

## PENGARUH PANJANG TERLEKAT TERHADAP KEKUATAN LEKAT TULANGAN PADA BETON SEBAGAI PERKUATAN EKSTERNAL (*NEAR-SURFACE MOUNTED*)

Henda Febrian Egatama<sup>1\*</sup>, Andreas Triwiyono<sup>2</sup>, dan Djoko Sulisty<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, D. I. Yogyakarta

\*Email: henda.febrian.e@mail.ugm.ac.id

### Abstrak

Penelitian mengenai perkuatan eksternal (*Near-surface Mounted*) dengan menggunakan baja tulangan biasa perlu dilakukan, sebagai alternatif dari perkuatan FRP. Namun, sebelum penelitian tersebut dilakukan, penelitian pendahuluan diperlukan untuk mengetahui panjang penyaluran yang dibutuhkan, berdasarkan kekuatan lekat antara tulangan, bahan perekat (*epoxy*), dan beton. Metode pengujian yang dilakukan adalah dengan uji lolos tarik (*pull out*) tulangan ulir D13 yang direkatkan pada permukaan beton dengan kedalaman takikan 20 mm (1,5D) dengan *epoxy* adesif. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan lekat ultimit yang terjadi pada panjang terlekat 50 mm, 100 mm, 150 mm, dan 200 mm berturut-turut adalah 11,181 MPa, 19,972 MPa, 14,348 MPa, dan 10,235 MPa. Mode keruntuhan yang terjadi pada panjang terlekat 50 mm dan 100 mm adalah pecah pada beton (*spalling*), sedangkan pada 150 mm dan 200 mm adalah putus/luluh tulangan.

**Kata kunci:** kekuatan lekat, *near-surface mounted*, perkuatan eksternal, perekat *epoxy*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang Masalah

Perkuatan komponen struktural yang terbuat dari beton bertulang merupakan salah satu isu yang tidak pernah berhenti untuk diteliti. Teknologi terus dikembangkan untuk menemukan metode paling optimal dalam perkuatan komponen tersebut. Salah satu metode perkuatan adalah penulangan eksternal pada permukaan beton bertulang, atau yang lebih dikenal dengan metode *Near-surface Mounted* (NSM). Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Asplund (1949). Perkuatan ini dilakukan untuk menanggulangi beberapa permasalahan di lapangan, antara pengalihfungsian gedung agar mampu memikul momen lebih besar, atau perbaikan perkuatan balok akibat bencana. Alternatif lain dari perkuatan struktur yang saat ini sedang banyak diteliti adalah perkuatan dengan *fiber reinforced polymer* (FRP). Perkuatan tersebut memang memberikan peningkatan kekuatan lentur atau tarik yang besar, tetapi membutuhkan biaya yang relatif besar pula. Oleh sebab itu, penelitian mengenai perkuatan eksternal dengan menggunakan baja tulangan biasa sebagai alternatif lain sangat dibutuhkan. Namun, sebelum metode ini diaplikasikan, penelitian pendahuluan diperlukan untuk mengetahui panjang penyaluran yang dibutuhkan, berdasarkan kekuatan lekat antara tulangan, bahan perekat (*epoxy*), dan beton. Banyak penelitian sudah dilakukan untuk mengetahui kekuatan lekat (*bond strength*) tulangan FRP dengan metode NSM, sedangkan penelitian dengan baja tulangan sebagai material perkuatan masih relatif minim.

### Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara panjang tulangan yang dilekatkan pada alur di bagian permukaan beton dengan kekuatan lekatnya. Berdasarkan kekuatan lekat tersebut, akan didapatkan panjang penyaluran yang dibutuhkan tulangan eksternal, sedemikian sehingga baja tulangan eksternal dapat mencapai titik leleh sebelum terjadi kegagalan. Dengan diketahui kekuatan lekat baja tulangan eksternal dan panjang penyaluran yang dibutuhkan, perencanaan dan pekerjaan perkuatan eksternal dapat dilakukan efektif dan efisien.

