

Studi Eksperimen Pengaruh Asam Fosfat terhadap Karakteristik Material dari Natural dan EPDM Rubber

Ana Nur Octaviani^{1*}, Dafit Feriyanto¹, Kurniawan¹²³, Dewi Kusuma Arti², Hery Nur⁴

¹Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana

Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat. Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11650

²Pusat Teknologi Material (PTM)-BPPT

Jl. MH. Thamrin No. 8, Lantai 22 - BPPT II, Jakarta 10340

³Indonesia Fuel Cell and Hydrogen Energy

Gd.224 Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, Banten 15311

⁴PT Astra Komponen Indonesia

Jl. Raya Mayor Oking Jaya Atmaja, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810

*e-mail : anaoctvn@gmail.com

Received 30 November 2024 | Revised 24 Desember 2024 | Accepted 15 Januari 2025

Abstrak

Natural Rubber (NR) dan Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) adalah material karet yang banyak digunakan dalam komponen otomotif seperti bushing karena sifat elastisitas dan daya tahannya. Namun, paparan bahan kimia agresif seperti asam fosfat dapat memengaruhi sifat mekanik dan fisik kedua material ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perendaman dalam larutan asam fosfat dengan konsentrasi 13% terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro NR dan EPDM. Hasil pengujian menggunakan Mesin (UTM) Universal Testing Machine menunjukkan bahwa NR mengalami penurunan pada kekuatan tarik tegangannya NR sebesar 20,44% dari nilai rata-rata 9,64 MPa menjadi 7,67 MPa dan EPDM sekitar 23,8% setelah perendaman, yakni dari nilai rata-rata 9,06 ke 6,9 dan untuk nilai regangannya penurunan NR sebesar 38,3% dari rata-rata regangan sebesar 406,75% menjadi 251% dan EPDM sekitar 17,43% dari rata-rata peregangan sebesar 610% menjadi 503,7% disebabkan oleh degradasi rantai polimernya. Penurunan kekerasan NR yang diuji menggunakan Shore A mencapai 19,2%, dari nilai rata-rata kekerasan 68,6 HA menjadi 55,4 HA sedangkan EPDM hanya sekitar 4,81% dari nilai rata-rata kekerasan 55,8 HA menjadi 52,5 HA. Hasil struktur mikro dengan perbesaran 20x, 50x dan 100x dari kedua jenis karet pun menunjukkan bahwa tidak banyak perubahan yang dapat teramati. Temuan ini mengindikasikan bahwa EPDM lebih unggul dalam hal ketahanan ketika terkena paparan asam fosfat sedangkan NR lebih cepat terdegradasi, namun NR masih memiliki tegangan, dan kekerasan yang lebih baik dibanding EPDM meskipun telah mendapat paparan asam fosfat.

Kata kunci: Natural Rubber, EPDM, Asam Fosfat, Bushing, Sifat Mekanik

Abstract

Natural Rubber (NR) and Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) are rubber materials that are widely used in automotive components such as bushings due to their elasticity and durability properties. However, exposure to aggressive chemicals such as phosphoric acid can affect the mechanical and physical properties of these two materials. This study aims to evaluate the effect of immersion in phosphoric acid solution with a concentration of 13% on the tensile strength, hardness, and microstructure of NR and EPDM. The results of the test using the Universal Testing Machine (UTM) showed that NR experienced a decrease in tensile strength of NR by 20.44% from an average value of 9.64 MPa to 7.67 MPa and EPDM of around 23.8% after immersion, namely from an average value of 9.06 to 6.9 and for a stretch value a decrease in NR by 38.3% from an average strain of 406.75% to 251% and EPDM of around 17.43% from

an average stretch of 610% to 503.7% due to degradation polymer chain. The reduction in NR hardness tested using Shore A reached 19.2%, from the average hardness value of 68.6 HA to 55.4 HA while EPDM was only around 4.81% from the average hardness value of 55.8 HA to 52.5 HA. The results of the microstructure with 20x, 50x and 100x magnification of both types of rubber also showed that not much change could be observed. These findings indicate that EPDM is superior in terms of resistance when exposed to phosphoric acid while NR is degraded more quickly, but NR still has better stress, and hardness than EPDM despite exposure to phosphoric acid.

Keywords: Natural Rubber, EPDM, Phosphoric Acid, Bushing, Mechanical Properties

1. Pendahuluan

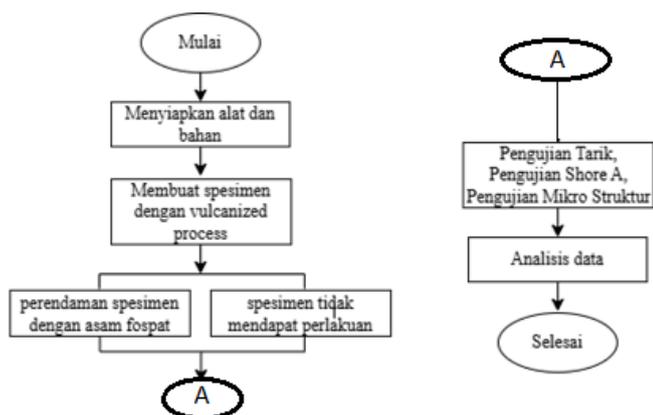
Natural Rubber (NR) dan *Ethylene Propylene Diene Monomer* (EPDM) adalah dua jenis elastomer yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri [1], terutama untuk komponen yang membutuhkan elastisitas dan ketahanan lingkungan, seperti *bushing* dan seal [2]. NR dikenal dengan sifat elastisitas tinggi, namun memiliki kelemahan dalam ketahanan terhadap bahan kimia dan panas. Sebaliknya, EPDM menawarkan keunggulan dalam ketahanan terhadap paparan ozon, panas, dan bahan kimia, termasuk asam dan basa [3]. Dalam aplikasi otomotif, seperti sistem suspensi kendaraan, *bushing* berbahan karet sering terpapar lingkungan kerja yang agresif, termasuk bahan kimia seperti asam fosfat [4], sehingga menimbulkan masalah seperti kerusakan komponen dalam waktu yang cenderung singkat. Akibat dari paparan asam fosfat dapat memengaruhi sifat mekanik dari karet dan juga kinerja dan umur pakai ketika diaplikasikan dalam aplikasi otomotif. Oleh karena itu, jurnal ini bertujuan untuk memahami perbedaan respons NR dan EPDM terhadap paparan asam fosfat untuk memilih material yang paling sesuai.

