



Simulasi Model Sambungan Mekanis dengan Menggunakan Coupler Untuk Beton Pracetak

Bunga Shafira Wijaya, Anis Rosyidah*, Ega Edistria

¹Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

^{*}anis.rosyidah@sipil.pnj.ac.id

Received: 8 Desember 2021 Resived:29 September 2023 Accepted: 2 Oktober 2023

Abstract

The use of mechanical joints can improve the performance of the connection and make the time more efficient. The purpose of this study was to determine the maximum tensile force, failure pattern and effect of epoxy thickness on the maximum tensile force, epoxy-bar bonding stress, and epoxy-coupler bonding stress of each splice type Grouted Coupler Connector. The research specimens were 6 pieces with varying thicknesses of epoxy and diameter of reinforcing steel. Software that supports the pullout test simulation is ANSYS and the research data processing method uses Simple Linear Regression Analysis. The output from the pullout test simulation is the maximum tensile force with a thickness of 25mm epoxy on the reinforcing steel D16, D22, and D25 of 91.156 kN; 148,090 kN, and 203,295 kN. All the test specimens have an epoxy coupler slip failure pattern. And the concluded from the simple linear regression analysis is a significant effect between the thickness of the epoxy on the maximum tensile force and bond stress, with a negative regression coefficient value. The optimum value of using thick epoxy with a varying diameter of reinforcing bars is 25mm.

Keywords: *Finite element method, grouted coupler connector, pullout test, simple linear regression analysis*

Abstrak

Penggunaan sambungan mekanis mampu meningkatkan kinerja sambungan dan waktu yang lebih efisien. Tujuan penelitian ini ialah untuk mendapatkan nilai gaya tarik maksimum, pola kegagalan dan pengaruh tebal epoxy terhadap gaya tarik maksimum, tegangan lekat tulangan-epoxy, dan tegangan lekat epoxy-coupler dari setiap sambungan Grouted Coupler Connector tipe splices. Benda uji berjumlah 6 buah dengan tebal epoxy dan diameter baja tulangan bervariasi. Software pendukung simulasi pullout test ialah ANSYS dan metode pengolahan data penelitian menggunakan Analisis Regresi Linear Sederhana. Hasil yang diperoleh dari simulasi pullout test adalah gaya tarik maksimum dengan tebal epoxy 25mm pada baja tulangan D16, D22, dan D25 sebesar 91,156 kN; 148,090 kN dan 203,295 kN. Didapatkan bahwa benda uji mengalami pola kegagalan epoxy-coupler slip. Dari analisis regresi linear sederhana terdapat pengaruh yang signifikan antara tebal epoxy terhadap gaya tarik maksimum dan tegangan lekat, dengan nilai koefisien regresi negatif. Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai optimum penggunaan tebal epoxy dengan diameter baja tulangan yang bervariasi sebesar 25mm.

Kata Kunci: *Metode elemen hingga, sambungan grouted coupler, tes pullout, analisis regresi linier sederhana*

Pendahuluan

Penggunaan struktur beton pracetak semakin diminati di era pembangunan ini, karena memiliki banyak kelebihan yaitu dalam efisiensi waktu, biaya, tahan terhadap bencana maupun dalam efisiensi desain estetis menurut Li, *et al.*, 2019 dan Li *et al.*, 2019. Salah satu pertimbangan saat menggunakan beton pracetak ialah perencanaan sambungan antar komponen struktur. Untuk

menjamin kinerja dari struktur beton pracetak maka baja tulangan pada komponen bangunan harus disambung dengan baik menurut (Yu *et al.*, 2019).

Sambungan tipe *Grouted Coupler Connector* atau sambungan dengan *coupler* yang diisi dengan *epoxy* mempunyai kelebihan dalam kemudahan penginstalan, pengendalian mutu, dan kekuatan sambungan. Sambungan dengan *coupler* dan *grouting* dibuat dengan memasukan baja tulangan

ke *coupler* dan menuangnya dengan bahan nat (*epoxy*) berkekuatan tinggi (Ghayeb *et al.*, 2020). Biasanya *Grouted Sleeve Connector* digunakan untuk menghubungkan *pier cap* jembatan dan kolom beton pracetak di Amerika (Parks *et al.*, 2016). *Epoxy* dapat digunakan dengan aman untuk rehabilitasi dan perkuatan elemen struktur dengan kuat tekan beton kurang dari 50 MPa (Ponnada Markandeya Raju, 2020).

Pada (ACI 439.3R-91, 1999) tipe sambungan *Grouted Coupler Connector* dapat digunakan pada variasi diameter baja tulangan dapat disambung secara mekanis, sehingga dapat diaplikasikan pada beton pracetak dimana baja tulangan akan dimasukan kedalam *coupler* dan kedua ujung *coupler* ditutup kemudian diisi *grout* kedalam *coupler* dalam keadaan vertikal. Dengan spasi antar ujung baja tulangan sekitar 1 in. (25mm). Sesuai dengan (ACI 318-14, 2014) sambungan tipe *Grouted Coupler Connector* dirancang untuk mencapai minimal 125% dari kekuatan luluh baja tulangan.

Menurut Yu *et al.*, 2019 dan Ling *et al.*, 2014 terdapat tiga pola kegagalan yang dapat terjadi pada *Grouted Coupler Connector* yaitu *bar fracture*/baja tulangan putus, *bar-epoxy slip*, dan *epoxy-coupler slip*. Kegagalan *bar fracture* disebabkan kapasitas lekat *bar-epoxy* besar dibandingkan kapasitas tarik tulangan. Sedangkan slip antara *bar-epoxy* terjadi akibat tegangan lekat *bar-epoxy* lebih kecil dibandingkan kapasitas tarik sehingga lekatan tersebut tidak mampu menahan baja tulangan dari *epoxy* dan terjadi slip. Serta kegagalan *epoxy-coupler* diakibatkan kurangnya lekatan *epoxy-coupler* dibandingkan kapasitas tarik yang bekerja. Kegagalan dengan pola baja tulangan putus sesuai dengan ketentuan Sambungan Level 1 Spesifikasi Teknis Sambungan Mekanis Baja Tulangan pada JGJ107-2010 menurut (Chen *et al.*, 2020) dan Yu *et al.*, 2019.