### Studi Pustaka

Soliman dkk. (2011) menguraikan definisi metode NSM, yaitu sebuah metode perkuatan struktur dengan melekatkan tulangan eksternal di dalam selimut beton, sehingga risiko-risiko kerusakan pada perkuatan dapat teratasi. Secara umum, ada 2 cara pengujian kekuatan lekat dalam metode NSM ini. Cara pengujian yang pertama adalah *direct pull-out test* seperti yang telah

dilakukan oleh Budipriyanto dkk. (2018), Zhang (2018), Lee dkk. (2017), Seo dkk. (2012), dan Soliman (2011). Cara pengujian yang kedua adalah *beam pull-out test* seperti yang telah dilakukan oleh Wang dkk. (2019) dan Lorenzis dkk. (2000). Cara pengujian yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Lee dkk. (2017) dan Soliman (2011), yaitu *direct pull-out test* tulangan eksternal pada benda uji yang terbuat dari beton berbentuk C. Namun, penelitian-penelitian tersebut menggunakan FRP sebagai perkuatan NSM, sedangkan pada penelitian ini digunakan tulangan baja S13 (ulir) sebagai perkuatan, yang mengacu pada penelitian Mulyani (2004).

Tegangan lekat adalah tegangan geser yang terjadi pada permukaan tulangan baja dan beton, di mana terjadi perpindahan gaya/beban antara tulangan dengan beton di sekelilingnya yang dapat meningkatkan tegangan pada baja (Park dan Paulay, 1974). ACI 440.3R-12 merumuskan tegangan lekat di sepanjang panjang terlekat seperti pada Persamaan (1).

$$\tau = \frac{P}{\pi d_b l_b} \quad (1)$$

dengan:

- $P$  = gaya tarik (*pull-out*) selama pengujian (N)  
 $l_b$  = panjang terlekat (mm)  
 $d_b$  = diameter efektif tulangan eksternal (mm)

Tegangan lekat juga dapat ditentukan secara eksperimental dari data pembacaan regangan di sepanjang tulangan. Bilotta dkk. (2015) juga menggunakan definisi ini untuk menentukan dan membuat grafik hubungan tegangan lekat dan slip, seperti tertulis pada Persamaan (2), dengan asumsi bahwa distribusi tegangan yang terjadi pada interval ini adalah seragam.

$$\tau = E_{f,exp} \frac{A_f \Delta \varepsilon_i}{p_f \Delta x_i} \quad (2)$$

dengan:

- $E_{f,exp}$  = modulus elastisitas tulangan perkuatan (MPa)  
 $A_f$  = luas permukaan penampang tulangan perkuatan (mm<sup>2</sup>)  
 $p_f$  = keliling penampang tulangan perkuatan (mm)  
 $\Delta \varepsilon_i$  = selisih regangan pada kedua titik SG  
 $\Delta x_i$  = jarak antara dua titik SG (mm)

Menurut Wight dan Mac Gregor (2012), tegangan lekat rerata yang digunakan untuk menghitung panjang penyaluran ( $l_d$ ) adalah tegangan lekat rerata pada saat terjadi kegagalan pada uji kekuatan lekat. Dalam penelitian Lorenzis dkk. (2002), terdapat dua jenis kegagalan yang memengaruhi perhitungan kekuatan lekatnya, yaitu kegagalan epoksi-beton dan kegagalan tulangan-epoksi. Persamaan kekuatan lekatnya ditulis seperti dalam Persamaan (3) dan (4) berikut.

1. Kekuatan lekat untuk kegagalan epoksi-beton

$$\tau_{av1u} = \frac{P_{max}}{3d_g l_b} \quad (3)$$

2. Kekuatan lekat untuk kegagalan tulangan-epoksi

$$\tau_{av2u} = \frac{P_{max}}{\pi d_b l_b} \quad (4)$$

dengan:

- $P_{max}$  = beban maksimum yang mengakibatkan kegagalan lekatan (N)  
 $d_g$  = panjang sisi-sisi alur (mm)

