

## Pengaruh kadar karbon terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur baja tulangan

Wa Ode Amala Rabia Malim<sup>1,\*</sup>, Rudy Djamaluddin<sup>1</sup>, Rita Irmawati<sup>1</sup>, Fakhrudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Hasanuddin University, Indonesia

### Article Info

Available online

### Keywords:

Reinforcing steel  
Carbon content  
Mechanical properties  
microstructure

### Corresponding Author:

W Amala Rabia Malim  
[amalawaode@gmail.com](mailto:amalawaode@gmail.com)

### Abstract

Most of the local reinforcing steel is produced from scrap materials because it is more profitable. Using scrap as raw material for rebar production by steel mills will more or less adversely affect the quality of the rebar. This study aims to analyze the carbon content and level of compliance with standards of four brands of reinforcing steel produced by local manufacturers. 16 mm diameter rebar steel was tested for chemical content (carbon content) using Scanning Electron Microscope-Energy Dispersion Spectroscopy (SEM-EDX) test. While the mechanical properties were tested with a Universal Testing Machine (UTM). The carbon content of the test results are S2 = 4,94%wt; S4 = 8,51%wt; S7 = 5,99%wt; and S8 = 3,79%wt. All brands of reinforcing steel do not meet the carbon requirements according to SNI 2052: 2017 specifications. Although the carbon content in these four samples is relatively high, the tensile test results of the reinforcing steel show ductile behavior. Ratio of Ultimate Tensile Strength (UTS) to Yield Strength (YS) is on average greater than 1.25. And effect of carbon content on microstructure shows that carbon content determines the proportion of ferrite-pearlite, the higher the carbon, the higher the proportion of pearlite and the distribution of carbon will affect the homogeneity of the structure.

Copyright © 2025 Universitas Islam Indonesia

All rights reserved

### Pendahuluan

Indonesia rawan bencana gempa karena posisinya di cincin api pasifik. Rata-rata setiap tahunnya terjadinya satu gempa bumi dengan 6 skala Richter (atau lebih) dan menyebabkan kerusakan infrastruktur dan jatuhnya korban jiwa. Sebagian besar korban jiwa disebabkan oleh runtuhnya bangunan rumah karena konstruksi yang buruk. Walaupun aturan tentang konstruksi bangunan kita sudah lengkap namun sebagian besar masyarakat belum memahami pentingnya aturan tersebut. Kemudian lemahnya pengawasan terhadap konstruksi bangunan yang dibangun oleh masyarakat menyebabkan resiko yang sangat fatal.

Konstruksi yang umum dipakai untuk infrastruktur maupun rumah tinggal adalah konstruksi beton bertulang. Untuk itu Badan Standard Nasional (BSN) mengeluarkan SNI 2052:2017 tentang baja tulangan beton dan SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton

struktural untuk bangunan gedung. Aturan ini hendaknya menjadi acuan dalam merencanakan bangunan maupun infrastruktur yang menggunakan konstruksi beton bertulang.

Baja tulangan beton harus memiliki kualifikasi sesuai SNI 2052:2017, karena penggunaannya akan berimbas pada kekuatan dan ketahanan bangunan. Adapun baja tulangan beton dibuat melalui proses pembentukan besi *billet* yang dipanaskan sampai suhu sangat tinggi (sekitar 1200°C) kemudian ditekan dan ditarik melalui serangkaian rol (semacam silinder besar) sehingga membentuk batang panjang dengan diameter yang diinginkan. Proses ini disebut "*hot rolling*" atau penggilingan panas. Besi *billet* biasanya dibuat dari berbagai macam bahan seperti bijih besi dan *scrap* dengan penambahan elemen-elemen paduan lainnya. Bahan dasar *scrap* ini dapat menyebabkan kadar karbon dari baja

