

TUGAS AKHIR
PEMANFAATAN ARANG HASIL PIROLISIS LIMBAH
VULKANISAT KARET (*SCRAP*) SEBAGAI *FILLER* PADA
KOMPON *TREAD* BAN RADIAL DI PT. X KENDAL



Disusun Oleh :
MUHAMMAD IKHSAN
NIM. 2203016

KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA
BADAN PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA INDUSTRI
POLITEKNIK ATK YOGYAKARTA

2025

PENGESAHAN JUDUL

**PEMANFAATAN ARANG HASIL PIROLISIS LIMBAH VULKANISAT
KARET (*SCRAP*) SEBAGAI *FILLER* PADA KOMPON *TREAD* BAN
RADIAL DI PT. X KENDAL**

Disusun oleh:
MUHAMMAD IKHSAN
NIM. 2203016

Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik

Pembimbing I,

Latifah Listyalina, M.Eng
NIP. 19910602 202202 2 001

Pembimbing II,

Risang Pujiyanto, S.H., M.A.P
NIP. 198411302009011009

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir dan dinyatakan memenuhi salah satu syarat yang diperlukan untuk mendapatkan Derajat Ahli Madya Diploma III (D3) Politeknik ATK Yogyakarta
Tanggal: 28 Juli 2025

TIM PENGUJI
Ketua

Midarto Dwi Wibowo, S.T., M.T
NIP. 19820922200803 1002
Anggota

Penguji II,

Latifah Listyalina, M.Eng
NIP. 19910602 202202 2 001

Penguji III,

Uma Fadzilia Arifin, M.T
NIP. 199312162019012002

Yogyakarta, 28 Juli 2025
Direktur Politeknik ATK Yogyakarta



Dr. Sonny Taufan, S.H., M.H.
NIP. 19840226 201012 1 002

PERSEMBAHAN

Puji Syukur selalu terpanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan Karunia-Nya, sholawat serta salam tercurahkan kepada Rasulullah SAW. Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya, Bapak Slamet dan Ibu Heni, serta adik kandung saya satu-satunya Amelinda yang selalu memberikan dukungan baik secara moral maupun materi, doa, serta semangat selama saya menyusun Tugas Akhir ini.
2. Terimakasih kepada Nida Luthfiyah Nurrahmah selalu memberikan dukungan, semangat, serta menemani saya dalam menyusun Tugas Akhir ini.
3. Ibu Latifah Listyalina, M. Eng., dan Bapak Risang Pujianto, S.H., M.A.P., selaku pembimbing Tugas Akhir yang bersedia memberikan bimbingan, saran, serta masukan dalam penulisan Tugas Akhir ini sampai selesai.
4. Bapak/Ibu dosen prodi TPKP yang membantu serta memberikan ilmu selama masa perkuliahan.
5. Semua teman TPKP seperjuangan saya selama melaksanakan magang di PT. X Kendal yang selalu membantu selama magang berlangsung.
6. Diri sendiri yang selalu semangat, mampu untuk melawan rasa malas, rasa capek, dan mau keluar dari zona nyaman.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “PEMANFAATAN ARANG HASIL PIROLISIS LIMBAH VULKANISAT KARET (*SCRAP*) SEBAGAI *FILLER* PADA KOMPON *TREAD* BAN RADIAL DI PT. X KENDAL”. Tugas akhir ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Pendidikan Diploma III (D3) Politeknik ATK Yogyakarta. Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari dorongan dan dukungan dari berbagai pihak, maka dalam kesempatan ini saya ucapkan Terimakasih kepada:

1. Dr. Sonny Taufan, S.H., M.H., selaku Direktur Politeknik ATK Yogyakarta.
2. Yuli Suwarno, S.T., M.Sc., selaku Pembantu Direktur I Politeknik ATK Yogyakarta.
3. Dr. Wisnu Pambudi, M. Sc., selaku Ketua Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik Politeknik ATK Yogyakarta.
4. Diana Ross Arief, M.A., selaku Dosen Pembimbing Akademik
5. Latifah Listyalina, M. Eng., dan Bapak Risang Pujianto, S.H., M.A.P., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
6. Pimpinan, pembimbing lapangan, staff, dan pegawai di PT. X Kendal, yang telah memberikan kesempatan magang dan juga atas kerja sama, ilmu, serta pengalaman yang telah diberikan.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak, terutama bagi pembaca dan pada industri pembuatan produk plastik.

Kendal, 06 April 2025

Penulis



Muhammad Ikhsan

DAFTAR ISI

PENGESAHAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
INTISARI	x
ABSTRACT	xi
BAB I	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Permasalahan	3
C. Tujuan Tugas Akhir	3
D. Manfaat Tugas Akhir	4
BAB II	5
A. Limbah Industri Ban dan Permasalahannya	5
B. Vulkanisat Karet	9
C. Teknologi Pirolisis Pada Limbah Karet.....	12
D. Filler dalam Kompon Karet	19
E. Studi Terdahulu Terkait Daur Ulang dan Pemanfaatan Limbah Karet.....	22
BAB III	30
A. Lokasi dan Waktu	30
A. Metode Pelaksanaan Tugas Akhir.....	31
B. Materi Pelaksanaan Tugas Akhir	33
BAB IV	54
A. Pengaruh Filler Arang Hasil Pirolisis Terhadap Kemampuan Proses dan Sifat Fisik Kompon Karet	55
B. Pengaruh Filler Arang Pirolisis Terhadap Sifat Mekanik Kompon Karet	68
BAB V	82
A. Kesimpulan.....	82

B. Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	85



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Review Jurnal	25
Tabel 2. Alat Penelitian	34
Tabel 3. Formulasi Kompon Karet	42
Tabel 4. Hasil Pengujian Sifat Fisik	55
Tabel 5. Hasil Pengujian Sifat Mekanik	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Limbah Vulkanisat Karet	6
Gambar 2. Limbah Bahan Kimia	6
Gambar 3. Limbah Cair	7
Gambar 4. Limbah Kompon Mati.....	8
Gambar 5. Proses Pirolisis	13
Gambar 6. Jalur Reaksi pirolisis primer (M; monomer; MW: molecular weight)	14
Gambar 7. Skema Kerja Percobaan Pembuatan Kompon Tread Ban Radial dengan Filler Arang Hasil Pirolisis	37
Gambar 8. Limbah Rheologi dan Scrap.....	38
Gambar 9. Limbah di dalam reaktor.....	39
Gambar 10. Proses Pirolisis Sederhana	39
Gambar 11. Arang hasil pirolisis	40
Gambar 12. Arang hasil pirolisis yang sudah di saring dengan saringan 400 mesh.....	41
Gambar 13. Proses Pembuatan Kompon FM-EH012	43
Gambar 14. Sampel Kompon Karet untuk Pengujian Sifat Fisik.....	44
Gambar 15. Proses Pengujian MV (Mooney Viscosity).....	45
Gambar 16. Proses Pengujian SP.Gr (Specific Gravity).....	46
Gambar 17. Proses Pengujian T10 (Time to 10% Cure).....	47
Gambar 18. Sampel Uji HS (Hardness Shore A).....	49
Gambar 19. Proses Pengujian HS (Hardness Shore A)	49
Gambar 20. Proses Pengujian Keausan (Abrasion Resistance).....	50
Gambar 21. Spesimen Dumbbell Die C.....	51
Gambar 22. Sampel Die C	51
Gambar 23. Proses Pengujian Kuat tarik (Tensile Strength)	52
Gambar 24. Diagram Hasil Pengujian MV (Mooney Viscosity).....	56
Gambar 25. Diagram Hasil Pengujian SP.Gr (Specific Gravity).....	58
Gambar 26. Diagram Hasil Pengujian T10 (Time to 10% Cure)	61
Gambar 27. Diagram Hasil Pengujian T90 (Time to 90% Cure).....	63
Gambar 28. Diagram Hasil Pengujian MH (Maximum Torque)	66
Gambar 29. Diagram Hasil Pengujian HS (Hardness Shore A)	69
Gambar 30. Diagram Hasil Pengujian Keausan (Abrasion Resistance).....	73

Gambar 31. Diagram Pengujian Kuat Tarik (Tensile Strength).....75

Gambar 32. Diagram Pengujian Elongasi (Elongation at Break).....78



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil pengujian <i>Tensile Strength</i> dan <i>Elongation at Break</i>	94
Lampiran 2. Hasil pengujian <i>Abrasion Resistance</i>	95
Lampiran 3. Lembar kerja harian magang	96
Lampiran 4. Surat keterangan magang.....	104

INTISARI

Produksi ban yang terus meningkat di Indonesia menyebabkan akumulasi limbah karet tervulkanisasi yang sulit terurai secara alami. Penelitian ini menawarkan alternatif pemanfaatan limbah karet scrap dari PT. X Kendal melalui teknologi pirolisis untuk menghasilkan arang karbon hitam sebagai filler dalam kompon karet. Arang pirolisis digunakan sebagai substitusi filler dalam formulasi kompon karet dengan variasi 0, 5, 10, dan 15 phr, kemudian diuji sifat fisik (Mooney Viscosity, Specific Gravity, Torque Max, T10, T90) dan sifat mekanik (Hardness Shore A, Abrasion Resistance, Tensile Strength, dan Elongation at Break). Hasil menunjukkan peningkatan viskositas dari 55 ke 56, massa jenis dari 1,11 ke 1,14, dan kekerasan dari 70 ke 75 Shore A, namun menurunkan kuat tarik (27,74 menjadi 19,91 N/mm²), elongasi putus (612% menjadi 443%), serta meningkatkan abrasi (108,4 menjadi 148,33 mm³). Oleh karena itu, penggunaan filler arang pirolisis direkomendasikan maksimal 10 phr untuk menjaga performa fisik dan 5 phr untuk menjaga performa mekanik kompon. Sebagai solusi lanjutan, disarankan perlakuan awal seperti perendaman dalam larutan NaCl serta modifikasi formulasi untuk meningkatkan efektivitas filler. Penelitian ini menunjukkan bahwa arang pirolisis memiliki potensi sebagai filler alternatif yang ramah lingkungan, terutama untuk aplikasi sekunder dalam industri pengolahan karet.

Kata Kunci : *Limbah Karet, Pirolisis, Filler, Kompon Karet, PT. X Kendal.*

ABSTRACT

The increasing tire production in Indonesia has led to the accumulation of vulcanized rubber waste that is difficult to decompose naturally. This research offers an alternative utilization of scrap rubber waste from PT. X Kendal through pyrolysis technology to produce carbon black char as a filler in rubber compounds. The pyrolysis char is used as a filler substitute in rubber compound formulations with variations of 0, 5, 10, and 15 phr, and then tested for physical properties (Mooney Viscosity, Specific Gravity, Torque Max, T10, T90) and mechanical properties (Hardness Shore A, Abrasion Resistance, Tensile Strength, and Elongation at Break). The results show an increase in viscosity from 55 to 56, specific gravity from 1.11 to 1.14, and hardness from 70 to 75 Shore A, but a decrease in tensile strength (27.74 to 19.91 N/mm²), elongation at break (612% to 443%), and an increase in abrasion (108.4 to 148.33 mm³). Therefore, the use of pyrolysis char filler is recommended to be maximally 10 phr to maintain physical performance and 5 phr to maintain mechanical performance of the compound. As a further solution, initial treatment such as immersion in NaCl solution and formulation modification are suggested to increase the effectiveness of the filler. This research shows that pyrolysis char has potential as an environmentally friendly alternative filler, especially for secondary applications in the rubber processing industry.

