

SKRIPSI

**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *SINTERING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN NILAI REDAMAN MATERIAL
TERMOPLASTIK – ELASTOMER UNTUK MATERIAL *SLEEPER***

Oleh:

M. KHALID

D211 16 018



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020



SKRIPSI

**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *SINTERING*
TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN NILAI REDAMAN MATERIAL
TERMOPLASTIK – ELASTOMER UNTUK MATERIAL *SLEEPER***

OLEH :

**M. KHALID
D211 16 018**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020



LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan Mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sejana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

JUDUL :

ANALISA PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *SINTERING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN NILAI REDAMAN MATERIAL TERMOPLASTIK – ELASTOMER UNTUK MATERIAL *SLEEPER*

M. KHALID

D211 16 018

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I



Dr. Hairul Arsyad, ST., MT
NIP. 19750322 200212 1 001

Dosen Pembimbing II



Dr. Muhammad Syahid, ST., MT
NIP. 19770707 200501 1 002

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Eng. Jalaluddin, ST., MT
NIP. 19720825 200003 1 001



PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

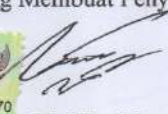
Nama : M. Khalid
Nomor Induk Mahasiswa : D211 16 018
Jenjang Pendidikan : S1
Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan Bahwa Skripsi yang berjudul "*Analisa Pengaruh Temperatur dan Waktu Sintering Terhadap Sifat Mekanik dan Nilai Redaman Material Termoplastik-Elastomer Untuk Material Sleeper*" adalah **BENAR** merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi Skripsi ini hasil karya orang lain atau dikutip tanpa menyebut sumbernya, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Agustus 2020

Yang Membuat Pernyataan



M. Khalid
D211 16 018



ABSTRACT

M. KHALID., *Analysis of the Effect of Temperature and Sintering Time on Mechanical Properties and Damping Value of Thermoplastic Materials - Elastomers (70% HDPE: 30% Rubber) for Sleeper Materials* (supervised by Dr. Hairul Arsyad, ST., MT and Dr. Muhammad Syahid, ST., MT)

This study aims to analyze the effect of temperature and holding time of the sintering process on mechanical properties (tensile strength and bending strength), damping value and microstructure of thermoplastic - elastomeric materials (70% HDPE + 30% rubber) as sleeper materials. The research was conducted using the experimental laboratory method. The specimens were made using powder technology using the sintering method with the variations used were temperature 140°C, 180°C and holding time 10 minutes, 15 minutes and 20 minutes. The materials used in this research are HDPE type plastics derived from oil bottles and rubber from used tires.

The results showed that the mechanical properties including tensile strength did not meet the requirements of wood sleeper classes 1 and 2 where the maximum tensile strength was obtained at a temperature of 140°C with a holding time of 15 minutes at 6.36 MPa and the bending strength both at 140°C and 180°C met the requirements of class 1 and class 1 wood sleepers. 2 where the maximum bending strength is obtained at a temperature of 140°C with a holding time of 15 minutes of 27.78 MPa. The maximum value of vibration amplitude as a damping material is obtained at a temperature of 180°C with a holding time of 10 minutes of 11.62 μm with a damping percentage of 40.46%. The results of microstructure testing showed that the shorter the holding time for surface mass transport bonds was formed and the subsequent increase in holding time formed the bulk mass transport bonds between HDPE powder and rubber and the increase in holding time of 20 minutes at both 140°C and 180°C caused the pores to be bigger.

Keywords: *Sleeper, Thermoplastic-elastomer, Powder Technology, Sintering*



ABSTRAK

M. KHALID., *Analisa Pengaruh Temperatur dan Waktu Sintering Terhadap Sifat Mekanik dan Nilai Redaman Material Termoplastik – Elastomer (70% HDPE : 30% Karet) Untuk Material Sleeper* (dibimbing oleh Dr. Hairul Arsyad, ST., MT dan Dr. Muhammad Syahid, ST., MT)

Penelitian ini bertujuan menganalisa pengaruh temperatur dan *holding time* proses *sintering* terhadap sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan *bending*), nilai redaman dan struktur mikro material termoplastik – elastomer (70% HDPE + 30% karet) sebagai material *sleeper*. Penelitian dilakukan dengan metode *experimental laboratory*. Pembuatan spesimen menerapkan teknologi serbuk dengan metode *sintering* dengan variasi yang digunakan adalah temperatur 140°C, 180°C dan *holding time* 10 menit, 15 menit dan 20 menit. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah plastik jenis HDPE yang berasal dari kemasan botol oli dan karet yang berasal dari ban bekas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik meliputi kekuatan tarik belum memenuhi persyaratan *sleeper* kayu kelas 1 dan 2 dimana kekuatan tarik *maximum* diperoleh pada temperatur 140°C dengan *holding time* 15 menit sebesar 6.36 MPa dan kekuatan *bending* baik pada temperatur 140°C dan 180°C memenuhi persyaratan *sleeper* kayu kelas 1 dan 2 dimana kekuatan *bending maximum* diperoleh pada temperatur 140°C dengan *holding time* 15 menit sebesar 27.78 MPa. Nilai *maximum* amplitudo getaran sebagai material peredam diperoleh pada temperatur 180°C dengan *holding time* 10 menit sebesar 11.62 μ m dengan persentase redaman 40.46%. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan semakin singkatnya *holding time* terbentuk ikatan *surface mass transport* dan peningkatan *holding time* berikutnya membentuk ikatan *bulk masss transport* antar serbuk HDPE dan karet dan peningkatan *holding time* 20 menit baik pada temperatur 140°C dan 180°C menyebabkan pori yang terbentuk lebih besar.

Kata Kunci : *Sleeper, Termoplastik-elastomer, Teknologi Serbuk, Sintering*



KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, atas banyaknya Berkah, Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Salam dan shalawat kepada Nabi Muhammad SAW sebagai tauladan kami yang menghantarkan kita selalu menuntut ilmu untuk bekal akhirat dan duniawi.

Akhir penyusunan skripsi “**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU SINTERING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN NILAI REDAMAN MATERIAL TERMOPLASTIK – ELASTOMER UNTUK MATERIAL *SLEEPER***” sudah ada dihadapan pembaca. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada kedua orang tua dan saudara-saudara saya (penulis) yang selalu memberikan motivasi, support dan kasih sayang serta doa restunya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

Saya menyadari dalam menyelesaikan skripsi dan penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang dihadapi hingga sampai ke titik ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya penelitian dan skripsi ini telah selesai.

h karena ini dengan penuh rasa hormat dan tulus saya selaku penulis
pkan banyak terima kasih kepada Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT



selaku pembimbing pertama dan Dr. Muhammad Syahid, ST., MT selaku pembimbing kedua, yang telah memberikan sangat banyak pelajaran berharga bagi saya, yang tidak bisa ternilai harganya dengan apapun, meluangkan waktu dan tenaganya, dan juga memberikan motivasi dan ide-ide kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Tak lupa pula penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan petunjuk, terutama kepada :

1. Ibu Prof. Dwia Aris Tina Pulubuhu, selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta stafnya.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT, selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Edi Iskandar selaku laboran Laboratorium Metalurgi Fisik yang telah banyak membantu dalam pengerjaan spesimen penelitian dan telah banyak menghibur serta memberikan masukan dan saran yang mendidik.
5. Bapak dan ibu dosen serta staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Mesin khususnya Angkatan 2016 COMPREZZOR. Terima kasih atas bantuan dan dukungannya serta

mangat.



