

DOI: doi.org/10.21009/SPEKTRA.031.09

# PROPERTI MEKANIK TARIK BAJA *WIRE* Ø 3.2 MM DAN *PC BAR* Ø 7.1 MM SEBAGAI TULANGAN PADA TIANG PANCANG BETON PRATEKAN *SPUN PILE*

Candra Irawan<sup>1, a)</sup>, I Gusti Putu Raka<sup>1, b)</sup>, Faimun<sup>1, c)</sup>, Rudy Djameluddin<sup>2, d)</sup>, Priyo Suprobo<sup>1, e)</sup>, Gambiro Soeprapto<sup>3, f)</sup>

<sup>1</sup>*Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, Indonesia.*

<sup>2</sup>*Universitas Hasanuddin, Kampus Fakultas Teknik UNHAS, Jalan Poros Malino Km. 6, Gowa, Indonesia.*

<sup>3</sup>*PT Wijaya Karya Beton, Tbk., Jakarta, Indonesia.*

Email: <sup>a)</sup>chandra@ce.its.ac.id, candra.irawan.its@gmail.com, <sup>b)</sup>raka@ce.its.ac.id, <sup>c)</sup>faimunf@gmail.com, <sup>d)</sup>rudy0011@gmail.com, <sup>e)</sup>priyo@ce.its.ac.id, <sup>f)</sup>gambiro.s@wika-beton.co.id

## Abstrak

Paper ini menyajikan properti mekanik tarik baja tulangan wire berdiameter 3.2 mm dan PC bar berdiameter 7.1 mm yang digunakan sebagai tulangan transversal dan longitudinal untuk tiang pancang beton pratekan spun pile. Pembebanan aksial tarik dilakukan menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM). Regangan tarik yang terjadi pada baja tulangan dibaca oleh sensor strain gauge yang ditempel pada bagian sisi luar baja tulangan. Beban tarik dan regangan baja tulangan direkam menggunakan alat data logger. Hasil pengujian tarik ini berupa kurva hubungan antara tegangan dan regangan. Analisis kurva tersebut menghasilkan modulus elastisitas PC bar adalah 230 GPa dan wire dan 220 GPa. PC bar memiliki tegangan leleh  $f_y$  1404 MPa dan tegangan ultimit  $f_u$  1469 MPa. Regangan saat leleh PC bar  $\epsilon_y$  0.007 dan regangan ultimitnya 0.023. Sedangkan wire memiliki tegangan ultimit 712 MPa. Nilai elongasi wire dan PC bar adalah 2.0% dan 8.7%.

**Kata-kata kunci:** properti mekanik tarik, PC bar, wire, spun pile.

## Abstract

This paper presents the tensile mechanical properties of the 3.2 mm in diameter of the wire and 7.1 mm in diameter of PC bars used as transverse and longitudinal reinforcement for prestressed spun piles. The axial tensile loading is carried out on using Universal Testing Machine (UTM) machine. The tensile strain was occurring in the reinforcing steel read by the strain gauge sensor attached to the outer side of the reinforcing steel. The tensile load and reinforcement steel strain are recorded using the data logger. The result of this tensile test is a curve of the stress and strain relationship. The elastic modulus of PC bar and the wire is 229577 MPa and 219774 MPa. The yield and ultimate stress of the PC bar are 1404 MPa and 1469 MPa. The yield and ultimate strain are 0.007 and 0.023, respectively. Wire 3.2 mm has a 712 MPa ultimate stress. The value of wire and PC bar elongation is 2.0% and 8.7%, respectively.

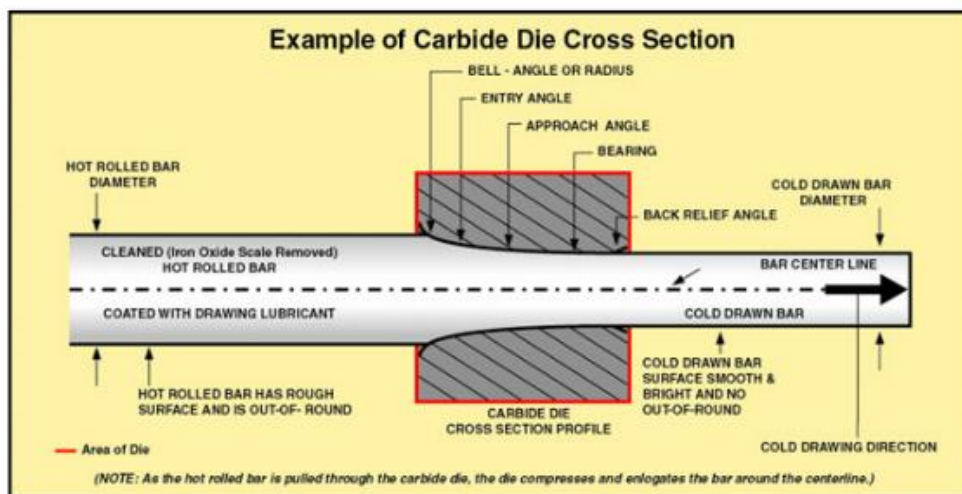
**Keywords:** tensile mechanical property, PC bar, wire, spun pile.