tulangan sering kali tidak bisa dikontrol. Ketidakkonsistenan kandungan ini memberikan pengaruh yang signifikan pada kekuatan baja tersebut. Contohnya, standar minimum untuk tegangan luluh tulangan beton pada kelas baja tulangan BJTS420 adalah minimal 420 MPa dan maksimal 545 MPa. Namun baja tulangan yang dijual seringkali memiliki kekuatan sangat tinggi dengan keuletan yang rendah, sehingga sulit untuk dibengkokkan. Menurut Banini dan Kankam (2022), kandungan karbon yang sangat tinggi pada baja dapat menghasilkan kekuatan sedang hingga tinggi (hasil tinggi). Meskipun karbon berkontribusi terhadap kekerasan, titik luluh dan kekuatan tarik, namun kelebihan karbon mengurangi kemampuan las dan keuletan batang baja sehingga baja menjadi rapuh / getas. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan analisis komposisi kimia dan sifat mekanik baja tulangan. Hal ini akan membantu dalam menentukan kontribusi bahan bangunan penting ini terhadap kegagalan/runtuhnya bangunan dan membandingkan hasil kami dengan standar yang berlaku.

**Material dan Metode**

Penelitian ini dimulai dengan persiapan benda uji baja tulangan ulir diameter 16 mm dari 4 (empat) pabrikan. Selanjutnya adalah uji tarik baja tulangan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) untuk mengetahui sifat mekaniknya (*mechanical properties*). Kemudian uji komposisi dilakukan dengan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS) yang merupakan salah satu cara untuk mengetahui sifat fisik seperti struktur mikro dan kandungan kimia baja tulangan. Menurut SNI 2052:2017, baja tulangan adalah batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip yang digunakan untuk penulangan beton, yang diproduksi dari bahan baku billet dengan cara canai panas (*hot rolling*). Menurut Tariq Islam dan Hossain MMA Rashed, (2019), baja adalah paduan kristal dari besi, karbon, dan beberapa elemen lainnya.. Baja tulangan dengan kadar karbon

rendah umumnya memiliki sifat daktilitas yang lebih baik karena memiliki struktur mikro yang lebih homogen. Struktur mikro yang baik memungkinkan deformasi plastik yang lebih baik dan memberikan peringatan yang lebih jelas sebelum kegagalan total terjadi. Baja tulangan dengan kadar karbon tinggi cenderung memiliki struktur mikro yang lebih kasar dan kurang elastis, yang dapat menyebabkan kegagalan yang lebih tiba-tiba dan kurang memberikan peringatan sebelum patah.

Adapun kandungan unsur maksimum yang terdapat dalam baja tulangan sesuai kelasnya seperti yang diperlihatkan pada tabel berikut :

Tabel 1. Komposisi Kimia Billet Baja Tuang Kontinyu (Ladle Analysis)

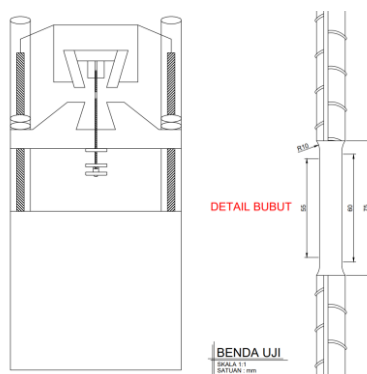
Kelas baja tulangan	Kandungan unsur maksimum (%)					
	C	Si	Mn	P	S	CEq*
BjTP 280	-	-	-	0.05	0.05	-
BjTS 280	-	-	-	0.05	0.05	-
BjTS 420A	0.32	0.55	1.65	0.05	0.05	0.6
BjTS 420B	0.32	0.55	1.65	0.05	0.05	0.6

Pemilihan komposisi material terbaik untuk bahan peleburan merupakan tantangan utama yang dihadapi oleh produsen dalam industri daur ulang baja bekas. Masalah utama yang dihadapi selama proses daur ulang adalah kesulitan dalam mengendalikan tingkat elemen residu yang tidak diinginkan seperti Cu, Ni, Sn, As, Cr, Mo, Pb yang menyertai scrap. Proporsi campuran bahan kimia paduan utama, Si dan Mn, dan nilai *Carbon Equivalent* dapat mempengaruhi kekuatan luluh dan pemanjangan batang (K.P.A.S. Perera and S.P. Guluwita 2018).