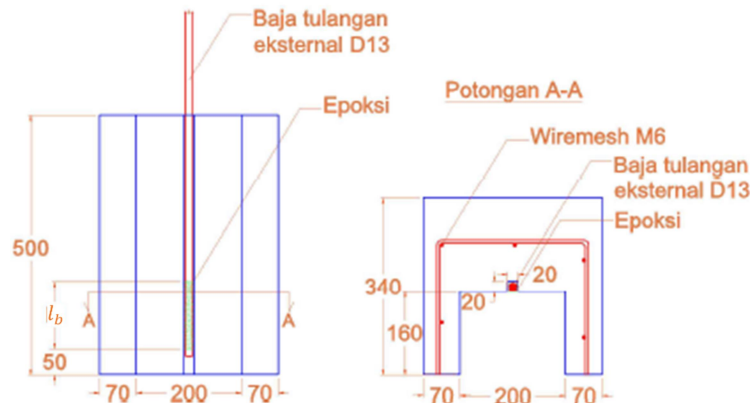
Caro dkk (2017) juga menggunakan definisi yang sama dengan Lorenzis dkk. (2002) mengenai tegangan lekat rata-rata (*average bond stress*) yang digunakan untuk perbandingan hasil kekuatan lekat berdasarkan panjang terlekat. Sekalipun asumsi itu tidak sepenuhnya akurat, mengingat adanya ketidakseragaman tegangan-tegangan lekat yang terjadi di sepanjang panjang terlekat, tetapi definisi ini dapat digunakan karena cukup memudahkan dalam perbandingan hasil.

## PENGUJIAN KEKUATAN LEKAT

### Benda Uji

Benda uji beton berbentuk C dengan dimensi lebar 340 mm, tinggi 340 mm, dan panjang 500 mm. Penentuan dimensi benda uji mengacu pada penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan kekuatan lekat metode NSM. Gambar 1 memperlihatkan detail dimensi dan penulangan benda uji kekuatan lekat. Panjang terlekat (*bonded length*) ditentukan sebagai variasi dalam pengujian ini. Terdapat 4 (empat) variasi panjang terlekat yaitu 50 mm, 100 mm, 150 mm, dan 200

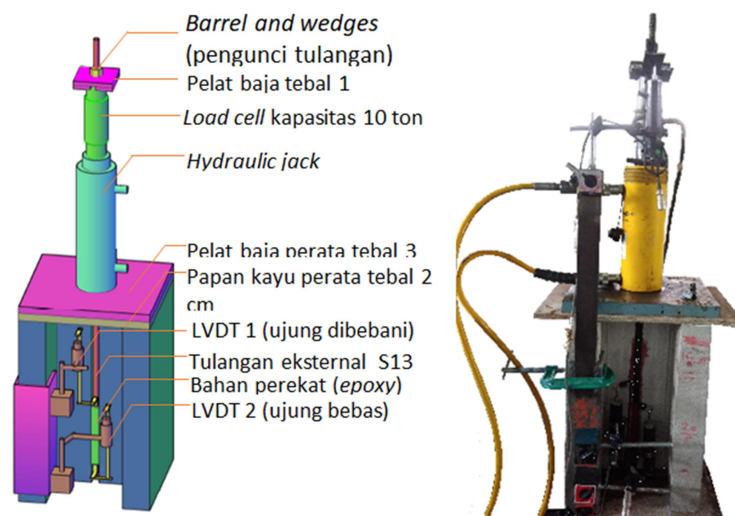
mm. Pada Gambar 1,  $l_b$  merupakan notasi dari panjang lekatan. Benda uji kekuatan lekat (*bond strength*) berjumlah 12 buah, yang terdiri dari masing-masing 3 benda uji masing-masing variasi panjang terlekat.



Gambar 1. Detil benda uji kekuatan lekat

### Material

Beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton dengan kekuatan tekan rerata pada umur 28 hari sebesar 18,06 MPa. Baja tulangan yang digunakan terdiri dari 2 jenis, yaitu *wiremesh* M6 sebagai tulangan konstruktif. Tulangan ulir S13 merek Krakatau Steel dengan kuat luluh  $f_y = 487,59 \text{ MPa}$ , sebagai tulangan eksternal yang akan diuji kekuatannya. Bahan adesif yang digunakan sebagai perekat adalah epoksi merek HIT-RE 500 V3 *Epoxy Adhesive Anchoring System*, dari PT. Hilti. Spesifikasi bahan ini adalah sebagai berikut; kekuatan lekat 10,8 MPa (2 hari) dan 11,7 MPa (14 hari), kekuatan tekan 82,7 MPa, modulus tekan 2.600 MPa, dan kekuatan tarik 49,3 MPa (7 hari).