7. Teman-teman asisten Laboratorium Metalurgi Fisik, Laboratorium Teknologi Mekanik dan Laboratorium Getaran dan Akustik yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.
8. Saudara saya musyafriadi yang telah membantu dalam mengumpulkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini.
9. Seluruh pihak yang tidak sempat disebutkan namanya satu per satu.

Akhir kata, *jazakumullah khairan katsiran* atas semuanya dan penulis berharap, tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua khususnya dalam ilmu material dan permesinan. Karenanya, masukan dan kritik rekan-rekan sekalian kiranya dapat membantu pengembangan penelitian ini selanjutnya.

Gowa, 19 Juni 2020

M. Khalid
D211 16 018



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
NOMENKLATUR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Struktur Jalan Rel	7
2.1.1 Bantalan (<i>Sleeper</i>) Rel	11



2.1.2 Material Bantalan (<i>Sleeper</i>) Rel.....	13
2.2 Material Polimer	24
2.2.1 Termoplastik	25
2.2.2 Termoset	28
2.2.3 Elastomer	29
2.2.4 Termoplastik-Elastomer.....	31
2.2.5 <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE).....	33
2.2.6 Karet SBR (<i>Styrene Butadine</i>)	35
2.3 Teknologi Serbuk	37
2.4 <i>Powder Fabrication</i>	38
2.5 <i>Powder Tailoring</i>	40
2.6 Kompaksi (<i>Compaction</i>).....	43
2.7 <i>Sintering</i>	46
2.8 Pengujian	50
2.8.1 Uji Tarik.....	50
2.8.2 Struktur Mikro	53
2.8.3 Pengukuran Getaran (<i>Vibration</i>).....	57
2.8.4 Uji <i>Bending</i>	59

METODOLOGI PENELITIAN

Waktu dan Tempat.....	61
-----------------------	----



3.2 Alat dan Bahan	61
3.3 Metode Pengambilan Data.....	67
3.4 Prosedur Penelitian	67
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	74

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Temperatur dan <i>Holding Time</i> terhadap Kekuatan Tarik.....	75
4.2 Pengaruh Temperatur dan <i>Holding Time</i> terhadap Kekuatan <i>Bending</i> ..	81
4.3 Pengaruh Temperatur dan <i>Holding Time</i> terhadap Besar Amplitudo Getaran Sebagai Material Peredam	83
4.4 Struktur Mikro Material Termoplastik Elastomer Komposisi 70HDPE – 30% Karet.....	92

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	98
5.2 Saran	99

DAFTAR PUSTAKA	100
-----------------------------	------------

LAMPIRAN.....	105
----------------------	------------



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Struktur jalan rel.....	8
Gambar 2.2 : Bentuk molekul rantai polimer.....	25
Gambar 2.3 : Rantai polimer amorf	26
Gambar 2.4 : Rantai polimer semikristalin	27
Gambar 2.5 : Mikrostruktur dari efek pemanasan dan pendinginan selama proses pada termoplastik dan termoset	29
Gambar 2.6 : Ikatan silang pada elastomer	29
Gambar 2.7 : Botol-botol dari plastik HDPE	34
Gambar 2.8 : Simbol <i>recycle</i> HDPE	34
Gambar 2.9 : Ban Mobil merupakan aplikasi karet sintetis jenis SBR.....	35
Gambar 2.10 : Sel <i>electrolytic</i> untuk mendekomposisi material	39
Gambar 2.11 : Mekanisme pencampuran serbuk.....	41
Gambar 2.12 : Skema perubahan partikel serbuk terhadap penambahan tekanan	43
Gambar 2.13 : Grafik hubungan penambahan tekanan terhadap densitas	44
Gambar 2.14 : Skema distribusi tekanan sistem serbuk terhadap kompaksi pada cetakan	45
Gambar 2.15 : Distribusi partikel pada <i>uniaxial single compaction</i>	45
Gambar 2.16 : Mekanisme perpindahan massa serbuk.....	46
Gambar 2.17 : Skema penyusutan rongga-rongga selama proses <i>sintering</i>	47



Gambar 2.18 : <i>Crack propagation</i> pada material berpori	49
Gambar 2.19 : Penyusutan (<i>shrinkage</i>) material setelah <i>sintering</i>	50
Gambar 2.20 : Pembebanan Tarik.....	51
Gambar 2.21 : Standar spesimen <i>cutting dumbbell</i>	52
Gambar 2.22 : Pengujian mikrostruktur.....	54
Gambar 2.23 : Tahapan proses metalografi	55
Gambar 2.24 : Mesin pemotong sampel presisi metkon	55
Gambar 2.25 : Mesin <i>mounting</i> metkon dan hasil <i>mounting</i>	56
Gambar 2.26 : Mesin gerinda dan poles metkon dan permukaan sampel.....	56
Gambar 2.27 : Dua gelombang yang berberda amplitudo	58
Gambar 2.28 : Penampang uji <i>bending</i> (Standart ASTM D 790-20).....	59
Gambar 3.1 : Kikir	61
Gambar 3.2 : <i>Screener</i>	62
Gambar 3.3 : <i>Furnace</i>	62
Gambar 3.4 : WAW-600D <i>Servo Hydraulic Universal Testing Machine</i>	63
Gambar 3.5 : Jangka sorong.....	63
Gambar 3.6 : Miligram <i>electric</i>	64
Gambar 3.7 : Termokopel	64

3.8 : 3D <i>Measuring Laser Microscope</i> OLS4100	65
3.9 : Motor eksiter	65



Gambar 3.10 : <i>Vibexpert II</i>	66
Gambar 3.11 : Botol oli bekas.....	66
Gambar 3.12 : Karet ban mobil.....	67
Gambar 3.13 : Serbuk (a) HDPE dan (b) karet	68
Gambar 3.14 : Hasil pencampuran serbuk HDPE dan karet.....	69
Gambar 3.15 : Spesimen hasil proses <i>sintering</i>	71
Gambar 3.16 : Dimensi spesimen uji tarik.....	72
Gambar 3.17 : Dimensi spesimen uji <i>bending</i> (ISO 178)	73
Gambar 3.18 : Skema pengukuran amplitudo getaran	74
Gambar 4.1 : Data hasil pengujian tarik variasi temperatur dan <i>holding time</i>	76
Gambar 4.2 : Grafik uji tarik material a) temperatur 140°C <i>holding time</i> 15 menit dan b) temperatur 180°C <i>holding time</i> 15 Menit.....	78
Gambar 4.3 : Persentase regangan variasi temperatur dan <i>holding time</i>	80
Gambar 4.4 : Data hasil pengujian kekuatan <i>bending</i> variasi temperatur dan <i>holding time</i>	82
Gambar 4.5 : Perbandingan hasil pengukuran amplitudo berdasarkan <i>time waveform</i> pada variasi temperatur (a) 140°C dan (b) 180°C.....	86
Gambar 4.6 : Perbandingan hasil pengukuran amplitudo berdasarkan <i>spectrum</i> pada variasi temperatur (a) 140°C dan (b) 180°C	90