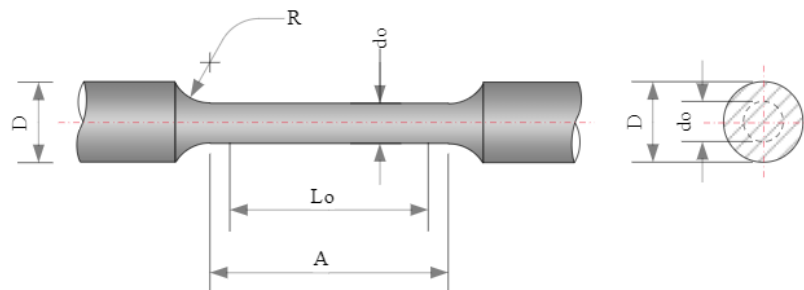
Menurut G. Loporcario et al. (2018), Oluwaseun B. Hassan et al. (2021), bahwa sebagian besar baja tulangan diproduksi dari potongan logam atau bijih besi atau kombinasi keduanya, dimana proses pembuatannya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat-sifatnya, demikian juga dengan presentase berbagai elemen penyusunnya dan laju pendinginan dalam proses produksi sehingga penting untuk menyelidiki lebih lanjut beberapa sifat mekanis dan kimiawi batang baja tulangan yang diproduksi dari besi

tua (*scrap*) untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar yang disyaratkan.

**Uji Tarik untuk menentukan sifat Mekanik.** Metode pengujian tarik dengan alat UTM yang dilengkapi alat extensometer mengacu pada ASTM E8 tentang metode pengujian baja tulangan. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur tegangan dan regangan. Berikut gambar sketsa benda uji dan posisinya pada mesin UTM.



Gambar 1. Set Up Pengujian



Gambar 2. Spesimen Uji Tarik Bentuk Round Bar Berdasarkan ASTM E8

Tabel 2. Dimensi spesimen standar dan ukuran kecil ASTM E8-04

Notasi	Dimensi				
	Diameter Spesimen Standar (mm)	Diameter Spesimen Ukuran Kecil (mm)			
	12.5	9	6	4	2.5
Lo	62.5 ± 0.1	45 ± 0.1	30 ± 0.1	20 ± 0.1	12.5 ± 0.5
Do	12.5 ± 0.2	9 ± 0.1	6 ± 0.1	4 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R	10	8	6	4	2
A	75	54	36	24	40

**Pengujian SEM-EDS**

Langkah-langkah pengujian SEM dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Material uji yang akan dilakukan pemotretan harus bersih, kering dan telah

Pada sketsa di atas, spesimen uji tarik dipasang pada mesin UTM dengan cara mencengkeram bagian grip section yang berulir pada penjepit atas dan penjepit bawah mesin. Penjepit atas akan bergerak ke atas, sedangkan penjepit bawah diam, sehingga mengakibatkan tarikan pada spesimen di bagian panjang ukur (*gauge length*).

Selama pengujian tarik, deformasi dan pemuluran akan terjadi pada bagian panjang ukur yang memiliki penampang lebih kecil. Radius transisi berfungsi untuk menghindari konsentrasi tegangan yang berlebihan pada daerah tersebut. Pengukuran perpanjangan dan pengamatan perilaku material selama pengujian dilakukan pada bagian panjang ukur spesimen yang terpasang di antara penjepit atas dan penjepit bawah mesin uji tarik.

Pada bagian 7.5.1 ASTM E8/E8M, disebutkan bahwa untuk material logam dengan diameter awal ( $D$ ) kurang dari atau sama dengan 20 mm ( $D \leq 20$  mm), maka diameter gauge length harus ditetapkan sebagai berikut:

mengalami proses pemolesan (*polishing*) dengan menggunakan alumina untuk mendapatkan permukaan spesimen yang rata, bebas dari kotoran, tidak berminyak dan mengkilap sehingga dapat