## PENDAHULUAN

Penggunaan baja mutu tinggi telah banyak digunakan di dunia konstruksi. Misalnya, pada konstruksi atap bangunan digunakan profil baja galvalum sebagai rangka kuda-kuda [1]. Selain untuk galvalum, baja mutu tinggi juga digunakan sebagai tulangan pada struktur beton, misalnya adalah penggunaan PC bar dan wire pada tiang pancang spun pile. Penggunaan baja mutu tinggi memberikan keuntungan terhadap harga struktur yang ekonomis. Untuk menghasilkan kekuatan yang sama dibandingkan dengan baja normal biasa ma dengan baja mutu tinggi jumlah baja yang digunakan relatif lebih sedikit atau luas penampang yang lebih kecil [2].

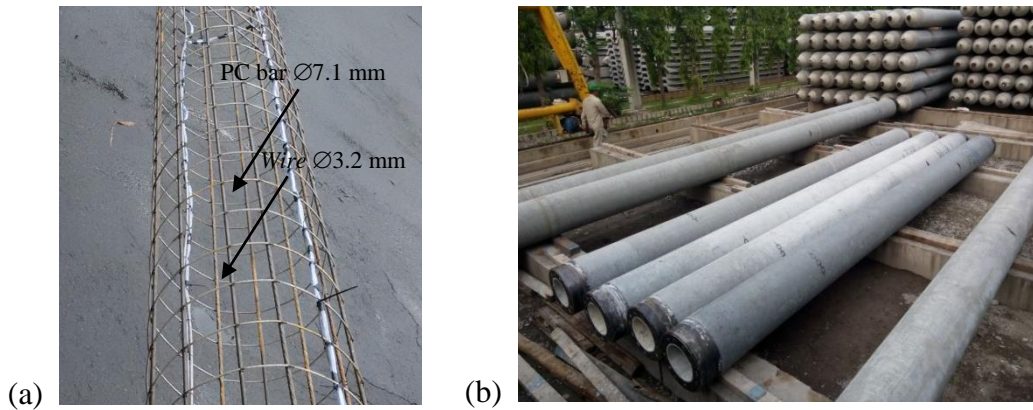
PC bar merupakan baja kuens (quench) dan temper yang digunakan untuk kosntruksi beton pratekan. Kawat baja ini berpenampang lingkaran dengan permukaan polos, bersirip, beralur, atau berlekuk, dilakukan dengan proses perlakuan panas, didinginkan dengan cepat (quench) untuk menghasilkan struktur martensitic kemudian dihilangkan sisa tegangannya melalui proses perlakuan panas (tempering) secara kontinyu untuk mencapai sifat mekanis sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Dalam pengujian ini tipe PC bar adalah PC bar / KBJP-Q dengan permukaan beralur [3].

Wire merupakan kawat baja dengan tanpa perubahan permukaan (smooth surface, plain wire). Kawat baja (steel wire) SWM-P merupakan salah satu tipe kawat baja karbon rendah yang digunakan sebagai penulangan beton. Kawat baja ini merupakan tipe cold reduced steel wire, yaitu kawat yang diproduksi dengan cara memperkecil ukuran kawat dari besi tuang (hot rolled bar) melalui mekanisme Carbide Die Cross Section (GAMBAR 1) [5].



