bertulang tanpa agregat kasar belum banyak dilakukan.

Faktor yang mempengaruhi perilaku serta kekuatan geser balok terbilang banyak serta cukup kompleks, adanya kuat tarik beton, rasio tulangan longitudinal, ukuran balok, bentuk penampang balok, agregat beton, rasio bentang (a/d) serta sifat beton dan baja itu sendiri. Kuat geser pada balok dipengaruhi oleh faktor ketinggian efektif matriks (*size effect*). *Size effect* mempertimbangkan suatu struktur dengan ukuran yang berbeda namun memiliki bentuk geometris yang sama, contohnya balok dengan rasio tulangan dan rasio bentang (a/d) yang sama. Kani (1964) adalah salah satu peneliti yang melakukan penelitian terhadap *size effect* ini. Kani menyatakan bahwa lebar balok beton tidak memberikan efek yang sangat penting dalam kekuatan geser pada balok. Kani juga menyimpulkan bahwa tegangan geser akan menurun seiring dengan meningkatnya nilai kedalaman beton, apabila parameter yang lain konstan akan menunjukkan *size effect* dengan jelas. Hubungan antara *size effect* (tinggi balok) dapat dilihat di Gambar 1, dimana terlihat bahwa semakin tinggi balok, maka kuat geser yang ditimbulkan akan semakin kecil.



Gambar 1. *Shear stress at failure vs. a/d for concrete members with variable depth* (Kani, 1964)

Analisis yang dilakukan menggunakan metode *finite element*, *finite element* merupakan salah satu metode yang cukup efektif untuk menganalisis perilaku non linier dari suatu struktur beton bertulang, studi analisis ini dapat dilakukan dengan biaya yang lebih terjangkau dibandingkan dengan cara melakukan uji fisik di laboratorium. Lektan (*bond*) adalah suatu hubungan kerja sama antara tulangan dengan beton disekelilingnya, sehingga beton bertulang dapat bekerja sama dengan baik sebagai bahan komposit. Batang tulangan dan beton dapat saling bekerja sama dan menjadi satu kesatuan yang saling mendukung, hal itu perlu diusahakan agar penyaluran gaya yang terjadi dari tulangan ke beton bekerja dengan baik. Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi keakuratan hasil analisis menggunakan *finite element method* pada beton bertulang adalah persamaan *bonding* yang digunakan, semakin tepat persamaan *bonding* yang digunakan maka hasil yang didapat akan mendekati atau sama dengan hasil pengujian yang dilakukan di

laboratorium. Lekatan (*bond*) tulangan baja dengan beton yang akan dimodelkan menggunakan fungsi *bond-slip* dari FIB bulletin 10 *Bond of reinforcement in concrete* (2000). Analisis *finite element nonlinier* terhadap beton bertulang dengan metode numerik dan eksperimental memiliki tingkat hasil yang cukup baik, walau berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan penggunaan analisis *finite element nonlinier* untuk memperkirakan kapasitas *ultimate* dan keretakan dari elemen beton bertulang yang sederhana pun dapat memiliki ketidakpastian yang tinggi (Mathern & Yang, 2021).

Dalam penelitian ini akan membahas mengenai *size effect*, yaitu variasi rasio h/b pada balok beton bertulang terhadap tegangan geser balok beton tanpa agregat kasar dan tanpa tulangan transversal dengan persamaan *bonding* yang tepat menggunakan *finite element method*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pola perubahan tegangan geser terhadap variasi perubahan tinggi balok menggunakan *finite element method*.

2. METODE PENELITIAN

Studi numerik yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan *finite element method* (metode elemen hingga). *Finite element method* merupakan salah satu metode numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan teknik dengan cara membagi objek yang dianalisis menjadi bagian-bagian yang kecil sampai tidak terhingga. Melalui program MIDAS FEA akan diperoleh nilai dan pola keruntuhan geser dari objek penelitian yang dianalisis. Data-data penelitian yang diperlukan diperoleh dari studi penelitian yang telah dilakukan.

Dalam metode penelitian ini, akan membahas tahapan penelitian yang menjadi pedoman agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik serta sistematis. Data utama yang digunakan dalam penelitian ini berupa data pengujian di laboratorium yang telah dilakukan oleh Christianto et al. (2022). Data pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Data ini akan digunakan dan dibandingkan dalam analisis untuk mengetahui kekuatan geser *ultimate* dan pola keretakan yang diuji dengan analisis *finite element nonlinier*. Tahapan penelitian pada skripsi ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1. Data benda uji (Christianto et al., 2022)