Gaya akan ditransfer dari baja tulangan ke *epoxy*, lekatan yang terjadi akibat *interlocking* baja tulangan ulir dengan *epoxy*. Selanjutnya gaya ditransfer dari *epoxy* ke *coupler* dengan efek friksi dan *interlocking coupler* (Soliman *et al.*, 2019). Pada Persamaan 1 perhitungan tegangan tarik pada baja tulangan diluar sambungan *Grouted Coupler Connector* menurut (Yang *et al.*, 2020):

$$f_y = \frac{P}{A_s} \quad (1)$$

dimana, P adalah gaya tarik dengan satuan N,kN dan A_s luas penampang baja tulangan (mm^2).

Untuk mencapai keseimbangan maka gaya tarik dengan kuat lekat harus sama besar, agar tidak mengalami kegagalan dan nilai slip (Henrikus,

2015) dapat menggunakan Persamaan 2 sampai dengan 7.

$$Ld \cdot \pi \cdot d \cdot u = P \quad (2)$$

dengan nilai $P = A_s \cdot f_y$ maka didapat persamaan:

$$Ld \cdot \pi \cdot d \cdot u = A_s \cdot f_y \quad (3)$$

$$Ld \cdot \pi \cdot d \cdot u = \pi \cdot \frac{d^2}{4} f_y \quad (4)$$

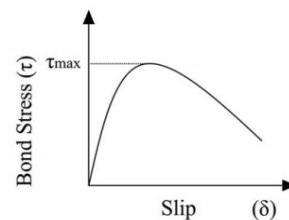
Dari Persamaan (4) diperoleh panjang penyaluran sebagai Persamaan 5 dan nilai tegangan lekat pada Persamaan 6.:

$$Ld = d \cdot \frac{f_y}{4u} \quad (5)$$

$$u = d \cdot \frac{f_y}{4Ld} \quad (6)$$

Perubahan panjang tulangan setelah tertarik adalah $\Delta c = \frac{P \cdot L_o}{A_s \cdot E}$ (7)

dimana P adalah gaya tarik (kg), A_s merupakan luas penampang baja tulangan (mm^2), E merupakan modulus elastisitas (MPa), f_y merupakan tegangan baja leleh (MPa, Pa), d merupakan diameter tulangan baja (mm), Ld adalah panjang penyaluran (mm), u adalah kuat lekat/tegangan lekat. (N/mm^2), Δc merupakan perubahan panjang tulangan setelah terkena gaya tarik (mm) dan L_o merupakan panjang baja tulangan mula-mula(mm).



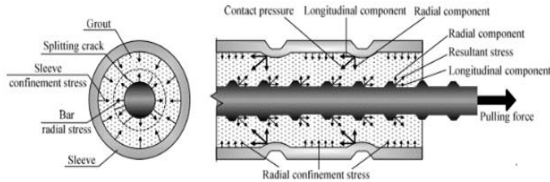
Sumber: (Mohemmi *et al.*, 2020)

Gambar 1. Grafik hubungan tegangan lekat-slip

Slip yang terjadi berupa pergeseran dari ujung tulangan yang tidak dibebani terhadap *epoxy*. Pada tahap awal, saat adhesi dan friksi bekerja, kurva hampir tegak, kemudian mulai melandai saat adhesi dan friksi mulai berkurang, seperti pada Gambar 1. Akan tetapi tegangan lekat terus meningkat sampai mencapai nilai maksimum akibat adanya *interlock rib* tulangan dengan *epoxy*. Nilai maksimum didefinisikan sebagai kuat lekatan nominal dari tulangan. Gaya tarik yang bekerja pada *coupler* akan meningkat ketika penggunaan *rib coupler* berukuran kecil dan spasi yang kecil seperti ulir kecil dan rusuk kerucut sehingga dapat memberikan mekanisme *interlocking* dan meningkatkan distribusi beban menurut (Zheng *et al.*, 2018).

Pada sambungan *Grouted Sleeve Connector* terdapat 2 komponen yaitu komponen longitudinal dan komponen radial. Komponen longitudinal

dapat mencegah *epoxy* terlepas atau *slip* dan komponen radial memberikan efek pengekan pada *epoxy* sehingga dapat meningkatkan kekuatan ikatan baja tulangan, dapat dilihat Gambar 2 sebagai visualisasi interaksi antar komponen. (Zheng *et al.*, 2014).



Sumber: Zheng *et al.*, 2014

Gambar 2. Interaksi komponen sambungan

Pada sambungan tipe splices dibutuhkan panjang penjangkaran sekitar 6-6,4 kali diameter baja tulangan sehingga mampu meningkatkan kapasitas tariknya (Lu *et al.*, 2019). Dengan memperpanjang penjangkaran dari 75mm menjadi 175mm, dapat meningkatkan kuat lekat sebesar 10% (Ling *et al.*, 2012). Saat kondisi baja tulangan tertanam (Elsayed, 2018), maka gaya resultan yang ditransferdimiringkan dengan sudut terhadap sumbu longitudinal baja tulangan, sebanding dengan sudut rusuk baja tulangan. Gaya resultan tersebut diuraikan menjadi komponen paralel yang berkontribusi pada tegangan lekat, dan komponen normal yang berkontribusi pada tegangan *splitting*. Perhitungan confining stress atau tegangan kekang pada sambungan *Grouted Coupler Splices Connector* (Soliman *et al.*, 2019) seperti pada Persamaan 8 dan 9

$$Bc = 17,841 \left(\frac{1}{dsi} \right) + 0,015 \cdot db - 0,0024 \left(\frac{ts \cdot Es}{\pi \cdot (ds \text{ avg})^2} \right) \quad (8)$$

$$Fn = Bc \cdot Fg \quad (9)$$

dimana, Bc adalah koefisien kekang, Fn adalah tegangan kekang (*confining stress*), dsi adalah diameter dalam *coupler*, ds avg adalah rata-rata diameter *coupler*, ts adalah tebal *coupler*, Es adalah modulus elastisitas *coupler* dan Fg adalah kuat tekan *epoxy*.