Keyword : Rubber Waste, Pyrolysis, Filler, Rubber Compound, PT. XKendal.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan industri otomotif yang pesat membuat setiap komponen-komponen penting yang diperlukan pada setiap pembuatan automotif diproduksi secara massal dan berlimpah. Salah satu komponen penting dalam kendaraan adalah ban (Deviyani & Mudra, 2024). Indonesia terdapat 14 industri ban dengan skala nasional yang mampu memasok kebutuhan ban nasional. Industri ban yang ada di Indonesia telah mampu memenuhi kebutuhan ban nasional dengan berbagai tipe. Ban mobil dengan berbagai ukuran dan ban peralatan berat telah dapat dipenuhi. Kapasitas produksi seluruh industri di Indonesia mencapai 77 juta ban mobil, truk, dan bus serta 64 juta ban kendaraan roda dua. Selain mencukupi kebutuhan ban nasional, sebagian industri nasional telah mampu memenuhi kebutuhan ban negara lain seperti Amerika Serikat, Jepang, Asia, Australia dan Eropa (Biro Humas, 2016).

Peningkatan produksi ban kendaraan turut menimbulkan permasalahan baru berupa limbah karet. Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), sampah di Indonesia mencapai 33,6 juta ton pada tahun 2024. Dari jumlah tersebut, sampah yang berasal dari karet dan kulit menyumbang sekitar 2,53% yang setara dengan sekitar 851.622 ton/tahun. Menurut Alit & Mara (2025) Limbah karet menjadi masalah lingkungan karena sulit terurai dan dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Pembakaran limbah karet dan plastik umumnya dilarang karena dapat menimbulkan polusi udara, sedangkan penguburan

limbah tersebut berisiko mencemari lahan di tempat pembuangan akhir. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Untuk mengurangi limbah yang dihasilkan oleh pabrik manufaktur ban, sejumlah solusi telah dikembangkan oleh para peneliti, antara lain mencampurkan limbah karet ke dalam aspal (Gunawan, Abdillah, & Halimatusadiyah, 2022), menggunakannya sebagai isian beton (Raafidiani *et al.*, 2022), atau mengolahnya menjadi bahan pembuat batako (Iduwin *et al.*, 2023). Pemanfaatan lainnya adalah menjadikan limbah karet sebagai bahan bakar melalui metode pirolisis (Abdallah *et al.*, 2020). Di antara berbagai metode tersebut, pirolisis dinilai sebagai solusi yang paling relevan dan berpotensi untuk diterapkan langsung dalam skala industri manufaktur ban.

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia bahan organik yang terjadi akibat pemanasan pada suhu tinggi dengan sedikit atau tanpa kehadiran oksigen, serta tanpa melibatkan reaksi kimia lainnya, di mana proses ini menghasilkan tiga produk utama, yaitu arang, minyak pirolisis, dan gas (Azizah, Suropto, & Subekti, 2023). Di antara ketiga produk tersebut, residu arang menarik perhatian karena memiliki karakteristik morfologi, luas permukaan, dan struktur karbon pirolisis (*Pyrolytic Carbon Black/PCB*) yang menyerupai karbon hitam jenis N326, sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan kembali dalam industri ban (Zhang *et al.*, 2018). Berdasarkan karakteristik tersebut, arang hasil pirolisis berpotensi digunakan sebagai *filler* alternatif dalam formulasi kompon karet, baik secara parsial maupun penuh, menggantikan penggunaan karbon hitam

konvensional. Dengan demikian, pemanfaatan arang pirolisis tidak hanya berkontribusi dalam mengurangi limbah padat, tetapi juga meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam proses produksi kompon karet. Oleh karena itu, tugas akhir ini dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi limbah vulkanisat karet dengan memanfaatkannya sebagai *filler* alternatif melalui proses pirolisis dalam pembuatan kompon *tread* ban radial.

B. Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

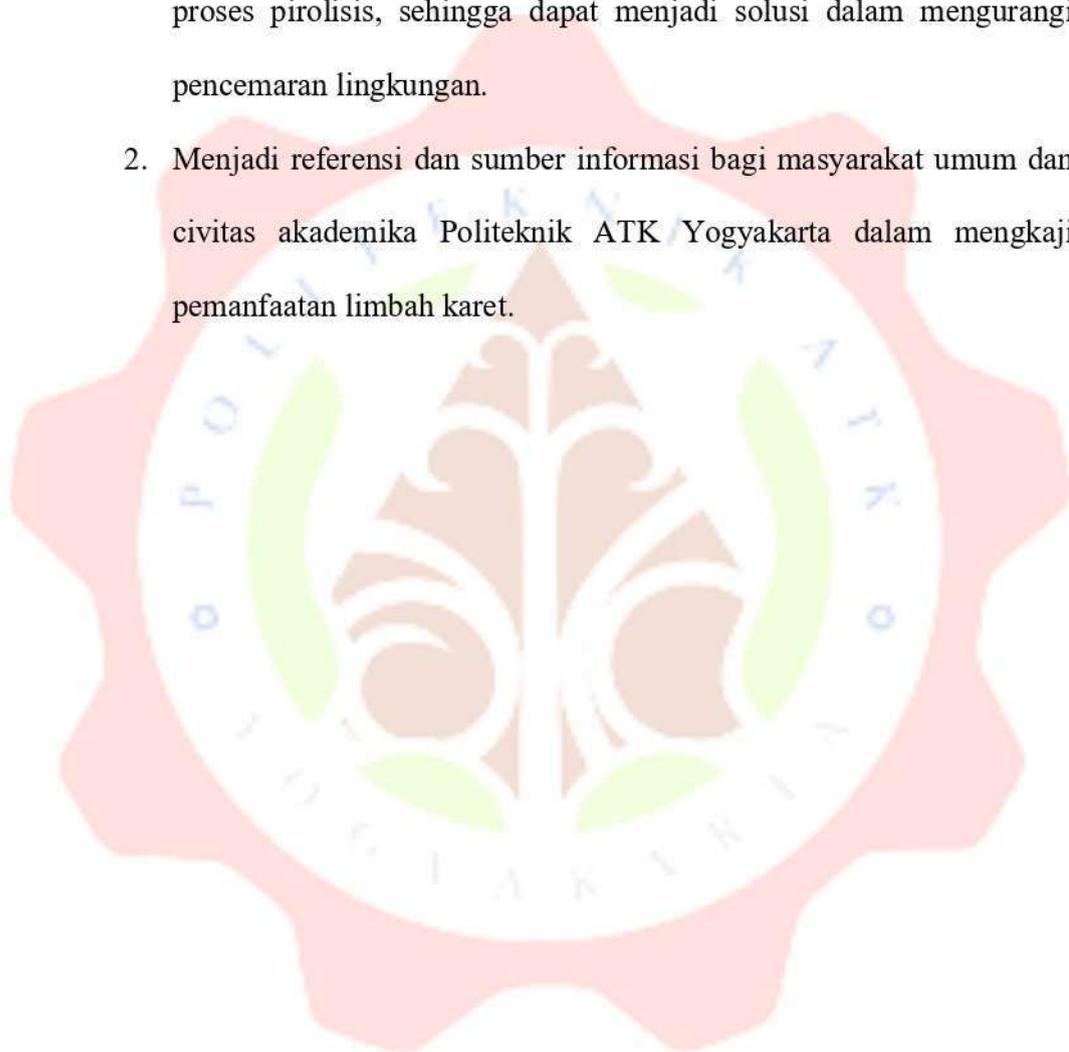
1. Bagaimana pengaruh penggunaan *filler* arang hasil pirolisis dari limbah vulkanisat karet (*scrap*) terhadap kemampuan proses kompon dan sifat fisik vulkanisat *tread* ban radial?
2. Bagaimana dampak penggunaan *filler* arang hasil pirolisis dari limbah vulkanisat karet (*scrap*) terhadap sifat mekanik vulkanisat *tread* ban radial?

C. Tujuan Tugas Akhir

1. Mengevaluasi pengaruh penggunaan *filler* arang hasil pirolisis dari limbah vulkanisat karet (*scrap*) terhadap kemampuan proses kompon dan sifat fisis vulkanisat *tread* ban radial.
2. Mengevaluasi dampak penggunaan *filler* arang hasil pirolisis dari limbah vulkanisat karet (*scrap*) terhadap sifat mekanik vulkanisat *tread* ban radial.

D. Manfaat Tugas Akhir

1. Memberikan informasi kepada PT. X Kendal mengenai pemanfaatan limbah vulkanisat karet menjadi *filler* dalam kompon karet melalui proses pirolisis, sehingga dapat menjadi solusi dalam mengurangi pencemaran lingkungan.
2. Menjadi referensi dan sumber informasi bagi masyarakat umum dan civitas akademika Politeknik ATK Yogyakarta dalam mengkaji pemanfaatan limbah karet.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah Industri Ban dan Permasalahannya

Limbah merupakan salah satu bentuk luaran non-produktif yang tidak dapat dihindari dan memerlukan bentuk penanganan khusus dalam pengelolaannya. Hal ini disebabkan oleh jenis limbah yang ada beragam, mulai dari organik hingga non organik, serta subvariasi dari masing-masing jenis limbah memiliki karakteristik yang berbeda satu dengan yang lainnya (Santoso *et al.*, 2024). Industri karet, khususnya industri ban, merupakan sektor yang memiliki kontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan akibat limbah kompleks yang dihasilkannya selama proses produksi ban berupa sisa karet vulkanisasi, karbon hitam, minyak proses, bahan kimia aditif, dan limbah gas buang dari proses *curing* dan pemanasan (Rochman & Setiyo, 2019).

1. Jenis-Jenis Limbah dari Proses Produksi Karet

Berikut ini adalah beberapa jenis limbah yang dihasilkan dari proses pencampuran pada divisi *mixing* di PT. X Kendal :

a. Limbah vulkanisat karet

Limbah ini berupa *scrap* atau sisa dari proses pembuatan sampel pengujian sifat fisik dan mekanik kompon karet, seperti pengujian MV (*Mooney Viscosity*), HS (*Hardness Shore A*), T90 (*Time to 90% Cure*), kuat tarik (*Tensile Strength*), elongasi (*Elongation at Break*), dan uji keausan (*Abrasion Resistance*).



Gambar 1. Limbah Vulkanisat Karet

(Dokumentasi pribadi)

b. Limbah bahan kimia

Limbah bahan kimia merupakan sisa zat kimia yang telah melebihi batas masa penyimpanan atau kedaluwarsa, sehingga tidak dapat digunakan lagi dan menumpuk di ruang penyimpanan bahan. Limbah ini terdiri dari berbagai aditif yang digunakan dalam pembuatan kompon karet, seperti *sulfur*, *akselerator*, *antioksidan* dan lain-lain.