GAMBAR 1. Proses produksi wire 3.2 dengan metode Carbide Die Cross Section [5]

Pada penelitian ini kedua jenis kawat baja tersebut digunakan sebagai tulangan (reinforcement) pada tiang pancang spun pile diameter 400 mm (GAMBAR 2). PC bar digunakan sebagai tulangan arah longitudinal. Sedangkan wire SWM-P digunakan sebagai tulangan arah transversal (sengkang). Dalam paper ini dipaparkan tentang hasil pengujian properti mekanik PC bar diameter 7.1 mm dan wire 3.2 mm. Analisis ini mencakup modulus elastisitas, tegangan-regangan leleh dan putus, dan elongasi maksimum. Data ini digunakan sebagai input pemodelan numerik pada tahap penelitian selanjutnya.

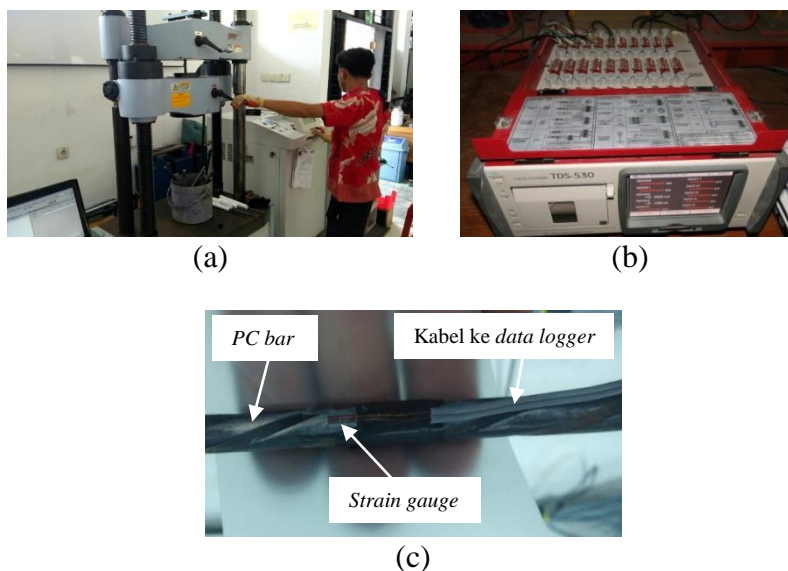


**GAMBAR 2.** (a) Rakitan tulangan PC bar dan wire, (b) hasil produksi tiang pancang *spun pile*.

Penelitian terdahulu menyebutkan bahwa perbedaan mutu baja memberikan dampak terhadap nilai modulus elastisitasnya. Pengujian eksperimental dilakukan oleh Mahendran (1996) untuk baja mutu  $f_y$  290 MPa hingga  $f_y$  726 Mpa. Hasil menunjukkan bahwa modulus elastisitas memiliki nilai antara 209 GPa hingga 239 GPa [1].

### METODE PENELITIAN

Tiga buah benda uji PC bar 7.1 mm disebut dengan kode benda uji PC bar 7.1 (1), PC bar 7.1 (2) dan PC bar 7.1 (3). Sedangkan dua buah benda uji wire 3.2 mm disebut dengan kode benda uji sebagai wire 3.2 (1) dan wire 3.2 (2). Luas penampang nominal PC bar 7.1 mm adalah 40 mm<sup>2</sup>. Sedangkan Luas penampang nominal wire 3.2 mm adalah 8 mm<sup>2</sup>. Pengujian PC bar 7.1 mm mengacu pada SNI 7701: 2016 [3] dan JIS G 3137 1994 [6]. Sedangkan untuk wire 3.2 mm dengan JIS G 3532 2000 [4].



**GAMBAR 3.** Setup pengujian (a) Universal testing machine (UTM), (b) Data Logger, dan (c) Sensor strain gauge

Sejumlah instrumen digunakan dalam pengujian ini. Alat Universal Testing Machine (UTM) dengan kapasitas 50 tons digunakan untuk memberikan gaya tarik pada sampel. Dari alat ini didapatkan catatan beban tarik (P) mulai dari awal pembebanan hingga sampel putus yang dicatat oleh alat data logger. Regangan ( $\epsilon$ ) yang terjadi pada sampel PC bar dan wire direkam melalui alat

sensor strain gauge. Sensor ini ditempel dengan lem adhesive khusus sehingga dapat melekat dengan baik saat sampel mengalami perpanjangan. Sensor strain gauge ditunjukkan pada GAMBAR 3 (c).

Dua macam data didapatkan dari pengujian ini. Data pertama adalah beban tarik yang dibaca oleh load cell mesin UTM. Kedua, regangan yang terjadi pada sampel yang dibaca oleh sensor strain gauge. Kedua data tersebut diproses dan disimpan oleh data logger.