Gambar 2. Setup pengujian kekuatan lekat

### Cara Pengujian

Pengujian kekuatan lekat dilakukan untuk mengetahui kekuatan lekat (*bond strength*) dan slip yang terjadi. *Setup* pengujian dilakukan seperti pada Gambar 2. Pada *setup* pengujian, sebuah papan kayu setebal 2 cm diletakkan di bawah pelat baja perata untuk meratakan beban pada benda uji. Prosedur pengujian pada uji kekuatan lekat ini mengacu pada ACI 440.3R-12 pasal 3 tentang metode pengujian kekuatan lekat tulangan FRP dengan uji tarik lolos (*pull-out testing*) dan Lee dkk. (2017).

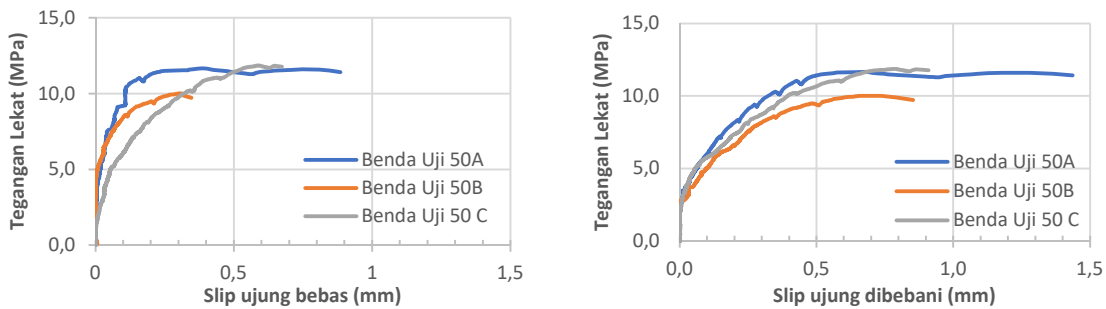
Pembebanan berupa gaya tarik dikerjakan dengan *hydraulic jack* terhadap tulangan eksternal, dengan kecepatan pembebanan rencana sebesar 20 kN/menit atau 1,3 mm/menit. Selanjutnya, dilakukan pencatatan terhadap hasil pengujian menggunakan alat Dewetron dan *software* Dewesoft. Pencatatan dilakukan hingga terjadi kegagalan berupa pecah (*crack*) pada permukaan beton, atau

leleh/putus baja. Besarnya kekuatan lekat ultimit ditunjukkan dengan besarnya beban tarik maksimum yang mampu ditahan benda uji sebelum terjadinya kegagalan. Mode kegagalan yang terjadi juga dicatat. Pengujian distribusi regangan dilakukan terhadap benda uji 200A dengan memasang 2 *strain gauge* pada tulangan di dalam epoksi, yang terletak pada jarak 110 mm dan 195 mm dari ujung bebas.

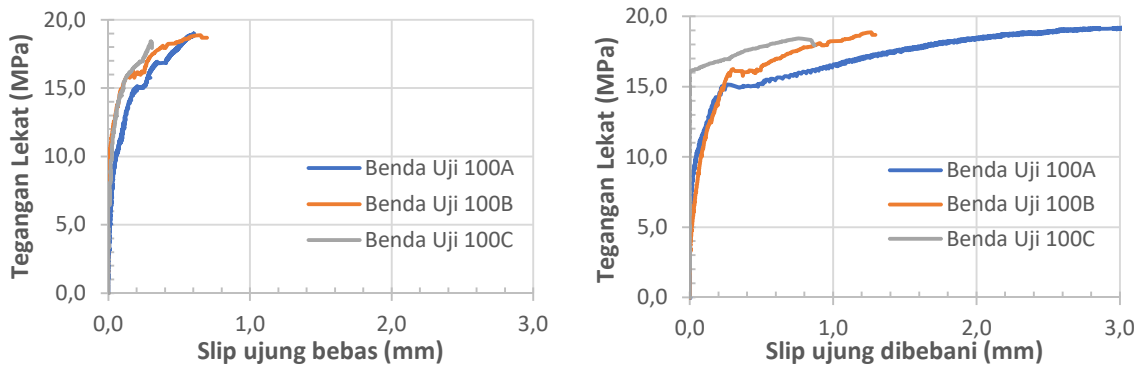
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penjelasan umum hasil pengujian