- meningkatkan kualitas hasil pemotretan yang baik.
- Membersihkan material uji dengan menggunakan ultrasonic cleaner dengan media acetone untuk menghilangkan debu-debu pengotor sebelum penempelan pada specimen holder.
  - Menempelkan material uji pada specimen holder dengan menggunakan double sticky tip untuk mendapatkan posisi spesimen yang rigid.
  - Memberikan lapisan tipis (coating) oleh gold-palladium (Au : 80% dan Pd : 20%).
  - Material uji dimasukkan ke dalam specimen chamber pada mesin SEM untuk melakukan observasi pada spesimen uji sebelum dilakukan pemotretan.
  - Pemotretan dilakukan dengan menggunakan perbesaran yang diinginkan untuk mengetahui butiran, batas butir, keretakan, dan dislokasi.
  - Hasil pemotretan berupa gambar SEM yang kemudian dianalisis tentang struktur makro, dan struktur mikro.

Dengan hasil gambar SEM yang diperoleh, selanjutnya dapat menentukan pengambilan titik yang akan ditembak EDS. Hasil dari EDS yaitu tampilan grafik prosentase berupa (mass%) dan (atom%) dari unsur yang terkandung didalam bahan. Unsur yang ditampilkan pada grafik bisa dipilih sesuai yang dikehendaki.



Gambar 3. Uji SEM-EDS

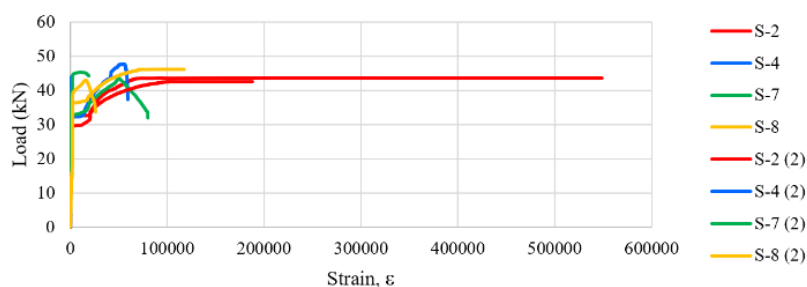
### Hasil dan Pembahasan Hasil Uji Kimia dan Uji Tarik

Komposisi kimia dan sifat mekanis sampel disajikan pada Tabel 3, kemudian dibandingkan dengan Standar SNI 2052:2017.

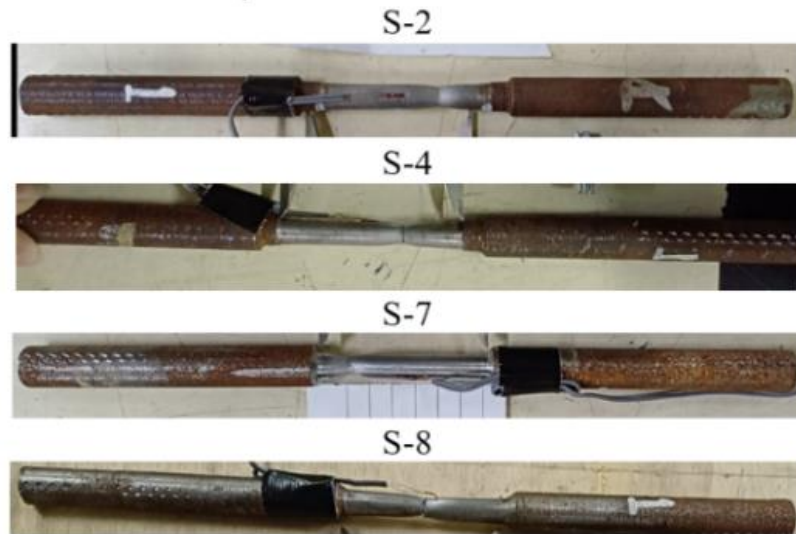
Tabel 3. Kadar Karbon dan Sifat Mekanis

Sample	Load (N)		Luas (mm <sup>2</sup> )	Stress (Mpa)		Rasio UTS/YS	Dia awal (mm)	Dia patah (mm)	kadar karbon
	Yield	Ult		YS	UTS				
S-2	29750	42900	71,70	414	598	1,44	9,50	6,01	4,94
S-2	30800	44150	71,00	435	623	1,43	9,56	6,48	4,94
S-4	28500	43850	67,00	428	658	1,54	9,33	5,85	8,51
S-4	33250	47750	68,40	486	698	1,44	9,21	5,91	8,51
S-7	29200	43700	72,00	406	608	1,50	9,57	5,87	5,99
S-7	33950	45350	69,70	487	651	1,34	9,42	5,47	5,99
S-8	17000	43150	69,60	244	620	2,54	9,41	5,86	3,79
S-8	34450	46400	75,60	456	614	1,35	9,81	5,79	3,79