4.7 : Persentase nilai redaman material termoplastik-elastomer variasi temperatur dan <i>holding time</i>	92
4.8 : Struktur mikro variasi temperatur dan <i>holding time</i>	93



Gambar 4.9 : Kedalaman pori material termoplastik-elastomer komposisi 70% HDPE dan 30% karet dengan variasi (a) 140°C *holding time* 10 menit, (b) 140°C *holding time* 15 menit, (c) 140°C *holding time* 20 menit, (d) 180°C *holding time* 10 menit, (e) 180°C *holding time* 15 menit dan (f) 180°C *holding time* 20 menit.96

Gambar B.1 : Pemilihan dan pengeringan botol oli121

Gambar B.2 : Proses pembuatan serbuk121

Gambar B.3 : *Screening* serbuk122

Gambar B.4 : *Mixing* serbuk122

Gambar B.5 : Proses kompaksi123

Gambar B.6 : Proses *sintering*123

Gambar B.7 : Spesimen uji tarik124

Gambar B.8 : Proses pengujian tarik.....124

Gambar B.9 : Spesimen uji *bending*125

Gambar B.10 : Proses pengujian *bending*126

Gambar B.11 : Proses pengukuran amplitudo.....127

Gambar B.12 : Proses foto stuktur mikro.....127



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Karakteristik rel	9
Tabel 2.2 : Dimensi dan toleransi bantalan kayu yang diijinkan di Indonesia	13
Tabel 2.3 : Bantalan komposit tipe 1	22
Tabel 2.4 : Bantalan komposit tipe 3	24
Tabel 2.5 : Sifat dan struktur dari polimer amorf dan kristalin.....	27
Tabel 2.6 : Jenis plastik beserta contohnya.....	30
Tabel 2.7 : <i>Property Ranges of Selected Thermoplastic-Elastomer (TPEs)</i>	32
Tabel 4.1 : Hasil pengukuran getaran berdasarkan <i>time waveform</i>	88
Tabel 4.2 : Hasil pengukuran getaran berdasarkan <i>spectrum</i>	91
Tabel A.1 : Uji tarik	105
Tabel A.2 : Data regangan	106
Tabel A.2 : Uji <i>bending</i>	106
Tabel A.3 : <i>Minimum</i> amplitudo	107
Tabel A.4 : <i>Maximum</i> amplitudo	107



NOMENKLATUR

NOTASI	KETERANGAN	SATUAN
N_c	Kecepatan Putar Kritis	RPM
d	Diameter Tabung/Tebal Spesimen	Mm
F_c	Gaya sentrifugal	N
F_g	Gaya gravitasi	N
m	Massa	Kg
V	Volume	mm ³
ρ_T	Densitas Campuran Serbuk	g/cm ²
W_T	Massa Total	G
V_T	Volume Total	cm ²
W_A	Massa Serbuk A	G
W_B	Massa Serbuk B	G
ρ_A	Densitas Serbuk A	g/cm ³
ρ_B	Densitas Serbuk B	g/cm ³
σ	Tegangan Nominal	kg/mm ²
P	Gaya Tarik Aksial/Beban	N
A_0	Luas Penampang Normal	mm ²
M	Momen Lentur	N/mm
p	Panjang	mm
L	Jarak Antar Titik Tumpuan	mm
B	Lebar Spesimen	Mm
σ_b	Kekuatan <i>Bending</i>	MPa
f	Frekuensi	Hz
A_0	Amplitudo Tanpa Peredam	μm
	Amplitudo Teredam	μm
	Temperatur	°C
	Temperatur Transisi <i>Glass</i>	°C



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah terutama plastik dan karet adalah hal yang tidak bisa dihindari lagi saat ini. Limbah bahan plastik dan karet masih menjadi salah satu permasalahan dan kesadaran untuk membuang sampah pada tempatnya masih diperlukan usaha yang sangat besar dari berbagai pihak.

Semakin meningkatnya limbah plastik ini akan menjadi masalah serius bila tidak dicari penyelesaiannya. Penanganan limbah plastik yang populer selama ini adalah dengan 3R (*Reuse, Reduce, Recycle*). *Reuse* adalah memakai berulang kali barang-barang yang terbuat dari plastik. *Reduce* adalah mengurangi pembelian atau penggunaan barang-barang dari plastik, terutama barang-barang yang sekali pakai. *Recycle* adalah mendaur ulang barang-barang yang terbuat dari plastik. Disamping dapat menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan, limbah plastik maupun karet dapat juga dimanfaatkan salah satunya pembuatan material termoplastik-elastomer. Material termoplastik-elastomer dibuat dari dua atau lebih bahan untuk memperoleh properti yang lebih unggul dari komponen individu. Setiap kombinasi material akan memiliki sifat yang berbeda satu sama lain.



Material komposit dapat menjadi alternatif yang baik untuk tumpukan (*sleeper*) rel kereta saat ini karena memiliki sifat seperti ketahanan terhadap korosi dan kimia, daya tahan lingkungan, dan kekuatan spesifik

yang tinggi. Material komposit akan menciptakan manfaat ekologis karena mendaur ulang limbah plastik sehingga menyebabkan pengurangan plastik di tempat pembuangan sampah. Teknologi material komposit yang menggunakan *filler* serbuk sudah banyak dikembangkan dengan tujuan untuk mendapatkan material baru pengganti logam. Karena pada umumnya material bermatrik polimer memiliki densitas yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan logam. Penambahan *filler* pada umumnya bertujuan untuk meningkatkan sifat fisik material dan bertujuan mencampur sesuatu yang lebih murah dibanding dengan menggunakan polimer murni (Ismariny, 2007).

Penerapan teknologi *sleeper* komposit rel kereta telah dikembangkan diberbagai belahan dunia. Teknologi ini muncul sebagai alternatif untuk *sleeper* berbahan kayu. Berbeda dengan baja dan beton, *sleeper* komposit dapat dirancang untuk meniru sifat *sleeper* kayu. Saat ini teknologi *sleeper* komposit rel kereta yang terbuat dari bahan plastik daur ulang baik tanpa maupun mengandung penguat serat dibagi atas 3 tipe yaitu *sleeper* tanpa atau dengan penguat serat pendek (tipe 1), *sleeper* dengan penguat serat panjang dalam arah longitudinal (tipe 2) dan *sleeper* dengan penguat serat dalam arah longitudinal dan melintang (tipe 3).

Sleeper yang terbuat dari plastik daur ulang (kantong plastik, ban bekas, gelas plastik, botol deterjen, dll) dengan *filler* (pasir, kerikil, kaca daur ulang atau serat kaca pendek < 20 mm) termasuk *sleeper* tipe 1. Selama proses pembuatan untuk komposit *sleeper* tipe 1, bahan dicampur dan



dilelehkan untuk membuat campuran yang homogen kemudian di ekstrusi menjadi cetakan.