Hasil pengujian tarik ini berupa kurva hubungan antara tegangan dan regangan. Lingkup analisis hasil adalah nilai modulus elastisitas, tegangan dan regangan saat tulangan mengalami leleh dan saat beban maksimum tercapai (kondisi ultimit), serta perpanjangan akhir (elongasi). Properti mekanis dan idealisasi kurva tegangan-regangan PC bar 7.1 dan wire 3.2 dihasilkan dari analisis ini.

Dengan membagi nilai beban tarik ( $P$ ) dengan luas penampang sampel ( $A$ ) didapatkan nilai tegangan ( $f$ ) yang terjadi adalah seperti ditunjukkan pada persamaan (1). Data tegangan tersebut diplot bersama dengan data regangan ( $\epsilon$ ) sehingga didapatkan kurva tegangan-regangan tarik PC bar dan wire.

$$f = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Analisis regangan ultimit dilakukan melalui pengukuran elongasi secara manual. Elongasi merupakan rasio pertambahan panjang ( $\Delta_l$ ) terhadap panjang awal ( $L_0$ ) sampel *PC bar* dan *wire*. Pertambahan panjang ( $\Delta_l$ ) adalah selisih antara panjang akhir ( $L_a$ ) dengan panjang awal ( $L_0$ ).

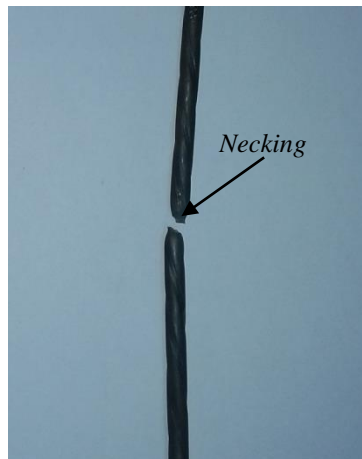
$$elongasi = \frac{\Delta_l}{L_0} \quad (2)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji tarik *PC bar* dan *wire* ditunjukkan melalui kurva tegangan dan regangan. Kurva tersebut dianalisis melalui pembahasan secara detail tentang tegangan dan regangan saat kondisi leleh dan ultimit beserta kondisi visual benda uji. Perhitungan nilai modulus elastisitas juga dilakukan. Analisis pemenuhan hasil tes tarik terhadap ketentuan peraturan (*codes*) juga menjadi bagian dalam pembahasan ini.

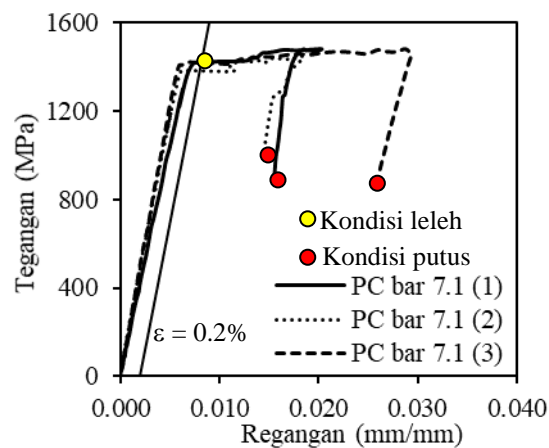
### Properti Mekanis *PC bar* 7.1 mm

Tegangan tarik terekam dengan baik mulai awal pembebanan hingga *PC bar* putus, sedangkan regangan tarik terekam dengan baik oleh *strain gauge* mulai awal pembebanan hingga tegangan maksimum tercapai. Setelah itu regangan tidak terbaca lagi. Setelah beban maksimum tercapai maka penampang sampel akan mengalami pengecilan (*necking*) seperti ditunjukkan pada GAMBAR 4. Sehingga *strain gauge* tidak menempel pada permukaan sampel, sehingga regangan tidak dapat dibaca.



GAMBAR 4. Kondisi PC bar setelah putus.