Dari Persamaan 8 dan 9 disimpulkan bahwa semakin besar kekuatan tekan *epoxy* dan semakin besar diameter baja tulangan, akan menghasilkan kapasitas tarik dan tegangan kekang pada *epoxy* juga semakin besar. Namun dengan semakin besar diameter *coupler* atau semakin tebal *epoxy* yang digunakan, menyebabkan semakin menurunnya tegangan kekang pada *epoxy* disekitar baja tulangan, sehingga menyebabkan tegangan lekat menurun juga.

Apabila semakin kecil diameter *coupler* dan semakin dalam penjangkaran baja tulangan akan

meningkatkan kuat lekat yang terjadi (Ling *et al.*, 2012) dan (Anis; Rosyidah, R.; & Yasin, 2011). Semakin pendek penjangkaran baja tulangan maka perlu *epoxy* yang lebih tebal.

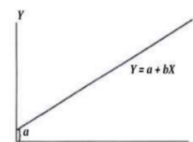
Metode elemen hingga adalah metode yang digunakan dalam membagi area yang ingin diteliti menjadi jumlah tertentu dan menggunakan berbagai konsep untuk membentuk perkiraan yang meliputi elemen dalam jumlah tertentu (Kusbiantoro & Amariansyah, 2017). Penggunaan metode elemen hingga dalam mempelajari perilaku beton lebih cepat dibandingkan dengan praktikum di laboratorium dan biayanya lebih ekonomis (Kusbiantoro, 2016), juga mampu mengevaluasi dan menentukan hubungan beban-slip secara *non-linear* serta keretakan yang terjadi pada struktur beton bertulang (Dere, 2017).

Epoxy dimodelkan menggunakan SOLID65 yang memungkinkan elemen tersebut disimulasikan material akan retak dan hancur, serta *coupler* dan baja tulangan menggunakan elemen SOLID185 untuk material daktil. Hubungan tegangan – regangan pada *epoxy*, *coupler* dan baja tulangan digunakan untuk menentukan sifat mekanik dari masing-masing material. Pemodelan elemen kontak diaplikasikan pada antarmuka *epoxy-coupler* dan *epoxy-baja tulangan* (Henin & Morcou, 2015).

Untuk mengetahui keterpengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat dapat menggunakan analisis regresi linear sederhana. Analisis regresi linear dapat dilakukan jika data kuantitatif yang memiliki skala pengukuran (Nasir, 2018) dan menghasilkan persamaan regresi linear seperti pada Persamaan 10, dan grafik pada Gambar 3.

$$Y = a + bx \quad (10)$$

dimana Y adalah variabel terikat, a adalah konstanta dan b adalah koefisien regresi.



Gambar 3. Grafik persamaan linear

Koefisien determinasi atau koefisien korelasi (R^2) digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara variabel *predictor* X dan *response* Y. Nilai koefisien determinasi antara 0 sampai 1 (Yuliara & I Made, 2016). Jika R^2 mendekati 1 maka dapat dikatakan bahwa pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat adalah besar (Harahap *et al.*, 2013).

Berdasarkan penjelasan di atas, maka penelitian ini meninjau pola kegagalan, gaya tarik maksimum,

tegangan lekat dan pengaruh tebal epoxy terhadap tegangan lekat baja tulangan-epoxy, dan tegangan lekat epoxy-coupler pada sambungan *Grouted Coupler Connector* dengan tipe *splices* yang memiliki variasi tiga diameter baja tulangan yang mudah ditemui dipasaran yaitu D16, D22, dan D25 serta dua variasi tebal epoxy sebesar 25mm dan 50mm, dengan harapan nantinya akan diketahui tebal epoxy yang paling ideal dari variasi diameter baja tulangan serta dapat dijadikan referensi sambungan tipe *Grouted Coupler Connector* di lapangan.

Metode

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan pola kegagalan, gaya tarik maksimum, tegangan lekat baja tulangan-epoxy dan tegangan lekat epoxy-coupler yang terjadi dari sambungan mekanis yang memiliki 3 variasi diameter baja tulangan dan 2 variasi tebal epoxy. Pemodelan lebih detail dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Benda uji dengan tebal epoxy 25mm



Gambar 5. Benda uji dengan tebal epoxy 50mm

Baja Tulangan yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe sirip tulang ikan (*Fish Bone*) dengan Kelas Baja Tulangan BjTS 420B (Anis Rosyidah, Tjondro, & Sucita, 2021). Untuk epoxy menggunakan produk Epoxyndo Polyamide (02) 28.08 ALD, serta coupler dengan tebal 6mm (Yu *et al.*, 2019). Tabel 1 sampai dengan 3 merupakan table spesifikasi material yang digunakan.

Pemodelan benda uji menggunakan cad dan *solidworks*, serta simulasi *pullout test* dilakukan pada *software* ANSYS. Sebelum dilakukan simulasi *pullout test*, diperlukan validasi pemodelan dengan benda uji yang hampir sama. Validasi pemodelan yang digunakan adalah hasil eksperimen *pullout test* 1 tulangan. Jika hasil simulasi *pullout*

test dengan ANSYS kurang dari 10% maka dapat dikatakan bahwa pemodelan sudah valid dan dapat melanjutkan ke tahapan berikutnya. Selanjutnya dilakukan peng-*inputan material properties* yang sudah didapatkan dari referensi jurnal dan percobaan laboratorium, dilanjutkan dengan pengumpulan *material properties* dari setiap material yang dibutuhkan dari referensi jurnal dan percobaan laboratorium, peng-*inputan material properties* dan proses *input geometry* dengan format (IGES). Lalu *settings* bagian *meshing* dan *contact pair*, pilih *meshing automatic* dengan *face sizing* 10mm, dan *contact bonded*.