Gambar 2. Limbah Bahan Kimia

(Dokumentasi pribadi)

c. Limbah cair

Limbah cair merupakan hasil buangan dari bahan-bahan pelunak (*plasticizer*) yang tidak tercampur secara merata selama proses

pencampuran kompon karet. Pencampuran yang tidak merata menyebabkan sebagian bahan pelunak keluar bersama sisa bahan-bahan lain melalui saluran pembuangan mesin *mixing*. Limbah cair ini umumnya hanya ditampung tanpa dilakukan pengolahan.



Gambar 3. Limbah Cair
(Dokumentasi pribadi)

d. Limbah kompon mati

Limbah kompon mati berasal dari sisa bahan karet yang sudah melebihi batas simpan atau dari hasil pencampuran yang tidak memenuhi standar pengujian nilai MV (*Mooney Viscosity*), HS (*Hardness Shore A*), Sp.Gr (*Specific Gravity*), MH (*Maximum Torque*), T10 (*Time to 10% Cure*), dan T90 (*Time to 90% Cure*), sehingga tidak bisa diproses ke tahap selanjutnya dan disimpan sebagai limbah padat tanpa pengolahan lebih lanjut.



Gambar 4. Limbah Kompon Mati

(Dokumentasi pribadi)

2. Dampak Lingkungan dari Limbah Vulkanisat Karet

Meskipun seluruh jenis limbah tersebut penting untuk dikelola secara menyeluruh, penelitian ini secara khusus difokuskan pada limbah vulkanisat karet, yang memiliki tantangan besar dalam proses daur ulang. Menurut Kumar *et al.*, (2024), limbah karet vulkanisasi sulit didaur ulang karena adanya jaringan ikatan silang sulfur tiga dimensi (3D), yang menghambat degradasi alami material.

Metode pembuangan konvensional, seperti pembakaran dan penimbunan, tidak hanya memperburuk masalah karena menimbulkan emisi asap dan gas beracun yang dapat membahayakan kesehatan manusia, tetapi juga menambah kompleksitas pengelolaan limbah karet vulkanisasi (Kumar *et al.*, 2024). Paparan sinar matahari maupun pembakaran terbuka pada limbah vulkanisat karet dan ban bekas juga menghasilkan emisi gas rumah kaca seperti metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), serta senyawa organik volatil (VOCs) berbahaya yang

berdampak terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Glushankova *et al.* 2019).

Berdasarkan hasil pengamatan dari PT. X Kendal, limbah yang dihasilkan dari manufaktur 1 mencapai sekitar 7 kg per hari yang berasal dari empat mesin *mixing* yang beroperasi. Dalam satu bulan, rata-rata jumlah limbah yang dihasilkan mencapai sekitar 200 kg. Seiring rencana penambahan mesin menjadi sebelas unit, volume limbah diperkirakan meningkat secara signifikan. Tanpa pengelolaan yang memadai, hal ini akan menimbulkan dampak lingkungan dan operasional yang lebih serius.

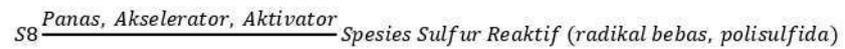
B. Vulkanisat Karet

Vulkanisat karet merupakan bentuk karet yang telah mengalami proses vulkanisasi. Vulkanisasi adalah proses di mana karet yang linier mengalami reaksi sambung silang dengan bantuan *sulfur-crosslinking* sehingga menjadi molekul polimer yang membentuk rangkaian tiga dimensi. Reaksi ini mengubah karet yang bersifat plastis dan lemah menjadi karet yang elastis, keras, dan kuat (Irfan, 2022).

Berikut adalah gambaran umum reaksi kimianya:

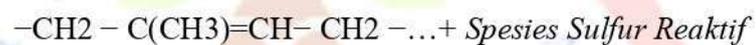
1. Pada suhu tinggi 100–180°C dan dengan bantuan *akselerator* turunan *benzothiazole*, *thiuram*, *dithiocarbamate* dan *aktivator* (seng oksida, *ZnO*, dan asam stearat), molekul *sulfur* berbentuk cincin (S_8) akan terbuka dan bereaksi. Ini menghasilkan spesies *sulfur* yang lebih

reaktif, seringkali dalam bentuk radikal bebas atau *spesies polisulfida* yang mengandung *akselerator*.



(1)

2. Spesies *sulfur* reaktif ini menyerang atom karbon *alilik* (yang berada di samping ikatan rangkap) pada rantai *poliisoprena*. Ikatan rangkap pada karet memungkinkan terbentuknya *radikal alilik* yang stabil, yang kemudian bereaksi dengan *sulfur*.



(2)

3. Pembentukan ikatan silang (*Cross-linking*) dimana atom *sulfur* atau rantai *sulfur* (*polysulfidic bridge*, $-\text{S}_x-$ di mana x bisa 1 sampai beberapa atom) kemudian membentuk jembatan antara dua rantai polimer karet yang berbeda. Ini adalah reaksi paling krusial yang mengubah sifat fisik karet.



(3)

Di mana x adalah jumlah atom *sulfur* dalam ikatan silang. Jenis ikatan silang ini dapat bervariasi:

- a. *Monosulfida* (C-S-C): Satu atom *sulfur*. Menghasilkan karet yang lebih tahan panas dan set permanen yang lebih baik.
- b. *Disulfida* (C-S-S-C): Dua atom *sulfur*.
- c. *Polisulfida* (C-S $_x$ -C, $x > 2$): Rantai panjang atom *sulfur*.

Ikatan silang *polisulfida* yang terbentuk selama proses vulkanisasi memberikan elastisitas tinggi dan kekuatan tarik yang baik pada karet. Namun, jenis ikatan ini memiliki kelemahan berupa ketahanan panas yang rendah dan kecenderungan mengalami degradasi termal lebih cepat. Oleh karena itu, dalam industri pembuatan produk karet, sistem vulkanisasi belerang menjadi metode yang paling umum digunakan. Sistem ini terbagi menjadi tiga jenis, yaitu sistem konvensional (CV), sistem efisien (EV), dan sistem semi-efisien (SEV), yang dibedakan berdasarkan rasio konsentrasi antara belerang dan bahan pemercepat (Long, 1985).

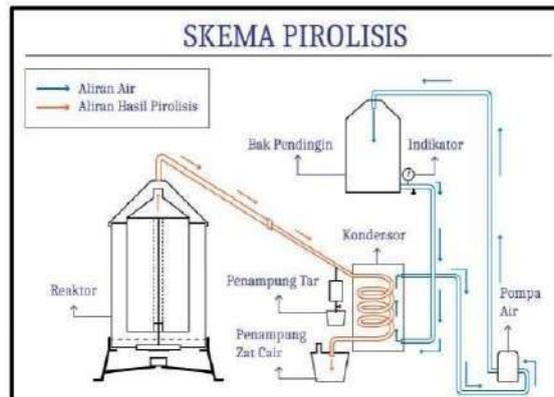
Penambahan belerang ke dalam karet tak jenuh meningkatkan sifat mekanik karet, karena struktur ikatan silang yang dibuat (Kamarad *et al.* 2015). Selain peningkatan kekuatan mekanik, proses vulkanisasi juga mengubah material karet menjadi *termoset elastis*. Sifat *termoset* ini berarti bahwa vulkanisat karet tidak dapat larut dalam pelarut, tidak dapat dilebur kembali menjadi cairan, dan tidak dapat diproses ulang secara langsung menggunakan metode *termoplastik* konvensional (Karger-Kocsis *et al.*, 2013). Karakteristik ini, meskipun memberikan stabilitas dan kinerja yang unggul selama masa pakai produk, menjadi tantangan utama dalam upaya daur ulang karet setelah mencapai akhir masa pakainya (Ikeda *et al.*, 2018).

C. Teknologi Pirolisis Pada Limbah Karet

1. Prinsip Dasar Pirolisis

Pirolisis merupakan suatu proses dekomposisi bahan dengan bantuan suhu tinggi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan produk cair yang mengandung *tar* serta *polymatic hydrocarbon*. Produk pirolisis biasanya terdiri dari 3 tipe, ialah gas (H_2 , CO , CO_2 , H_2O serta CH_2), *tar (pyrolitic oil)*, serta arang. Umpan untuk proses pirolisis bisa berbentuk bahan-bahan alam tanaman, biomassa, ataupun berbentuk polimer.

Melalui proses pirolisis, biomassa serta polimer mengalami pemutusan ikatan dan membentuk molekul- molekul dengan dimensi serta struktur yang lebih ringkas. Pirolisis biomassa secara umum merupakan dekomposisi bahan organik yang menghasilkan produk berupa arang aktif, gas serta uap dan *aerosol*. Gas yang bisa dikondensasikan selaku bahan cair dan stabil pada temperatur kamar ialah senyawa hidrokarbon yang dikenal dengan *biofuel* ataupun *bio-oil* (Riandis, Setyawati, & Sanjaya 2021). Berikut ini disajikan gambaran umum mengenai proses pirolisis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 berikut:



Gambar 5. Proses Pirolisis

Sumber : (Suyanto & Harahap, 2019)

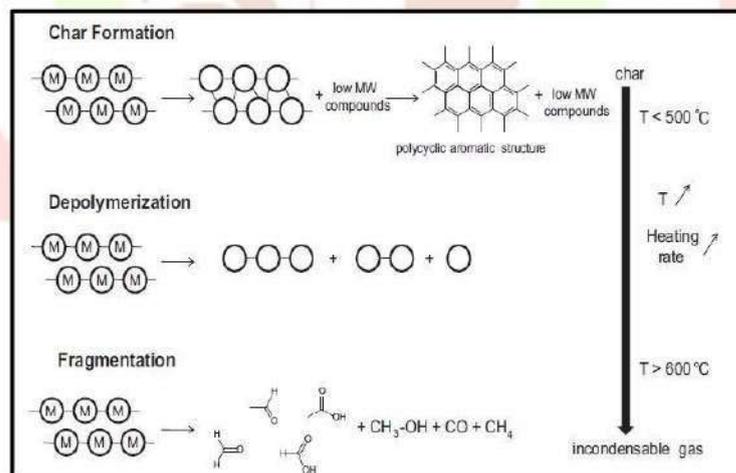
Berdasarkan Gambar 5, yang menunjukkan gambaran umum proses pirolisis, Proses pirolisis terdiri dari beberapa komponen utama yang memiliki fungsi spesifik. Reaktor pirolisis merupakan inti dari sistem ini, yaitu tempat berlangsungnya dekomposisi termal limbah karet. Reaktor dirancang khusus agar mampu menahan suhu tinggi sekaligus mencegah masuknya oksigen. Sistem pemanasan berfungsi untuk menaikkan suhu dalam reaktor hingga mencapai kisaran 400–900°C, yaitu rentang suhu optimal untuk reaksi pirolisis berlangsung secara efisien (Tang *et al.*, 2022).

