

IDENTIFIKASI FAKTOR PENYEBAB KERUSAKAN CONICAL RUBBER SPRING BONDED PADA KERETA API MELALUI ANALISIS KEGAGALAN

Identification of Factors Causing Damage to Conical Rubber Spring Bonded in Railway Vehicle Through Failure Analysis

Muhammad Irfan FATHURROHMAN, Santi PUSPITASARI*, dan Arief RAMADHAN

PT Riset Perkebunan Nusantara, Jalan Salak Nomor 1A Bogor 16128, Jawa Barat

*E-mail: santi.puspitasari.ppk@gmail.com

Diterima: 16 Oktober 2025/ Disetujui: 15 Desember 2025

Abstract

Conical rubber spring bonded play a crucial role in supporting train vehicle functionality, especially in providing safety and comfort for train passengers. Therefore, early identification of damage to conical rubber spring bonded is important to ensure that the product can perform properly in absorbing vibration when the train is operated. The study was aimed to examine the type of damage and factors that cause damage to conical rubber spring bonded by applying failure analysis procedure. The failure analysis was conducted by characterizing the physical visualization of macroscopic, chemical, physical, mechanical, and thermal properties of three types of used conical rubber spring bonded. Conical rubber springs bonded used in the research were provided by PT Kereta Api Indonesia (KAI) Persero, namely type K, G, and T. The result of failure analysis indicated that the type of damage includes of surface cracking appearing of conical rubber spring bonded type K due to natural rubber composed in rubber layer of conical rubber spring bonded type K was not resistant prior to ozone attack. Severe mechanical damage (tear) to T type conical rubber spring bonded was caused by internal factor probably resulting from inappropriate selection and determination of rubber additive during the production of conical rubber spring bonded compound. Meanwhile, the damage showed on G type conical rubber spring bonded was visible at metal component which expose to corrosion. Corrosive metal caused the rubber composite to split off from the metal component.

Keywords: Failure analysis; railway vehicle; rubber additive; rubber bonded; surface cracking

Abstrak

Conical rubber spring bonded memegang peran krusial dalam mendukung fungsional kereta api terutama dalam memberikan keamanan dan kenyamanan bagi penumpang kereta api. Oleh karena itu, identifikasi dini kerusakan conical rubber spring bonded menjadi penting untuk dilakukan dalam rangka menjamin conical rubber spring bonded dapat berfungsi dengan baik dalam meredam getaran pada saat kereta api beroperasi. Riset ini bertujuan mengkaji tipe kerusakan dan faktor eksternal maupun internal penyebab timbulnya kerusakan pada conical rubber spring bonded dengan menerapkan prosedur analisis kegagalan yang dilakukan dengan cara mengkarakterisasi visualisasi fisik makroskopik, sifat kimia, fisika, mekanik, dan panas dari tiga tipe produk conical rubber spring bonded bekas yang telah digunakan oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero) yaitu tipe K, G, dan T. Hasil kajian analisis kegagalan menunjukkan bahwa jenis kerusakan meliputi muncul retak permukaan pada conical rubber spring bonded tipe K yang disebabkan karena karet alam penyusun lapisan material komposit karet tidak tahan terhadap paparan ozon. Kerusakan mekanis (sobekan) yang parah pada conical rubber spring bonded tipe T yang mungkin disebabkan oleh faktor internal akibat pemilihan jenis dan penetapan dosis bahan kimia karet saat produksi conical rubber spring bonded tipe T yang tidak tepat.

Sementara pada *conical rubber spring bonded* tipe G kerusakan tampak pada komponen logam yang mengalami korosi yang menyebabkan terkelupasnya material komposit karet dari logam penyusun *conical rubber spring bonded* tipe G tersebut.

Kata kunci: Analisis kegagalan; bahan aditif karet; kereta api; retak permukaan, rubber bonded

PENDAHULUAN

Moda transportasi massal jalur darat dengan kereta api menjadi primadona guna memfasilitasi mobilitas orang dan barang. Kereta api dengan segala keunggulannya dalam memberikan efisiensi daya angkut, mampu mengurangi kemacetan di jalan, menimalisir kecelakaan lalu lintas dan kerusakan jalan akibat beban lalu lintas yang semakin berat, serta mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan dari kendaraan bermotor menjadi semakin diminati. Data BPS mencatat pada tahun 2023 pengguna kereta api sebanyak 372 juta orang, sedangkan pada tahun 2024 (yoy) naik menjadi 842 juta orang. Oleh karena itu, jumlah pengguna kereta api diprediksi akan terus meningkat di masa mendatang baik kereta pelaju maupun kereta api jarak jauh. Sebagai upaya meningkatkan pelayanan dengan mengutamakan keselamatan dan kenyamanan penumpang maka pemeliharaan kelaikan fungsi kereta api hendaknya menjadi prioritas utama. Potensi risiko kejadian kerusakan yang dapat menurunkan kinerja kereta api harus dapat diidentifikasi sejak dini.

Dalam menjalankan fungsinya, kereta api didukung oleh lokomotif, gerbong, dan caboose/FRED. Seperti pada kendaraan umumnya, gerbong kereta api yang merupakan bagian yang berkontak langsung dengan penumpang juga dilengkapi dengan komponen otomotif yang terbuat dari karet misal *conical rubber spring bonded* selanjutnya disebut dengan "*Rubber Spring*". *Rubber spring* telah secara luas dimanfaatkan sebagai komponen peredam atau penyerap getaran (*Anti-vibration device*) (Banic *et al.*, 2020). *Rubber spring* yang dipasang di antara gerbong khususnya bagian *axle box* dan rangka *boogie* dikenal sebagai suspensi utama (Zhang & Zhu, 2017). *Rubber spring* dapat dipasang tunggal maupun berpasangan, umumnya sebanyak

empat pasang (delapan buah) di setiap poros *boogie*.

Rubber spring tersusun dari lapisan komposit karet yang direkatkan pada logam. Komponen logam berfungsi sebagai rangka untuk menahan beban, sedangkan karet sebagai material peredam getaran. Komponen berbentuk kerucut ini bekerja dengan memberikan tiga arah kekakuan yaitu vertikal (longitudinal) dan horizontal (lateral dan longitudinal). Kekakuan vertikal berguna untuk mencegah penggelinciran, sementara kekakuan horizontal penting untuk mentransfer gaya pengereman dan traksi serta menjaga stabilitas gerbong. Ketebalan dan dimensi lapisan komposit karet pada produk *rubber bonded* turut berpengaruh terhadap kinerjanya (Zhao *et al.*, 2021).