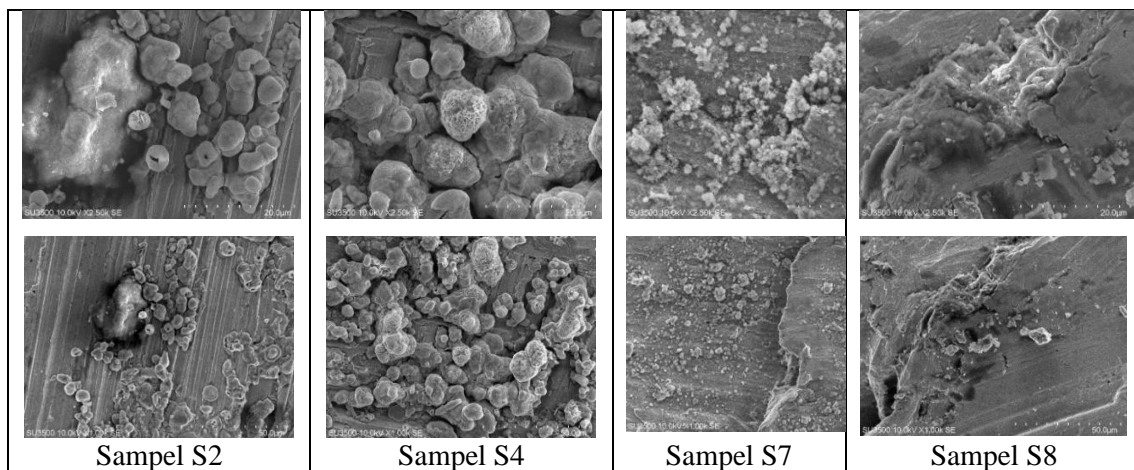
Adapun grafik tegangan regangan seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Kemudian Gambar 5 menunjukkan bentuk necking pada baja tulangan setelah uji tarik sampai patah. Tampak pada gambar 6 adalah mikrostruktur baja tulangan S2, S4, S7 dan S8.



Gambar 4. Grafik tegangan-regangan



Gambar 5. Necking



Gambar 6. Mikrostruktur

Meskipun kadar karbon pada keempat sampel ini tergolong tinggi, namun hasil uji tarik baja tulangan menunjukkan perilaku yang daktil. Pada tabel 3 nilai rasio *Ultimate Tensile Strength* (UTS) terhadap *Yield Strength* (YS) rata-rata lebih besar dari 1,25 yang berarti bahwa terjadi perbedaan yang cukup besar antara tegangan leleh dan tegangan ultimit. Setelah mencapai titik leleh, baja tulangan masih mampu menahan beban tambahan sebelum mencapai kekuatan ultimitnya. Hal ini menunjukkan bahwa sampel baja tulangan memiliki kemampuan untuk berdeformasi plastis yang besar sebelum patah.

Selain kadar karbon, komposisi elemen paduan seperti mangan, kromium, nikel, atau vanadium juga dapat berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanis baja. Elemen-elemen paduan ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap patah, menstabilkan struktur mikro, serta memperbaiki daktilitas pada baja yang memiliki kadar karbon tinggi. Kehadiran elemen paduan ini mungkin memberikan kontribusi yang signifikan terhadap keuletan yang terlihat pada sampel meskipun kadar karbonnya lebih tinggi daripada batas yang ditetapkan dalam SNI.