Fosfat dalam bentuk asam fosfat atau ester fosfat sering ditemukan dalam residu industri dan limbah jalan raya. Meski konsentrasi spesifik asam fosfat di jalan raya jarang dilaporkan, penggunaan fosfat dalam industri pelapisan, perawatan logam, dan bahan kimia dapat memberikan dampak pada tanah di sekitar area tersebut [5]. Dalam konteks jalan raya, senyawa fosfat bisa berasal dari pelapukan material kendaraan, limbah pelumas, atau air hujan yang membawa polutan ke tanah di pinggir jalan [6]. Paparan jangka panjang terhadap senyawa asam fosfat dapat menyebabkan perubahan sifat mekanik pada bahan seperti karet karena reaksi kimia antara fosfat dan rantai polimer dalam karet [7]. Penelitian pada elastomer menunjukkan bahwa senyawa kimia dari lingkungan dapat menurunkan daya tahan material terhadap tekanan mekanik serta mengubah kekerasannya. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan efek ini saat merancang aplikasi elastomer seperti *bushing arm* yang terpapar lingkungan jalan [8].

Pengujian sifat mekanik dan mikrostruktur material merupakan langkah penting dalam memahami performa material elastomer seperti NR dan EPDM dalam aplikasi industri. Pengujian ini meliputi uji tarik Parameter utama yang diukur meliputi kekuatan tarik maksimum (*tensile strength*), regangan maksimum (*elongation at break*), dan modulus elastisitas [9]. Pengukuran nilai kekerasan karet menggunakan alat durometer dengan skala *Shore A*. Alat ini menerapkan metode non-destruktif yang digunakan untuk mengevaluasi resistensi material terhadap penetrasi. Nilai kekerasan *Shore A* berkorelasi dengan kekuatan tekan dan kemampuan material mempertahankan bentuknya di bawah tekanan [10]. Selanjutnya analisis mikrostruktur dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi material akibat perlakuan atau lingkungan tertentu. Teknik analisis yang digunakan seperti mikroskop optik, *scanning electron microscopy*, *transmission electron microscopy*, *Xray Diffraction*, dan *metallografi*. Hasil analisis mikrostruktur memberikan wawasan tentang mekanisme kerusakan material, yang tidak dapat diukur secara langsung melalui uji mekanik [11].

2. Metodologi

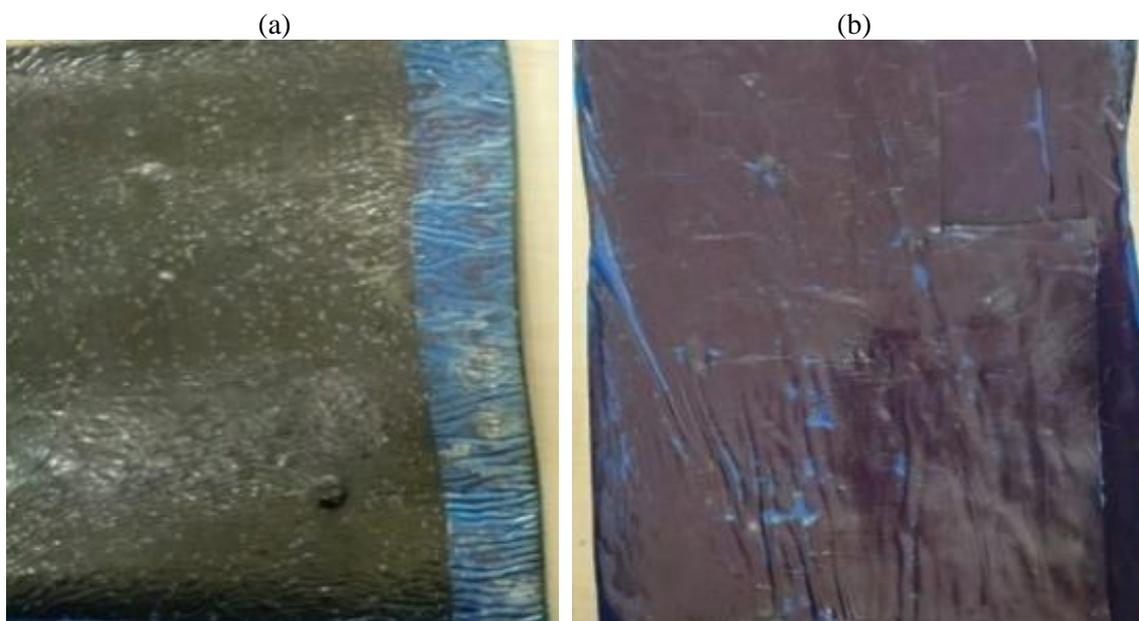
Secara keseluruhan proses pengujian ini digambarkan pada diagram alur gambar 1.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

2.1 Bahan

Bahan spesimen uji yaitu NR dan EPDM *compound* yang berbentuk lembaran setengah jadi dengan komposisi 100 phr yang terlihat pada Gambar 2. Dan bahan untuk perendaman menggunakan larutan asam phospat dengan konsentrasi 15% yang ditunjukkan pada Gambar 3.



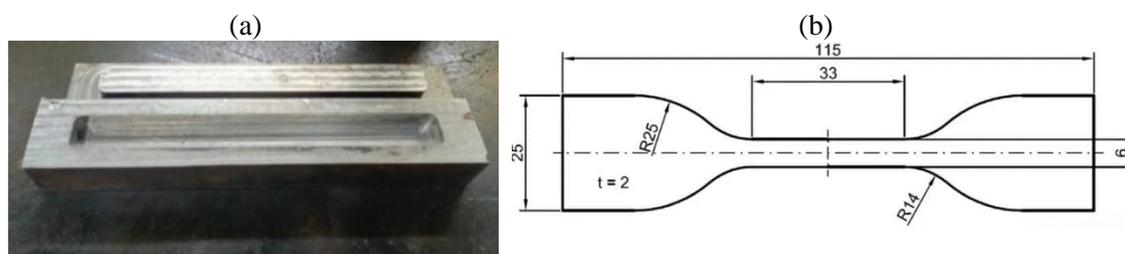
Gambar 2. (a) *Natural Rubber (NR) coumpond* (b) *EPDM coumpond*