Berdasarkan pengamatan dan pengalaman di lapangan, penggunaan *rubber spring* harus sering kali diganti. Penggantian disebabkan karena umur layanan *rubber spring* yang cukup singkat akibat rentan mengalami kerusakan, seperti retak permukaan, sobek, dan terlepasnya lapisan karet dari logam (Luo *et al.*, 2009). Produk karet khususnya yang berfungsi sebagai komponen penyerap getaran seperti *rubber spring* akan sangat rentan menerima beban dinamis yang berfluktuatif yang memicu terjadinya kerusakan akibat timbulnya retakan (Moon *et al.*, 2011). Munculnya retakan (*cracks*) pada permukaan produk karet yang terlihat dengan jelas dan terjadinya perubahan kekakuan seringkali digunakan sebagai indikator awal terjadinya kerusakan pada produk karet dan dapat dianggap sebagai akhir masa layanan produk karet tersebut (Wu *et al.*, 2006).

Pada saat produk karet digunakan pada waktu yang lama terutama pada kondisi terpapar oleh lingkungan luar maka karet rentan mengalami penuaan (*aging*) yang ditandai dengan karet menjadi keras namun rapuh sehingga karet kehilangan kemampuan dalam menahan redaman. Proses penuaan tidak hanya mempengaruhi sifat karet namun juga masa layanan produk karet (Woo & Park, 2011). Material karet pada produk *rubber spring* yang mengalami penurunan kualitas akibat penuaan dapat menyebabkan hilangnya elastisitas produk *rubber spring* tersebut. Pada akhirnya memerlukan penyesuaian tinggi *axle box* agar kereta dapat bekerja dengan baik dalam

menjamin keselamatan dan keamanan perjalanan (Suzuki *et al.*, 2006).

Analisis kegagalan sangat penting dalam prosedur desain untuk memastikan keamanan dan kehandalan komponen karet termasuk lapisan material komposit karet pada produk *rubber spring* (Li *et al.*, 2009). Analisis kegagalan suatu produk karet dapat diidentifikasi melalui teknik karakterisasi secara fisik, kimiawi, mekanis, dan morfologi permukaan (Su *et al.*, 2021). Penelitian ini bertujuan mengobservasi tipe kerusakan dan mengidentifikasi faktor eksternal maupun internal penyebab timbulnya kerusakan pada produk *rubber spring* yang telah digunakan (bekas) dengan menerapkan analisis kegagalan (*failure analysis*). Analisis kegagalan dilakukan dengan mengkaji visualisasi makroskopik dan karakteristik produk.

BAHAN DAN METODE

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk *rubber spring* bekas yang sudah tidak digunakan dalam

rangkaian kereta api. *Rubber spring* bekas didapatkan dari Gudang Balai Yasa Manggarai, PT Kereta Api Indonesia (KAI) Persero, DKI Jakarta. Terdapat tiga tipe produk *rubber spring* bekas yang digunakan dalam riset yang teridentifikasi menjadi *rubber spring* tipe K, tipe G dan tipe T, masing-masing tipe terdiri atas dua produk sehingga total terdapat enam produk yang dianalisis.

Analisis kegagalan produk *rubber spring* yang dikaji dalam riset ini menerapkan teknik karakterisasi sifat material komposit karet penyusun produk *rubber spring* secara kimiawi, fisik, mekanik, panas dan morfologi (visual). Parameter uji dalam karakterisasi sifat produk *rubber spring* disajikan secara lengkap pada Tabel 1. Selanjutnya berdasarkan data hasil karakterisasi sifat tersebut dilakukan analisis penyebab kerusakan pada produk *rubber spring* bekas. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Penguji Unit Riset Bogor Getas PT Riset Perkebunan Nusantara (LP-IDN-029).

Tabel 1. Parameter dan metode uji karakterisasi *rubber spring* bekas
Table 1. Parameter and procedure on characterization of used rubber spring

No	Sifat <i>property</i>	Parameter <i>Parameter</i>	Metode Uji <i>Procedure</i>
1	Morfologi	Makrostruktur atau visualisasi fisik	-
2	Kimia	Jenis polimer (ATR-FTIR)	-
3		Jenis plasticizer (ATR-FTIR)	-
4		Kadar polimer	ASTM D 297-15
5		Kadar karbon	ASTM D 297-15
6		Kadar abu	ASTM D 297-15
7		Kadar ekstrak aseton	ASTM D 297-15
8		kadar bahan pelunak	ASTM D 297-15
9		Derajat ikatan silang	Flory Rehner
10	Fisika	<i>Specific gravity</i>	ASTM D 297-15
11		Perubahan volume	ISO 1871
12		Ketahanan terhadap ozon	ISO 1431-1
13	Mekanik	Kekerasan	ISO 48
14		Sifat tarik (kuat tarik, perpanjangan putus)	ISO 37
15		Pampatan tetap 70±1°C, 24±2 jam	ISO 815
16		Ketahanan sobek	ISO 34
17	Panas	Ketahanan oksidasi (thermal aging)	ISO 188

Sebelum dilakukan analisis kimiawi dan pengujian sifat fisik dan mekanik, sampel produk dibersihkan terlebih dahulu dengan menggunakan sikat dan sabun agar tidak ada lagi kotoran yang menempel. Kotoran yang menempel dapat mengganggu observasi dan evaluasi. Kemudian pada produk *rubber spring* yang telah bersih dibelah menjadi empat bagian sebelum dilakukan pengujian atau inspeksi secara visual. Inspeksi visual secara makroskopik dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi kerusakan pada produk *rubber spring*. Tahapan berikutnya, lapisan material komposit karet yang menempel pada potongan produk *rubber spring* dipisahkan atau dilepaskan dari bagian logam. Lapisan material komposit karet yang telah dipisahkan kemudian dipotong menjadi specimen sampel uji sesuai parameter sifat kimia, fisika, mekanik, dan panas yang diuji. Penetapan parameter uji khususnya uji sifat fisika, mekanik dan panas didasarkan pada kondisi kinerja produk *rubber spring* pada saat digunakan pada lingkungan sebenarnya.