Proses pembuatan dan perlakuan panas yang diterapkan pada material baja juga dapat mempengaruhi hasil akhir dari sifat mekaniknya. Jika perlakuan panas dan proses pendinginan dilakukan dengan baik, juga bisa membantu menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan meningkatkan kemampuan baja untuk mengalami deformasi plastis.

Pada gambar 6, sampel S2 dengan kandungan karbon 4,94 %wt menunjukkan karakteristik mikrostruktur dengan distribusi ferit-perlit teratur dan ferit yang dominan (area terang adalah ferit), presipitat bulat (sementit) tersebar merata dalam bentuk partikel halus. Nilai rasio UTS/YS yang konsisten dan tegangan leleh yang stabil. Struktur mikro yang teratur dapat menghasilkan sifat mekanik yang konsisten.

Sampel S4 dengan kandungan karbon 8,51 %wt menunjukkan mikrostruktur yang lebih kasar, Proporsi perlit lebih tinggi, koloni perlit lebih besar dengan lamel sementit terlihat jelas. Rasio UTS/YS bervariasi, dan Tegangan leleh yang lebih tinggi. Semakin tinggi kadar karbon ternyata struktur mikronya menjadi lebih kasar karena proporsi perlit yang tinggi dan berkontribusi pada kekuatan material.

Sampel S7 dengan kandungan karbon 5,99 %wt menunjukkan distribusi ferit-perlit tidak seragam dan segregasi sementit. Rasio UTS/YS dan tegangan leleh bervariasi. Ketidakseragaman mikrostruktur menghasilkan variasi dalam sifat mekanik namun daktilitas meningkat.

Sampel S8 dengan kandungan karbon 3,79 %wt terlihat retakan yang lebih jelas pada mikrostruktur, ketidakseimbangan distribusi ferit-perlit ekstrem, dan konsentrasi sementit di area tertentu. Rasio UTS/YS dan tegangan leleh sangat bervariasi. Ketidakseimbangan mikrostruktur ekstrim menyebabkan inkonsistensi sifat mekanik yang signifikan.

Sehingga pengaruh kadar karbon pada mikrostruktur terlihat bahwa kadar karbon menentukan proporsi ferit-perlit, semakin tinggi karbon maka semakin tinggi proporsi

perlit dan distribusi karbon akan mempengaruhi homogenitas struktur. Sampel dengan distribusi karbon lebih homogen (S2) menunjukkan performa lebih konsisten, sementara ketidakmerataan distribusi karbon (S8) menghasilkan variabilitas sifat mekanis yang signifikan.

### Kesimpulan

1. Korelasi Karbon-Kekuatan:
  - S4 dengan karbon 8.51% wt memiliki nilai UTS tertinggi.
  - S2 dengan karbon 4.94% wt menunjukkan sifat mekanis yang paling konsisten.
  - S8 dengan karbon 3.79% wt menunjukkan variabilitas tertinggi.
2. Jumlah kandungan karbon dalam baja tulangan berpengaruh pada susunan mikrostruktur baja. Struktur mikro yang teratur dapat menghasilkan sifat mekanik yang konsisten. Sebaliknya susunan struktur mikro yang tidak seimbang dapat menyebabkan inkonsistensi sifat mekanik.  
pengaruh karbon pada mikrostruktur:
  - Karbon tinggi (8.51%) menghasilkan struktur lebih kasar.
  - Karbon moderat (4.94-5.99%) memberikan struktur lebih seragam.
  - Karbon rendah (3.79%) menghasilkan heterogenitas struktur.
3. Kadar karbon yang terdeteksi pada semua sampel relatif tinggi untuk baja tulangan (sesuai SNI 2052:2017 kandungan unsur maksimum karbon 0,32%) ini mungkin disebabkan oleh keterbatasan metode SEM-EDX dalam mengukur karbon atau ada kontaminasi permukaan.
4. Semua sampel menunjukkan sifat mekanik yang memenuhi standar SNI 2052:2017, dengan HK-HK menunjukkan kekuatan tertinggi namun

tetap mempertahankan daktilitas yang baik.