Kurva tegangan-regangan *PC bar* hasil uji tarik ditunjukkan pada GAMBAR 5. Penentuan kondisi leleh menurut SNI 7701 2016 ditentukan saat regangan 0.2% atau 0.002 [3]. Saat kondisi leleh tercapai, nilai tegangan ketiga sampel *PC bar* adalah 1423 MPa, 1382 MPa, dan 1419 MPa. Sehingga rata-rata adalah tegangan leleh ( $f_{py}$ ) adalah 1404 MPa terjadi saat regangan 0.007. Nilai tegangan maksimum (ultimit) adalah 1480 MPa, 1447 MPa dan 1479 MPa. Sehingga rata-rata tegangan ultimit ( $f_{pu}$ ) adalah 1469 MPa. Regangan maksimum yang mampu dibaca oleh *strain gauge* adalah 0.020, 0.018 dan 0.029 (rata-rata 0.023).



GAMBAR 5. Kurva tegangan-regangan *PC bar* 7.1.

*Strain gauge* tidak bisa merekam regangan *PC bar* hingga putus. Untuk mengukur regangan *PC bar* saat putus diukurlah elongasi secara manual. Elongasi merupakan rasio perpanjangan akhir terhadap panjang awal sampel *PC bar*. Hasil perhitungan elongasi ditunjukkan pada TABEL 1. Rata-rata elongasi adalah 8.7%.

TABEL 1. Elongasi ultimit *PC bar* 7.1

Sampel	$L_0$ (mm)	$L_a$ (mm)	Elongasi (%)
<i>PC bar</i> 7.1 (1)	100	108	8
<i>PC bar</i> 7.1 (2)	100	108	8
<i>PC bar</i> 7.1 (3)	100	110	10
Rata-rata			8.7

Analisis bagian elastis dari kurva tegangan-regangan PC bar dengan menggunakan konsep linier elastik akan didapat nilai modulus elastisitasnya. Sesuai dengan Hukum Hooke, nilai modulus elastisitas (E) merupakan gradient (kemiringan) kurva tegangan regangan saat masih elastis.

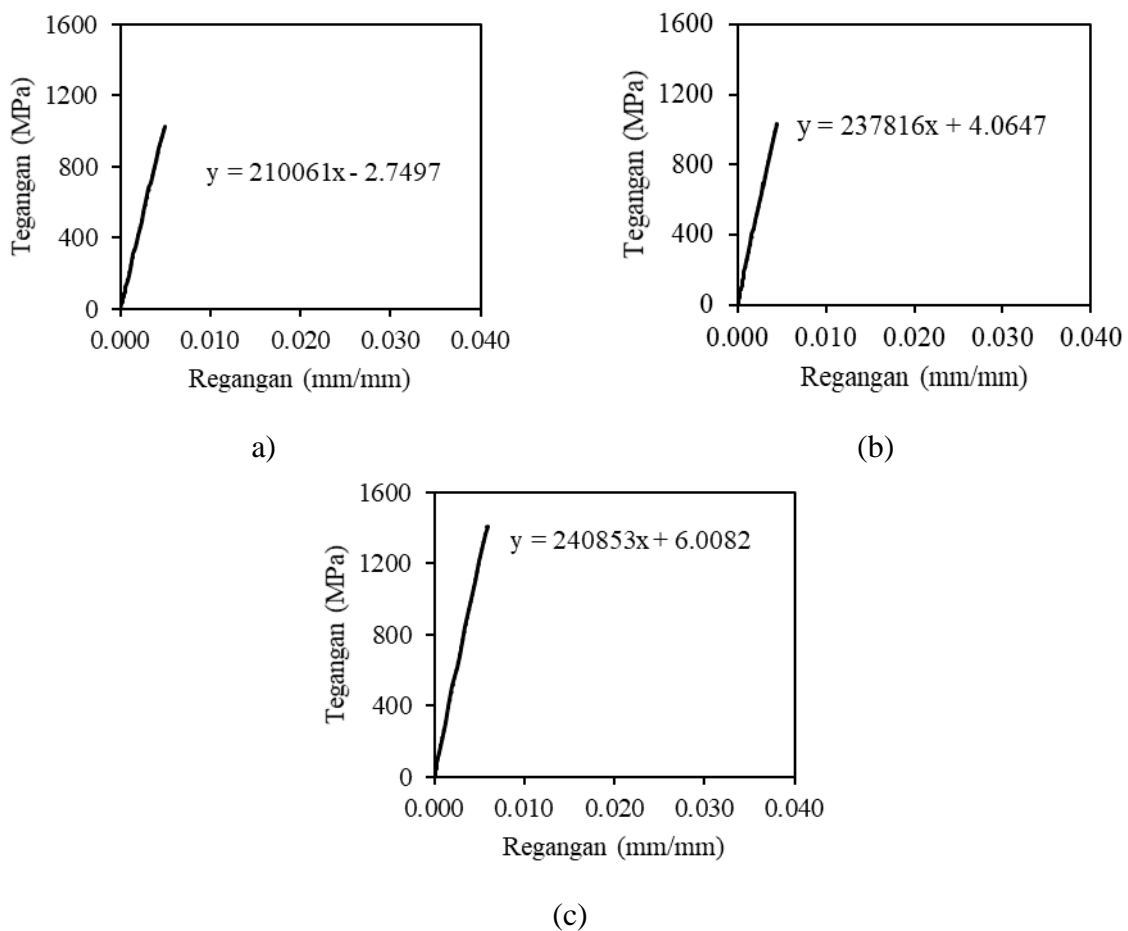
Penentuan modulus elastisitas (E) PC bar dilakukan dengan meregresi kurva tegangan regangan saat kondisi elastik. Dalam analisis ini regresi dilakukan hingga tegangan maksimum 1000 MPa. Kurva regresi ketiga sampel PC bar ditunjukkan pada GAMBAR 6. Persamaan regresi linier adalah:

$$\text{Sampel 1: } y = 210061x - 2.7497 \quad (3)$$

$$\text{Sampel 2: } y = 237816x + 4.0647 \quad (4)$$

$$\text{Sampel 3: } y = 240853x + 6.0082 \quad (5)$$

Nilai gradien persamaan regresi kurva tegangan-regangan adalah 210061, 237816 dan 240853. Sehingga rata-rata gradien adalah 229577. Sehingga modulus elastisitas PC bar adalah E = 229577 Mpa (230 GPa).

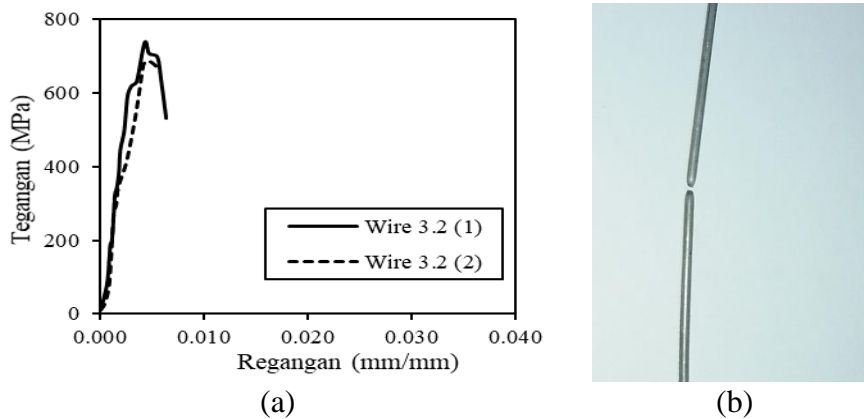


**GAMBAR 6.** Regresi kurva elastis PC bar (a) Sampel PC bar 7.1 (1), (b) Sampel PC bar 7.1 (2), dan (c) Sampel PC bar 7.1 (3)

### Properti Mekanis Wire SWM-P 3.2 mm

Kurva tegangan-regangan kawat baja SWM-P 3.2 mm hasil uji tarik ditunjukkan pada GAMBAR 7(a). Dalam persyaratan properti mekanis wire 3.2 mm tipe SWM-P hanya ditinjau aspek *tensile strength* (kuat putus). Ternyata saat diuji batas lelehnya tidak terlihat. Saat tegangan maksimum

tercapai maka *wire* tidak mampu lagi berelongasi. Kondisi *wire* setelah putus ditunjukkan pada GAMBAR 7(b). *Necking* muncul dalam kondisi tersebut.