Tabel 1. Spesifikasi baja tulangan

Diameter baja tulangan	Yield strength (MPa)	Tensile ultimate strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
D16	448	597	200.000
D22	476	639	200.000
D25	482	643	200.000

Tabel 2. Spesifikasi epoxy

Jenis epoxy	Tensile yield (MPa)	Tensile ultimate (MPa)	Elastic modulus (MPa)
Epoxyndo polymide (02) 28.08 ALD	11,01	37,68	2335,9

Tabel 3. Spesifikasi Coupler

Tebal Coupler (mm)	Yield Strength (MPa)	Tensile Ultimate Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)
6	363,8	523,63	184.200

Karena pembebanan pada penelitian ini sesuai dengan *displacement* atau *displacement control* yaitu pemberian atau *input displacement* pada dibagian atas baja tulangan sebesar 3mm. Selanjutnya *input force reaction* searah dengan *displacement* yang direncanakan sehingga menghasilkan reaksi beban (*load*) akibat *displacement*. Dengan *analysis settings substeps* mulai dari 20 sampai 50. Kemudian untuk memunculkan *output* yang dibutuhkan dengan tahapan (1) *Directional Y axis* sebagai *slip* yang terjadi pada sumbu Y (arah vertikal) pada benda uji. (2) *Equivalent Stress* sebagai hasil resultan tegangan yang terjadi pada benda uji. (3) *Shear stress* sebagai tegangan geser yang terjadi dari setiap material dan dapat didefinisikan sebagai tegangan lekat. (4) *Max principal stress* sebagai

nilai maksimum atau ekstrim dari tegangan normal yang terjadi. (5) *Vector principal stress* sebagai pola atau kontur yang menunjukkan kegagalan yang terjadi, pola tersebut menggambarkan tarikan yang terjadi pada benda uji. Tahapan terakhir yaitu analisis statistika dengan uji regresi linear sederhana dengan bantuan microsoft excel untuk mendapatkan *R-Square* dan persamaan regresi linear.

Hasil dan Pembahasan

Validasi pemodelan

Pembandingan slip, tegangan baja tulangan, dan tegangan lekat baja tulangan dari hasil eksperimen (Gambar 6) dengan hasil simulasi ANSYS Workbench 19.2 (Gambar 7) pada benda uji *pullout test* 1 tulangan dengan beban maksimum sebesar 35,12 kN, dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi perbandingan eksperimen dengan FEM

Hasil Uji	Eks	FEM	Penyimpangan
Slip (mm)	4,599	4,305	5,89%
Fu (Mpa)	256,806	231,320	9,28%
σ t-e (MPa)	13,162	13,162	0,00%

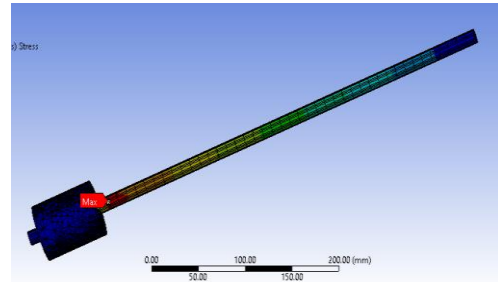
Terjadi penyimpangan slip, tegangan baja tulangan dan tegangan lekat baja tulangan-epoxy sebesar 5,89%; 9,28% dan 0%, nilai tersebut masih dalam batas toleransi validasi karena penyimpangan kurang dari 10%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pemodelan tersebut sudah valid sehingga dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.



Gambar 6. Kegagalan benda uji validasi saat eksperimen

Pola kegagalan yang terjadi saat eksperimen maupun simulasi dengan ANSYS adalah *bar-grout slip* atau baja tulangan terlepas dari lekatan *epoxy*. Hal tersebut karena pada saat melakukan uji eksperimen mengalami slip sebesar 4,599 mm, seperti pada Gambar 6, dan slip saat simulasi sebesar 4,305mm (Gambar 7), sedangkan jarak

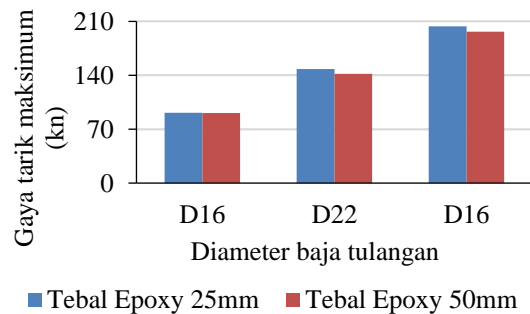
antar *rib*/ulir pada baja tulangan D13 sebesar 4 mm, sehingga memenuhi syarat keruntuhan *bar-grout slip* yaitu slip yang terjadi lebih besar daripada jarak antar *rib* / ulir baja tulangan. Dari kesamaan pola kerusakan yang terjadi antara eksperimen dengan pemodelan dengan *finite element method*, maka model tersebut sudah dikatakan valid.



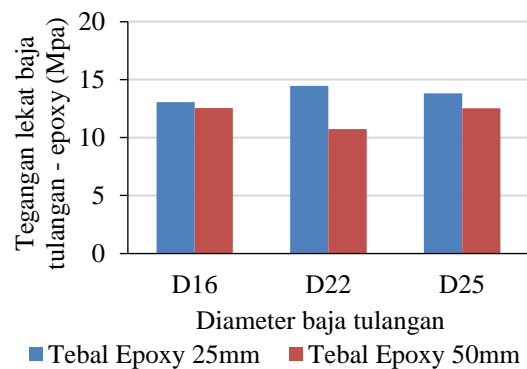
Gambar 7. Kegagalan titik putus baja tulangan pada benda uji validasi saat simulasi ANSYS

Pengujian Tarik (*Pullout Test*)

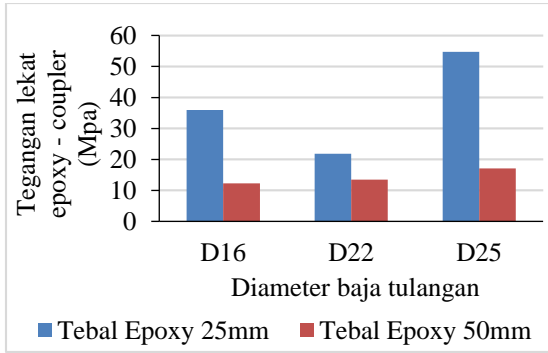
Dari hasil simulasi *pullout test* pada ANSYS Workbench didapatkan nilai gaya tarik maksimum, tegangan lekat tulangan-epoxy, dan tegangan lekat *epoxy-coupler* dari 3 variasi diameter baja tulangan dan 2 variasi tebal *epoxy*, dapat dilihat pada Gambar 8 sampai dengan 10.