Setelah proses berlangsung, uap hasil pirolisis dialirkan ke sistem kondensasi yang berperan penting dalam mendinginkan dan mengubah uap menjadi minyak pirolisis. Sementara itu, gas yang tidak terkondensasi dikumpulkan melalui sistem pengumpulan gas untuk digunakan kembali sebagai bahan bakar atau sumber energi dalam proses industri. Di akhir proses, sistem pengumpulan karbon hitam berfungsi untuk menampung residu padat yang tersisa, yaitu

arang atau karbon hitam, yang memiliki nilai komersial tinggi dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti bahan pengisi (*filler*) pada industri karet atau sebagai bahan penyerap (*adsorben*) dalam aplikasi lingkungan (Miandad *et al.*, 2016; Pratiwi & Dahani, 2015).

2. Fase pada Pirolisis

Proses pembakaran pirolisis terdapat beberapa fase yaitu fase pengeringan; terjadi pada suhu 200°C, fase pirolisis pada suhu 200°C-500°C, dan fase evolusi gas: terjadi pada suhu 500°C (Ridhuan *et al.*, 2019). Pirolisis akan menghasilkan gas, yang kemudian mengembun sebagian, serta padatan yang tidak bereaksi lagi dan tersisa di dalam reaktor (Pratiwi & Dahani, 2015). Proses terjadinya reaksi pirolisis primer dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Jalur Reaksi pirolisis primer (*M*; monomer; *MW*: molecular weight)

Sumber: Collard dan Blin (2014)

Berdasarkan Gambar 6, jalur reaksi pirolisis primer berlangsung melalui tiga tahap yaitu pembentukan *char*, *depolimerisasi* dan *fragmentasi* (Collard & Blin, 2014).

a. Pembentukan Char

Pembentukan *char* terdiri dalam perubahan biomassa menjadi padatan sisa yang disebut *char* yang menghasilkan struktur *polisiklik aromatik*. Jalur reaksi ini secara umum dihasilkan oleh reaksi pembentukan kembali *inter* dan *intramolekular* yang menghasilkan derajat *retikulasi* yang lebih tinggi dan pada stabilitas termal yang tinggi dari residu. Langkah utama pada jalur ini adalah pembentukan gugus benzena dan kombinasi dari gugus struktur *polisiklik*. Semua reaksi rekombinasi secara umum disertai oleh pelepasan air atau gas yang tidak terkondensasi.

b. Depolimerisasi

Depolimerisasi terdiri dalam pemecahan ikatan antara monomer dari *polymer*. Setelah masing-masing pecah, terjadilah 2 rantai stabil yang baru. *Depolimerisasi* menyebabkan penurunan derajat polimerisasi rantai hingga diproduksi senyawa *volatil*.

c. Fragmentasi

Fragmentasi terdiri dalam sambungan dari banyak ikatan *kovalen* pada *polymer*. Bahkan di dalam unit monomer menghasilkan bentuk gas tidak terkondensasi dan beragam senyawa organik rantai pendek yang terkondensasi pada temperatur lingkungan.

3. Aplikasi Pirolisis pada Limbah Karet

Pirolisis merupakan teknologi yang menjanjikan dalam pengelolaan limbah karet dengan mengubahnya menjadi produk bernilai tinggi seperti minyak, gas, dan karbon hitam. Dengan menggunakan panas, pirolisis dapat menguraikan karet menjadi produk sampingan yang berharga, membuka kemungkinan baru untuk mendaur ulang karet dan berpotensi merevolusi industri (Tang *et al.*, 2022).

a. Produksi Bahan Bakar

Proses pirolisis limbah karet menghasilkan tiga komponen utama, yaitu minyak pirolisis (*pyrolysis oil*), gas pirolisis (*syngas*), dan residu padat (*char*). Minyak pirolisis mengandung senyawa hidrokarbon *aromatik* dan *alifatik* yang tinggi, sehingga menjadikannya sebagai kandidat bahan bakar cair alternatif yang potensial untuk menggantikan minyak diesel dan bahan bakar industri lainnya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Dewang *et al.* (2025), minyak pirolisis memiliki densitas energi yang sebanding dengan bahan bakar diesel, namun memerlukan perlakuan lanjut untuk menurunkan kadar *sulfur* dan logam berat agar memenuhi standar emisi.

Gas pirolisis, yang terdiri dari metana (CH_4), hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan etilena (C_2H_4), dapat digunakan sebagai sumber energi panas internal dalam proses pirolisis itu sendiri. Hal ini memungkinkan terciptanya sistem operasi semi-

otonom yang hemat energi dan berkelanjutan. Menurut Martínez *et al.* (2025), kandungan gas tersebut cukup untuk menjaga kestabilan termal reaktor pirolisis selama proses berlangsung.

b. Bahan Baku Industri

Selain sebagai bahan bakar, minyak pirolisis juga mengandung senyawa kimia bernilai tinggi seperti *aromatik polisiklik, fenol*, dan turunan *toluena*. Senyawa-senyawa ini dapat dimurnikan lebih lanjut untuk digunakan sebagai bahan dasar dalam industri resin, pelarut, lem, serta aditif cat. Ojolo *et al.* (2021) menyebutkan bahwa komposisi minyak pirolisis memberikan peluang besar untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri kimia.

Gas pirolisis juga memiliki potensi sebagai bahan baku sintesis kimia, seperti amonia dan metanol, apabila dilakukan proses pemurnian lanjutan. Potensi ini menunjukkan bahwa produk pirolisis tidak hanya bernilai energi, tetapi juga memiliki nilai tambah sebagai bahan baku industri kimia dasar (Tang *et al.*, 2022).

c. Pengolahan Limbah

Limbah karet, khususnya ban bekas, merupakan jenis limbah padat yang sulit terurai secara alami dan kerap menumpuk di tempat pembuangan akhir (TPA). Metode pirolisis menawarkan solusi pengolahan yang efektif dan ramah lingkungan karena mampu menurunkan volume limbah secara signifikan serta menghasilkan

produk yang berguna. Miandad *et al.* (2016) menyatakan bahwa pirolisis limbah ban dapat menghasilkan minyak dan gas dengan efisiensi tinggi tanpa menghasilkan emisi berbahaya seperti pada proses pembakaran terbuka.

Dengan mengubah limbah menjadi produk bernilai guna, pirolisis juga mendukung prinsip ekonomi sirkular, di mana limbah dikonversi menjadi sumber daya baru yang dapat digunakan kembali di sektor industri.

d. Produksi Karbon Hitam

Residu padat dari proses pirolisis, yaitu *char*, dikenal sebagai *recovered carbon black (rCB)* dan memiliki nilai komersial tinggi. *rCB* dapat digunakan sebagai pengganti karbon hitam komersial dalam berbagai aplikasi seperti produksi ban, tinta, dan plastik. Tang *et al.* (2022) melaporkan bahwa karakteristik morfologi dan luas permukaan dari *rCB* hasil pirolisis cukup kompetitif jika dibandingkan dengan karbon hitam murni.

Penelitian oleh Bogdahn *et al.* (2025) juga menunjukkan bahwa *rCB* memiliki stabilitas termal dan struktur partikel yang sebanding dengan karbon hitam konvensional. Selain itu, proses produksi *rCB* lebih ekonomis karena tidak bergantung pada bahan baku berbasis minyak bumi, serta memberikan kontribusi terhadap pengurangan jejak karbon industri secara keseluruhan.

D. Filler dalam Kompon Karet

Filler atau bahan pengisi adalah material padat berbentuk partikel halus yang ditambahkan ke dalam matriks karet selama proses pencampuran. Penambahan *filler* ini dilakukan dengan berbagai tujuan, baik untuk meningkatkan sifat-sifat fisik dan mekanik karet maupun untuk mengurangi biaya produksi (Falaah, Chalid, & Fathurrohman 2022).

1. Fungsi dan Jenis Jenis Filler

Bahan pengisi (*filler*) adalah bahan pendukung dengan porsi terbesar dalam pembuatan kompon karet yang fungsinya untuk meningkatkan sifat fisik, memperbaiki karakteristik pengolahan dan mengurangi biaya (Alfa, 2008). Menurut Haryadi (2010), bahan pengisi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu bahan pengisi aktif dan bahan pengisi tidak aktif (netral). Bahan pengisi aktif berperan dalam meningkatkan kekerasan, ketahanan sobek, ketahanan aus (*abrasion resistance*), serta ketegangan putus (*tensile strength*) dari produk karet. Sementara itu, bahan pengisi tidak aktif lebih berfungsi dalam menambah kekerasan dan kekakuan, tetapi tidak secara signifikan meningkatkan sifat mekanik lainnya.

Adapun contoh dari masing-masing jenis bahan pengisi adalah sebagai berikut:

a. Bahan Pengisi Aktif:

- Karbon hitam (*Carbon black*)
- Silika (*Silicon dioxide*)

- Nanokarbon (*CNTs, graphene*)
- Nano-silika / silika presipitasi
- *Organoclay / montmorillonite*

b. Bahan Pengisi Tidak Aktif (Netral):

- Kaolin (*clay*)
- Talk (*talcum*)
- Barium sulfat (
- Aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$)

2. Pengaruh Filler Terhadap Sifat Mekanik

Filler dalam suatu matriks polimer berperan penting dalam memperkuat material, salah satunya adalah *modulus young* yang merupakan ketahanan material untuk mengalami perubahan bentuk pada saat material tersebut diberikan suatu gaya, sehingga peran *filler* menjadi sangat signifikan dengan peningkatan sifat mekanik polimer. Penggabungan antara matriks polimer dengan *filler* terjadi secara alami membentuk suatu jaringan (*filler network*). Dalam *filler network* terjadi interaksi antar permukaan karet dan *filler*, selanjutnya terjadi perpaduan yang disebabkan pembentukan struktur kompleks *filler* yang aktif (Ivanovska-Dacikj *et al.*, 2017).

Penambahan *filler* juga dinilai merupakan cara untuk mengurangi sifat getas karet karena *filler* dapat memberikan aksi peredaman pada rantai sehingga mengurangi kerusakan yang

menyebabkan karet mudah getas (Al-Maamori *et al.*, 2018). Semakin banyak *filler* yang ditambahkan akan menyebabkan nilai kekerasan dan kuat tarik cenderung menurun karena terjadi aglomerasi partikel *filler* pada matriks karet (Winya & Pittayaprasertkul, 2015).

3. Potensi Filler dari Hasil Pirolisis

Arang pirolisis memiliki potensi sebagai alternatif bahan pengisi karbon yang digunakan untuk memperkuat struktur kompon karet, baik dalam meningkatkan sifat mekanik karet maupun performa material lain seperti *bitumen*. Arang pirolisis mengandung komponen zat terbang yang sebagian besar terdiri dari unsur karbon. Menurut Williams (2013), karakteristik *char* atau residu yang dihasilkan dari proses pirolisis dengan bahan baku ban bekas berkisar antara 22% hingga 49% dari total berat bahan baku. *Char* yang dihasilkan mengandung karbon hingga 90%, dengan kandungan *sulfur* yang relatif tinggi, yaitu antara 1,9% hingga 2,7%. Namun demikian, *char* tersebut juga mengandung abu dengan kadar 8,27% hingga 15,33%, yang berasal dari kandungan logam seperti seng dalam bahan baku.