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
|  | <i>Product Name</i> | <i>Phosporic Acid</i> |
| | <i>Appearance</i> | <i>Colorless Liquid</i> |
| | <i>CAS Number</i> | 7664-38-2 |
| | <i>Einecs Number</i> | 231-633-2 |
| | <i>HS Code</i> | 28092011 |
| | <i>UN</i> | 3453 |
| | <i>Molecular Formula</i> | H ₃ PO ₄ |
| | <i>Storage</i> | <i>Cool Dry Place</i> |
| | <i>Odor</i> | <i>No Pungent odor</i> |
| | <i>Density</i> | 1.685 g/mL at 25 °C |
| | <i>Boiling Point</i> | 158 °C |
| | <i>Melting Point</i> | -40 °C |

Gambar 3. Larutan Asam Phospat dengan konsentrasi 15% dan keterangan sifat cairannya

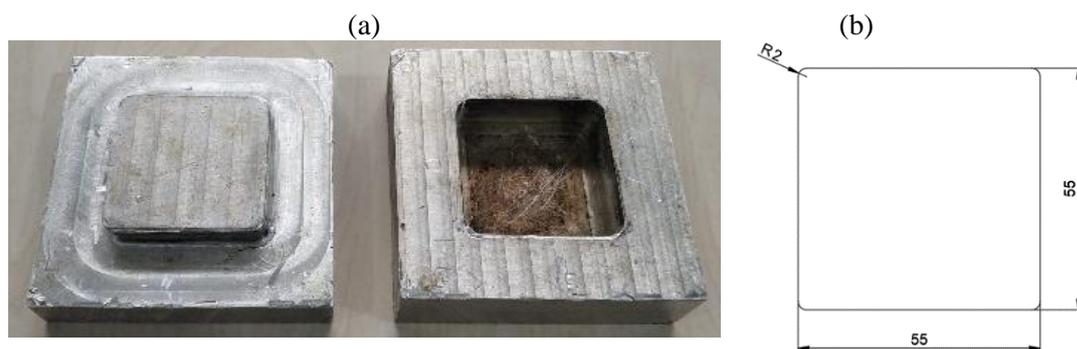
2.2 Alat

Alat yang digunakan untuk membuat specimen atau vulcanized rubber adalah molding/cetakan. Spesifikasi untuk Cetakan Uji Tarik dibuat dari bahan Baja VCN (*Vanadium, Carbon, Nickel*) dengan ukuran sesuai dengan ketentuan ASTM D412 [12] dengan profil cetakan yang digambarkan pada gambar 4 sebagai berikut:



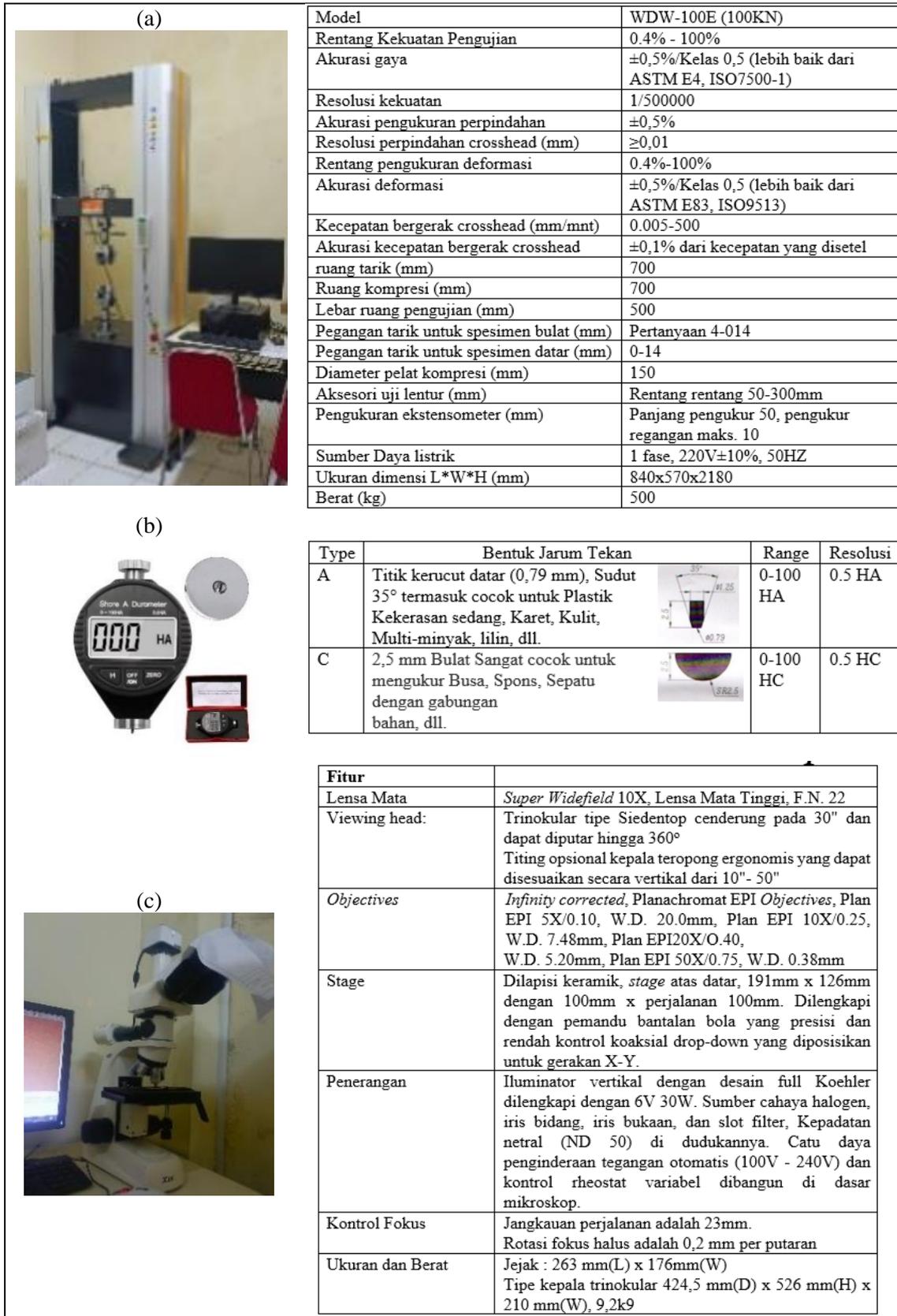
Gambar 4. (a) Cetakan Uji Tarik (b) Dimensi profil spesimen uji tarik