Gambar 8. Diagram gaya tarik maksimum pada benda uji



Gambar 9. Diagram tegangan lekat baja tulangan-epoxy pada benda uji



Gambar 10. Diagram tegangan lekat epoxy-coupler pada benda uji

Berdasarkan Gambar 8 sampai dengan 10 dapat diketahui bahwa semakin besar diameter baja tulangan maka menghasilkan gaya tarik dan kapasitas daya dukung epoxy yang besar sesuai dengan penelitian Zheng *et al.*, 2016 dan Lu *et al.*, 2019. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar tebal epoxy atau semakin besarnya coupler pada diameter baja tulangan yang sama menghasilkan gaya tarik maksimum yang kecil (Einea *et al.*, 1995). Hal tersebut dapat mengakibatkan menurunnya tegangan lekat baja tulangan-epoxy dan tegangan lekat epoxy-coupler.

Perhitungan tegangan kekang dan ratio strength

Sebagai contoh perhitungan tegangan kekang pada benda uji baja tulangan D16:

Tipe SG16-25 :
 db = 16 mm
 dso = 78 mm
 dsi = 66 mm
 ds avg = 72 mm
 ts = 6 mm
 Es = 184200 MPa
 Fg = 145 MPa
 $Bc = 17,841 \cdot \left(\frac{1}{dsi}\right) + 0,015 \cdot db - 0,0024 \cdot \left(\frac{ts \cdot Es}{n \cdot (ds \text{ avg})^2}\right)$
 $Bc = 0,371$
 $Fn = Bc \cdot Fg$
 $Fn = 0,371 \cdot 145 = 53,863 \text{ MPa}$

Tipe SG16-50 :
 db = 16 mm
 dso = 128 mm
 dsi = 116 mm
 ds avg = 122 mm
 ts = 6 mm
 Es = 184200 MPa
 Fg = 145 MPa
 $Bc = 17,841 \cdot \left(\frac{1}{dsi}\right) + 0,015 \cdot db - 0,0024 \cdot \left(\frac{ts \cdot Es}{n \cdot (ds \text{ avg})^2}\right)$
 $Bc = 0,342$
 $Fn = Bc \cdot Fg$
 $Fn = 0,342 \cdot 145 = 49,625 \text{ MPa}$

Dari perhitungan tegangan kekang diatas terbukti bahwa dengan diameter baja tulangan yang sama namun penggunaan epoxy yang tebal dapat mengurangi tegangan kekang yang terjadi. Pada sambungan Grouted Coupler Connector dapat mengembangkan kapasitas tegangan tarik ultimate baja tulangan sebesar 125% dari tegangan luluh baja tulangan sebagai syarat ketentuan ACI 439 dan ACI 318-14.

Dari simulasi pullout test dan perhitungan. didapatkan bahwa dengan penggunaan epoxy yang semakin tipis dapat menghasilkan ratio strength (Rs) semakin besar. Dapat dilihat rekapitulasi ratio strength dan tegangan kekang dari setiap benda uji pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi ratio strength dan tegangan kekang benda uji

Kode	Pmax kN	Rs	Fn MPa
SG16-25	91,156	1,424	58,863
SG16-50	91,054	1,420	49,625
SG22-25	148,090	1,388	66,421
SG22-50	141,800	1,361	62,233
SG25-25	203,295	1,651	72,685
SG25-50	196,655	1,597	68,545

dimana, Pmax adalah gaya tarik maksimum, Rs adalah ratio strength, dan Fn adalah tegangan kekang.

Pola kegagalan

Diketahui dari output vector principal stress yang memvisualisasikan pola pada benda uji yang paling tertarik, sehingga disimpulkan pola kegagalan yang terjadi pada semua benda uji ialah epoxy-coupler slip. Hal tersebut ditandai dengan nilai tegangan lekat epoxy-coupler lebih kecil dibandingkan dengan tegangan tarik yang terjadi baik di epoxy dan coupler, namun slip yang terjadi tidak melebihi jarak antar ulir baja tulangan. Dapat dilihat pada Tabel 6, sampai dengan 8, Gambar 11 sampai dengan 13. Kegagalan yang terjadi pada spesimen Epoxyed Coupler Splices Connector hanya epoxy-coupler slip (Yu *et al.*, 2019).

Tabel 6. Tegangan tarik epoxy dan coupler benda uji

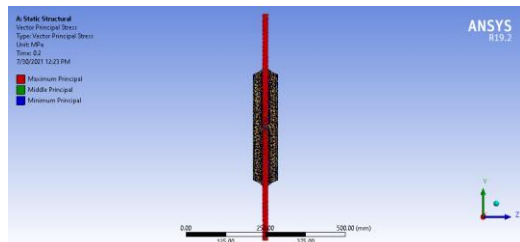
Kode Benda Uji	σt epoxy MPa	σt coupler MPa
SG16-25	89,396	56,813
SG16-50	94,034	16,788
SG22-25	79,773	39,247
SG22-50	84,613	37,766
SG25-25	83,070	131,860
SG25-50	86,267	40,655

Tabel 7. Pola kegagalan berdasarkan tegangan lekat pada benda uji

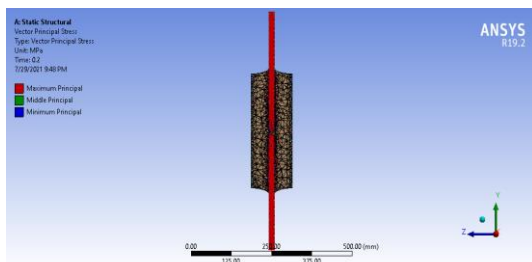
Kode Benda Uji	σ t-e MPa	σ e-c MPa	Pola Kegagalan
SG16-25	13,05	35,93	<i>epoxy-coupler slip</i>
SG16-50	12,54	12,23	<i>epoxy-coupler slip</i>
SG22-25	14,45	21,80	<i>epoxy-coupler slip</i>
SG22-50	10,73	13,44	<i>epoxy-coupler slip</i>
SG25-25	13,81	54,74	<i>epoxy-coupler slip</i>
SG25-50	12,52	17,10	<i>epoxy-coupler slip</i>