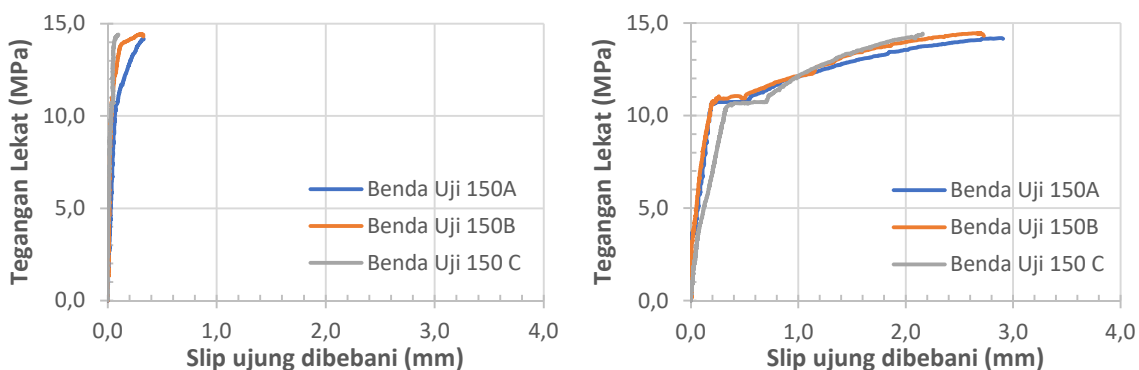
Hasil pengujian berupa hubungan antara tegangan lekat dan slip pada tiap variasi panjang terlekat dapat dilihat pada Gambar 3, 4, 5, dan 6.



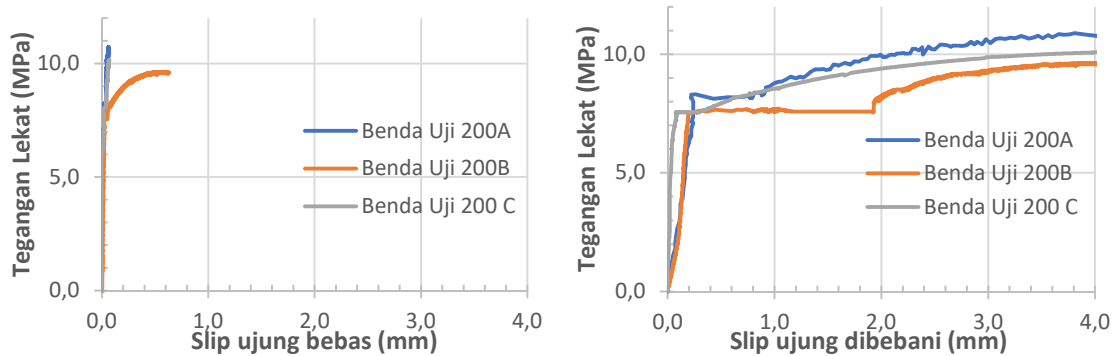
**Gambar 3.** Grafik hubungan tegangan lekat dan slip pada ujung bebas (kiri) dan ujung dibebani (kanan), dengan panjang terlekat  $l_b = 50$  mm



**Gambar 4.** Grafik hubungan tegangan lekat dan slip pada ujung bebas (kiri) dan ujung dibebani (kanan), dengan panjang terlekat  $l_b = 100$  mm



**Gambar 5.** Grafik hubungan tegangan lekat dan slip pada ujung bebas (kiri) dan ujung dibebani (kanan), dengan panjang terlekat  $l_b = 150$  mm