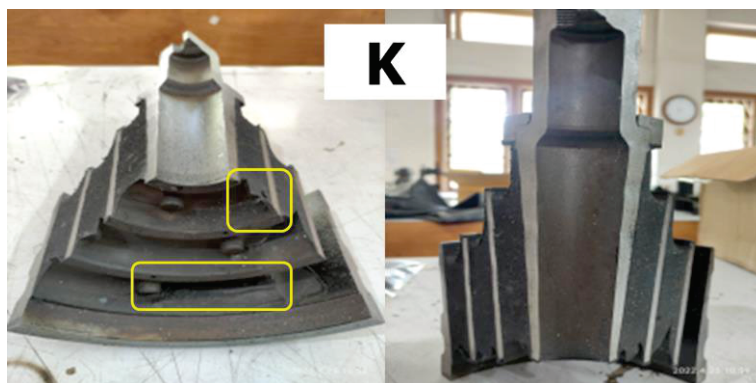
HASIL DAN PEMBAHASAN

Inspeksi Visual secara Makrostruktur

Objek potongan setiap tipe produk *rubber spring* yang diobservasi visualisasi fisiknya secara makroskopik diperlihatkan pada Gambar 1, 2, dan 3. Dari Gambar 1, inspeksi visual secara makroskopik terlihat bahwa masing-masing tipe produk *rubber spring* memiliki tipe kerusakan yang berbeda. Pada produk *rubber spring* Tipe K meskipun terlihat tidak mengalami

kerusakan berat namun tampak adanya retakan berupa garis horizontal pada permukaan produk tersebut. Selain itu pada bagian lekukan terdapat retakan yang cukup dalam. Jenis retakan seperti ini dapat diakibatkan karena faktor eksternal (lingkungan) yaitu termal oksidasi dan paparan ozon (Kamaruddin & Muhr, 2018). Pada permukaan karet juga terlihat adanya rusak sobekan namun tidak cukup besar hingga menyentuh bagian dalam karet. Sobek ringan ini diduga karena material komposit karet penyusun *rubber spring* tipe K memiliki sifat ketahanan sobek yang baik sehingga tidak mudah sobek pada saat mengalami beban dinamis. Dari pengamatan pada bagian dalam dan bawah potongan *rubber spring* terlihat jelas tidak tampak adanya kerusakan meskipun telah digunakan (bekas).

Sementara itu untuk produk *rubber spring* tipe G, dari inspeksi secara visual terlihat bahwa kerusakan didominasi di bagian karet yang menempel pada logam. Tipe kerusakan ini disebabkan karena perlakuan persiapan pada logam dan pengaplikasian perekat logam-karet yang kurang tepat serta produk mengalami kelelahan mekanis saat digunakan sehingga mengakibatkan terjadinya korosi di bagian logam dan menyebabkan terkelupasnya bagian karet (Aswin et al., 2025). Pembersihan logam dari karat dan minyak sangat dianjurkan sebelum dilakukan aplikasi perekat. Jika logam berkarat dan tidak dibersihkan, maka akan mengakibatkan penurunan daya rekat dan bahkan akan menyebabkan terkelupasnya karet dari logam (tambahkan dengan

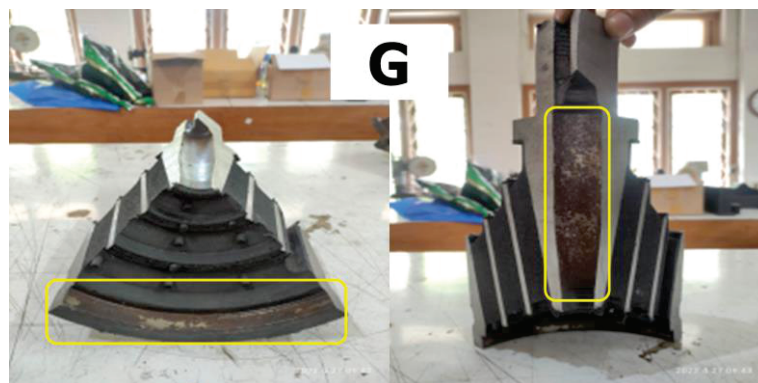


Gambar 1. Visualisasi fisik produk *rubber spring* bekas tipe K
Figure 1. Physical appearance of used rubber spring product type K

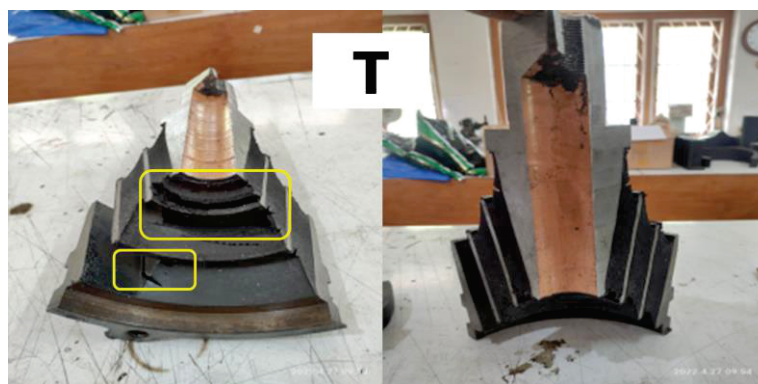
penelitian terdahulu untuk mendukung pernyataan ini). Lebih lanjut, pada bagian dalam dan bawah terlihat tidak ada kerusakan yang terjadi pada lapisan material komposit karet produk *rubber spring* tipe G. Namun terlihat jelas bahwa pada bagian logam yang paling luar telah mengalami korosi yang dimungkinkan karena kualitas logam yang kurang baik.

Hasil inspeksi kerusakan produk *rubber spring* tipe T menunjukkan bahwa jenis kerusakan yang muncul berupa retakan yang cukup dalam dan lebar. Retakan tersebut terjadi pada ketiga lapisan karet di tiap tingkat dan posisinya hampir sama. Pola kerusakan tersebut mengindikasikan bahwa retakan terjadi karena adanya getaran dinamis pada saat produk *rubber spring* mengalami beban dinamis. Retakan besar dimungkinkan diawali dengan adanya retakan-retakan kecil selanjutnya karena adanya getaran dinamis, karet tersebut mengalami sobekan

yang cukup dalam dan lebar. Retakan-retakan kecil dan halus dapat diakibatkan karena faktor lingkungan (oksidasi thermal atau paparan ozon). Selain kerusakan di bagian permukaan atas, pada produk *rubber spring* tipe T juga muncul kerusakan di bagian bawah, namun tidak terdeteksi kerusakan pada bagian dalam tepatnya diantara karet dan logam. Kerusakan pada bagian dalam-bawah diakibatkan dari retakan di bagian pinggir yang cukup dalam sehingga retakan tersebut menembus ke bagian bawah. Untuk kerusakan pada bagian atas, terdeteksi karena pengelupasan lapisan perekat antara karet dan logam. Pada produk *rubber spring* tipe T terjadi kerusakan lapisan material karet pada bagian luar bawah berupa retakan yang lebar dan dalam. Lebih lanjut, terlihat juga munculnya pengelupasan perekat antara karet dan logam yang diakibatkan karena karet pada produk *rubber spring* tipe T mengalami kelelahan mekanik.