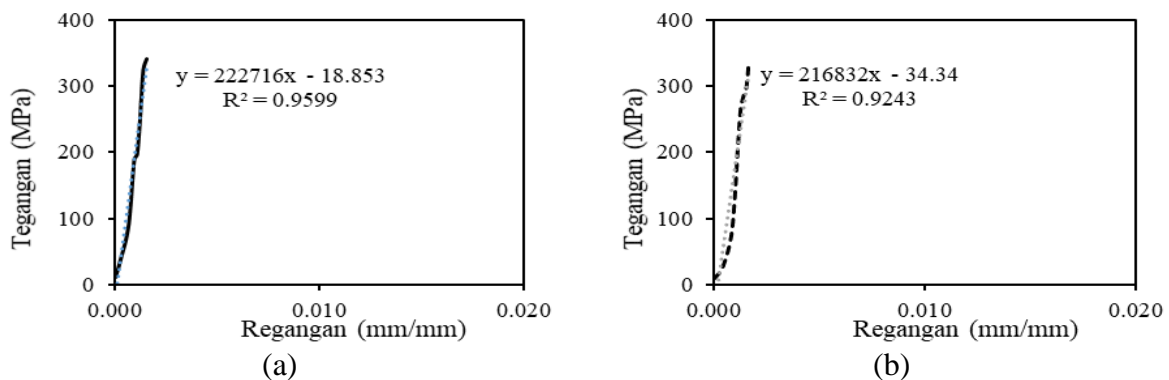
GAMBAR 7. (a) Kurva tegangan-regangan *wire* 3.2, (b) Kondisi *wire* pasca putus.

Hasil regresi kurva tegangan-regangan ketiga sampel *wire* ditunjukkan pada GAMBAR 8. Persamaan regresi linier adalah:

$$\text{Sampel 1: } y = 216832x - 34.34 \quad (6)$$

$$\text{Sampel 2: } y = 222716x - 18.853 \quad (7)$$

Nilai gradien persamaan regresi kurva tegangan-regangan adalah 216832 dan 222716. Sehingga nilai rata-rata gradien adalah 219774. Sehingga modulus elastisitas *wire* 3.2 mm adalah  $E = 219774$  MPa (220 MPa). Selain itu, dari hasil pengujian didapatkan tegangan maksimum *wire* adalah 688 dan 736 Mpa (rata-rata 712 MPa). Hasil perhitungan elongasi ditunjukkan pada TABEL 2. Rata-rata elongasi ultimit *wire* adalah 2%.



GAMBAR 8. Regresi kurva elastis (a) *wire* 3.2 (1) dan (b) *wire* 3.2 (2)

TABEL 2. Elongasi ultimit *wire* 3.2

Sampel	$L_0$ (mm)	$L_a$ (mm)	Elongasi (%)
Wire 3.2 (1)	100	102	2
Wire 3.2 (2)	100	102	2
Rata-rata			2

## Evaluasi Persyaratan Codes untuk PC bar dan Wire

Evaluasi persyaratan *codes PC bar* mengikuti persyaratan SNI 7701: 2016 [3] untuk *PC bar* dengan konfigurasi permukaan berlekuk atau beralur. Tiga kriteria ditentukan dalam peraturan tersebut, yaitu kuat tarik, kuat leleh dan elongasi ultimit. Seperti ditunjukkan pada TABEL 3, *PC bar* memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai tulangan longitudinal pratekan.

TABEL 3. Persyaratan properti mekanis *PC bar 7.1*

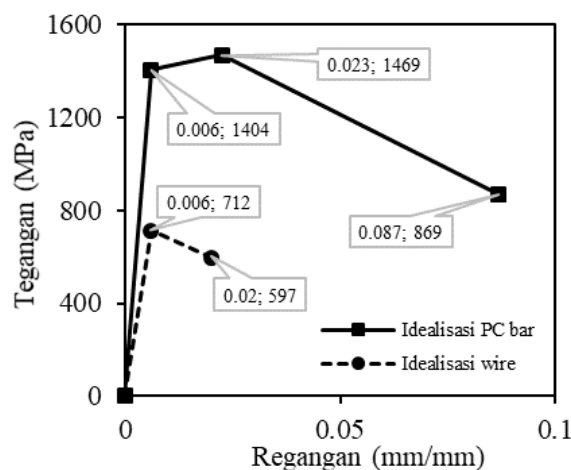
Parameter	Satuan	Hasil pengujian	Spesifikasi	Keterangan
Kuat tarik ( $f_{pu}$ )	N/mm <sup>2</sup>	1469	Min. 1420	OK
Kuat leleh (0.2%)	N/mm <sup>2</sup>	1404	Min. 1275	OK
Elongasi	%	8.7	Min. 5.0	OK

Sesuai dengan JIS G 3532 2000 [6] untuk kawat baja tipe SWM-P disyaratkan memiliki *tensile strength* (tegangan tarik,  $f_u$ ) minimum 540 MPa. Hasil pengujian *wire 3.2* menunjukkan  $f_u$  rata-rata kedua sampel adalah 712 MPa, sedangkan tegangan putus minimum *wire SWM-P* adalah 540 MPa. Sehingga *PC bar* dan *wire* memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai penulangan beton.