Meskipun sebagian besar produsen *sleeper* komposit telah mengevaluasi kinerja secara statis, kinerja jangka panjang dalam hal aspek seperti sifat dinamis, kelelahan dan daya tahan semua jenis *sleeper* masih belum diketahui. Tingginya biaya perawatan dan masalah lingkungan dari *sleeper* kayu, beton dan baja telah memotivasi untuk memikirkan alternatif *sleeper* yang terbuat dari bahan komposit (Wahid Ferdous, dkk. 2015).

High Density Polyethylene (HDPE) merupakan salah satu bahan paling populer sebagai matriks untuk bahan komposit (Tuba Evgin dkk, 2019). *High Density Polyethylene* (HDPE) termasuk dalam kategori termoplastik, karena memiliki ikatan antar molekul yang linier sehingga dapat mengalami pelunakan atau perubahan bentuk, dengan kata lain meleleh, jika dikenai panas (Billmeyer, 1994). Karet alam maupun sintetis memiliki kelebihan dan kekurangan yang mempengaruhi sifat fisis kompon karet yang dihasilkan. Ketahanan kompon karet tergantung dari bahan penyusunnya, baik karet alam maupun karet sintetis. Karet alam tidak tahan terhadap ozon dan panas, tetapi memiliki ketahanan kikis yang tinggi. Sedangkan karet sintetis tahan terhadap ozon, panas dan ketahanan retak. Material elastomer berbasis *Styrene-Butadiene Rubber* (SBR) memiliki ketahanan retak yang cukup baik, tahan air dan tahan terhadap cuaca (Fassan dkk, 2012).



Berdasarkan uraian di atas, penulis tertarik untuk mengadakan penelitian sebagai tugas akhir dengan judul “**ANALISA PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *SINTERING* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN NILAI REDAMAN MATERIAL TERMOPLASTIK – ELASTOMER UNTUK MATERIAL *SLEEPER***”.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan lentur), nilai redaman dan struktur mikro dari material termoplastik – elastomer (70% HDPE + 30% karet) untuk material *sleeper* ?
2. Bagaimana pengaruh temperatur dan *holding time* proses *sintering* terhadap sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan lentur), nilai redaman dan struktur mikro material termoplastik – elastomer (70% HDPE + 30% karet) ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa sifat mekanik (kekuatan tarik dan kekuatan lentur), nilai redaman dan struktur mikro dari material 70% HDPE + 30% karet (HDPE-Elastomer) untuk material *sleeper*.
2. Menganalisa pengaruh temperatur dan *holding time* proses *sintering* terhadap sifat mekanik meliputi kekuatan tarik dan kekuatan lentur,



nilai redaman dan struktur mikro material 70% HDPE + 30% karet (HDPE-Elastomer).

I.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) dan karet ban jenis *Styrene-Butadiene Rubber* (SBR).
2. *Screening* dengan ukuran 45 *mesh* dilakukan pada serbuk *High Density Polyethylene* (HDPE) dan karet ban jenis *Styrene-Butadiene Rubber* (SBR).
3. Proses kompaksi dilakukan dengan tekanan maksimum sebesar 8.2 MPa.
4. Temperatur *sintering* dilakukan dengan variasi 140 °C dan 180 °C.
5. *Holding time sintering* dilakukan dengan variasi 10 menit, 15 menit, dan 20 menit.
6. Pengujian yang digunakan yaitu sifat mekanik meliputi kekuatan tarik dan kekuatan lentur, besar amplitudo sebagai material peredam dan struktur mikro.

I.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:



1. Dapat memberikan informasi sebagai referensi tambahan yang ingin melakukan riset secara khusus di bidang teknologi material termoplastik-elastomer.
2. Dapat menghasilkan material yang relatif baru dan dapat diterima secara teknik serta ekonomis.
3. Dapat mengurangi permasalahan sampah, terutama sampah plastik dan karet, dengan penerapan salah satu dari prinsip 3R, yaitu *recycle*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Jalan Rel

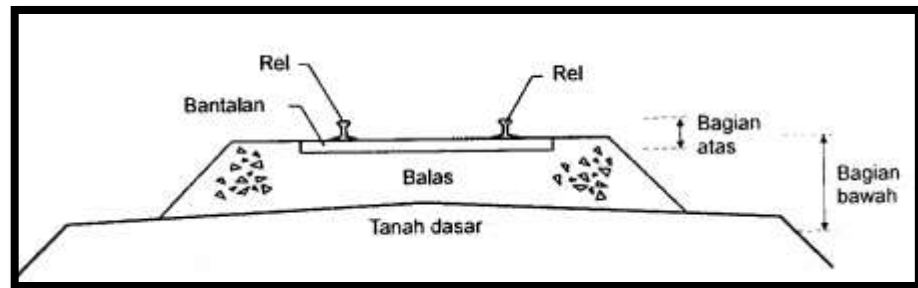
Struktur jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Kereta api dalam menjalankan fungsinya sebagai sarana transportasi bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya berjalan diatas jalan rel. Secara umum, pada teknologi konvensional berupa Teknologi Dua Rel Sejajar, jalan rel terbentuk dari dua batang rel baja diletakkan di atas balok-balok melintang. Balok-balok melintang ini disebut bantalan. Untuk menjaga agar sepaya rel tetap pada kedudukannya, rel tersebut ditambatkan pada bantalan dengan menggunakan penambat rel. Dengan susunan dan tambatan yang demikian maka susunan dan struktur rel, bantalan dan penambat rel menjadi suatu rangka yang kokoh. Rangka yang kokoh tersebut bersambungan secara memanjang membentuk jalur yang disebut dengan sepur (*track*). Sepur diletakkan di suatu alas yang disebut balas (*ballast*), yang selanjutnya dibawah balas terdapat lapisan tanah dasar (*subgrade*). (Hapsoro, Suryo. 2009)

Selanjutnya komponen-komponen struktur jalan rel tersebut di atas dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut :



- Struktur bagian atas, yaitu bagian lintasan, terdiri dari atas rel, bantalan dan penambat rel.

2. Struktur bagian bawah, yaitu bagian pondasi terdiri atas balas dan tanah dasar. (Hapsoro, Suryo. 2009)



Gambar 2.1 : Struktur jalan rel

Secara umum komponen-komponen penyusun jalan rel dijelaskan sebagai berikut:

1. Rel (*Rail*)

Rel merupakan batangan baja longitudinal yang berhubungan secara langsung, dan memberikan tuntunan dan tumpuan terhadap pergerakan roda kereta api secara berterusan. Rel ditumpu oleh bantalan-bantalan, sehingga pada saat kereta api melintasi jalan rel tekanan tegak lurus dari roda akan menyebabkan momen lentur pada rel diantara bantalan-bantalan. Selain itu, gaya arah horizontal yang disebabkan oleh gaya angin, goyangan kereta api dan gaya sentrifugal menyebabkan terjadinya momen lentur arah horizontal.