Gambar 2. Visualisasi fisik produk *rubber spring* bekas tipe G
Figure 2. Physical appearance of used rubber spring product type G



Gambar 3. Visualisasi fisik produk *rubber spring* bekas tipe T
Figure 3. Physical appearance of used rubber spring product type T

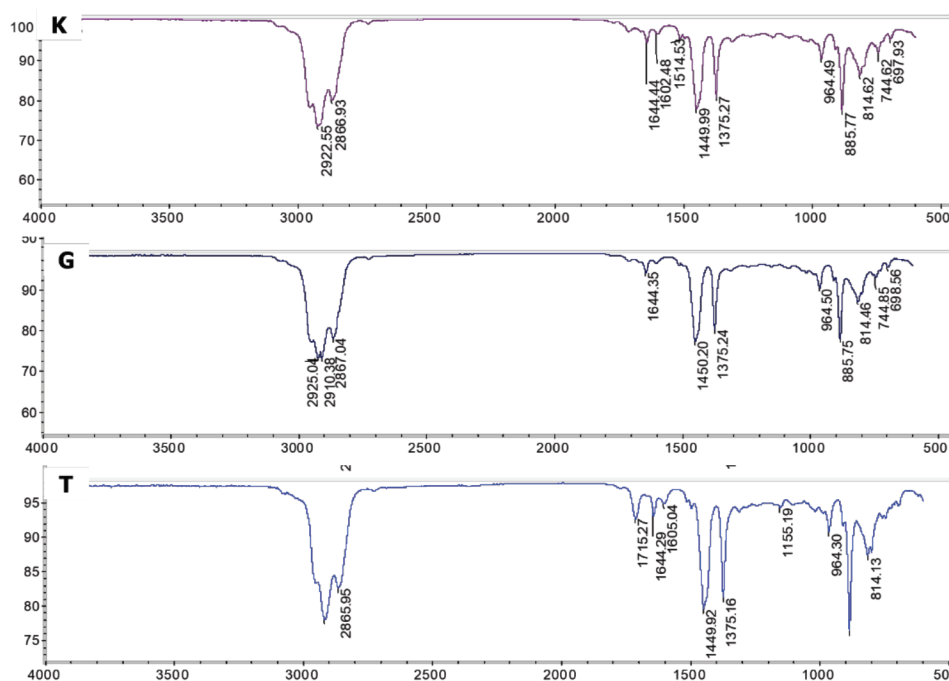
Karakterisasi Sifat Kimia

Karakterisasi sifat kimia dilakukan secara kualitatif untuk mengetahui jenis polimer dan jenis bahan pelunak, serta secara kuantitatif untuk mengetahui komposisi bahan penyusun komposit karet pada setiap produk *rubber spring* yang dikaji dalam riset. Hasil pengujian gugus fungsi khas pada komposit karet untuk mengetahui jenis polimer dan jenis bahan pengisi dengan alat ATR-FTIR ditampilkan pada Gambar 4 sebagai berikut.

Mengacu pada spektrum FTIR produk *rubber spring* seperti ditunjukkan pada Gambar 4 terlihat bahwa dari ketiga gambar spektrum FTIR dari masing-masing tipe produk *rubber spring* tersebut saling memiliki pola spektrum yang identik memiliki puncak serapan yang sama. Setelah dibandingkan dengan basis data spektrum polimer yang ada, dapat diketahui bahwa jenis polimer yang digunakan oleh semua sampel produk *rubber spring* yang diujikan adalah karet alam (*isoprene rubber*, IR). Gugus fungsi dari poliisoprena sebagai polimer utama penyusun karet alam dapat dideteksi dari puncak serapan pada bilangan gelombang sekitar 290 cm^{-1} , 1662 cm^{-1} , 1444 cm^{-1} , 1374 cm^{-1} dan 839 cm^{-1} . Area

terbaik untuk mengkonfirmasi struktur rantai molekul poliisoprena terjadi pada puncak serapan bilangan gelombang 2960 cm^{-1} (gugus C-H₃) dan 1444 cm^{-1} (gugus deformasi C-H) (Rahmah et al., 2019; Farida et al., 2019).

Spektrum FTIR produk *rubber spring* pada Gambar 4 juga digunakan untuk mengidentifikasi bahan pelunak yang digunakan dalam kompon karet *rubber spring*. Setelah dibandingkan dengan basis data spektrum bahan pelunak maka dapat diketahui bahwa jenis bahan pelunak yang digunakan adalah jenis minyak naftenik. Spektrum FTIR minyak naftenik dapat dikarakterisasi melalui serapan pada bilangan gelombang sekitar 2925 cm^{-1} (vibrasi ulur asimetris gugus -CH), 2857 cm^{-1} (vibrasi deformasi simetris gugus -CH₃), 1596 cm^{-1} (vibrasi ulur gugus cincin benzena), 1370 cm^{-1} (Vibrasi tekuk gugus =C-H), dan 1940 cm^{-1} (vibrasi ulur gugus C=C=C) (Pan et al., 2021). Minyak naftenik umum digunakan pada kompon karet berbasis karet alam selain minyak aromatik. Namun demikian, jenis naftenik memiliki keunggulan dari segi stabilitas terhadap perubahan suhu dan ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dibandingkan jenis aromatik.