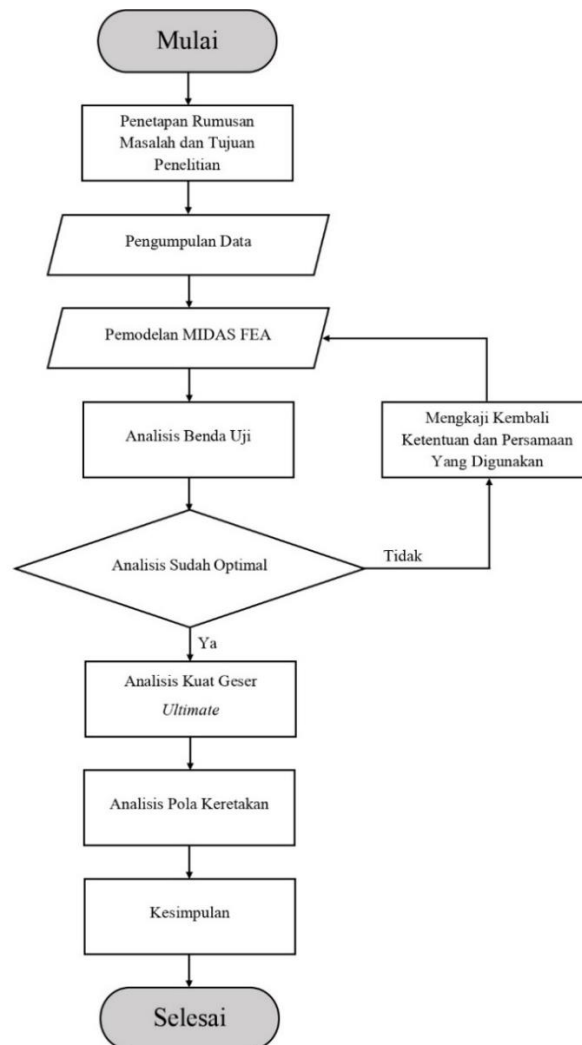
Benda Uji	Ukuran Balok	Kuat Tekan		Jenis Kegagalan
		Balok Beton, f'_c (MPa)	Beban, P (kN)	
1B	6 x 6 x 110 cm ³	92,96	37,32	Geser
1,5B	6 x 9 x 110 cm ³	96,185	37,4	Geser
2B	6 x 12 x 110 cm ³	63,71	43,895	Geser
2,5B	6 x 15 x 110 cm ³	91,195	47,56	Geser
3B	6 x 18 x 110 cm ³	68,69	40,175	Geser

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian MIDAS FEA, formula geser ACI 318M-19 dan hasil uji lab ditampilkan pada Tabel 2. Perbandingan dari hasil penelitian dengan formula geser ACI 318M-19 dan hasil uji lab diuraikan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 2. Kapasitas balok yang didapat dari hasil analisis *finite element*, percobaan di laboratorium, dan secara teoritis (ACI 318M-19)

Benda Uji	Pengujian	Beban, P		Beban, P ACI 318M-19 (kN)
		MIDAS FEA (kN)	Laboratorium (kN)	
1B	1	33,20	37,02	18,18
	2	30,31	37,62	17,63
1,5B	1	39,03	37,02	26,22
	2	31,79	37,78	25,25
2B	1	29,23	35,03	25,14
	2	33,24	52,76	27,29
2,5B	1	43,34	49,26	37,35
	2	44,21	45,86	36,96
3B	1	30,68	31,74	34,22
	2	39,98	48,61	39,23



Gambar 2. Tahapan Penelitian

Tabel 3. Perbandingan antara kapasitas balok yang didapat dari percobaan di laboratorium dengan kapasitas balok berdasarkan analisis *finite element*

Benda Uji	Pengujian	Beban, P Laboratorium (kN)	Beban, P MIDAS FEA (kN)	%Selisih
1B	1	37,02	33,20	10,32%
	2	37,62	30,31	19,42%
1,5B	1	37,02	39,03	5,15%
	2	37,78	31,79	15,86%
2B	1	35,03	29,23	16,55%
	2	52,76	33,24	36,99%
2,5B	1	49,26	43,34	12,01%
	2	45,86	44,21	3,59%
3B	1	37,02	30,68	10,32%
	2	37,62	39,98	19,42%

Tabel 4. Perbandingan kapasitas balok secara teoritis (ACI 318M-19) dengan kapasitas balok berdasarkan analisis *finite element*

Benda Uji	Pengujian	Beban, P ACI 318M-19 (kN)	Beban, P MIDAS FEA (kN)	%Selisih
1B	1	18,18	33,20	45,22%
	2	17,63	30,31	41,83%

Tabel 4 (lanjutan). Perbandingan kapasitas balok secara teoritis (ACI 318M-19) dengan kapasitas balok berdasarkan analisis *finite element*

Benda Uji	Pengujian	Beban, P		%Selisih
		ACI 318M-19 (kN)	MIDAS FEA (kN)	
1,5B	1	26,22	39,03	532,18%
	2	25,25	31,79	20,56%
2B	1	25,14	29,23	14,00%
	2	27,29	33,24	17,90%
2,5B	1	37,35	43,34	13,83%
	2	36,96	44,21	16,41%
3B	1	34,22	30,68	10,37%
	2	39,23	39,98	1,87%

Nilai kapasitas balok (P) yang terjadi pada saat balok mengalami keruntuhan, baik yang didapat berdasarkan pengujian di laboratorium, analisis *finite element*, maupun perhitungan secara teoritis (ACI 318M-19) menunjukkan tingkat kemiripan yang cukup baik.