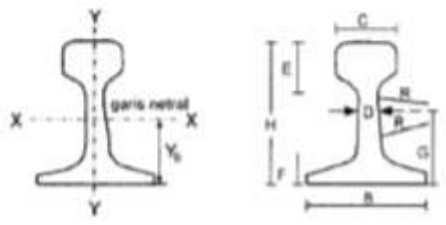
Keausan rel umumnya terjadi pada bagian kepala, oleh karenanya untuk mendapatkan umur rel yang lebih panjang, bagian kepala diperbesar. Usaha lain yang dilakukan untuk mempertahankan ketahanan terhadap aus adalah dengan memperbesar kepala rel sebagai



tempat tumpuan roda kereta api. Roda kereta api yang melintas merupakan penyaluran beban yang melintas serta mengakibatkan gesekan secara konstan terhadap rel yang berisiko terhadap keausan rel.

Karakteristik penampang rel kereta api sesuai dengan Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10) dijelaskan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 : Karakteristik rel

Karakteristik Rel		Tipe Rel			
Karakteristik	Notasi dan satuan	R. 42	R. 50	R. 54	R. 60
Tinggi Rel	H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
Lebar kaki	B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
Lebar Kepala	C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
Tebal badan	D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
Tinggi Kepala	E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
Tinggi kaki	F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
Jarak tepi bawah kaki rel ke garis horizontal dari pusat kelengkungan badan rel	G (mm)	72,00	76,00	74,97	80,95
Jari-jari kelengkungan badan rel	R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
Luas penampang	A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
Berat Rel	W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
Momen inersia terhadap sumbu X	I _x (cm ⁴)	1,369	1,960	2,346	3,055
Jarak tepi bawah kaki rel ke garis netral	Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
Penampang melintang					

Sumber : Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10)-1986



2. Penambat (*Fastening System*)

Untuk menghubungkan diantara bantalan dengan rel digunakan suatu sistem penambat yang jenis dan bentuknya bervariasi sesuai dengan jenis bantalan yang digunakan serta klasifikasi jalan rel yang harus dilayani.

3. Bantalan (*Sleeper*)

Bantalan memiliki beberapa fungsi yang penting, diantaranya menerima beban dari rel dan mendistribusikannya kepada lapisan balas dengan tingkat tekanan yang kecil, mempertahankan sistem penambat untuk mengikat rel pada kedudukannya, dan menahan pergerakan rel arah longitudinal, lateral dan vertikal. Bantalan terbagi menurut bahan konstruksinya, seperti bantalan besi, kayu maupun beton. Perancangan bantalan yang baik sangat diperlukan supaya fungsi bantalan dapat optimal.

4. Lapisan Pondasi Atas atau Lapisan Balas (*Ballast*)

Konstruksi lapisan balas terdiri dari material granular/butiran dan diletakkan sebagai lapisan permukaan (atas) dari konstruksi sub-struktur. Material balas yang baik berasal dari batuan yang bersudut, pecah, keras, bergradasi yang sama, bebas dari debu dan kotoran dan tidak pipih (*prone*). Meskipun demikian, pada kenyataannya, klasifikasi butiran di atas sukar untuk diperoleh/dipertahankan, oleh yang demikian, permasalahan pemilihan material balas yang ekonomis dan memungkinkan secara teknis masih mendapat perhatian dalam kajian



dan penelitian. Lapisan balas berfungsi untuk menahan gaya vertikal (cabut/*uplift*), lateral dan longitudinal yang dibebankan kepada bantalan sehingga bantalan dapat mempertahankan jalan rel pada posisi yang disyaratkan.

5. Lapisan Fondasi Bawah atau Lapisan Subbalas (*Subballast*)

Lapisan diantara lapisan balas dan lapisan tanah dasar adalah lapisan sub-balas. Lapisan ini berfungsi sebagaimana lapisan balas, diantaranya mengurangi tekanan di bawah balas sehingga dapat didistribusikan kepada lapisan tanah dasar sesuai dengan tingkatannya.

6. Lapisan Tanah Dasar (*Sugrade*)

Lapisan tanah dasar merupakan lapisan dasar pada struktur jalan rel yang harus dibangun terlebih dahulu. Fungsi utama dari lapisan tanah dasar adalah menyediakan landasan yang stabil untuk lapisan balas dan subbalas. Perilaku tanah dasar adalah komponen substruktur yang sangat penting yang mana memiliki peranan yang signifikan berkait pada sifat teknis dan perawatan jalan rel.

2.1.1 Bantalan (*Sleeper*) Rel

Bantalan rel adalah landasan tempat rel bertumpu dan diikat dengan penambat rel, oleh karena itu harus cukup kuat untuk menahan beban kereta api yang berjalan di atas rel. Bantalan merupakan bagian penyusun struktur

as konstruksi jalan rel mempunyai peranan sebagai berikut:



- a. Mendukung rel dan meneruskan beban ke balas dengan bidang sebaran beban lebih luas sehingga memperkecil tekanan yang dipikul balas,
- b. Mengikat/memegang rel (dengan penambat rel) sehingga gerakan rel arah horizontal tegak lurus sumbu sepur ataupun arah membujur searah sumbu dapat ditahan, sehingga jarak antara rel dan kemiringan kedudukan rel dapat dipertahankan,
- c. Memberikan stabilitas kedudukan sepur di dalam balas,
- d. Menghindarkan kontak langsung antara rel dengan air tanah.

Secara ideal jarak bantalan atau jumlah bantalan dalam satu satuan panjang rel tergantung pada hal-hal berikut:

- Tipe, potongan melintang dan kekuatan rel.
- Jenis dan kekuatan bantalan.
- Balas tempat bantalan diletakkan.
- Beban gandar, volume dan kecepatan kereta api.

Secara praktis di Indonesia digunakan jarak bantalan sebagai berikut:

- Jarak bantalan pada lintas lurus ialah 60 cm, sehingga jumlah bantalan yang dipasang adalah 1667 buah untuk tiap km panjang.
- Pada tikungan/lengkung, jarak bantalan ialah sebesar 60 cm (diukur pada rel luar).

Jarak ini seragam sepanjang jalur, kecuali pada bantalan tempat sambungan rel berada. (Hapsoro, Suryo. 2009)



2.1.2 Material Bantalan (*Sleeper*) Rel

Pemilihan material bantalan yang digunakan dalam konstruksi jalan rel umumnya terbuat dari kayu, baja ataupun beton. Penerapan teknologi *sleeper* komposit rel kereta telah dikembangkan diberbagai belahan dunia. Teknologi ini muncul sebagai alternatif untuk *sleeper* berbahan kayu. Berbeda dengan baja dan beton, *sleeper* komposit dapat dirancang untuk meniru sifat *sleeper* kayu.