Tabel 8. Pola kegagalan berdasarkan slip pada benda uji

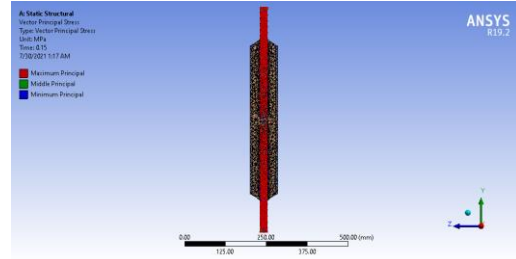
Kode benda uji	Jarak antar ulir mm	Slip yang terjadi mm	Pola kegagalan
SG16-25	11,2	0,6	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>
SG16-50	11,2	0,6	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>
SG22-25	15,4	0,45	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>
SG22-50	15,4	0,45	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>
SG25-25	17,5	0,45	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>
SG25-50	17,5	0,45	Tidak terjadi <i>bar-grout slip</i>



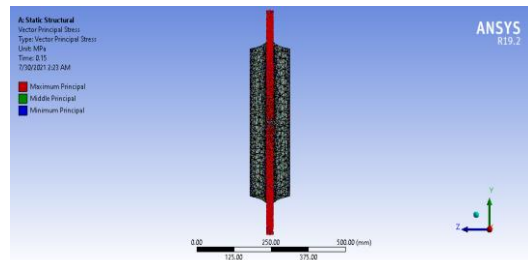
Gambar 11a. Pola keruntuhan D16 tebal epoxy 25mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)



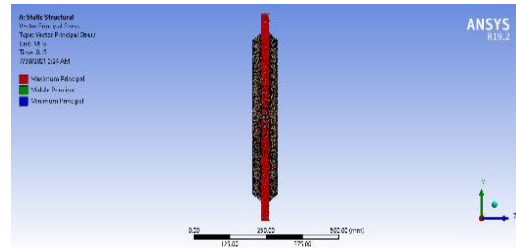
Gambar 11b. Pola keruntuhan D16 tebal epoxy 50mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)



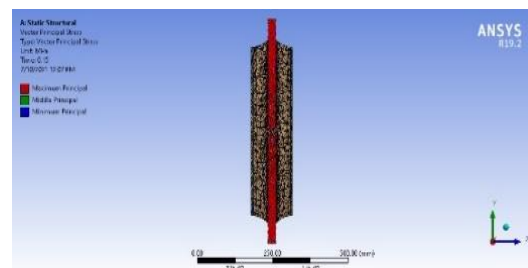
Gambar 12a. Pola keruntuhan D22 tebal epoxy 25mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)



Gambar 12b. Pola keruntuhan D22 tebal epoxy 50mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)



Gambar 13a. Pola keruntuhan D25 tebal epoxy 25mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)



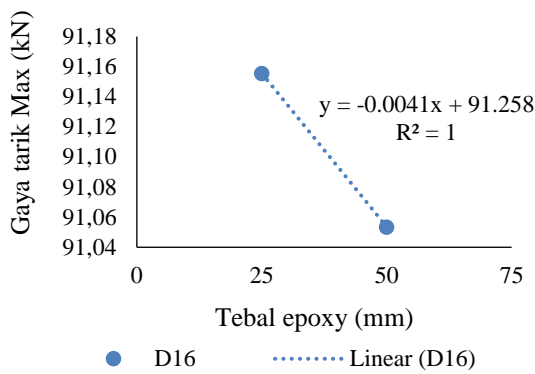
Gambar 13b. Pola keruntuhan D25 tebal epoxy 50mm dengan *vector principal* (tidak terjadi slip antara *bar-grout*)

Uji regresi linear sederhana

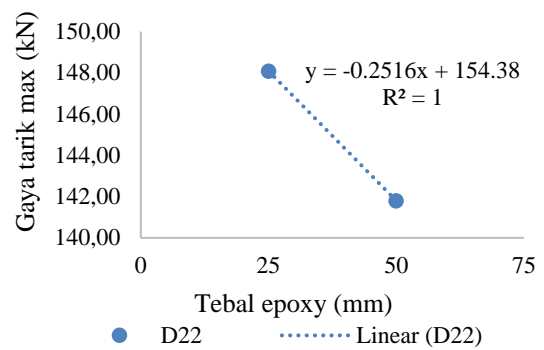
Setelah dilakukan analisis statistika dengan uji regresi linear sederhana, diketahui pengaruh tebal *epoxy* terhadap tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* maupun *epoxy-coupler* didapatkan nilai *R-Square* dan persamaan regresi linear seperti pada Gambar 14a sampai dengan 16c.

Tebal *epoxy* mempengaruhi gaya tarik maksimum pada D16 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka gaya tarik maksimum D16 menurun sebesar 0,0041 dengan nilai konsisten 91,258 (Gambar 14a). Pada Gambar 14b, tebal *epoxy* mempengaruhi tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* pada D16 sebesar 100% dan setiap penambahan 1 mm tebal *epoxy* maka tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* D16 menurun sebesar 0,0205 dengan nilai konsisten 13,561. Berdasarkan Gambar 14c, berarti tebal *epoxy* mempengaruhi tegangan lekat *epoxy-coupler* pada D16 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka tegangan lekat *epoxy-coupler* D16 menurun sebesar 0,947 dengan nilai konsisten 59,62

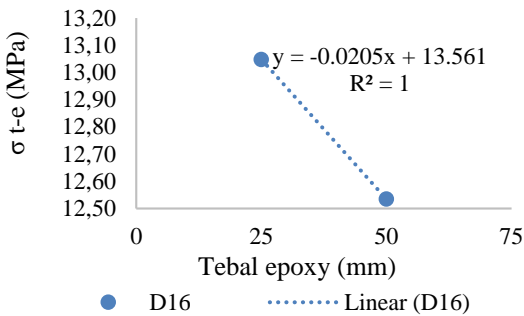
Berdasarkan Gambar 15a, tampak tebal *epoxy* mempengaruhi gaya tarik maksimum pada D22 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka gaya tarik maksimum D22 akan menurun sebesar 0,2516 dengan nilai konsisten 154,38. Pada Gambar 15b, tebal *epoxy* mempengaruhi tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* pada D22 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* D22 akan menurun sebesar 0,149 dengan nilai konsisten 18,178. Berdasarkan Gambar 15c, tebal *epoxy* mempengaruhi tegangan lekat *epoxy-coupler* pada D22 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka tegangan lekat *epoxy-coupler* D22 menurun sebesar 0,334 dengan nilai konsisten 39,159.