Menurut Prasertsri & Srichan (2017), beberapa sifat mekanik dari karet yang diformulasikan menggunakan arang pirolisis menunjukkan performa yang sebanding dengan karbon hitam semi-penguat seperti seri N772 dan N774, pada persentase penggantian tertentu. Akan tetapi, performanya masih lebih rendah dibandingkan karbon hitam penguat tinggi seperti seri N330 dan N339. Hal ini

terutama disebabkan oleh kandungan abu yang tinggi serta rendahnya aktivitas permukaan dari arang pirolisis tersebut. Moulin *et al.* (2017) juga menunjukkan bahwa sifat penguat dari karbon hitam daur ulang melalui proses *termolisis* uap-air lebih rendah dibandingkan dengan karbon hitam N330, namun setara atau sedikit lebih baik dibandingkan dengan karet yang diisi menggunakan karbon hitam seri N550 dan N772.

E. Studi Terdahulu Terkait Daur Ulang dan Pemanfaatan Limbah Karet

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menemukan metode daur ulang limbah vulkanisat karet yang efektif, salah satunya melalui proses pirolisis. Metode ini tidak hanya mengurangi jumlah limbah, tetapi juga menghasilkan produk samping bernilai seperti gas, minyak, dan arang (*char*). Arang hasil pirolisis menarik perhatian karena potensinya sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam kompon karet. Penelitian telah dilakukan untuk memanfaatkan arang pirolisis sebagai substitusi parsial *carbon black* komersial dalam senyawa karet.

Lai *et al.* (2021) meneliti efek substitusi arang pirolisis komersial terhadap *carbon black* N660 dalam karet SBR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang pirolisis memiliki ukuran agregat lebih kecil dan kandungan unsur logam yang lebih tinggi dibandingkan N660. Penambahan arang pirolisis sebanyak 20% tidak menurunkan kekuatan tarik dan kekuatan sobek secara signifikan. Namun, semakin tinggi rasio arang pirolisis, performa terhadap abrasi dan modulus elastisitas cenderung menurun. *Tear strength* relatif stabil, menjadikan arang pirolisis cocok

untuk aplikasi yang mengedepankan ketahanan sobek namun sebaliknya, ketika arang pirolisis digunakan dalam jumlah banyak, karet menjadi lebih mudah aus sehingga kurang cocok untuk produk karet yang digunakan dalam kondisi berat.

Liu *et al.* (2020) membandingkan arang pirolisis terhadap *carbon black* N326 dalam senyawa karet untuk lapisan transisi ban radial baja penuh. Pada rasio substitusi arang pirolisis sebesar 15 phr, terjadi peningkatan elongasi putus dan *resilience* tanpa perubahan signifikan pada kekerasan dan kekuatan tarik. Penurunan pada *tear strength* dan *stress* 300% memang terjadi, namun masih dalam batas fungsional. Penelitian ini juga menggarisbawahi keuntungan ekonomis dari penggunaan arang pirolisis, yaitu potensi penghematan biaya produksi sekitar USD 22.86 per ton karet campuran.

Penelitian Anupabphan *et al.* (2023) juga mengonfirmasi bahwa arang pirolisis dapat digunakan untuk menggantikan *carbon black* N330 secara parsial pada senyawa SBR. Rasio optimum ditemukan pada campuran 80% N330 dan 20% arang pirolisis, di mana sifat-sifat seperti kekuatan tarik, kekuatan sobek, dan elongasi masih berada dalam rentang performa fungsional. Penurunan signifikan terhadap sifat mekanik mulai terlihat ketika arang pirolisis digunakan dalam jumlah lebih besar dari 40%, yang disebabkan oleh kandungan abu tinggi (hingga 17.45%) dan luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan N330.

Artikel oleh Dwivedi, Manjare, dan Rajan (2020) membahas pemanfaatan teknologi pirolisis untuk mendaur ulang limbah ban bekas yang nantinya dijadikan sebagai pengisi penguat alternatif dalam senyawa karet alam. Studi ini menunjukkan bahwa *recovered carbon black* (rCB) yang dihasilkan melalui proses

pirolisis dapat digunakan sebagai bahan pengisi pengganti *virgin carbon black* dalam formulasi karet, tanpa mengorbankan sifat mekanik secara signifikan. Hasil eksperimen membuktikan bahwa meskipun terdapat sedikit penurunan pada kekuatan tarik dan elongasi, performa akhir karet yang diisi rCB tetap dalam kisaran yang dapat diterima untuk aplikasi teknik. Artikel ini menekankan nilai lingkungan dan ekonomi dari pendekatan ini, karena tidak hanya mengurangi limbah ban yang sulit terurai, tetapi juga menurunkan ketergantungan terhadap sumber daya berbasis fosil. Dengan demikian, pendekatan ini dinilai sebagai solusi *sustainable* dan ramah lingkungan dalam industri karet.

Jurnal Rikmann, Mäeorg, & Liiv (2024) meneliti daur ulang *carbon black* berkualitas rendah yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah ban sebagai upaya pemanfaatan limbah karet secara berkelanjutan. Penelitian ini fokus pada karakterisasi dan peningkatan kualitas *recovered carbon black* (rCB) agar dapat digunakan kembali dalam berbagai aplikasi teknis, termasuk sebagai bahan pengisi dalam produk berbasis karet. Dengan menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis seperti BET, XRD, dan FTIR, mereka menunjukkan bahwa meskipun rCB memiliki kadar abu dan struktur permukaan yang lebih kasar dibanding *carbon black* komersial, kinerjanya masih cukup layak jika diolah dengan tepat. Studi ini memperkuat potensi rCB sebagai alternatif ekonomis dan ramah lingkungan dalam industri manufaktur, sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari akumulasi limbah ban.

Untuk memperkuat landasan teoritis dalam penelitian ini, dilakukan kajian terhadap sejumlah literatur yang relevan mengenai pemanfaatan arang pirolisis

sebagai bahan pengganti parsial *carbon black* dalam senyawa karet. Kajian ini mencakup beberapa penelitian terdahulu yang membahas metode pirolisis pada limbah karet serta evaluasi sifat mekanik senyawa karet yang dihasilkan setelah pencampuran dengan arang pirolisis. Setiap penelitian memberikan sudut pandang berbeda terhadap efektivitas substitusi, rasio optimal yang direkomendasikan, serta dampaknya terhadap parameter seperti kekuatan tarik, kekerasan, elongasi putus, dan ketahanan sobek. Ringkasan hasil kajian pustaka tersebut disajikan secara sistematis dalam Tabel 1 sebagai bahan pertimbangan dan pembandingan yang relevan dengan arah penelitian ini.

Tabel 1. Review Jurnal

Penulis	Tahun	Bahan	Metode	Hasil	Hubungan
Teerapat Anupabphan <i>et al.</i>	2023	Ban bekas, <i>Carbon Black</i> N330, <i>Styrene-Butadiene Rubber</i> (SBR)	Pirolisis limbah ban, pencampuran <i>carbon black</i> pirolisis (CBp) dan N330 dalam SBR, pengujian sifat mekanik (tegangan tarik, modulus, elongasi putus, kekerasan, <i>tear strength</i>).	CBp berpotensi menggantikan N330 dalam SBR, namun perlu optimasi rasio pencampuran karena CBp cenderung menurunkan modulus dan kekuatan tarik pada rasio tertentu.	Jurnal ini sangat relevan karena fokus pada pemanfaatan <i>pyrolysis carbon black</i> (CBp) dari limbah ban sebagai <i>filler</i> di karet. Ini langsung mendukung konsep penelitian ini.

Lanjutan Tabel 1

Qi Liu <i>et al.</i>	2019	Ban bekas, <i>Carbon Black</i> N326, Karet lapisan transisi ban radial baja	Pirolisis limbah ban, penggantian N326 dengan <i>carbon black</i> pirolisis dalam karet, pengujian sifat (kompresi, panas, <i>dynamic loss</i> , elongasi putus, <i>resiliensi</i> , tegangan tarik, <i>tear strength</i> , kekerasan).	Penggunaan <i>CBp</i> dapat mengurangi panas kompresi dan <i>dynamic loss</i> , serta meningkatkan elongasi putus dan <i>resiliensi</i> , meskipun kekuatan tarik dan kekuatan sobek sedikit menurun. Komposisi utama <i>CBp</i> adalah C, O, Cu, Zn dengan kadar abu dan serbuk halus yang tinggi.	Jurnal ini menguatkan relevansi pirolisis limbah ban untuk menghasilkan <i>filler</i> . Fokus pada sifat-sifat spesifik seperti reduksi panas kompresi dan <i>dynamic loss</i> sangat penting untuk aplikasi di industri ban. Ini memberikan wawasan tentang potensi manfaat fungsional <i>CBp</i> selain hanya sebagai pengganti, yang dapat dieksplorasi lebih lanjut di PT. X Kendal.
Sun-Mou Lai <i>et al.</i>	2021	Ban bekas, <i>Carbon Black</i> N660, <i>Styrene-Butadiene Rubber</i> (SBR)	Analisis ukuran agregat partikel, komposisi, dan fungsionalitas permukaan <i>CBp</i> komersial (ET black) dan N660. Pencampuran ET black dalam SBR dan pengujian sifat mekanik.	ET black menunjukkan viskositas senyawa dan daya agregasi yang lebih tinggi. Terjadi penurunan bertahap sekitar 20% pada M300 seiring peningkatan rasio ET black. ET black berpotensi menggantikan N660.	Jurnal ini memberikan detail lebih lanjut mengenai karakteristik <i>pyrolysis carbon black</i> komersial (ET black), termasuk ukuran partikel dan sifat permukaan. Pemahaman tentang viskositas senyawa dan daya agregasi sangat krusial dalam formulasi karet, yang akan relevan dalam proses.