Gambar 4. Spektrum FTIR produk *rubber spring* bekas
Figure 4. FTIR spectras of used *rubber spring* product

Komposisi material penyusun dari sebuah produk karet berpengaruh besar terhadap sifat fisika, mekanik, dan panas produk karet tersebut (Sisanth et al., 2017). Kadar material penyusun produk karet dapat diketahui melalui uji komposisi, yang meliputi uji kadar polimer, kadar karbon, kadar abu, dan kadar ekstrak aseton yang

jika keempat hasil uji dijumlahkan adalah 100%. Sebagai tambahan adalah kadar bahan pelunak, yang tidak dimasukkan sebagai komposisi penyusun 100% produk karet tersebut, karena nilainya merupakan bagian dari kadar ekstrak aseton. Hasil uji komposisi produk *rubber spring* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat kimia produk *rubber spring* bekas
Table 2. Chemical property of used rubber spring product

No	Parameter Parameter	Tipe rubber spring Rubber spring type		
		K	G	T
1	Jenis polimer	Karet alam	Karet alam	Karet alam
2	Jenis bahan pelunak	Naftenik	Naftenik	Naftenik
3	Kadar polimer, %	53,60	65,73	72,01
4	Kadar karbon, %	34,67	23,06	17,11
5	Kadar abu, %	6,53	4,23	5,01
6	Kadar ekstrak aseton, %	5,20	6,98	5,87
7	kadar bahan pelunak, %	1,42	2,34	2,79
8	Derajat ikatan silang, $\times 10^{-4}$ mol/cm ³	1,89	5,08	2,29

Berdasarkan hasil uji kadar polimer pada Tabel 2 terlihat bahwa kandungan polimer karet alam cukup mendominasi sebagai material utama penyusun produk *rubber spring* yang ditunjukkan dengan nilai kadar polimer pada kisaran 53,60 – 72,01%. Secara berurutan produk *rubber spring* yang memiliki kadar polimer rata-rata dari yang paling tinggi ke rendah ditunjukkan oleh tipe T sebesar 72,01%, kemudian diikuti oleh tipe G sebesar 65,73% dan terakhir tipe K sebesar 53,60%. Unsur karbon menjadi material penyusun komposisi produk *rubber spring* terbesar kedua setelah polimer karet alam, dengan kisaran kadar karbon antara 17,11 – 34,67%. *Rubber spring* tipe K memiliki kadar karbon tertinggi 34,67% kemudian tipe G sebesar 23,06%, dan 17,11% pada tipe T. Kadar karbon menggambarkan jumlah bahan pengisi penguat (*carbon black*) yang ditambahkan ke dalam formulasi kompon karet. Nilai kadar karbon yang semakin tinggi berarti semakin banyak *carbon black* yang ditambahkan ke dalam komposit karet. Sebagai akibatnya produk karet memiliki kekerasan dan kuat tarik yang tinggi sehingga lebih mampu menahan deformasi yang mengakibatkan kerusakan (Ismail et al., 2018).

Hasil pengujian kadar abu produk *rubber spring* berada pada kisaran 4,23 –

6,53%. Pengujian kadar abu dapat mengidentifikasi jumlah bahan pengisi inorganik dan bahan pengaktif tipe oksida logam (ZnO) yang ditambahkan ke dalam kompon karet. Tabel 2 menunjukkan bahwa kadar abu tertinggi dihasilkan oleh *rubber spring* tipe K, diikuti tipe T dan G, masing-masing sebesar 5,01% dan 4,23%. Kadar abu yang tinggi dalam produk karet dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik produk karet tersebut (Chukwu et al., 2019). Selanjutnya parameter penting lain dalam uji komposisi produk karet yang mempengaruhi kinerja produk karet adalah kadar ekstrak aseton. Kadar ekstrak aseton menggambarkan kandungan bahan non polimer (selain poliisoprena) seperti bahan pengaktif (asam lemak) dan bahan aditif lain yang larut dalam aseton misalnya bahan antioksidasi dan bahan pelunak (Xu et al., 2017). Kadar ekstrak aseton pada produk *rubber spring* sebesar 5,20% pada *rubber spring* tipe K, lalu 6,98% pada *rubber spring* tipe G, dan sebesar 5,87% untuk *rubber spring* tipe T. Kandungan bahan kimia karet yang tergambar dalam nilai kadar ekstrak aseton berpengaruh terhadap karakteristik produk karet termasuk kemampuan karet dalam menahan deformasi (Virag et al., 2024).

Nilai kadar ekstrak aseton berkaitan dengan nilai kadar bahan pelunak kompon karet. Kadar bahan pelunak produk *rubber spring* berada pada kisaran antara 1,13 – 3,00% seperti dirangkum pada Tabel 2. Diperlihatkan pada Tabel 2 bahwa secara berurutan produk *rubber spring* yang memiliki kadar bahan pelunak rata-rata dari yang paling tinggi ke rendah ditunjukkan oleh *rubber spring* tipe T sebesar 2,79%, kemudian tipe G sebesar 2,34% dan terakhir tipe K sebesar 1,42%. Jumlah bahan pelunak mempengaruhi derajat ikatan silang yang terbentuk pada saat vulkanisasi kompon karet (Kruzalak et al., 2025). Hasil pengujian *crosslink density* produk *rubber spring* berada pada kisaran antara $1,88 - 5,35 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$. Diperlihatkan pada Tabel 2, bahwa secara berurutan produk *rubber spring* yang memiliki derajat ikatan silang rata-rata dari yang paling tinggi ke rendah ditunjukkan oleh tipe G sebesar $5,08 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$, kemudian tipe T sebesar $2,29 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$ dan tipe K sebesar $1,89 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$. Kajian yang dilakukan oleh Li et al (2022) menyatakan dengan meningkatnya derajat ikatan silang produk karet hingga tercapai titik jenuh maka menghindarkan kerusakan produk karet akibat terputusnya rantai molekul karet.

Karakterisasi Sifat Fisika, Mekanik, dan Panas

Sifat fisika dan mekanik produk *rubber spring* dievaluasi dengan melakukan pengukuran pada parameter kekerasan, kuat tarik, perpanjangan putus, pampatan tetap, ketahanan sobek, specific gravity, dan ketahanan ozon. Untuk sifat thermal dievaluasi dengan melakukan pengujian parameter sifat fisika dan mekanik khususnya kekerasan, kuat tarik dan perpanjangan putus setelah sampel produk *rubber spring* diusakan (*aging*) pada kondisi suhu 70°C selama 168 jam. Tabel 3 merinci hasil pengujian sifat fisika, mekanik, dan panas dari produk *rubber spring* yang dikaji.

Hasil pengujian kekerasan produk *rubber spring* baik pada kondisi sebelum maupun setelah pengusangan disajikan secara lengkap pada Tabel 3. Dari Tabel 3, terlihat bahwa produk *rubber spring* tipe K memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tipe G dan T, dengan selisih 10 Shore A. Pada kondisi sebelum pengusangan kekerasan *rubber spring* tipe K

sebesar 67 Shore A, sedangkan tipe G dan tipe T sebesar 57 Shore A. Sementara pada kondisi setelah pengusangan, kekerasan produk *rubber spring* tipe K naik menjadi 68 Shore A, namun tidak terjadi perubahan kekerasan setelah pengusangan pada produk *rubber spring* tipe G dan T.