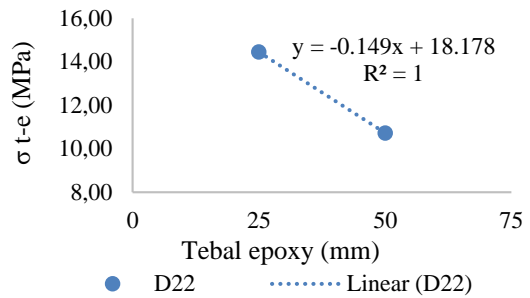
Gambar 14a. Grafik regresi linear gaya tarik maksimum D16



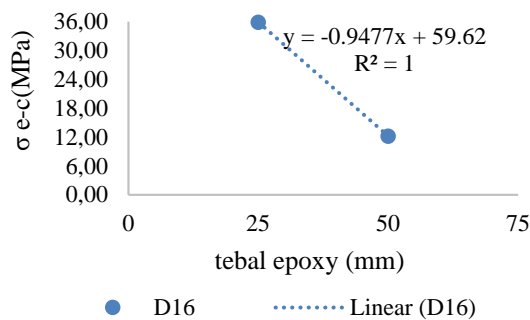
Gambar 15a. Grafik regresi linear gaya tarik maksimum D22



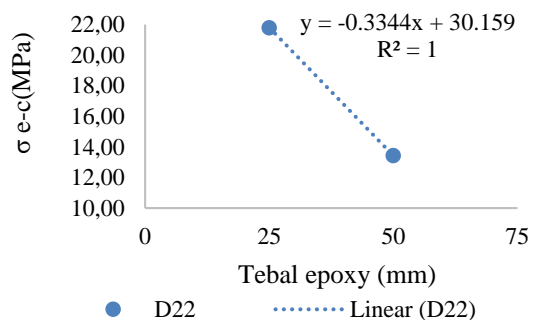
Gambar 14b. Grafik regresi linear tegangan lekat baja tulangan-Epoxy D16



Gambar 15b. Grafik regresi linear tegangan baja tulangan-epoxy D22

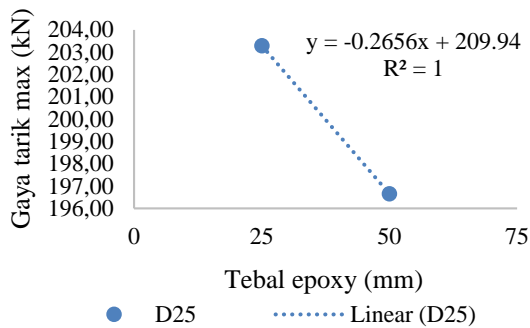


Gambar 14c. Grafik regresi linear tegangan lekat epoxy-coupler D16

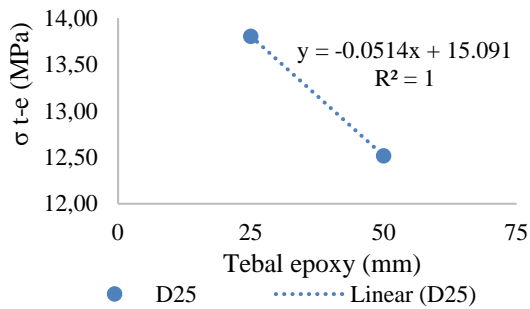


Gambar 15c. Grafik regresi linear tegangan lekat epoxy-coupler D22

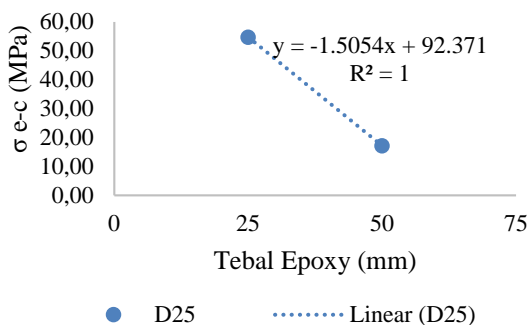
Berdasarkan Gambar 16a, menunjukkan tebal *epoxy* mempengaruhi Gaya Tarik Maksimum pada D25 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka Gaya Tarik Maksimum D25 akan menurun sebesar 0,2656 dengan nilai konsisten 209,94. Dari Gambar 16b, tebal *epoxy* mempengaruhi Tegangan Lekat Baja Tulangan-Epoxy pada D25 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka Tegangan Lekat Baja Tulangan-Epoxy D25 akan menurun sebesar 0,051 dengan nilai konsisten 15,091. Pada Gambar 16c, tebal *epoxy* mempengaruhi Tegangan Lekat Epoxy-Coupler pada D25 sebesar 100% dan setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* maka Tegangan Lekat Epoxy-Coupler D25 akan menurun sebesar 1,505 dengan nilai konsisten 91,371.



Gambar 16a. Grafik regresi linear gaya tarik maksimum D25



Gambar 16b. Grafik regresi linear tegangan lekat baja tulangan-epoxy D25



Gambar 16c. Grafik regresi linear tegangan lekat epoxy-coupler D25

Kesimpulan

Penggunaan diameter baja tulangan yang semakin besar dapat menghasilkan gaya tarik maksimum yang besar juga. Diameter baja tulangan yang sama namun penggunaan *epoxy* yang tebal, maka menghasilkan gaya tarik, tegangan lekat baja tulangan – *epoxy* dan tegangan lekat *epoxy-coupler* yang kecil sehingga mempengaruhi tegangan kekang yang semakin menurun. Pola kegagalan yang terjadi pada semua benda uji adalah *epoxy-coupler slip* tanpa mengalami *slip* pada baja tulangan. Penggunaan tebal *epoxy* sangat mempengaruhi kinerja sambungan dengan nilai koefisien regresi nya negatif (-) dengan kata lain setiap penambahan 1mm tebal *epoxy* dapat mengurangi kapasitas gaya tarik maksimum, tegangan lekat baja tulangan-*epoxy* maupun *epoxy-coupler*. Model sambungan yang paling optimum adalah SG25-25 yaitu diameter baja tulangan D25 dengan tebal *epoxy* yang tipis sebesar 25mm.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada UP2M Politeknik Negeri Jakarta yang telah memberikan bantuan dana.