Spesifikasi untuk Cetakan Uji Kekerasan dibuat dari bahan Baja VCN dengan ukuran sesuai dengan ketentuan ASTM D2240 [13] dengan profil yang digambarkan pada gambar 5 cetakan sebagai berikut:



Gambar 5. (a) Cetakan Uji Kekerasan (b) Dimensi profil spesimen uji kekerasan

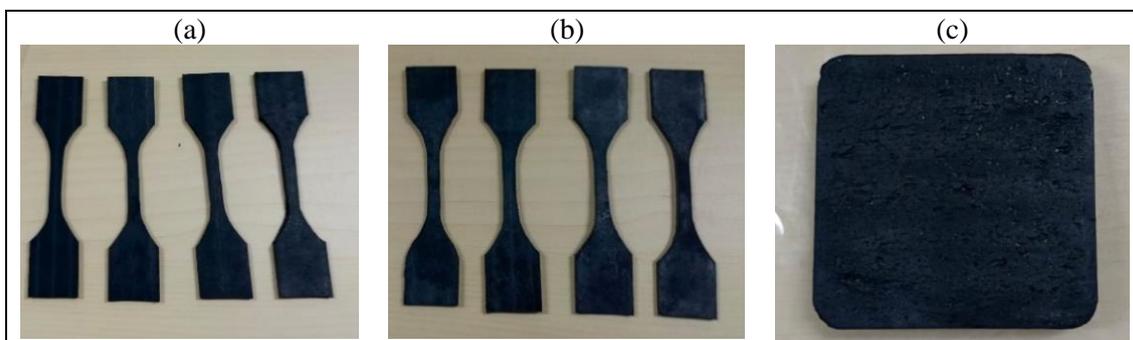
Alat untuk proses vulkanisasi karet menggunakan mesin hot press dengan tekanan 7 MPa dengan temperatur pemanasan 180 °C. Dengan waktu vulkanisasi selama 30 menit. Sedangkan alat uji Tarik yang digunakan adalah menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 50 kN yang terdapat pada gambar 6a, untuk uji kekerasan menggunakan *Shore A*, dan untuk pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dengan lensa perbesaran 20x, 50x, dan 100x, ketiga alat pengujian ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. (a) Universal Testing Machine (b) Shore A (c) Mikroskop Optik

2.3 Perlakuan Asam Fosfat

Sampel NR dan EPDM yang sudah disiapkan sesuai ukuran standar untuk uji tarik dan uji kekerasan. Sampel kemudian direndam dalam larutan asam fosfat selama 15 menit dengan suhu stabil 70°C. Setelah perendaman karet dibiarkan menguap dengan suhu ruangan sampai mengering. Hasil Karet yang sudah mendapat perlakuan perendaman asam fosfat ditunjukkan dengan pada gambar 7.



Gambar 7. Spesimen hasil perendaman asam fosfat (a) *Natural Rubber* (b) EPDM (c) Spesimen Uji Kekerasan

2.4 Proses Pengujian

Spesimen disiapkan untuk ketiga jenis pengujian yakni; uji Tarik, uji kekerasan, dan uji mikrostruktur. Spesimen disiapkan untuk pengujian yang tidak mendapatkan perlakuan perendaman dan spesimen yang mendapatkan perlakuan perendaman. Seluruh spesimen yang sudah siap diuji, disimpan dalam keadaan vakum pada suhu ruangan.

Uji Tarik, dilakukan dengan *grip methode* B dengan penampang lurus dan kecepatan penarikan diatur pada kecepatan 20mm/min. Uji Kekerasan, dilakukan menggunakan alat shore A pada 5 titik pengujian di masing-masing specimen. Uji struktur mikro dilakukan pada perbesaran 20x, 50x dan 100x.

Persamaan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah dengan menggunakan persamaan tegangan tarik (1) dan persamaan elongasi (2) sehingga didapatkan nilai tegangan Tarik dan besar elongasi yang terjadi

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

dimana:

σ = Tegangan Tarik (MPa)

F = gaya tarik (N)

A = Luas Penampang (mm^2)

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2)$$

dimana:

ε = elongasi (%)

l = Panjang material setelah uji Tarik (mm)

l_0 = Panjang awal material (mm)