Pada grafik “Tegangan geser terhadap tinggi balok” dimana sumbu x mewakili tinggi balok dan sumbu y mewakili $\frac{V_u}{b \times d}$ dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan data-data untuk keperluan analisis dapat dilihat pada Tabel 5, 6, 7 dan 8.

Tabel 5. Data f'_c , b, d, H, V_u , dan $\frac{V_u}{b \times d}$

Benda Uji	Pengujian	b (mm)	d (mm)	H (mm)	Berat Sendiri Balok (kN/m)	f'_c (MPa)	f'_c rata-rata (MPa)
1B	1	60	44	60	0,0864	95,82	92,960
	2					90,1	
1,5B	1	60	44	90	0,1296	99,8	96,185
	2					92,57	
2B	1	60	44	120	0,1728	58,51	63,710
	2					68,91	
2,5B	1	60	44	150	0,216	92,15	91,195
	2					90,24	
3B	1	60	44	180	0,2592	59,44	68,690
	2					77,94	

Tabel 6. Data hasil penelitian dengan MIDAS FEA

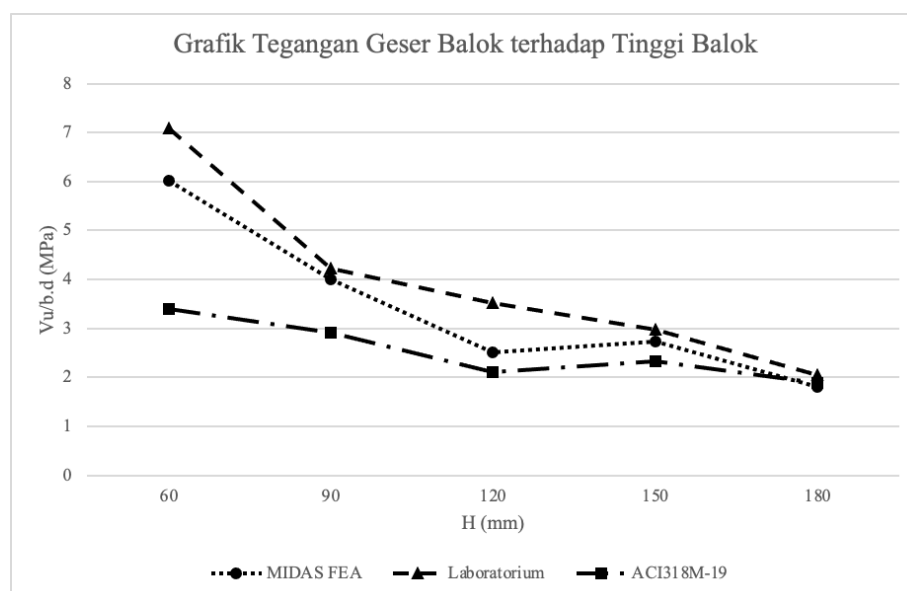
Benda Uji	Pengujian	Hasil MIDAS FEA					
		Beban, P (kN)	Beban, P rata-rata (kN)	V_u (kN)	V_u rata-rata (kN)	$V_u/b.d$ (MPa)	$V_u/b.d$ rata-rata (MPa)
1B	1	33,1991	31,7557	16,6165	15,8948	6,2941	6,0207
	2	30,3124		15,1731		5,7474	
1,5B	1	39,0308	35,4101	19,5514	17,7411	4,4035	3,9957
	2	31,7895		15,9308		3,5880	
2B	1	29,2314	31,2367	14,6780	15,6806	2,3522	2,5129
	2	33,2419		16,6833		2,6736	
2,5B	1	43,3442	43,7787	21,7677	21,9850	2,7074	2,7344
	2	44,2132		22,2022		2,7615	
3B	1	30,6753	35,3256	15,4738	17,7989	1,5725	1,8088
	2	39,9758		20,1240		2,0451	