Sifat tarik pada produk *rubber spring* dievaluasi berdasarkan parameter kuat tarik dan perpanjangan putus baik pada kondisi sebelum maupun setelah pengusangan. Dari Tabel 3 terlihat bahwa nilai kuat tarik sebelum pengusangan tertinggi dihasilkan oleh *rubber spring* tipe G (23,6 MPa) diikuti dengan tipe T (23,3 MPa) dan tipe K (20,5 MPa). Sementara untuk nilai perpanjangan putus sebelum pengusangan yang tertinggi dihasilkan oleh *rubber spring* tipe T (374%) diikuti oleh tipe G (370%) dan tipe K (206%). Dari data tersebut dapat diketahui bahwa *rubber spring* tipe G dan T memiliki sifat tarik yang setara. Sementara tipe K menghasilkan sifat tarik yang paling rendah diantara ketiga produk *rubber spring*.

Pada kondisi setelah pengusangan terjadi perubahan karakter pada sifat tarik produk *rubber spring*. Penurunan kuat tarik terlihat pada *rubber spring* tipe K dan tipe T dengan perubahan terbesar dialami oleh *rubber spring* tipe T sebesar -11,16%. Perubahan kuat tarik *rubber spring* tipe K sebesar -10,73%. Sebaliknya, pada *rubber spring* tipe G tampak mengalami peningkatan kuat tarik setelah kondisi pengusangan dengan nilai perubahan mencapai +2,12%. Untuk parameter perpanjangan putus, *rubber spring* tipe T secara konsisten menunjukkan kecenderungan penurunan nilai dengan perubahan yang cukup tajam mencapai -10,52%. Penurunan nilai perpanjangan putus setelah pengusangan juga tampak pada *rubber spring* tipe G dengan nilai perubahan sebesar -9,91%. Kecenderungan yang berbeda terlihat pada *rubber spring* tipe K yang mengalami peningkatan perpanjangan putus setelah pengusangan dengan nilai perubahan +5,32%.

Dari Tabel 3 juga terlihat bahwa *rubber spring* tipe K memiliki nilai ketahanan sobek tertinggi mencapai 11,457 MPa, diikuti dengan tipe G dan tipe T masing-masing sebesar 3,247 MPa dan 2,33 MPa. Pengujian pampatan tetap dilakukan pada kondisi suhu 70°C selama 24 jam. Hasil pengujian pampatan tetap produk *rubber spring* disajikan pada Tabel 3. Secara berurutan produk *rubber spring* yang memiliki nilai

pampatan tetap dari yang paling rendah ke tinggi ditunjukkan oleh tipe T sebesar 8,37%, kemudian tipe G sebesar 11,96% dan terakhir tipe K sebesar 12,79%. Parameter sifat fisika selanjutnya yang dikarakterisasi untuk mengevaluasi kualitas produk *rubber spring* adalah *specific gravity*. *Rubber spring* tipe K memiliki nilai *specific gravity* terbesar yang mencapai 1,203 g/cm³. Selanjutnya *specific gravity rubber spring* tipe G dan tipe T masing-masing sebesar 1,077 g/cm³ dan

1,043 g/cm³. Nilai hasil pengujian perubahan volume menunjukkan bahwa *rubber spring* tipe K memiliki sifat ketahanan terhadap pelarut yang paling baik karena memiliki nilai perubahan volume yang terkecil yaitu sebesar 26,71%. Sementara sifat ketahanan terhadap pelarut produk *rubber spring* tipe G dan T terlihat berdekatan, masing-masing sebesar 37,03% dan 33,0%.

Tabel 3. Sifat fisika, mekanik, dan panas produk *rubber spring* bekas

Table 3. Physical, mechanical, and thermal properties of used rubber spring product

No	Parameter Parameter	Tipe rubber spring Rubber spring type		
		K	G	T
1	Ketahanan sobek, MPa	11,46	3,25	2,33
2	Pampatan tetap, %	12,79	11,96	8,37
3	Specific gravity, g/cm ³	1,203	1,077	1,043
4	Perubahan volume	26,71	37,03	33,02
5	Ketahanan ozon (kualitatif)	Retak < 48 jam	Retak < 72 jam	Retak < 96 jam
Sebelum pengusangan Before aging				
6	Kekerasan, Shore A	67	57	57
7	Kuat tarik, MPa	20,5	23,6	23,3
8	Perpanjangan putus, %	206,08	369,83	374,31
Setelah pengusangan After aging				
9	Kekerasan, Shore A	68	57	57
10	Kuat tarik, MPa	18,3	24,1	20,7
11	Perpanjangan putus, %	217,04	333,19	334,94



Gambar 5. Retak permukaan pada produk *rubber spring*

Figure 5. Surface cracks of used rubber spring product

Timbulnya retakan akibat paparan ozon pada permukaan karet berpotensi besar menyebabkan perubahan mikrostruktur polimer karet yang dapat berakibat kegagalan fungsi produk karet (Kamarrudin and Muhr, 2018; Wang et al., 2022). Hasil pengujian ketahanan ozon produk *rubber spring* disajikan secara kualitatif seperti ditampilkan pada Gambar 5. Produk *rubber spring* yang tahan terhadap paparan ozon diindikasikan dengan tidak timbulnya retakan pada permukaan produk tersebut. Dari hasil pengujian ketahanan ozon yang dilakukan pada kondisi suhu 40°C selama 96 jam, konsentrasi ozon 25 ppm dan regangan 30%, diketahui bahwa produk *rubber spring* tipe K ternyata mengalami retakan (*cracks*) sebelum 48 jam. Selanjutnya, *rubber spring* tipe G menunjukkan performa yang lebih baik, dengan terjadinya retakan (*cracks*) pada waktu sebelum 72 jam. Sementara *rubber spring* tipe T memiliki sifat ketahanan ozon yang terbaik dengan timbulnya retakan (*cracks*) pada waktu kurang dari 96 jam.