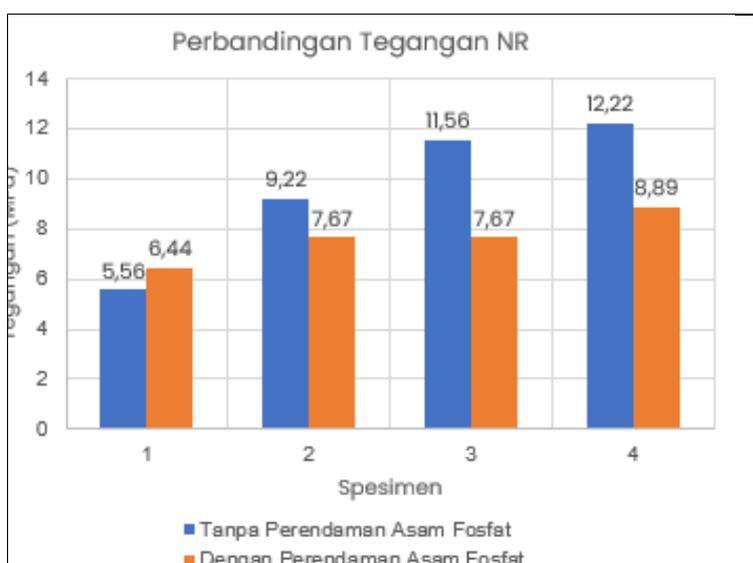
3. Hasil dan Pembahasan

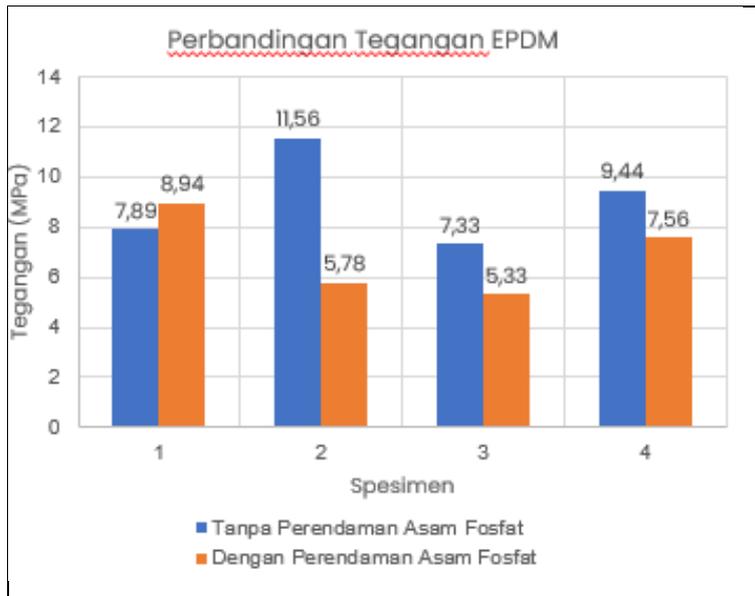
Hasil specimen yang telah diuji Tarik ditunjukkan dengan gambar 8 terlihat bahwa area putus terjadi sekitar daerah necking.



Gambar 8. Spesimen Hasil Uji Tarik dari masing-masing jenis karet

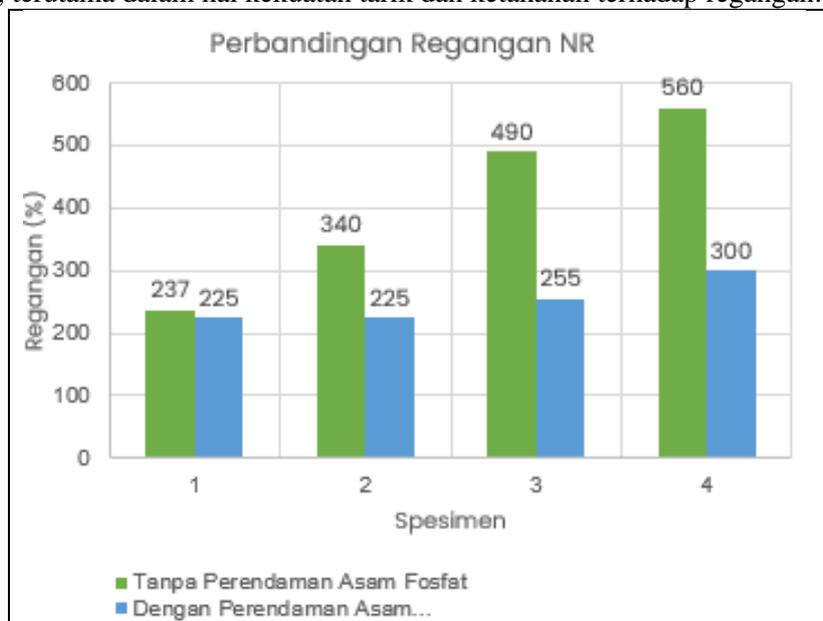
Hasil nilai tegangan dari masing-masing specimen tercantum pada gambar 9. Pada gambar 9 ditunjukkan bahwa nilai tegangan pada NR yang mendapat perlakuan perendaman fosfat mengalami penurunan nilai rata-rata dari 9,64 MPa sebelum mendapat perlakuan menjadi 7,67 MPa setelah perendaman atau sekitar 20,44%. Sedangkan untuk jenis karet EPDM mengalami penurunan nilai rata-rata tegangan sebesar 23,80% dari 9,055 MPa sebelum perendaman menjadi 6,9 MPa setelah perendaman. NR dan EPDM dengan perendaman memiliki tren penurunan tegangan yang lebih signifikan dibandingkan NR yang tidak direndam. Hal ini menunjukkan bahwa asam fosfat melemahkan struktur karet. Menurut literatur, asam fosfat dapat bertindak sebagai agen degradasi yang melemahkan struktur polimer NR dan EPDM, terutama dengan memutuskan ikatan silang (*cross-link*) pada rantai polimer. Ini mengurangi kekuatan tarik NR dan EPDM, seperti yang terlihat pada grafik.[14].