Tabel 7. Data hasil uji lab

Benda Uji	Pengujian	Hasil Laboratorium					
		Beban, P (kN)	Beban, P rata-rata (kN)	Vu (kN)	Vu rata-rata (kN)	Vu/b.d (MPa)	Vu/b.d rata-rata (MPa)
1B	1	37,0200	37,3200	18,5269	18,6769	7,0178	7,0746
	2	37,6200		18,8269		7,1314	
1,5B	1	37,0200	37,4000	18,5460	18,7360	4,1770	4,2198
	2	37,7800		18,9260		4,2626	
2B	1	35,0300	43,8950	17,5773	22,0098	2,8169	3,5272
	2	52,7600		26,4423		4,2375	
2,5B	1	49,2600	47,5600	24,7256	23,8756	3,0753	2,9696
	2	45,8600		23,0256		2,8639	
3B	1	31,7400	40,1750	16,0061	20,2236	1,6266	2,0552
	2	48,6001		24,4411		2,4839	

Tabel 8. Data hasil kajian dengan formula geser ACI 318M-19

Benda Uji	Pengujian	Hasil ACI 318M-19					
		Beban, P (kN)	Beban, P rata-rata (kN)	Vu (kN)	Vu rata-rata (kN)	Vu/b.d (MPa)	Vu/b.d rata-rata (MPa)
1B	1	18,1849	17,9089	9,1094	8,9713	3,4505	3,3982
	2	17,6328		8,8333		3,3459	
1,5B	1	26,2236	25,7384	13,1478	12,9052	2,9612	2,9066
	2	25,2532		12,6626		2,8519	
2B	1	25,1376	26,2143	12,6311	13,1695	2,0242	2,1105
	2	27,2910		13,7078		2,1968	
2,5B	1	37,3483	37,1528	18,7698	18,6720	2,3345	2,3224
	2	36,9573		18,5742		2,3102	
3B	1	34,2244	36,7270	17,2483	18,4996	1,7529	1,8800
	2	39,2296		19,7509		2,0072	



Gambar 3. Grafik tegangan geser terhadap tinggi balok

4. KESIMPULAN

Persamaan *bonding* dari Huang et al (FIB bulletin 10, 2000) yang digunakan pada pemodelan dengan *finite element method* memiliki akurasi yang cukup baik dikarenakan hasil analisis yang didapat mendekati dengan hasil yang telah dilakukan di laboratorium, pola keretakan dan tipe kegagalan yang terjadi pada analisis *finite element* menunjukkan kesesuaian terhadap hasil pengujian di laboratorium oleh Christianto et al. (2022) yaitu keruntuhan geser dengan tipe *diagonal tension failure* dan *shear tension failure*, Nilai kapasitas balok yang didapat berdasarkan analisis *finite element* dengan perhitungan teoritis berdasarkan ACI 318M-19 dan dengan hasil percobaan yang telah dilakukan di laboratorium memiliki selisih yang relatif kecil, persentase selisih antara analisis *finite element* dengan perhitungan teoritis yang didapat sebesar 1,87% dan persentase selisih antara analisis *finite element* dengan hasil percobaan yang telah dilakukan di laboratorium yang didapat sebesar 3,35% pada balok benda uji 3B.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318M-19). American Concrete Institute.
- Christianto, D., Makarim, C. A., & Tavio (2021). Influence of Longitudinal Reinforcement Ratio on Shear Capacity of No Coarse-Aggregate Concrete. *International Journal of GEOMATE*, 21(86), 122-130. <https://doi.org/10.21660/2021.86.j2288>
- Christianto, D., Makarim, C. A., Tavio, & Jusuf, A. H. (2022). A Proposed Formula for Predicting Size Effect on Shear Strength of Concrete Beams Without Coarse Aggregate. *International Journal on Engineering Applications (I.R.E.A.)*, 10(3), 220-226.
- Christianto, D., Tavio, & Kurniadi, D. (2018). Effect of Steel Fiber on The Shear Strength of Reactive Powder Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508, 1-10. doi:10.1088/1757-899X/508/1/012006
- Engstrom, B., Azizinamini, A., Vliet, A. B., den Uijl, J., Eligehausen, R., Gambarova, P., Magnusson, J., Noghabai, K., & Plizzari, G. (2000). *Bond of Reinforcement in Concrete* (fib Bulletin No. 10). Fédération Internationale du Béton. doi.org/10.35789/fib.BULL.0010
- Kani, G. N. J. (1964). The Riddle of Shear Failure and Its Solution. *American Concrete Institute Journal Proceedings*, 61(4), 441-467.
- Mathern, A., & Yang, J. (2021). A Practical Finite Element Modeling Strategy to Capture Cracking and Crushing Behavior of Reinforced Concrete Structures. *Materials*, 14(3), 506. <https://doi.org/10.3390/ma14030506>
- Nawy, E. G. (2009). *Prestressed Concrete* (edisi 5). Prentice Hall.