**Gambar 6.** Grafik hubungan tegangan lekat dan slip pada ujung bebas (kiri) dan ujung dibebani (kanan), dengan panjang terlekat  $l_b = 200$  mm

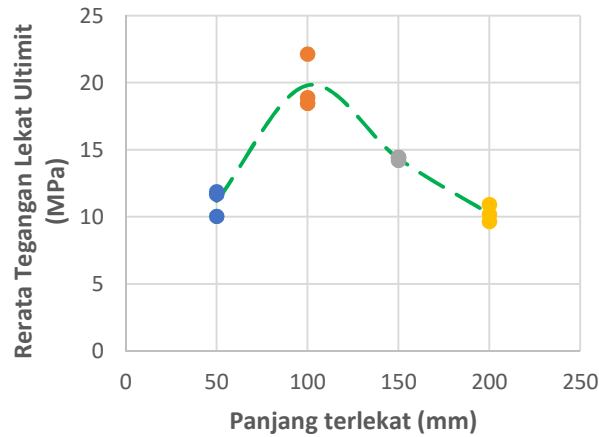
Dari grafik-grafik di atas, secara umum terlihat bahwa slip yang terjadi pada ujung bebas baru akan terjadi saat ujung yang dibebani mencapai slip atau tegangan lekat dengan besaran tertentu. Tegangan lekat adalah fungsi dari beban (gaya tarik) dan panjang terlekat, seperti tertulis dalam Persamaan (1). Lekatan epoksi pada tulangan dan beton awalnya menahan bagian tulangan pada ujung bebas untuk mengalami slip, sementara ujung yang dibebani mengalami slip akibat gaya yang dikenakan. Saat beban mencapai besaran tertentu, lekatan epoksi berangsur-angsur mulai kehilangan daya lekatnya pada tulangan, sehingga mulailah terjadi slip pada ujung bebas. Mekanisme ini ditunjukkan dengan kurva pada ujung dibebani selalu lebih panjang dibandingkan ujung bebas. Dapat disimpulkan bahwa semakin panjang panjang terlekat, semakin besar pula tegangan lekat yang terjadi sesaat sebelum ujung bebas mulai mengalami slip, kecuali pada panjang lekatan 200 mm. Hal ini menunjukkan bahwa panjang terlekat sampai pada batas tertentu memengaruhi distribusi tegangan lekat tulangan dari ujung yang dibebani hingga ujung bebas.

### Kekuatan lekat ultimit

Hasil evaluasi untuk mengetahui kekuatan lekat ultimit dapat dilihat pada Tabel 1. Hubungan antara tegangan lekat ultimit dengan panjang terlekat dapat dilihat pada Gambar 7. Dari Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa tegangan lekat ultimit meningkat seiring dengan peningkatan panjang terlekat hingga 100 mm, lalu berkurang seiring pertambahan panjang terlekat hingga 200 mm. Hal ini disebabkan oleh beban ultimit pada panjang terlekat 100 mm tidak memiliki selisih yang signifikan dengan beban ultimit pada panjang terlekat 150 dan 200 mm, sementara selisih panjang terlekat di antara variasi-variasi tersebut cukup signifikan. Beban ultimit berbanding lurus dengan tegangan lekat, sedangkan panjang terlekat berbanding terbalik dengan tegangan lekat.

**Tabel 1.** Hasil pengujian kekuatan lekat ultimit

Benda Uji	Beban Ultimit (kN)	Mode Keruntuhan	Tegangan Lekat Rata-rata saat Ultimit (MPa)	Rerata Tegangan Lekat Ultimit (MPa)
50A	23,454	Pecah beton ( <i>spalling</i> )	11,665	
50B	20,139	Pecah beton ( <i>spalling</i> )	10,016	<b>11,181</b>
50C	23,852	Pecah beton ( <i>spalling</i> )	11,863	
100A	88,947	Putus/leleh tulangan	22,119	
100B	75,854	Pecah beton ( <i>spalling</i> )	18,863	<b>19,972</b>
100C	76,132	Pecah beton ( <i>spalling</i> )	18,933	
150A	85,570	Putus/luluh tulangan	14,186	
150B	87,109	Putus/luluh tulangan	14,441	<b>14,358</b>
150C	87,056	Putus/luluh tulangan	14,417	
200A	87,700	Putus/luluh tulangan	10,905	
200B	77,435	Putus/luluh tulangan	9,628	<b>10,235</b>
200C	81,812	Putus/luluh tulangan	10,173	