Data modulus elastisitas menunjukkan bahwa *PC bar* dan *wire* memiliki modulus elastisitas 230 Gpa dan 220 GPa. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan yang terdapat dalam ACI 318M 2014 [7].

Rasio antara regangan ultimit dan regangan leleh merupakan nilai daktilitas suatu bahan. Dari pengujian ini didapat nilai daktilitas *PC bar* adalah  $\mu_\Delta=3.3$ . Sedangkan *wire* setelah mengalami leleh secara tiba-tiba mengalami putus. Sehingga *wire* memiliki daktilitas hampir nol. Dengan nilai daktilitas yang rendah tersebut menunjukkan *PC bar* dan *wire* bersifat getas. Hal ini menunjukkan perlu dikaji penggunaannya dalam suatu struktur bangunan terkait persyaratan tahan gempa

Dari analisis hasil tes tarik dihasilkan idealisasi kurva tegangan-regangan tarik *PC bar 7.1* dan *wire 3.2* seperti ditunjukkan pada GAMBAR 9. Idealisasi kurva trilinear untuk *PC bar*. Kurva idealisasi ini terdiri dari daerah elastik, daerah tegangan leleh ke maksimum, serta penurunan tegangan saat *PC bar* putus. Sedangkan *wire* memiliki kurva idealisasi bilinear, yaitu daerah elastis dan penurunan tegangan saat *wire* putus. *Wire* tidak mengalami leleh. Penurunan tegangan setelah tegangan maksimum tercapai hingga elongasi maksimum *PC bar* sebesar 8.7% dan *wire* sebesar 2%. Kurva tersebut dijadikan input dalam pemodelan numerik yang dilakukan dalam penelitian selanjutnya.



GAMBAR 9. Idealisasi kurva tegangan-regangan *PC bar 7.1* dan *wire 3.2*



## KESIMPULAN

Properti mekanis dan idealisasi kurva tegangan-regangan *PC bar* 7.1 dan *wire* 3.2 dihasilkan dari analisis ini. Modulus elastisitas *PC bar* dan *wire* adalah 229577 Mpa (230 GPa) dan 219774 MPa (220 GPa), lebih tinggi dari modulus elastisitas baja lunak biasa 200000 MPa (200 GPa) [7]. Tegangan leleh dan ultimit *PC bar* adalah 1404 MPa dan 1469 MPa. Tegangan tersebut saat regangan leleh 0.007 dan regangan ultimit 0.023. *Wire* 3.2 memiliki tegangan ultimit 712 MPa. Nilai elongasi *wire* dan *PC bar* adalah 2.0% dan 8.7%. Properti-properti mekanis *PC bar* dan *wire* tersebut memenuhi persyaratan *codes*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan pada KEMENRISTEK DIKTI yang telah memberikan beasiswa PMDSU untuk penulis pertama. Selain itu, kepada PT WIJAYA KARYA BETON, Tbk. disampaikan terima kasih atas dukungan dana (*financial support*) melalui kerjasama penelitian Kajian Daktilitas Tiang Pancang *Spun Pile* kontrak: KU.09.09/WB-0A.1763/2014 098SK/LB3/XII/2014 028/UN4.8/TS-LSB/PM05/2014.

## REFERENSI

- [1] M. Mahendran, "The Modulus of Elasticity of Steel - Is It 200 GPa?," in Thirteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, Missouri U.S.A., 1996, 641-648.
- [2] H.K. Preston (1966). PRESTRESSING STEEL: Some details every prestressed concrete producer should know [online]. Available: [http://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/prestressing-steel\\_o](http://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/prestressing-steel_o)
- [3] Kawat baja kuens (quench) temper untuk konstruksi beton pratekan (PC bar/KBjP-Q), SNI 7701, 2016.
- [4] Low carbon steel wires, JIS G 3532, 2000.
- [5] Precision Kidd Steel Company, Inc. (2010). The Cold Drawing Process for Steel Bars and Wire [online]. Available: <http://www.precisionkidd.com/technology.htm>
- [6] Small Size-Deformed Steel Bars for Prestressed Concrete, JIS G 3137, 1994.
- [7] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318M, 2014.