Daftar Pustaka

- ACI 318-14. (2014). ACI 318-14 - Building Code Requirements for Structural Concrete. In *American Concrete Institute*.
- ACI 439.3R-91. (1999). Mechanical Connections of Reinforcing Bars, Standard by American Concrete Institute. *Concrete International*, 5(1), 24–35.
- Chen, X., Shen, L., Shi, G., Wei, Y., & Wang, Y. (2020). Experimental Research on Mechanical Performance of Rebar Sleeve Grouting Connector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 580, 012014.
- Dere, Y. (2017). Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 71–74.
- Einea, A., Yamane, T., & Tadros, M. K. (1995). Grout-filled pipe splices for precast concrete construction. *PCI Journal*, 40(1), 82–93.
- Elsayed, M. G. (2018). *Experimental and Numerical Investigation of Emulative Connections in Precast Concrete Walls*. March.
- Ghayeb, H. H., Razak, H. A., Sulong, N. H. R., Mo,

- K. H., Abutaha, F., & Gordan, M. (2020). Performance of Mechanical Steel Bar Splices using Grouted Couplers under Unitensile Tension. In *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd. 851–863.
- (2013). Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Permintaan Air Minum Pada Perusahaan Daerah Air Minum (Pdam) Tirtanadi Medan. *Saintia Matematika*, 1(4), 323–336.
- Henin, E., & Morcou, G. (2015). Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction. *Engineering Structures*, 83, 154–162.
- Henrikus, E. (2015). *Kajian Eksperimental Perilaku Besi*.
- Kusbiantoro, A. (2016). Perbandingan Analisa Balok Baja Dengan Cara Teoritis Dan Finite Element Analysis. *Neo Teknika*, 2(1), 1–6.
- Kusbiantoro, A., & Amariansyah, W. (2017). Analisis Kolom Beton Dengan Beban Tarik Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Neo Teknika*, 3(1).
- Li, L. Z., Bai, Y., Yu, K. Q., Yu, J. T., & Lu, Z. D. (2019). Reinforced high-strength engineered cementitious composite (ECC) columns under eccentric compression: Experiment and theoretical model. *Engineering Structures*, 198(January), 109541.
- Li, L. Z., Liu, X., Yu, J. T., Lu, Z. D., Su, M. N., Liao, J. H., & Xia, M. (2019). Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 179(October 2018), 161–173.
- Ling, J. H., Ahmad, A. B., & Ibrahim, I. S. (2014). Feasibility study of grouted splice connector under tensile load. *Construction and Building Materials*, 50, 530–539.
- Ling, J. H., Ahmad, A. B., Ibrahim, I. S., & Abdul Hamid, Z. (2012). Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load. *Construction and Building Materials*, 33, 90–98.
- Lu, Z., Huang, J., Li, Y., Dai, S., Peng, Z., Liu, X., & Zhang, M. (2019). Mechanical behaviour of grouted sleeve splice under unitensile tensile loading. *Engineering Structures*, 186(June 2018), 421–435.
- Mohemmi, M., Broujerdian, V., & Rajaeian, P. (2020). An Equivalent Method for Bar Slip Simulation in Reinforced Concrete Frames. *International Journal of Civil Engineering*, 18(8), 851–863.
- Nasir, A. M. (2018). *Statistik Pendidikan* (Issue February).
- Parks, J. E., Papulak, T., & Pantelides, C. P. (2016). Acoustic emission monitoring of grouted splice sleeve connectors and reinforced precast concrete bridge assemblies. *Construction and Building Materials*, 122, 537–547.
- Ponnada Markandeya Raju. (2020). An Experimental Study On Assessment Of Strength Of Epoxy Bond Between Steel And Roughened Concrete Interface. *Malaysian Construction Research Journal*, 30(1), 17–34.
- Rosyidah, A., R., G. M., & Yasin, E. (2011). Tinjauan Variasi Tebal Grouting Sikadur 31 CF Normal dan Panjang Penyaluran terhadap Daya Lekat Baja Tulangann pada Beton Mutu Normal. *Politeknologi*, 10(1), 93–107.
- Soliman, A. M., Ibrahim, H. H., & Hodhod, H. A. (2019). The Mechanical Behavior of Grouted Sleeve Splice Connections with and without Mechanical Interlocking Ring Under Tensile Tensile Load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(2), 467–476.
- Yang, C., Zhang, L., Zhang, Z., Cao, X., Khan, I., Deng, K., & Xu, T. (2020). Effective stress-strain relationship for grouted sleeve connection: Modeling and experimental verification. *Engineering Structures*, 210(August 2019).
- Yu, Q., Sun, J., Xu, Z., Li, L., Zhang, Z., & Yu, S. (2019). Mechanical analysis of grouted sleeve lapping connector. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(22).
- Yuliara, & I Made. (2016). Regresi Linier Sederhana. *Fisika*, 7–41.
- Zheng, Y. F., Guo, Z. X., & Xie, M. (2014). Behaviour of Grout-Filled Splice under Monotonic and Cyclic Loads. *Advanced Materials Research*, 1079–1080, 322–326.
- Zheng, Y., Guo, Z., Guan, D., & Zhang, X. (2018). Parametric study on a novel grouted rolling pipe splice for precast concrete construction. *Construction and Building Materials*, 166, 452–463.
- Zheng, Y., Guo, Z., Liu, J., Chen, X., & Xiao, Q. (2016). Performance and confining mechanism of grouted deformed pipe splice under tensile load. *Advances in Structural Engineering*, 19(1), 86–103.