1. Bantalan Kayu

Kayu yang digunakan sebagai bantalan pada umumnya merupakan jenis kayu mutu A, dengan kelas kuat I atau II dan kelas awet I atau II. Jenis kayu yang biasa digunakan oleh PT Kereta Api untuk bantalan rel adalah jenis kayu jati dan kayu besi. Bantalan dengan jenis kayu jati dapat bertahan 16 sampai 20 tahun bahkan lebih. Bentuk dan dimensi bantalan kayu umumnya digunakan sesuai dengan lebar sepur konstruksi jalan kereta api di Indonesia yaitu 1067 mm. Dimensi bantalan kayu berikut toleransi yang masih di ijinakan dijelaskan pada tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2.2 : Dimensi dan toleransi bantalan kayu yang diijinkan di Indonesia

No.	Letak Bantalan	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)
1	Pada jalan lurus	2000 (+40, -20)	220 (-20, -10)	130 (-10, 0)
2	Pada jembatan	1800 (+40, -20)	220 (-20, -10)	200 (-10, 0)



Selain standar dimensi yang digunakan tersebut diatas, terdapat persyaratan bahwa bentuk penampang melintang pada dimensi bantalan kayu harus berupa empat persegi panjang, bidang sisi atas dan sisi bawah harus rata dan sejajar.

Akibat dari sifat-sifat yang dimiliki oleh bahan kayu, maka penggunaan bantalan kayu mempunyai keunggulan yang menonjol sebagai berikut:

- Elastisitas baik, mampu meredam getaran, sentakan dan kebisingan.
- Ringan, mudah dibentuk sesuai ukuran yang dikehendaki.
- Penggantian bantalan mudah dilakukan.

Kelamahan utama yang ada pada bantalan kayu ialah:

- Akibat dari pelapukan dan serangan binatang-binatang kecil (rayap dan sejenisnya), umur penggunaan menjadi berkurang.
- Kayu merupakan bahan yang mudah terbakar.
- Nilai sisa rendah.

Kerusakan yang terjadi pada bantalan kayu umumnya disebabkan oleh beberapa hal, misalnya tekanan rel atau beban dinamis yang melintas. Agar kerusakan akibat tekanan rel dapat dikurangi maka perletakan rel pada bantalan harus dalam keadaan tepat dan tidak mudah bergeser. Sebagai upaya untuk memperpanjang umur bantalan kayu, antara rel dan bantalan perlu dipasang pelat landas. Pelat landas



ini berfungsi untuk mengurangi kerusakan pada bantalan akibat beban dinamis yang diterima kemudian diteruskan melalui rel kepada bantalan.

Momen pada bantalan kayu dapat dihitung dengan teori balok berhingga (*finite beam*) di atas tumpuan elastis (*elastic foundation*). Adapun momen maksimum yang dapat dipikul oleh bantalan kayu dihitung berdasarkan tegangan ijin lentur kayu (σ_u) sesuai dengan kelasnya, yaitu:

- a. Kayu kelas I : $\sigma = 125 \text{ Kg/cm}^2$.
- b. Kayu kelas II : $\sigma = 83 \text{ Kg/cm}^2$ (Hapsoro, Suryo. 2009).

Bantalan kayu, harus memenuhi persyaratan kayu mutu A kelas 1 dengan modulus elastisitas (E) minimum 125.000 kg/cm^2 . Harus mampu menahan momen maksimum sebesar 800 kg-m , lentur absolute tidak boleh kurang dari 46 kg/cm^2 . Berat jenis kayu minimum = 0.9 kg/mm^3 , kadar air maksimum 15%, tanpa mata kayu, retak tidak boleh sepanjang 230 mm dari ujung kayu.

2. Bantalan Baja

Bantalan kayu dipilih sebagai struktur bantalan pada jalan rel dengan pertimbangan bahannya yang mudah diperoleh (jika masih memungkinkan dari hutan tropis) dan mudah dalam pembentukan dimensi (tidak melibatkan peralatan yang berat dan rumit). Meskipun demikian, penggunaan bantalan kayu saat ini di Indonesia saat ini



sangat jarang dipilih karena pertimbangan konservasi hutan terkait dengan semakin mahalnya harga kayu untuk Kelas Kuat I dan II. Oleh karena itu, sebagai alternatifnya digunakan bantalan besi.

Keunggulan bantalan besi adalah penggunaan bantalan baja dalam jalan kereta api mempertimbangkan beberapa keunggulan, antara lain : umur bantalan yang relatif panjang memiliki berat struktur bantalan yang ringan, kemudahan dalam pemasangan dan pengangkutan. Bantalan besi terbuat dari bahan baja dapat menghindari keretakan yang terdapat pada bantalan beton dan kayu. Keretakan dapat tereliminasi karena besi/baja memiliki elastisitas yang lebih besar. Sedangkan kelemahan bantalan besi meskipun demikian, jika dilihat dari penampang bantalan besi, tipe ini memiliki kelemahan dalam stabilitas lateral dan axialnya yang kurang baik dibandingkan bantalan kayu dan beton. Ini disebabkan berat sendiri bantalan besi yang kecil (47,1 kg) dan gesekan di antara permukaan bantalan dengan balas relatif lebih kecil sehingga tidak bisa dipakai untuk jalan dengan kecepatan tinggi dan pemakaian rel yang menerus. Selain itu, untuk meminimalkan adanya karat, bantalan besi harus senantiasa kering sehingga struktur bawah jalan rel harus mampu meloloskan air secara baik. Demikian seterusnya, pemakaian bantalan untuk daerah yang sulit kering dan sering terendam (misalnya: daerah perlintasan), maka tidak diperbolehkan memakai bantalan besi.



Sebagaimana bantalan kayu, perencanaan bantalan besi juga menggunakan teori tegangan lentur dengan momen lentur dihitung berdasarkan teori balok berhingga di atas tumpuan elastis. Dengan persyaratan tahanan momen dan tegangan ijin yang dipakai, maka beban yang dapat diterima akan terhitung, baik beban statis maupun dinamis. Dengan demikian, beban gandar dan kendaraan dapat ditentukan selanjutnya (Hapsoro, Suryo. 2009).

Bantalan besi harus memiliki kandungan *Carbon Manganese Steel Grade 900 A*, pada bagian tengah bantalan maupun pada bagian bawah rel, mampu menahan momen maksimum sebesar 650 kg.m, tegangan tarik 88 – 103 kg.m dan *elongation A1* > 10%.

3. Bantalan Beton

Bantalan beton merupakan struktur prategang:

1. Untuk lebar jalan rel 1067 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 500 kg/cm kg/cm², dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16.876 kg/cm kg/cm² (1.655 MPa). Bantalan beton harus mampu memikul momen minimum sebesar +1500 kg.m pada bagian dudukan rel dan -930 kg.m pada bagian tengah bantalan.
2. Untuk lebar jalan rel 1435 mm dengan kuat tekan karakteristik beton tidak kurang dari 600 kg/cm kg/cm², dan mutu baja prategang dengan tegangan putus (*tensile strength*) minimum sebesar 16.876 kg/cm kg/cm² (1.655 MPa). Bantalan beton harus



mampu memikul momen minimum sesuai dengan desain beban gandar dan kecepatan.

3. Dimensi bantalan beton

a. Untuk lebar jalan rel 1067 mm:

- Panjang : 2000 mm
- Lebar maksimum : 260 mm
- Tinggi maksimum : 220 mm

b. Untuk lebar jalan rel 1435 mm:

- Panjang : 2440 mm untuk beban gandar sampai dengan 22.5 ton; 2740 mm untuk beban gandar di atas 22.5 ton
- Lebar maksimum : 330 mm
- Tinggi di bawah dudukan rel : 220 mm.