Lanjutan Tabel 1

Dwivedi <i>et al</i>	2020	<p>Penelitian ini menggunakan limbah ban bekas, <i>natural rubber</i> sebagai matriks, serta bahan tambahan standar seperti <i>carbon black</i>, (CB-N330), <i>sulfur</i>, <i>zinc oxide</i>, <i>stearic acid</i>, dan <i>akselerator</i> untuk formulasi dan vulkanisasi kompon karet.</p>	<p>Ban bekas di pirolisis pada 450–600 °C untuk menghasilkan <i>carbon black</i> pirolisis (CBp), lalu di karakterisasi (FTIR, XRD, SEM, TEM, BET) dan dicampur dalam karet alam dengan berbagai rasio. Kompon diuji viskositas (<i>Mooney</i>), sifat mekanik, dan termalnya untuk menilai kinerja CBp sebagai <i>filler</i> pengganti <i>carbon black</i>.</p>	<p>Penelitian menunjukkan bahwa <i>carbon black</i> pirolisis (CBp) dari ban bekas dapat menggantikan <i>carbon black</i> komersial hingga 50% dalam karet alam, dengan hasil kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang baik. Namun, viskositas meningkat pada kadar tinggi CBp, sehingga <i>prosesabilitas</i> menurun.</p>	<p>Penelitian ini relevan karena sama-sama memanfaatkan limbah karet melalui pirolisis untuk menghasilkan arang sebagai <i>filler</i> dalam kompon karet. Hasilnya menunjukkan bahwa arang pirolisis dapat menggantikan <i>carbon black</i> hingga 50% dengan sifat mekanik dan termal yang baik.</p>
Rikmann <i>et al</i> .	2024	<p>Limbah ban bekas, NR atau PBR. ZnO, <i>stearic acid</i>, <i>sulfur</i>, dan <i>akselerator</i> CBS.</p>	<p>Ban bekas di pirolisis untuk menghasilkan <i>carbon black</i> pirolisis (rCB), yang kemudian di karakterisasi menggunakan uji densitas (<i>specific gravity</i>), luas permukaan (BET), serta analisis struktur dan morfologi menggunakan FTIR, XRD, SEM/TEM. Selanjutnya, rCB diaplikasikan sebagai <i>filler</i> dalam komposit, dan diuji sifat fisik serta mekaniknya.</p>	<p>Hasil penelitian memiliki densitas 1,7–1,9 g/cm³ dan struktur permukaan kasar dengan porositas tinggi. Kandungan abu lebih tinggi dibanding <i>carbon black</i> komersial, rCB. Sifat fisik dan kimia menunjukkan kinerja yang mendekati standar industri.</p>	<p>Penelitian ini sama-sama memanfaatkan limbah karet yang di pirolisis untuk menghasilkan <i>filler</i> dalam kompon karet. Jurnal ini mendukung penelitian saya dengan menunjukkan bahwa <i>carbon black</i> pirolisis memiliki sifat fisik dan kimia yang layak sebagai pengganti <i>filler</i> komersial.</p>

Berdasarkan kajian pustaka dan analisis perbandingan dengan berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa metode pirolisis merupakan pendekatan yang efektif dalam pengolahan limbah vulkanisat karet. Proses ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan volume limbah yang sulit terurai, tetapi juga menghasilkan produk samping yang bernilai ekonomis, seperti minyak pirolisis, gas, dan arang (*char*). Salah satu fokus penting dalam penelitian ini adalah pemanfaatan arang pirolisis sebagai bahan pengisi (*filler*) alternatif untuk menggantikan sebagian *carbon black* komersial dalam senyawa karet.

Semua penelitian menunjukkan bahwa substitusi parsial arang pirolisis dalam senyawa karet masih dapat mempertahankan sifat mekanik pada level fungsional, selama berada dalam rasio optimal. Efek negatif seperti penurunan kekuatan tarik, modulus elastisitas, atau ketahanan abrasi baru muncul pada tingkat substitusi yang tinggi. Secara umum, arang pirolisis dinilai potensial untuk aplikasi sekunder yang tidak membutuhkan performa ekstrem, serta memberikan manfaat tambahan dalam aspek efisiensi biaya produksi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan baku berbasis fosil.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting, khususnya dalam konteks pengolahan limbah karet di Indonesia dan penerapannya di lingkungan industri, seperti di PT. X Kendal. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan solusi teknis yang dapat diterapkan, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan melalui penerapan ekonomi *sirkular*. Dengan demikian, pemanfaatan arang pirolisis sebagai substitusi

parsial *carbon black* dalam kompon karet dinilai sebagai strategi yang relevan, ramah lingkungan, dan berpotensi untuk diimplementasikan pada skala industri.



BAB III

MATERI DAN METODE

A. Lokasi dan Waktu

Pengambilan limbah vulkanisat karet dilakukan di salah satu pabrik yang berlokasi di daerah Kendal, Jawa Tengah, pada divisi *mixing* awal April 2025. Limbah yang diambil berupa limbah sisa pengujian *rheology* dan sisa *scrap* dari pembuatan sampel pengujian sifat fisik kompon karet, di mana limbah tersebut sudah mengalami proses vulkanisasi dan tidak lagi memiliki nilai guna di industri. Dari limbah tersebut memicu ide untuk memanfaatkannya sebagai *filler* dalam pembuatan kompon karet melalui metode pirolisis, di mana limbah ini menjadi bahan utama dalam penelitian sebagai sumber karbon dari proses pirolisis.

Proses pirolisis dan pembuatan arang dilakukan di rumah pribadi pada awal April 2025. Kegiatan ini mencakup penyiapan limbah, proses pirolisis menggunakan reaktor sederhana, serta pengambilan dan pengumpulan hasil pirolisis berupa arang hitam. Lokasi ini dipilih karena keterbatasan waktu dan tempat untuk melakukan proses pirolisis.

Pembuatan kompon karet, pengamatan visual, serta serangkaian pengujian sifat fisik seperti *Mv (Mooney Viscosity)*, *HS (Hardness Shore A)*, *SP.Gr (Specific Gravity)*, *MH (Maximum Torque)*, *T10 (Time to 10% Cure)*, dan *T90 (Time to 90% Cure)*, serta validasi awal terhadap hasil dilakukan di Laboratorium Inspeksi Cepat PT. X Kendal pada minggu terakhir bulan April 2025. Laboratorium ini berperan

dalam menyediakan data pendukung yang dibutuhkan untuk memastikan konsistensi material dan kelayakan awal produk karet yang dihasilkan.

Selanjutnya, pengujian sifat fisik kompon karet meliputi kuat tarik (*Tensile Strength*), elongasi (*Elongation at Break*), dan uji keausan (*Abrasion Resistance*), dilakukan di Laboratorium Politeknik ATK Yogyakarta pada minggu pertama bulan Mei 2025. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa material terhadap standar teknis dan mengetahui pengaruh penambahan arang pirolisis terhadap sifat mekanik kompon karet.

A. Metode Pelaksanaan Tugas Akhir

Penyusunan tugas akhir ini berupa *Problem Solving* (penyelesaian masalah) yang diperoleh pada saat melaksanakan praktik kerja industri. Selain itu, juga dilakukan studi literatur untuk memperoleh informasi dan teori yang relevan untuk membantu mengkaji permasalahan sebagai bahan rujukan dalam hasil pembahasan.

1. Studi lapangan

Studi lapangan yaitu pengamatan secara langsung seluruh proses berkaitan dengan materi penelitian yang dilakukan selama proses praktik kerja industri. Sumber data yang diperoleh melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi yang dilakukan oleh penulis di PT. X Kendal.

- a. Observasi dilakukan di PT. X Kendal yang merupakan salah satu perusahaan pembuatan ban kendaraan. Observasi yang

dilakukan mulai dari pengecekan bahan baku, penimbangan, proses *mixing*, pengambilan sampel, pembuatan sampel sampai proses akhir termasuk sisa dari proses pengujian sampel kompon karet.

- b. Wawancara dilakukan secara langsung dengan narasumber yang merupakan karyawan di bagian laboratorium pengujian di PT. X Kendal. Tujuan dari wawancara ini adalah untuk memperoleh informasi mengenai frekuensi dan jenis pengujian yang dilakukan, serta estimasi jumlah limbah yang dihasilkan dari kegiatan pengujian tersebut, khususnya limbah vulkanisat karet. Informasi ini sangat penting untuk mengetahui potensi limbah yang tersedia dan sejauh mana limbah tersebut dapat dimanfaatkan kembali melalui proses pirolisis.
- c. Dokumentasi dilakukan guna memperoleh bukti visual dari seluruh tahapan proses penelitian, baik di lingkungan industri maupun laboratorium. Dokumentasi ini mencakup pengambilan gambar limbah vulkanisat karet yang diperoleh dari perusahaan, proses pirolisis yang dilakukan di rumah peneliti, hasil arang pirolisis yang dihasilkan, serta dokumentasi data pengujian karakteristik fisik kompon karet di laboratorium. Bukti visual ini digunakan sebagai pelengkap dalam laporan penelitian untuk memperkuat data yang disajikan dan memberikan gambaran nyata terhadap proses dan hasil penelitian.

2. Studi literatur

Tinjauan literatur bertujuan untuk mengumpulkan data literatur yang dihasilkan sebelumnya untuk memberikan informasi yang relevan mengenai pemanfaatan limbah menjadi *filler* kompon karet melalui pirolisis. Studi literatur yang digunakan berupa buku, jurnal ilmiah, naskah tugas akhir, dan bahan-bahan kepustakaan lainnya yang berkaitan dengan percobaan yang sedang dilakukan.

B. Materi Pelaksanaan Tugas Akhir

Materi pada tugas akhir ini dilakukan dengan mengolah limbah vulkanisat karet menjadi *filler* dalam kompon *tread* ban radial dengan metode pirolisis. Pembuatan kompon karet menggunakan *filler* arang dari pirolisis dengan *subtitusi* variasi arang 0 phr, 5 phr, 10 phr, dan 15 phr. Tujuan dari variasi tersebut untuk mengetahui pengaruh *subtitusi* arang pirolisis terhadap kemampuan proses, karakteristik sifat fisik dan mekanik kompon *tread* ban radial. Pengujian kemampuan proses dan sifat fisik meliputi: Mv (*Mooney Viscosity*), HS (*Hardness Shore A*), SP.Gr (*Specific Gravity*), MH (*Maximum Torque*), T10 (*Time to 10% Cure*), dan T90 (*Time to 90% Cure*). Sedangkan pengujian sifat mekanik meliputi kuat tarik (*Tensile Strength*), elongasi (*Elongation at Break*), HS (*Hardness Shore A*), dan uji keausan (*Abrasion Resistance*). Seluruh pengujian dilakukan berdasarkan standar pengujian internal yang berlaku di PT. X Kendal, guna memastikan kesesuaian dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan perusahaan.

1. Alat dan Bahan

Alat yang di gunakan pada pembuatan arang antara lain, reaktor pirolisis, saringan 400 *mesh*, dan *thermometer*. Peralatan yang digunakan untuk pembuatan kompon antara lain, timbangan, pisau, *two roll mill*, *hydraulic press molding*. Peralatan yang di gunakan dalam proses pengujian dalam skala laboratorium antara lain, *shore A durometer*, *densimeter*, *rheometer*, *viskometer mooney*, *universal testing machine*, *abrasion resistance tester*. Tabel 2 berikut adalah contoh gambar alat yang digunakan.

Tabel 2. Alat Penelitian

No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
1.	Alat pirolisis sederhana		Mengubah limbah karet menjadi minyak, gas dan arang melalui pemanasan tanpa oksigen.
2.	Saringan 400 mesh		Menyaring arang pirolisis menjadi 400 <i>mesh</i> atau sekitar 38 mikron.

Lanjutan Tabel 2

3.	Two roll mill		Melakukan proses <i>komponding</i> pada bahan pembuatan kompon karet.
4.	Timbangan		Menimbang bahan bahan pembuatan kompon karet.
5.	Termometer		Untuk mengukur suhu pada saat melakukan proses pirolisis limbah karet.
6.	Rheometer		Untuk melakukan proses pengujian T90,T10, dan MH pada kompon karet.
7.	Hydraulic press molding		Mencetak kompon karet yang nantinya akan di buat menjadi spesimen uji.