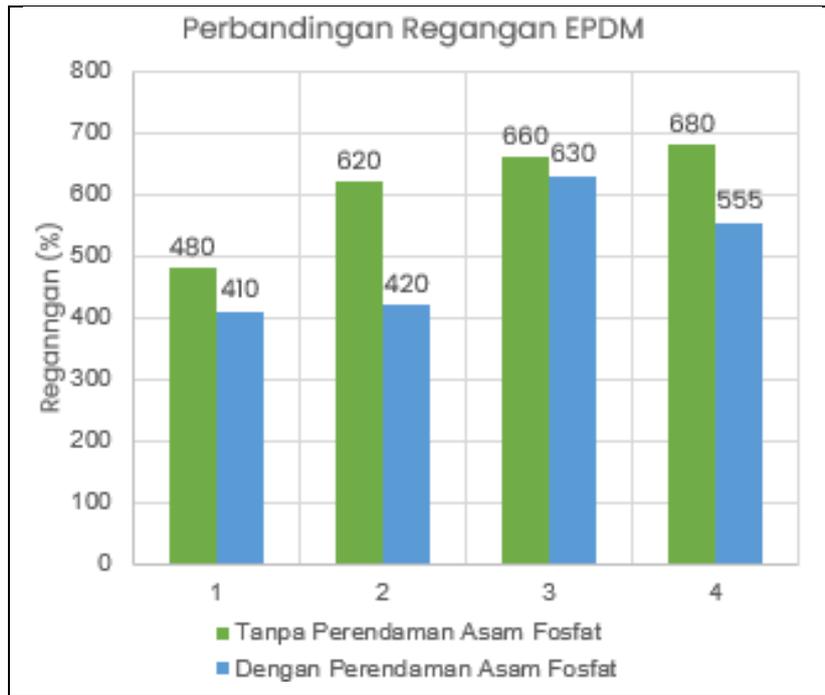




Gambar 9. Grafik perbandingan tegangan NR dan EPDM

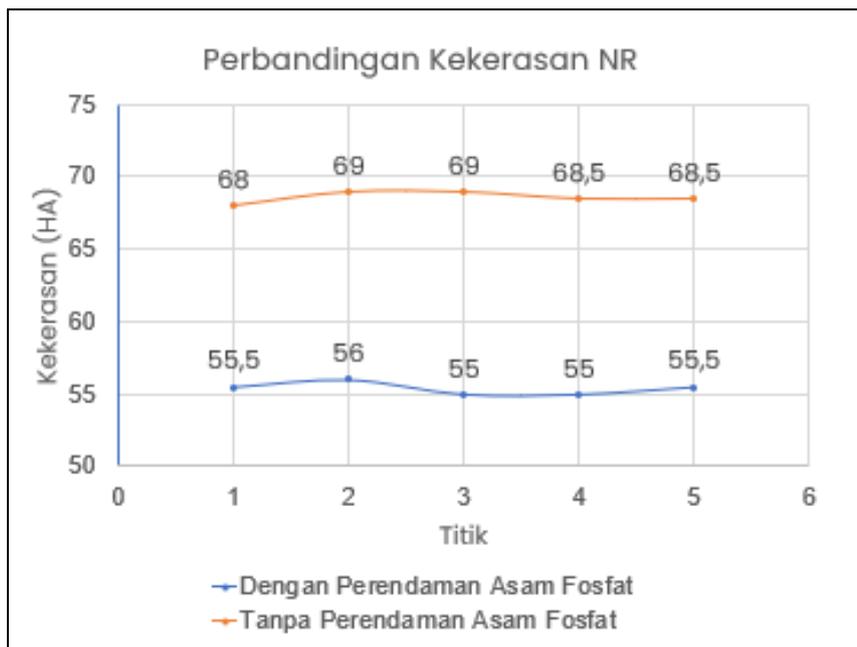
Hasil nilai regangan dari masing-masing specimen tercantum pada gambar 10. Pada gambar 10 ditunjukkan bahwa nilai regangan pada NR yang mendapat perlakuan perendaman fosfat mengalami penurunan nilai rata-rata dari 406,75% sebelum mendapat perlakuan menjadi 251% setelah perendaman atau sekitar 38,3% penurunan yang terjadi. Sedangkan untuk jenis karet EPDM mengalami penurunan nilai rata-rata regangan sebesar 17,43% dari besar peregangan 610% sebelum perendaman menjadi 503,7% setelah perendaman. EPDM memiliki ketahanan kimia yang lebih baik dibandingkan NR, sehingga asam fosfat kemungkinan besar tidak akan mempengaruhi struktur molekul EPDM secara signifikan. Meskipun demikian, paparan jangka panjang terhadap asam fosfat dapat menyebabkan beberapa perubahan pada sifat fisik dan mekaniknya, terutama dalam hal kekuatan tarik dan ketahanan terhadap regangan.

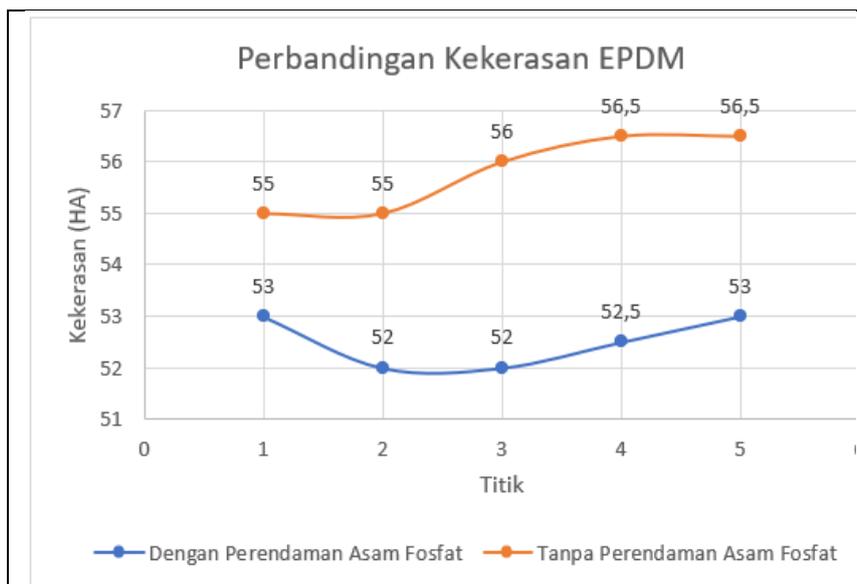




Gambar 10. Grafik perbandingan regangan NR dan EPDM

Hasil nilai kekerasan dari masing-masing spesimen tercantum pada gambar 11. Pada gambar 11 ditunjukkan bahwa nilai kekerasan pada NR yang mendapat perlakuan perendaman fosfat mengalami penurunan nilai rata-rata dari 68,6 HA (*Hardness A*) sebelum mendapat perlakuan menjadi 55,4 HA setelah perendaman atau sekitar 19,2% peurunan yang terjadi. Sedangkan untuk jenis karet EPDM mengalami penurunan nilai rata-rata tegangan sebesar 4,81% dari besar peregangan 55,8 HA sebelum perendaman menjadi 52,5 HA setelah perendaman. Asam fosfat dapat merusak ikatan silang (*cross-linking*) pada molekul NR, yang mengurangi ketahanan terhadap deformasi dan membuat karet lebih lembek. EPDM cenderung mempertahankan ketahanan terhadap suhu dan bahan kimia, meskipun paparan bahan kimia dalam jangka panjang tetap dapat menyebabkan penurunan kekerasan dan elastisitasnya.[15].