Bantalan jalan rel mempunyai fungsi sebagai berikut :

- Mendukung rel dan meneruskan beban dari rel ke balas dengan bidang sebaran beban lebih luas sehingga memperkecil tekanan yang dipikul balas
- Mengikat/memegang rel (dengan penambat rel) sehingga gerakan rel arah horizontal tegak lurus sumbu sepur ataupun arah membujur searah sumbu sepur dapat ditahan, sehingga jarak antara rel dan kemiringan kedudukan rel dapat dipertahankan.
- Memberikan stabilitas kedudukan sepur di dalam balas.
- Menghindarkan kontak langsung antara rel dengan air tanah.



Bantalan beton memiliki keunggulan dan kelemahan, adapun keunggulan yang ada pada bantalan beton sebagai berikut :

- Stabilitas baik, dapat menjaga lebar sepur dengan baik.
- Umur konstruksi panjang.
- Tidak dapat terbakar.
- Pengendalian mutu bahan mudah dilaksanakan, cocok untuk produk massal (*mass production*), dan
- Beton bukan konduktor listrik, sehingga dapat digunakan untuk sepur dengan elektrifikasi.

Sedangkan kelemahan bantalan beton ialah :

- Kurang elastik dibandingkan dengan bantalan kayu.
- Pemasangan secara manual sulit karena berat bantalan. Bantalan beton mempunyai berat sendiri yang cukup besar, yaitu antara 160-200 kg.
- Kemungkinan kerusakan pada proses pengangkutan dan pengangkatan
- Tidak meredam getaran dan kebisingan (perlu konstruksi tambahan untuk meredam), dan
- Nilai sisa sangat kecil.

Secara ideal jarak bantalan atau jumlah bantalan dalam satu satuan panjang rel tergantung pada hal-hal berikut :

- Tipe, potongan melintang, dan kekuatan rel.



- Jenis dan kekuatan bantalan.
- Balas tempat bantalan diletakkan.
- Beban gandap, volume dan kecepatan kereta api.

Secara praktis di Indonesia digunakan jarak bantalan sebagai berikut:

- Jarak bantalan pada lalu lintas ialah 60 cm, sehingga jumlah bantalan yang dipasang adalah 1667 buah untuk tiap km panjang.
- Pada tikungan/lengkung, jarak bantalan ialah sebesar 60 cm (diukur pada rel luar).

Jarak ini seragam sepanjang jalur, kecuali pada bantalan tempat sambungan rel berada. (Hapsoro, Suryo. 2009)

4. Bantalan komposit

Material komposit dapat menjadi alternatif yang baik untuk bantalan (*sleeper*) rel kereta saat ini karena memiliki sifat seperti ketahanan terhadap korosi dan kimia, daya tahan lingkungan, dan kekuatan spesifik yang tinggi. Material komposit akan menciptakan manfaat ekologis karena mendaur ulang limbah plastik sehingga menyebabkan pengurangan plastik di tempat pembuangan sampah. Teknologi material komposit yang menggunakan *filler* serbuk sudah banyak dikembangkan dengan tujuan untuk mendapatkan material baru pengganti logam. Karena pada umumnya material bermatrik polimer memiliki densitas yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan logam. Penambahan *filler* pada umumnya bertujuan untuk meningkatkan sifat



fisik material dan bertujuan mencampur sesuatu yang lebih murah dibanding dengan menggunakan polimer murni (Ismariny, 2007).

Penerapan teknologi *sleeper* komposit rel kereta telah dikembangkan diberbagai belahan dunia. Teknologi ini muncul sebagai alternatif untuk *sleeper* berbahan kayu. Berbeda dengan baja dan beton, *sleeper* komposit dapat dirancang untuk meniru sifat *sleeper* kayu. Saat ini teknologi *sleeper* komposit rel kereta yang terbuat dari bahan plastik daur ulang baik tanpa maupun mengandung penguat serat dibagi atas 3 tipe yaitu:

- a. *Sleeper* tanpa atau dengan penguat serat pendek (tipe 1)

Sleeper yang terbuat dari plastik daur ulang (kantong plastik, ban bekas, gelas plastik, botol deterjen, dll) dengan *filler* (pasir, kerikil, kaca daur ulang atau serat kaca pendek < 20 mm) termasuk *sleeper* tipe 1. Selama proses pembuatan untuk komposit *sleeper* tipe 1, bahan dicampur dan dilelehkan untuk membuat campuran yang homogen kemudian di ekstrusi menjadi cetakan.

Bantalan tipe-1 menawarkan berbagai manfaat termasuk kemudahan pengeboran dan potong, daya tahan yang baik, menggunakan bahan dari limbah, harga yang relatif murah, dan tangguh. Namun, bantalan ini memiliki kekuarangan seperti kekuatan dan kekakuan yang rendah, fleksibilitas desain yang terbatas, temperatur dan sensitivitas terhadap *creep*, dan resistensi yang rendah terhadap api. Tabel 2.3 menunjukkan beberapa jenis dari bantalan tipe 1.



Tabel 2.3 : Bantalan komposit tipe 1

Name	Materials	Country	Aplications
TieTek	85% recycled plastic (tyres, waste fiberglass)	USA	Mainline sleeper, turnout bearers and bridge transoms
Axion	100% recycled plastic (plastic bag, bootles etc.)	USA	Mainline sleeper, turnout bearers and bridge transoms
IntegriCo	Landfill-bound 100% recycled plastic materials	USA	Commuter, industrial and mining
i-Plas	100% domestic and industrial recycled plastic	UK	Timber replacement
Tufflex	Mix of recycled polypropylene and polyehylene	S. Africa	Underground rail track and narrow gauge line
Natural Rubber	Natural rubber	Thailand	Narrow gauge line
KLP	100% recycled plastic materials	Netherland	Mainline sleeper, turnout bearers and bridge transoms
MPW	Polymer, mixxed plastic and glass fibre waste	Germany	Timber replacement
Wood core	Plastic reinforced with wooden beam	USA	Timber replacement



b. *Sleeper* dengan penguat serat panjang dalam arah longitudinal (tipe 2)

Bantalan tipe 2 ini adalah teknologi bantalan yang diperkuat dengan serat penguat kaca panjang dalam arah longitudinal dan tidak ada atau sangat pendek dalam arah melintang. Kekuatan dan kekakuan dalam arah longitudinal terutama diatur oleh serat kaca panjang sementara itu arah melintang didominasi oleh polimer. Bantalan ini terutama cocok untuk diaplikasikan lintasan balas dimana tekanan pada bantalan diatur oleh pembebanan lentur. Mudah untuk mengebor dan memotong, memiliki daya tahan yang baik, kekuatan lentur yang unggul dan modulus elastisitas adalah keuntungan dari bantalan ini. Namun, memiliki kekuatan dan modulus geser yang rendah, fleksibilitas desain terbatas dan biaya yang relatif tinggi adalah beberapa masalah yang menantang terkait dengan bantalan.

c. *Sleeper* dengan penguat serat dalam arah longitudinal dan melintang (tipe 3)

Bantalan tipe 3 memiliki serat penguat panjang baik dalam arah longitudinal dan melintang sehingga akibatnya perilaku lentur dan geser didominasi oleh serat. Dalam beberapa kasus, kerugian dari bantalan polimer yang diperkuat serat kaca yang tidak ulet dapat diatasi dengan memasukkan beberapa tulangan baja. Bantalan ini memiliki kelebihan diantaranya fleksibilitas desain yang bagus, kekuatan lentur dan geser yang baik, pengeboran yang mudah dan kinerja terhadap api. Namun, proses produksi teknologi bantalan ini termasuk dalam kategori yang



cukup lama sehingga biaya produksi juga relatif tinggi. Tabel 2.4 menunjukkan beberapa jenis bantalan tipe ini. (Wahid Ferdous, dkk. 2015).