5. Secara keseluruhan, sifat mekanik material memenuhi persyaratan untuk aplikasi struktural, dengan kombinasi kekuatan dan daktilitas yang seimbang.
6. Meskipun tren umum menunjukkan korelasi positif antara kadar karbon dan kekuatan, hasil SEM-EDX ini perlu diverifikasi dengan metode lain mengingat nilainya yang tidak biasa.

### Daftar Pustaka

- Abbas, S., Hameed, R., Nehdi, M., Afzal, M., Shaukat, S., (2023), Investigation of reinforcing steel rebar manufactured from local scrap at various finishing rolling temperature, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02499>
- Achamyeleh, T., Şahin, Y., (2019), Investigation of Mechanical Properties of Ribbed Reinforcement Steel Bars: A Case Study on Ethiopian Construction Industry, International Journal of Steel Structures <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00236-0>
- Aghogho, O., Akanni, A., Olayiwola, A., Pelumi, I., Odusote, K., (2020), Microstructural Image Analyses of Mild Carbon Steel Subjected to a Rapid Cyclic Heat Treatment, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 55, 1, 2020, 198-209.
- Banini, E., & Kankam, C., (2022), Strength, Ductility and Chemical Properties of Reinforcing Steel Bars in Ghana's Building Construction Industry, Journal of Materials Science Research and Reviews 9(4): 1-18, 2022; Article no.JMSRR.90148.
- Çamur, T., Savaş, M., & Evcil, A. (2022), Mechanical strength variability of deformed reinforcing steel bars for concrete structures in Ethiopia, Scientific Reports | (2022) 12:2600 | <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06654-1>
- Carrillo, C., Lozano, H., Arteta, C., (2021), Mechanical properties of steel reinforcing bars for concrete structures in central Colombia Julian, Journal of Building Engineering 33 (2021)101858 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101858>
- Duan, J., Farrugia, D., Davis, C., & Li, Z., (2022), Effect of impurities on the microstructure and mechanical properties of a low carbon steel, Ironmaking & Steelmaking, 49:2,140-146, DOI:10.1080/03019233.2021.1972270.
- El Hadji, E., Keinde, D., Bodian, M. (2023), Comparative Evaluation of the Chemical Composition and Physical Properties of Reinforced Concrete Steel Bars Used in Construction in Senegal, Open Journal of Civil Engineering, 2023, 13, 292-302 <https://www.scirp.org/journal/ojce>
- Hassan, O., Akin, O., Lawan, A., and Amartey, Y., (2021), Mechanical and Chemical Properties of Reinforcement Bars Manufactured in Nigeria, Covenant Journal of Engineering Technology (CJET) Vol.5 No.1, June, 2021 ISSN: p. 2682-5317 e. 2682-5325, URL: <http://journals.covenantuniversity.edu.ng/index.php/cjet>.
- Islam, T., & Rashed, H., (2019), Classification and Application of Plain Carbon Steels, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.10268-1
- Komenda, J., Luo, C., and Lönnqvist, J., (2022), Interaction of Carbon, Titanium, and Boron in Micro-Alloy Steels and Its Effect on Hot Ductility, Alloys 2022,1(2),133-148; <https://doi.org/10.3390/alloys1020009>
- Muhammad Ishtiaq, Aqil Inam, Saurabh Tiwari and Jae Bok Seol., Microstructural, mechanical, and electrochemical analysis of carbon doped AISI carbon steels, <https://doi.org/10.1186/s42649-022-00079-w>
- Odeyemi, S., Giwa, Z., & Wahab, R., (2019), Building Collapse in Nigeria (2009- 2019), Causes and Remedies – A Review, USEP: Journal of Science and Engineering Production, Vol. 1, No. 1, pp122-135, 2019 Tech Publications, Nigeria.
- Odusote, K., Shittu, W., Adeleke, A., Ikubanni, P., Adeyemo, O., (2019), Chemical and Mechanical Properties of Reinforcing Steel Bars from Local Steel Plants, J Fail. Anal. and Preven. <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00695-x>.
- Zhu, Y., Jia, Y., Chen, X., Wang, Y., and Wang, Z., (2022), Mechanism of Balanced Strength and Ductility in High-Strength Low-Alloy Steel, <https://doi.org/10.3390/met12101554>