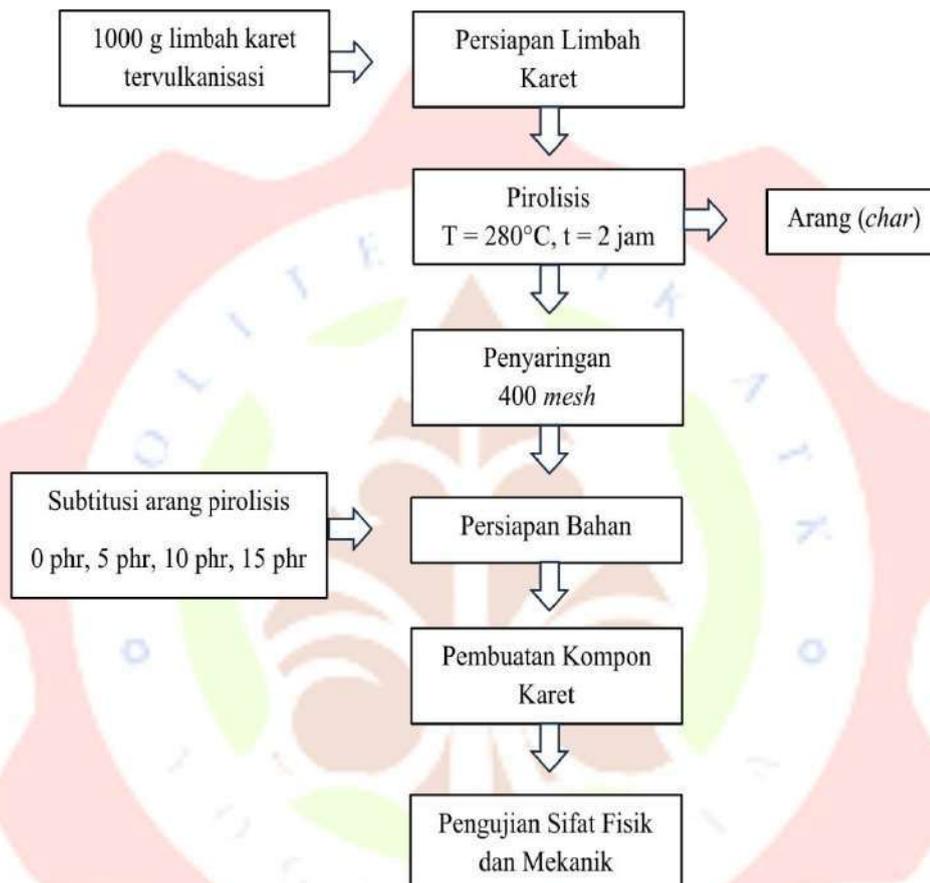
Lanjutan Tabel 2

8.	Shore A Durometer		Mengukur kekerasan vulkanisat karet dengan skala Shore A.
9.	Universal testing machine		Menguji kekuatan kuat tarik (<i>Tensile Strength</i>), elongasi (<i>Elongation at Break</i>)
10.	Abrasion resistance tester		Mengukur ketahanan vulkanisat karet terhadap keausan akibat gesekan atau abrasi.
11.	Viskometer vooney		Untuk melakukan proses pengujian MV pada kompon karet.
12.	Densimeter		Untuk melakukan proses pengujian SP.Gr pada kompon karet.
13.	Pisau		Untuk mempermudah dalam proses pembuatan kompon karet.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari limbah vulkanisat karet, *synthetic rubber*, *natural rubber*, bahan pengisi (*filler*), serta arang hasil pirolisis sebagai bahan *subtitusi filler*. Selain

itu, digunakan juga beberapa bahan seperti *coupling agent*, *aktivator*, *antioksidan*, *akselerator*, *stabilizer termal* dan *vulkanizing agent*.

2. Skema kerja percobaan pembuatan kompon *tread* ban radial dengan *filler* arang hasil pirolisis



Gambar 7. Skema Kerja Percobaan Pembuatan Kompon *Tread* Ban Radial dengan *Filler* Arang Hasil Pirolisis

Penjelasan mengenai skema kerja percobaan pembuatan kompon *tread* ban radial dengan *filler* hasil pirolisis pada Gambar 7 akan di jelaskan di bawah ini.

a. Persiapan limbah karet

Limbah vulkanisat karet yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari divisi *mixing* PT. X Kendal. Limbah ini berupa sisa pengujian *rheologi* dan *scrap* dari proses produksi ban yang telah melalui proses vulkanisasi yang kemudian dikumpulkan dan ditimbang sebanyak 1 kg, kemudian dipersiapkan untuk proses pirolisis. Limbah vulkanisat karet berupa hasil pengujian *rheologi* dan *scrap* dari proses produksi ban dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Limbah Rheologi dan Scrap

(Dokumentasi pribadi)

b. Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan untuk mengubah limbah karet menjadi arang karbon hitam (*char*) dan minyak pirolisis (*pyrolysis oil*). Dalam penelitian ini, pirolisis dilakukan menggunakan reaktor pemanas tertutup sederhana tanpa suplai oksigen. Limbah vulkanisat karet dimasukkan ke dalam reaktor dan dipanaskan secara bertahap hingga mencapai suhu 280°C selama dua jam. Suhu dan waktu ini dipilih karena pada kondisi tersebut telah

terbentuk arang pirolisis. Tahapan proses pirolisis sederhana yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Limbah di dalam reaktor

(Dokumentasi pribadi)



Gambar 10. Proses Pirolisis Sederhana

(Dokumentasi pribadi)

Selama proses pirolisis berlangsung, uap hasil dekomposisi dialirkan menuju kondensor sederhana untuk mengubah uap hidrokarbon menjadi cairan, yaitu minyak pirolisis (*pyrolysis oil*). Minyak pirolisis ini kemudian ditampung dalam botol, sedangkan arang hasil pirolisis dikumpulkan. Arang ini memiliki warna hitam pekat, struktur padat, dan ukuran partikel yang bervariasi

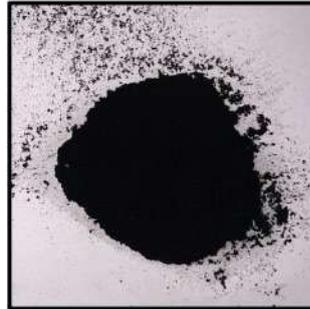
sehingga dilakukan proses penyaringan. Arang hasil pirolisis dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Arang hasil pirolisis
(Dokumentasi pribadi)

c. Penyaringan

Arang hasil pirolisis yang telah terkumpul disaring menggunakan saringan 400 *mesh* (38 mikron) untuk memperoleh ukuran partikel yang lebih halus dan seragam. Penyaringan hingga ukuran ini dilakukan karena *carbon black* komersial umumnya memiliki ukuran partikel yang sangat kecil, yaitu dalam rentang nanometer, sehingga diperlukan ukuran partikel arang yang mendekati halus agar dapat berfungsi secara optimal sebagai *filler*. Proses ini juga bertujuan untuk memastikan *filler* dapat tercampur secara homogen dalam matriks karet serta menghindari aglomerasi partikel, yang dapat menurunkan kinerja mekanik material. Hasil arang pirolisis yang sesudah di saring dengan saringan 400 *mesh* ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Arang hasil pirolisis yang sudah di saring dengan saringan 400 mesh

(Dokumentasi pribadi)

d. Persiapan bahan

Seluruh bahan disiapkan dan ditimbang sesuai dengan komposisi formulasi kompon karet yang telah ditentukan. Formulasi yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada formulasi standar kompon *tread* (tapak) ban radial, yang secara teknis telah terbukti memenuhi karakteristik performa sesuai kebutuhan PT. X Kendal. Terdapat empat jenis formulasi, yaitu Formulasi 1 (substitusi 0 phr), Formulasi 2 (substitusi 5 phr), Formulasi 3 (substitusi 10 phr), dan Formulasi 4 (substitusi 15 phr), yang dibedakan berdasarkan jumlah *filler* arang pirolisis yang digunakan. Penggunaan arang pirolisis dibatasi hingga maksimum 15 phr karena berdasarkan studi awal dan referensi sebelumnya, penambahan *filler* melebihi batas tersebut cenderung menurunkan sifat mekanik secara signifikan serta berisiko mengganggu performa akhir kompon karet. Rincian lengkap dari keempat formulasi tersebut ditampilkan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Formulasi Kompon Tread Ban Radial

Basis kompon 1000 g		Formulasi 1		Formulasi 2		Formulasi 3		Formulasi 4	
No	Bahan	PHR	Berat (g)	PHR	Berat (g)	PHR	Berat (g)	PHR	Berat (g)
1	<i>Natural rubber</i>	85.05	503.236	85.05	503.236	85.05	503.236	85.05	503.236
2	Filler (1)	28.04	165.998	23.04	136.578	18.04	106.478	13.04	76.378
3	Arang	0	0	5	29.650	10	59.300	15	88.950
4	<i>Synthetic rubber</i>	15	88.836	15	88.836	15	88.836	15	88.836
5	<i>Filler (2)</i>	10	59.224	10	59.224	10	59.224	10	59.224
6	<i>Filler (3)</i>	15	88.836	15	88.836	15	88.836	15	88.836
7	<i>Coupling agent (1)</i>	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884
8	<i>Aktivator (1)</i>	3.5	20.729	3.5	20.729	3.5	20.729	3.5	20.729
9	<i>Aktivator (2)</i>	2	11.845	2	11.845	2	11.845	2	11.845
10	<i>Antioksidan (1)</i>	0.85	5.034	0.85	5.034	0.85	5.034	0.85	5.034
11	<i>Antioksidan (2)</i>	0.85	5.034	0.85	5.034	0.85	5.034	0.85	5.034
12	<i>Antioksidan (3)</i>	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884
13	<i>Stabilizer</i>	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884	1.5	8.884
14	<i>Akselerator (1)</i>	0.2	1.184	0.2	1.184	0.2	1.184	0.2	1.184
15	<i>Vulkanizing agent</i>	1.35	7.995	1.35	7.995	1.35	7.995	1.35	7.995
16	<i>Akselerator (2)</i>	1.6	9.476	1.6	9.476	1.6	9.476	1.6	9.476
17	<i>Coupling agent (2)</i>	1	5.923	1	5.923	1	5.923	1	5.923
	Total	168.9	1000	168.9	1000	168.9	1000	168.9	1000

e. Pembuatan kompon karet

Proses *compounding* merupakan tahap awal dalam pembuatan kompon karet yang bertujuan untuk mencampurkan seluruh bahan baku secara homogen menggunakan mesin *two-roll mill*. Pencampuran dilakukan secara bertahap, dimulai dengan pembuatan kompon awal (1MB-EH012) melalui pencampuran karet alam (*natural rubber*) dan karet sintetis (*synthetic rubber*).