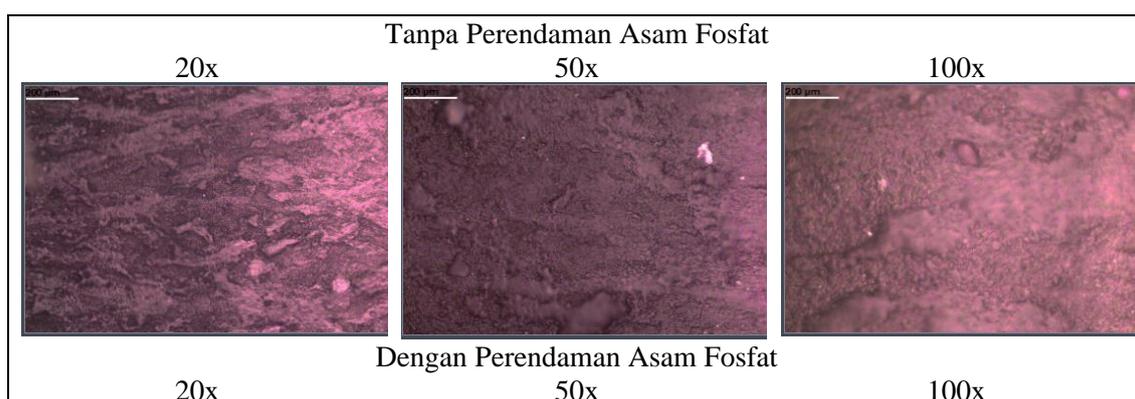


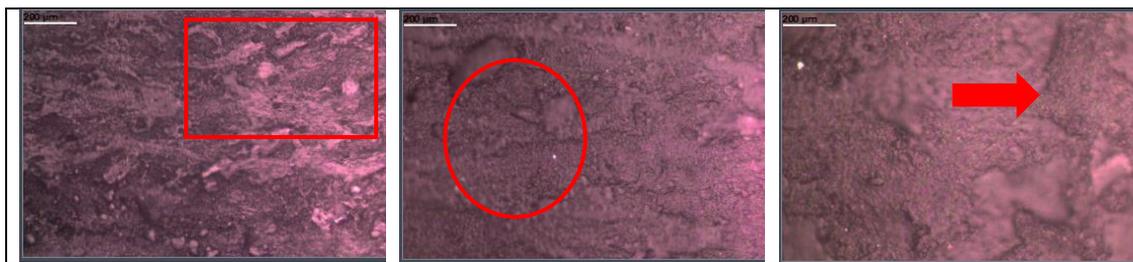


Gambar 11. Grafik perbandingan kekerasan NR dan EPDM

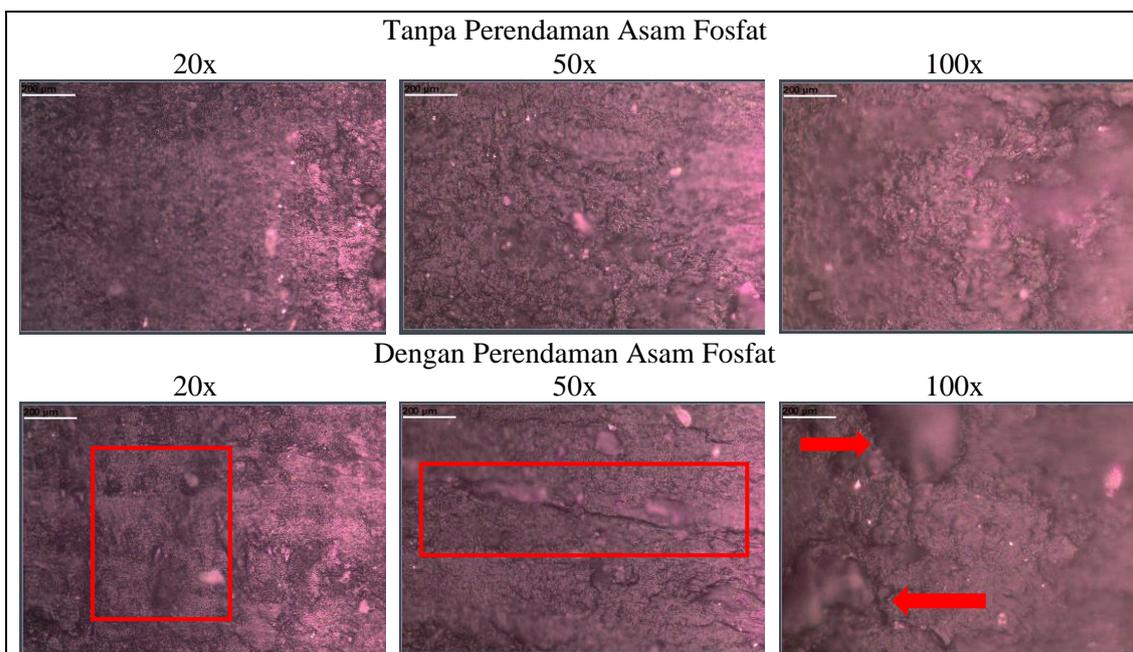
Struktur mikro NR yang terpapar asam fosfat kemungkinan menunjukkan penurunan kerapatan ikatan silang, yang dapat terlihat dari adanya retakan mikro atau struktur yang lebih longgar pada permukaan. Degradasi akibat asam fosfat dapat mempengaruhi morfologi permukaan, menjadikannya lebih rapuh dan kurang homogen. Struktur mikro NR tanpa perlakuan asam fosfat kemungkinan lebih padat dan teratur, dengan ikatan silang yang lebih kuat dan permukaan yang lebih halus, menunjukkan kestabilan fisik yang lebih baik [16].

EPDM yang direndam dalam asam fosfat mungkin menunjukkan sedikit perubahan mikrostruktur, tetapi karena sifatnya yang lebih tahan terhadap degradasi, strukturnya tetap relatif stabil meskipun ada perubahan kecil pada lapisan permukaan atau penurunan ketebalan pada daerah tertentu. Struktur mikro EPDM yang tidak terpengaruh oleh asam fosfat kemungkinan tetap kokoh, dengan morfologi yang homogen, dan tampak lebih elastis. Ini menunjukkan bahwa EPDM memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi dan mempertahankan kekuatan struktural meskipun tanpa perlakuan kimia.