Kerusakan produk karet berupa retak permukaan akibat serangan ozon dapat terjadi mengikuti mekanisme yang dijelaskan oleh Iwas et al (2017) sebagai berikut polimer karet bereaksi dengan ozon membentuk moolozonida sebagai zat antara yang kemudian diubah menjadi gugus karbonil dan gugus karbonil dioksida. Gugus karbonil dioksida selanjutnya bereaksi dengan gugus karbonil dan gugus karbonil dioksida yang lain menghasilkan ozonida, homopolymer, dan polioksana. Serangkaian reaksi tersebut berlangsung di permukaan produk karet (lapisan ozonida) sebagai lokasi terjadinya perambatan retak. Sementara mekanisme kerusakan produk karet akibat panas (*thermal oxidative aging*) melibatkan pembentukan ikatan silang antara molekul karet dan diikuti leh pemutusan rantai molekul karet pada kondisi pengusangan lanjut (Xiao et al., 2023).

Resume Identifikasi Tipe Kerusakan Produk *Rubber Spring*

Mengacu pada hasil pengujian dan karakterisasi berbagai sifat produk *rubber spring* seperti diuraikan di atas, maka dapat diketahui tipe dan penyebab kerusakan pada setiap tipe produk *rubber spring* seperti dijelaskan sebagai berikut:

***Rubber Spring* Tipe K**

Secara visual terlihat pada bagian permukaan produk *rubber spring* tipe K muncul retakan-retakan halus horizontal atau tegak lurus terhadap beban. Pola retakan tersebut sesuai dengan hasil pengujian ketahanan ozon dimana retakan yang terjadi akan tegak lurus terhadap arah regangan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa munculnya retakan tersebut diakibatkan karena paparan ozon dari lingkungan di sekitar produk *rubber spring* diaplikasikan (Wang et al., 2022). Retakan-retakan halus ini akan mengalami retakan yang cukup dalam karena adanya pergerakan dinamis secara vertikal dari produk ini pada saat pemakaian. Namun adanya retakan-retakan tersebut tidak mengakibatkan kerusakan yang cukup fatal karena produk ini memiliki karet dengan sifat mekanik yang baik terutama sifat ketahanan sobek yang relatif tinggi. Kekerasan dan kekuatan sobek *rubber spring* tipe K lebih tinggi dibanding produk *rubber spring* tipe lain karena mengandung bahan pengisi *carbon black* yang lebih banyak. *Carbon black* pada formulasi kompon karet berfungsi untuk menguatkan karet sehingga menghasilkan kekerasan dan kekuatan sobek yang lebih tinggi dibanding produk lainnya. Namun sifat kuat tarik dan perpanjangan putus dari produk *rubber spring* tipe K relatif lebih rendah dibandingkan dengan merk lainnya. Hal ini dikarenakan adanya bahan pengisi dapat menurunkan perpanjangan putus dari karet dan menurunkan derajat ikatan silang. Namun demikian, karena pada saat pemakaian, produk ini tidak memerlukan regangan yang cukup tinggi, maka produk ini tidak mengalami kegagalan.

***Rubber Spring* Tipe G**

Inspeksi visual pada produk *rubber spring* tipe G menunjukkan bahwa produk ini mengalami kerusakan terkelupasnya di bagian rekatan antara karet dan logam. Hal ini dikarenakan beberapa faktor, yaitu karena penggunaan perekat yang kurang tepat, penggunaan logam yang mudah korosi dan karena persiapan logam sebelum aplikasi perekat yang kurang tepat. Dari sisi kualitas karet, produk ini memiliki ketahanan ozon yang lebih baik dibandingkan dengan tipe K namun jika dibandingkan dengan tipe T lebih tidak

tahan ozon. Akan tetapi secara visual tidak terdeteksi adanya retakan-retakan akibat dari adanya paparan ozon. Sifat mekanik produk *rubber spring* tipe G hampir sama dengan produk tipe T dengan kekerasan dan sifat kuat tarik yang sama. Namun, sifat kekuatan sobeknya lebih tinggi dibandingkan dengan produk tipe T dan lebih rendah dibandingkan dengan produk tipe K. Hal ini dikarenakan produk tipe G memiliki derajat ikatan silang yang lebih tinggi dibandingkan produk lainnya. Selain itu produk tipe G juga memiliki kadar karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan produk tipe T. Kerusakan yang terjadi pada karet produk *rubber spring* tipe G tidak terlihat secara visual, namun kerusakan yang terlihat jelas pada logam yang telah mengalami korosi hingga menimbulkan karet di bagian permukaan logam sehingga menyebabkan terkelupasnya karet dari logam (Ismail & Harun, 2013).

Rubber Spring Tipe T

Tipe kerusakan pada produk *rubber spring* tipe T terlihat jelas secara visual, berupa retakan yang cukup dalam dan lebar. Retakan-retakan terjadi pada setiap lapisan yang terdapat pada produk *rubber spring* tipe T. Retakan-retakan tersebut diakibatkan karena produk tipe T sangat tidak tahan terhadap robekan, ditunjukkan dengan kekuatan sobek yang paling rendah dibandingkan dengan produk merk lainnya. Robekan terjadi karena adanya pergerakan dinamis secara vertikal yang terjadi pada saat produk *rubber spring* diaplikasikan di kereta api. Rendahnya kekuatan sobek produk tipe T disebabkan karena produk ini mengandung paling sedikit bahan pengisi *carbon black* (kadar karbon rendah) yang bersifat menguatkan (sumber referensi/sitasi dari penelitian terdahulu bahwa carbon/pengisi dapat memberikan sifat kompon karet). Kerusakan tidak hanya terdeteksi di bagian permukaan, namun terindikasi juga di bagian bawah dan bagian pinggir. Dari retakan-retakan yang ada terlihat jelas bahwa kerusakan tersebut terjadi karena pergerakan dinamis bukan hanya karena faktor lingkungan terutama ozon (Rong et al., 2021). Ketahanan ozon produk *rubber spring* tipe T jauh lebih baik dibandingkan dengan produk *rubber spring* tipe lainnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan sebagaimana diuraikan di atas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa produk *rubber spring* dapat mengalami kerusakan akibat faktor eksternal karena pengaruh lingkungan seperti paparan panas, oksigen, ozon dan beban dinamis. Selain itu, kerusakan produk *rubber spring* dapat juga disebabkan oleh faktor internal yang dipengaruhi oleh penetapan komposisi bahan penyusun kompon karet dan perlakuan komponen logam-karet pada saat proses manufaktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh pengguna produk *rubber spring* sebagai acuan dalam proses pengadaan dan pada saat penggunaan produk *rubber spring* secara langsung pada kondisi sebenarnya, sehingga dapat meminimalisasi risiko terjadinya kerusakan yang berakibat memperpanjang umur pakai produk *rubber spring*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memberikan penghargaan tinggi dan mengucapkan terima kasih kepada PT Kereta Api Indonesia (KAI) Persero atas dukungan dalam pendanaan riset dan penyediaan material riset. Penulis turut mengapresiasi fasilitasi yang diberikan oleh PT Bukaka Forging Industries dalam tahapan persiapan contoh uji dalam kegiatan riset ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aswin, G., Prakash, V., Subasree, N., Arul, V., Paramasivam, P., Gnanasekaran, L., Santhamoorthy, M., & Radhakrishnan, K. (2025). Recent advances in corrosion behaviour and interfacial failure of rubber-metal composite. *Materials Degradation (Article in press)*. <https://doi.org/10.1038/s41529-025-00721-4>
- Badan Pusat Statistik. (2025). Jumlah Penumpang Kereta Api. Badan Pusat Statistik (BPS), Jakarta: Indonesia
- Banic, M., Stamenkovic, D., Miltenovic, A., Jovanovic, D., & Tica, M. (2020). Procedure for the selection of rubber