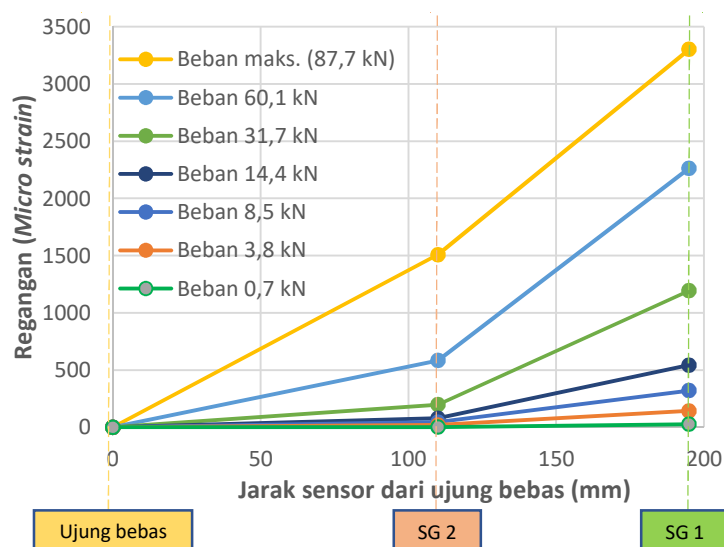
**Gambar 7.** Hubungan antara rerata tegangan lekat ultimit dengan panjang terlekat

**Mode keruntuhan**

Mode keruntuhan yang terjadi pada pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Pada panjang terlekat 50 mm dan 100 mm, kegagalan yang terjadi didominasi oleh kegagalan tarik beton, sehingga terjadi pecah (*spalling*) pada permukaan beton di sekitar lekatan. Gambar 8 menunjukkan bentuk kegagalan tarik beton pada benda uji 50B. Pada panjang terlekat 150 mm dan 200 mm, kegagalan yang terjadi adalah putus/luluhnya tulangan.



**Gambar 8.** Spalling pada benda uji 50B



**Gambar 9.** Distribusi regangan di sepanjang panjang terlekat

### **Distribusi regangan**

Distribusi regangan tulangan pada benda uji 200A dilihat pada gambar 9. Grafik tersebut menunjukkan bahwa regangan mula-mula terjadi pada titik pada SG 1 dan merambat menuju ujung bebas seiring peningkatan beban. Pada beban 0,7 kN, titik pada SG 1 (195 mm dari ujung bebas) mengalami regangan sebesar 26,37 *microstrain* saat titik pada SG 2 (110 mm dari ujung bebas) mulai mengalami regangan sebesar 2 *microstrain*. Pada beban 3,8 kN, titik pada SG 1 mengalami regangan 143,15 *microstrain*, saat titik pada SG 2 mengalami regangan sebesar 20 *microstrain*. Pada beban 8,5 kN, titik pada SG 1 dan SG 2 berturut-turut mengalami regangan sebesar 320 dan 45 *microstrain*, dan seterusnya hingga beban maksimum.

Dari data distribusi regangan tersebut, tegangan lekat dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2). Pada kondisi beban maksimum, regangan pada SG 1 dan SG 2 adalah 3303,64 dan 1508 *microstrain*. Dengan memasukkan data tersebut untuk interval SG 1 hingga SG 2 dan SG 2 hingga ujung bebas, lalu menghitung rerata dari 2 nilai tegangan lekat tersebut, maka diperoleh tegangan lekat berdasarkan distribusi regangan yang terjadi, yaitu 12,632 MPa. Nilai ini lebih besar dibanding tegangan lekat ultimit pada benda uji yang sama, yaitu 10,905 MPa (lihat sub-bab 3.2). Perbedaan tersebut disebabkan oleh ketidakteragaman tegangan lekat yang terjadi pada tulangan dengan panjang terlekat yang besar, seperti dituliskan dalam Soliman (2011).