Gambar 12. Hasil Uji struktur mikro NR



Gambar 13. Hasil Uji struktur mikro EPDM

4. Kesimpulan dan Saran

Asam fosfat dapat menyebabkan degradasi kimia pada NR, mengakibatkan penurunan elastisitas dan kekuatan tarik. Hal ini disebabkan oleh pemutusan rantai polimer yang menyebabkan kelemahan struktural. Sebaliknya, struktur EPDM yang lebih stabil, terutama karena keberadaan ikatan propilena dan diena, memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan kimia. Hasil ini menunjukkan bahwa EPDM lebih cocok untuk aplikasi di lingkungan yang melibatkan paparan bahan kimia agresif seperti asam fosfat, misalnya dalam industri kimia atau pengolahan air. Sebaliknya, NR mungkin lebih cocok untuk aplikasi di mana bahan kimia tidak menjadi faktor utama.

Penelitian ini menunjukkan hasil pengujian menggunakan Mesin (UTM) Universal Testing Machine menunjukkan bahwa NR mengalami penurunan pada kekuatan tarik tegangannya NR sebesar 20,44% dari nilai rata-rata 9,64 MPa menjadi 7,67 MPa dan EPDM sekitar 23,8% setelah perendaman, yakni dari nilai rata-rata 9,06 ke 6,9 dan untuk nilai regangannya penurunan NR sebesar 38,3% dari rata-rata regangan sebesar 406,75% menjadi 251% dan EPDM sekitar 17,43% dari rata-rata peregangan sebesar 610% menjadi 503,7% disebabkan oleh degradasi rantai polimernya. Penurunan kekerasan NR yang diuji menggunakan Shore A mencapai 19,2%, dari nilai rata-rata kekerasan 68,6 HA menjadi 55,4 HA sedangkan EPDM hanya sekitar 4,81% dari nilai rata-rata kekerasan 55,8 HA menjadi 52,5 HA. Hasil struktur mikro dengan perbesaran 20x, 50x dan 100x dari kedua jenis karet pun menunjukkan bahwa tidak banyak perubahan yang dapat teramati. Temuan ini mengindikasikan bahwa EPDM lebih unggul dalam hal ketahanan ketika terkena paparan asam fosfat sedangkan NR lebih cepat terdegradasi, namun NR masih memiliki

tegangan, dan kekerasan yang lebih baik dibanding EPDM meskipun telah mendapat paparan asam fosfat.

Saran untuk menemukan material yang lebih baik untuk aplikasi otomotif, teliti material komposit berbasis karet dengan penguat seperti karbon hitam, nanokomposit (CNT atau *graphene*), atau serat pendek untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan kimia, teliti aditif seperti antioksidan, antiozonan, atau pengisi organik untuk memperpanjang umur material, Gunakan simulasi berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) untuk memprediksi kinerja material di bawah beban dinamis dan lingkungan ekstrem sebelum pengujian fisik.

5. Daftar Pustaka

- [1] N. L. Costa *et al.*, “A Review of EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) Rubber-Based Nanocomposites: Properties and Progress,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 12, 2024, doi: 10.3390/polym16121720.
- [2] M. J. G. Tárrago, “Engineering rubber bushing stiffness formulas including dynamic amplitude dependence,” *Eng. Sci.*, p. 28, 2006.
- [3] J. Metz, X. Zhang, and X. Yu, “The Effect of Loading Rate on Rubber Bushing Push-Out Testing of Front Lower Control Arms,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2016-April, no. April, 2016, doi: 10.4271/2016-01-0430.
- [4] V. T. P. Sidabutar, “Untuk Pembuatan Seal / O-Ring Untuk Suku Cadang,” 2014.
- [5] S. J. Kim *et al.*, “Impact of traffic volumes on levels, patterns, and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in roadside soils,” *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 21, no. 1, pp. 174–182, 2019, doi: 10.1039/c8em00532j.
- [6] I. Sasongko, *Pengembangan Berkelanjutan Penyediaan Infrastruktur Pada Kawasan Pemukiman Secara Berkelanjutan*, vol. 1. 2023. [Online]. Available: <http://eprints.itn.ac.id/id/eprint/11360>
- [7] R. Balasubramanian, Jayanthan; Kumar, Vinay; Kirubakaran, Muthiah; Lalwani, “A Study on Automotive Sheetmetal Surface Pretreatment: Liquid Activation and Low Temperature Phosphating,” *SAE Int.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.4271/2023-28-1324>.
- [8] Diana Petronela BURDUHOS-NEGRIS; Costica BEJINARIU; Andrei Victor SANDU, *Phosphate Coatings Suitable for Personal Protective Equipment*. Materials Research Foundation, 2021.
- [9] W. A. Pangestu, H. Prawibowo, R. Ismail, and M. A. Wahid, “Sifat Mekanik Silicone Rubber Sebagai Kandidat Bahan Pengganti Alat Latihan Suturing,” vol. 04, no. 01, pp. 15–24, 2024.
- [10] J. M. Arguello and A. Santos, “Hardness and compression resistance of natural rubber and synthetic rubber mixtures,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 687, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/687/1/012088.
- [11] S. Hanifarianty and M. I. Fathurrohman, “Kajian Sifat Fisika Dan Morfologi Karet Alam Selular Pada Variasi Tipe Bahan Pengembang Dan Bobot Kompon,” *J. Penelit. Karet*, vol. 41, no. 2, pp. 103–112, 2023, doi: 10.22302/ppk.jpk.v41i2.837.
- [12] C. B. Manufacturing, C. R. Specimens, and T. Determina-, “Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers —,” pp. 1–14, 2009, doi: 10.1520/D0412-16.2.
- [13] American Society for Testing and Materials, “ASTM D2240-15 Standard Test Methods for Rubber Property-Durometer Hardness,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2015, doi: 10.1520/D2240-15.2.
- [14] S. H. Lee, G. W. Park, H. J. Kim, K. Chung, and K. S. Jang, “Effects of Filler Functionalization on Filler-Embedded Natural Rubber/Ethylene-Propylene-Diene Monomer Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173502.
- [15] N. Alcalá, M. Castrillón, I. Viejo, S. Izquierdo, and L. A. Gracia, “Rubber Material-Model Characterization for Coupled Thermo-Mechanical Vulcanization Foaming Processes,”

- Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 6, 2022, doi: 10.3390/polym14061101.
- [16] R. Pornprasit, P. Pornprasit, P. Boonma, and J. Natwichai, “Determination of the mechanical properties of rubber by FT-NIR,” *J. Spectrosc.*, vol. 2016, no. ii, 2016, doi: 10.1155/2016/4024783.