Selanjutnya, *filler* (1), *filler* (2), *filler* (3), dan arang pirolisis ditambahkan sesuai variasi phr yang telah ditentukan. Setelah itu, bahan-bahan tambahan seperti *coupling agent* (1), *aktivator* (1), *aktivator* (2), *antioksidan* (1), *antioksidan* (2), *antioksidan* (3), *stabilizer*, dan *akselerator* (1) dimasukkan satu per satu hingga seluruh bahan tercampur secara merata. Kompon awal 1MB-EH012 kemudian dilanjutkan menjadi FM-EH012 dengan menambahkan *akselerator* (2), *vulkanizing agent*, dan *coupling agent* (2), yang dicampurkan secara perlahan hingga diperoleh campuran yang homogen. Proses pembuatan kompon karet tersebut ditampilkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Proses Pembuatan Kompon FM-EH012

(Dokumentasi pribadi)

Setelah proses pencampuran selesai, kompon karet dicetak menggunakan *hydraulik press molding* dengan T 151°C dan t 1800 menit sesuai standar perusahaan. Cetakan ini menghasilkan dua bentuk sampel, yaitu lembaran persegi dan silinder, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14. Sampel Kompon Karet untuk Pengujian Sifat Fisik
(Dokumentasi pribadi)

f. Pengujian fisik kompon karet

Pengujian dilakukan terhadap kompon karet untuk mengetahui sifat fisik kompon karet. Pengujian dilakukan berdasarkan standar yang telah ditetapkan oleh perusahaan, dan masing-masing pengujian memiliki prosedur yang berbeda-beda. Berikut ini adalah jenis pengujian dan pembuatan sampel yang dilakukan.

- Pengujian MV (*Mooney Viscosity*)

Pengujian ini dilakukan menggunakan alat *mooney viscometer* sesuai dengan ketentuan standar internal perusahaan. Sampel kompon karet yang belum di vulkanisasi dipotong dan dibentuk cakram bulat, kemudian dimasukkan ke dalam ruang pemanas *mooney viscometer* yang dilengkapi rotor. Rotor berputar dengan kecepatan konstan sambil memberikan torsi terhadap sampel pada suhu 100 °C. Nilai MV (*Mooney Viscosity*) diukur berdasarkan resistensi terhadap putaran rotor selama pengujian berlangsung. Tujuan

dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat plastisitas dan kemampuan alir kompon karet sebelum proses vulkanisasi. Proses pengujian MV (*Mooney Viscosity*) bisa dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Proses Pengujian MV (*Mooney Viscosity*)
(Dokumentasi pribadi)

- Pengujian SP.Gr (*Specific Gravity*)

Pengujian ini dilakukan menggunakan *densimeter* sesuai dengan ketentuan standar internal perusahaan. Sampel kompon karet yang telah di vulkanisasi berbentuk silinder kecil ditimbang dalam kondisi kering di udara, dan selanjutnya ditimbang kembali dalam kondisi terendam air. Nilai SP.Gr (*Specific Gravity*) dihitung berdasarkan selisih antara massa di udara dan massa dalam air. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui massa jenis kompon karet. Pengujian SP.Gr (*Specific Gravity*) bisa dilihat pada Gambar 16.

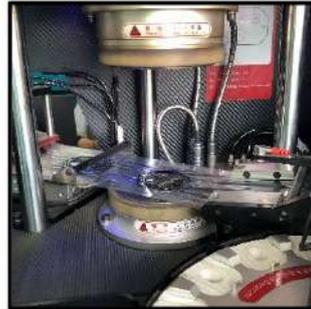


Gambar 16. Proses Pengujian SP.Gr (*Specific Gravity*)

(Dokumentasi pribadi)

- Pengujian T10 (*Time to 10% Cure*)

Pengujian ini dilakukan menggunakan *moving die rheometer* sesuai ketentuan perusahaan. Sampel kompon yang belum di vulkanisasi dipotong menggunakan alat potong khusus *rheometer* berbentuk cakram bulat dengan diameter 30 mm. kemudian sampel dimasukkan ke dalam ruang pemanas dan dikenai gaya puntir. Nilai T10 (*Time to 10% Cure*) diperoleh dari waktu yang dibutuhkan sejak awal pengujian hingga torsi meningkat sebesar 10% dari total kenaikan. Parameter ini digunakan untuk mengetahui waktu awal terjadinya reaksi vulkanisasi (*scorch time*), yang sangat penting untuk menilai stabilitas kompon saat pemrosesan awal, sebelum memasuki tahap pembentukan atau pencetakan. Proses pengujian T10 (*Time to 10% Cure*) bisa di lihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Proses Pengujian T10 (*Time to 10% Cure*)
(Dokumentasi pribadi)

- Pengujian T90 (*Time to 90% Cure*)

Masih menggunakan prosedur dan sampel yang sama seperti pada pengujian T10 (*Time to 10% Cure*), nilai T90 (*Time to 90% Cure*) diperoleh dari waktu yang diperlukan agar vulkanisasi mencapai 90% dari total kenaikan torsi. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan waktu optimum vulkanisasi, yaitu waktu yang ideal untuk mencapai struktur karet yang stabil dan matang tanpa mengalami *overcure*. Parameter ini sangat penting dalam pengendalian proses produksi karena berkaitan langsung dengan efisiensi dan kualitas hasil akhir kompon. Proses pengujian T90 (*Time to 90% Cure*) juga ditampilkan pada Gambar 15.

- Pengujian MH (*Maximum Torque*)

Nilai MH (*Maximum Torque*) diperoleh dari titik maksimum pada kurva torsi selama proses pengujian berlangsung. MH (*Maximum Torque*) mencerminkan kekakuan maksimum dan

tingkat kerapatan ikatan silang *crosslink density* dalam kompon setelah *divulkanisasi*. Nilai ini menjadi indikator kekuatan struktur akhir dari kompon karet dan dipengaruhi oleh formulasi bahan, termasuk jumlah *filler* yang digunakan. Semakin tinggi nilai MH (*Maximum Torque*), umumnya menunjukkan struktur vulkanisat yang lebih padat dan kuat. Pengujian MH (*Maximum Torque*) dilakukan dalam satu rangkaian yang sama dengan T10 (*Time to 10% Cure*) dan T90 (*Time to 90% Cure*), menggunakan sampel dan alat yang serupa.

g. Pengujian sifat mekanik kompon karet

Pengujian dilakukan terhadap vulkanisat karet untuk mengetahui sifat mekanik. Pengujian dilakukan berdasarkan standar yang telah ditetapkan oleh perusahaan, dan masing-masing pengujian memiliki prosedur yang berbeda-beda. Berikut adalah jenis pengujian dan pembuatan sampel yang dilakukan.

- Pengujian HS (*Hardness Shore A*)

Pengujian *HS (Hardness Shore A)* pada kompon karet bertujuan untuk mengetahui seberapa kuat daya tahan permukaan terhadap tekanan luar. Nilai kekerasan dinyatakan dalam satuan *Shore A*. Proses pengujian diawali dengan meletakkan Sampel berbentuk silinder pada permukaan datar, lalu jarum ditekan tegak lurus ke

permukaan karet menggunakan tuas pada alat hingga angka stabil. Sampel dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Sampel Uji HS (Hardness Shore A)

(Dokumentasi pribadi)

Proses pengujian *hardness* kompon karet dengan *durometer Shore A* dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Proses Pengujian HS (Hardness Shore A)

(Dokumentasi pribadi)

- Pengujian Keausan (*Abrasion Resistance*)

Pengujian keausan (*Abrasion Resistance*) bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana karet mampu menahan keausan permukaan akibat gaya gesek. Uji ini penting dilakukan mengingat untuk aplikasi pada *tread* ban radial, di mana

kompon karet harus memiliki ketahanan aus yang tinggi supaya tidak cepat menipis selama pemakaian.

Sampel yang digunakan dalam pengujian ini memiliki bentuk dan ukuran yang sama seperti pada pengujian *HS (Hardness Shore A)*, yang telah di tunjukan di gambar18. Pengujian dilakukan menggunakan mesin *abrasion resistance tester*, proses pengujian diawali dengan menimbang menggunakan timbangan digital untuk memperoleh massa awal. Selanjutnya, spesimen dipasang pada dudukan mesin uji abrasi dan ditekan secara konstan terhadap permukaan *amplas* kasar yang berputar, dengan beban yang telah ditetapkan pada mesin. Proses pengujian keausan (*Abrasion Resistance*) dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Proses Pengujian Keausan (*Abrasion Resistance*)

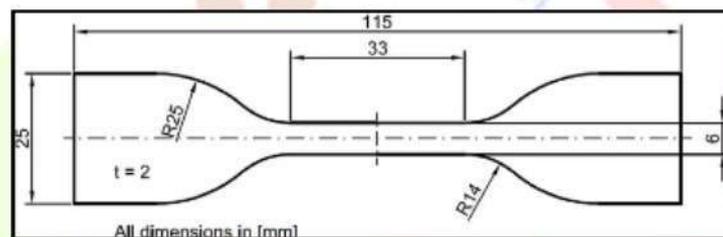
(Dokumentasi pribadi)

Setelah pengujian selesai, sampel ditimbang kembali menggunakan timbangan digital untuk memperoleh massa akhir. Selisih antara massa awal dan massa akhir digunakan

untuk menghitung kehilangan massa akibat abrasi. Prosedur ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM D5963.

- Pengujian Kuat Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian kuat tarik (*Tensile Strength*) bertujuan untuk mengetahui sejauh mana komponen karet mampu menahan gaya tarik sebelum mengalami kerusakan. Pembuatan sampel dilakukan dengan cara memotong vulkanisat karet yang berbentuk lembaran menjadi berbentuk *Dumbbell (Die C)* sesuai dengan standar ASTM D412.



Gambar 21. Spesimen Dumbbell Die C

Sumber (ASTM D412)

Gambar 22 di bawah ini memperlihatkan spesimen uji yang telah dipotong berbentuk *dumbbell Die C*.



Gambar 22. Sampel Die C

(Dokumentasi pribadi)

Pengujian dilakukan menggunakan mesin *universal testing machine* sesuai standar ASTM D412. Pengujian dilakukan dengan memasang spesimen uji dengan cara dijepit pada rahang atas dan bawah alat, data lebar dan tebal spesimen dimasukkan ke dalam komputer. Setelah itu, mesin akan menarik secara terus-menerus hingga spesimen putus dengan kecepatan tarikan 500 mm/menit. Proses pengujian bisa dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Proses Pengujian Kuat tarik (*Tensile Strength*)
(Dokumentasi pribadi)

Gaya maksimum yang mampu ditahan sebelum spesimen putus dibagi dengan luas penampang awal menghasilkan nilai kuat tarik (*Tensile Strength*).

- Pengujian Elongasi (*Elongation at Break*)

Pengujian elongasi (*Elongation at Break*) atau perpanjangan saat putus dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan material karet dalam meregang sebelum mengalami kerusakan atau putus. Proses pengujian

elongation at break dilakukan bersamaan dengan pengujian *tensile strength* menggunakan *universal testing machine* (UTM). Selama Pengujian kuat tarik (*Tensile Strength*) panjang awal dan panjang saat sampel putus diukur, dan dihitung persen perpanjangan dari nilai awal (*elongation at break*).