### **KESIMPULAN**

Dari hasil pengujian dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini, kesimpulan yang dapat diperoleh adalah sebagai berikut:

- 1) Semakin panjang panjang terlekat, semakin besar pula tegangan lekat yang terjadi sesaat sebelum ujung bebas mulai mengalami slip, kecuali pada panjang lekatan 200 mm.
- 2) Tegangan lekat ultimit maksimum terjadi pada panjang lekatan 100 mm yaitu sebesar 19,972 MPa, sedangkan pada panjang lekatan 50 mm, 150 mm, dan 200 mm, sebesar 11,181 MPa, 14,348 MPa, dan 10,235 MPa.
- 3) Mode keruntuhan yang terjadi pada panjang lekatan 50 mm dan 100 mm didominasi oleh kegagalan tarik beton, sedangkan pada panjang lekatan 150 mm dan 200 mm terjadi kegagalan luluh/putus tulangan.
- 4) Regangan mula-mula terjadi pada titik pada SG 1 dan merambat menuju ujung bebas seiring peningkatan beban.
- 5) Tegangan lekat maksimum pada benda uji 200A berdasarkan pembacaan regangan adalah 12,632 MPa, lebih besar 1,727 MPa dengan perhitungan tegangan ultimit, dikarenakan adanya ketidakteragaman tegangan lekat pada tulangan dengan panjang terlekat yang besar.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- American Concrete Institute, 2012, *ACI 440.3R-12: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structure*, Farmington Hills: ACI.
- Asplund, S. O, 1949, Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement, *American Concrete Institue*, 397-406.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Barros, J. A., Costa, I., Palmieru, A., Szabo, Z. K., . . . Pecce, M. (2015), Bond of NSM FRP-Strengthened Concrete: Round Robin Test Initiative, *American Society of Civil Engineers*.
- Budipriyanto, A., Han, A. L., & Hu, H.-T, 2018, Bond-shear Behavior of FRP Rods as a Function of Attachment Configuration, *Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering*, 1(1), 9-17.
- Caro, M., Jemaa, Y., Dirar, S., & Quinn, A, 2017, Bond Performance of Deep Embedment FRP Bars Epoxy-Bonded into Concrete, *Elsevier Science*, 147 (2017) 448-457.

- 
- Lee, H., Jung, W., & Chung, W, 2017, Bond Behavior of Near Surface Mounted CFRP Rods Under Temperature Cycling, *Elsevier*, 67-75.
- Lorenzis, L. D., Rizzo, A., & Tegola, A. L, 2002, A Modified Pull-out Test for Near-Surface Mounted FRP Rods in Concrete, *Elsevier Science*, 33(Composites), 589-603.
- Mulyani, S, 2004, Tinjauan Kuat Lekat antara Baja Tulangan Tunggal dengan Bahan Perekat (Epoxy) pada Kedalaman Takikan 10 mm untuk Perkuatan Lentur Balok, *Skripsi*, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Seo, S.-Y., Feo, L., & Hui, D, 2012, Bond Strength of Near Surface-Mounted FRP Plate for Retrofit of Concrete Structures, *Elsevier*, 719-727.
- Soliman, S. M., El-Salakawy, E., & Benmokrane, B, 2011, Bond Performance of Near-Surface-Mounted FRP Bars, *Journal of Composites for Construction ASCE*, 15(1), 103-111.
- Wang, Q., Zhu, H., Li, T., Wu, G., & Hu, X, 2019, Bond Performance of NSM FRP Bars in Concrete with An Innovative Additional Ribs Anchorage System: An Experimental Study, *Elsevier*, 572-584.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G, 2012, *Reinforced Concrete Mechanics and Design* (6th ed.), New Jersey: Pearson Education.
- Zhang, S. S, 2018, Bond Strength Model for Near-Surface Mounted (NSM) FRP Bonded Joints: Effect of Concrete Edge Distance, *Elsevier*, 664-675.