- compound in rubber-metal springs for vibration isolation. *Polymers*, 12, 1737.
- Chukwu, M.N., Ekhatior, I., & Ekebafé, L.O. (2019). Effect of zinc oxide level as activator on the mechanical properties of natural rubber composite. *Nigerian Journal of Technology*, 38(3), 675-679.
- Farida, E., Bukit, N., Ginting, E.M., & Bukit, B.F. (2019). The effect of carbob black composition in natural rubber compound. *Case Studies in Thermal Engineering*, 16, 100566.
- Ismail, I., and Harun, K. (2013). Evaluation of rubber/mild steel bonds failure after exposure in marine environment. *International Journal of Chemical Engineering and Application*, 4(3), 119-123.
- Ismail, R., Mahadi, Z.A., & Ishak, I.S. (2018). The effect of carbon black filler to the mechanical properties of natural rubber as base isolation system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012133.
- Iwase, Y., Shindo, T., Kondo, H., Ohtake, Y., & Kawahara, S. (2017). Ozone degradation of vulcanized isoprene rubber as a function of humidity. *Polymer Degradation and Stability*, 142, 209-216.
- Kamaruddin, S., & Muhr, A.H. (2018). Investigation of ozone cracking on natural rubber. *Journal of Rubber Research*, 21, 73-98.
- Kruzalak, J., Dzukanova, M., Kvasnicakova, A., Preto, J., Hronkovic, J., & Hudec, I. (2025). Influence of plasticizer on cross-linking process, morphology, and properties of lignosulfonate-filled rubber compounds. *Polymers*, 17(3), 393.
- Li, Q., Zhao, J.C., & Zhao, B. (2009). Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 16(7), 2304-2310.
- Li, K., Li, Z., Liu, J., Wen, S., Liu, L., & Zhang, L. (2022). Designing the cross-linked network to tailor the mechanical fracture of elastomeric polymer materials. *Polymer*, 252, 124931.
- Luo, R.K., Mortel, W.J., & Wu, X.P. (2009). Fatigue failure investigation on anti-vibration springs. *Engineering Failure Analysis*, 16(5), 1366-1378.
- Moon, S.I., Cho, I.J., Woo, C.S., & Kim, W.D. (2011). Study on determination of durability analysis process and fatigue damage parameter fo rubber component. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25, 1159-1165.
- Pan, J., Liao, G., Su, R., Chen, S., Wang, Z., Chen, L., Chen, L., Wang, X., & Guo, Y. (2021). 13C solid-state NMR analysis of the chemical structure in petroleum coke during idealized in situ combustion conditions. *ACS Omega*, 6(23), 15479-15485.
- Rahmah, M., Khusyairi, A.R.A., Khairunnisya, H.N., & Nurbalqis. (2019). Oven agung versus UV ageing properties of natural rubber cup lump/EPDM rubber blend with mangosteen powder (MPP) as natural antioxidant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 548, 012014.
- Rong, J., Yang, J., Huang, Y., Luo, W., & Hu, X. (2021). Characteristic tearing energy and fatigue crack propagation of filled natural rubber. *Polymers*, 13(22), 3891.
- Sisanth, K.S., Thomas, M.G., Abraham, J., & Thomas, S. (2017). *General Introduction to Rubber Compounding*. Progress in Rubber Nanocomposite. Woodhead Publishing, Elsevier.
- Su, C., Pan, A.X., Gong, Y., & Yang, Z.G. (2021). Failure analysis on rubber universal spherical joints for rail vehicles. *Engineering Failure Analysis*, 126, 105453.

- Suzuki, A., Mamada, S., Hansaka, M., Shimomura, T., & Ito, M. (2006). Development of creep decreased axlebox suspension of cone-shaped multi-layer rubberspring. *Quarterly Report of RTRI*, 47(3), 125-131.
- Virag, L., Egedy, A., Varga, C., Erdos, G., Berezvai, S., Kovacs, L., & Ulbert, Z. (2024). Determination of the most significant rubber components influencing the hardness of natural rubber (NR) using various statistical methods. *Heliyon*, 10(3), e25170.
- Wang, X., Pan, H., Yang, K., & Zhang, P. (2022). Cracking, structural, and mechanical property changes of SIBR and related elastomers during the ozone aging process. *Polymer Degradation and Stability*, 195, 109774.
- Woo, C.S., & Park, H.S. (2011). Useful lifetime prediction of rubber component. *Engineering Failure Analysis*, 18(7), 1645-1651.
- Wu, W., Cook, P., Luo, R., and Mortel, W. (2006). Fatigue life investigation in the design process of metacone rubber springs. *Elastomer and Components, Servis Life Prediction – Progress and Challenges*, 195-207. Woodhead Publishing.
- Xiao, L. (2023). Study on aging mechanism of special neoprene in hot air. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1171, 012038.
- Xu, T., Jia, Z., Wu, L., Chen, Y., Luo, Y., Jia, D., & Peng, Z. (2017). Effect of acetone extract from natural rubber on the structure and interface interaction in NR/CB composites. *RSC Adv*, 7, 26458-26467.
- Zhang, D., & Zhu, S. (2017). A fractional derivative model for rubber spring of primary suspension in railway vehicle dynamics. *ASME Journal of Risk Uncertainty Part B*, 3(3), 030908.
- Zhao, R.G., Yang, X.Q., Huang, Y.J., Liu, W.H., Zhou, X., Liu, Y.L., and Ye, D.H. (2021). Optimization design and fatigue life analysis of damping conical rubber spring for rail vehicle. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1st Edition, CRC Press.