Tabel 2.4 : Bantalan komposit tipe 3

Name	Materials	Country	Applications
Sandwich	Glue laminated	Australia	Mainline sleeper,
	sandwich composite		turnout bearers and bridge transoms
Hybrid	Geopolymer concrete	Australia	Mainline sleeper,
	filled pulpruted composite		turnout bearers and bridge transoms

2.2 Material Polimer

Polimer (*polymer*) berasal dari bahasa Yunani yaitu *poly* (banyak) dan *mer* (partikel/molekul). Polimer adalah molekul besar (makromolekul) yang dibangun oleh pengulangan unit kimia yang kecil dan sederhana (*mer*). Unit yang diulang dapat sama atau hampir sama dengan *monomer*, yaitu material awal pembentuk polimer. Pengulangan ini akan terus terjadi hingga menjadi seperti rantai disebut rantai polimer. Istilah “plastik” diartikan sebagai polimer (dengan rantai yang sangat panjang) yang diproses baik dalam keadaan *plastic* maupun *soft* yang memiliki kemampuan alir dan juga dapat dibentuk.



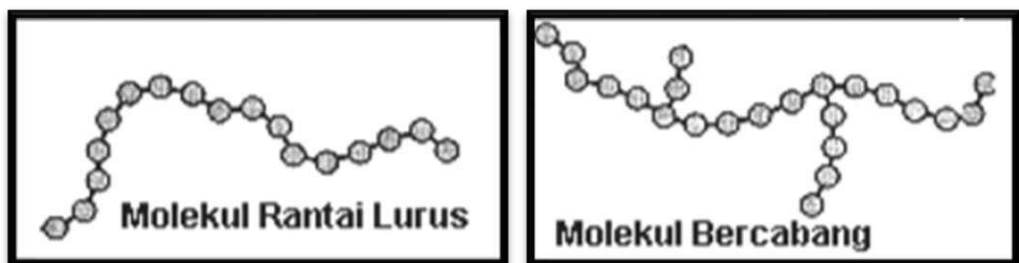
Pada dasarnya, polimer dapat dibagi atas polimer alamiah dan polimer sintetis. Polimer alamiah adalah polimer yang langsung diambil

dari tumbuhan dan hewan. Polimer jenis ini telah dimanfaatkan manusia selama berabad-abad seperti karet, kayu, kapas, wol dan kulit. Selain itu, terdapat pula polimer alamiah yang sangat diperlukan dalam proses-proses biologis dan fisiologis tumbuh-tumbuhan dan hewan, seperti protein, enzim dan selulosa. Sedangkan polimer sintetis merupakan polimer hasil buatan manusia. Saat ini hampir seluruh manusia baik sebagian atau seluruhnya terbuat dari polimer sintetis.

Polimer diklasifikasikan berdasarkan struktur makromolekul dan mekanisme ikatan di dalamnya. Berdasarkan kriteria tersebut, polimer dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok, yaitu termoplastik, termoset dan elastomer.

2.2.1 Termoplastik

Polimer terdiri dari makromolekul dengan rantai linear atau bercabang, seperti diilustrasikan pada gambar 2.2 yang menyatu bersama dalam ikatan antar molekul yang disebut termoplastik.



Gambar 2.2 : Bentuk molekul rantai polimer



Termoplastik akan melunak (*softening*) jika dipanaskan sehingga akan melemahkan tenaga antar molekul yang kemudian mudah untuk

dicetak. Dibedakan dengan polimer lain, produk termoplastik yang telah dicetak dapat dipanaskan kembali untuk dicetak lagi (berulang).

a. Termoplastik Amorf

Polimer dengan banyak rantai molekul cabang dan dengan rantai samping yang panjang tidak dapat dikompakkan karena struktur yang tidak teratur. Rantai molekul-molekul ini bersaling-silang melilit seperti benang kusut. Plastik yang tidak terstruktur disebut termoplastik amorf. Gambar 2.3 berikut menggambarkan rantai polimer amorf.



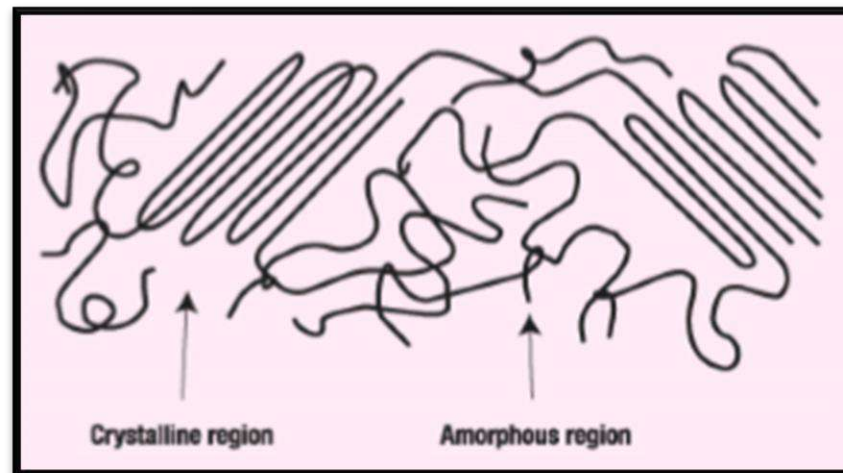
Gambar 2.3 : Rantai polimer amorf

b. Termoplastik Semikristalin

Hanya sebagian tertentu dari rantai molekul yang tersusun dalam susunan yang rapat, padat dan teratur. Sedang sebagian lain tetap dalam keadaan saling-silang dan melilit. Termoplastik yang memiliki bagian



kristalin dan amorf seperti yang digambarkan pada gambar 2.4 berikut disebut termoplastik semikristalin.



Gambar 2.4 : Rantai polimer semikristalin

Perbedaan antara termoplastik amorf dan kristalin dapat dilihat pada tabel 2.5 berikut :

Tabel 2.5 : Sifat dan struktur dari polimer amorf dan kristalin

	Amorf	Kristalin
Contoh Material	• ABS • Acrylics • Polycarbonate (PC) • Polystyrene (PS) • Polyvinyl Chloride (PVC) • Styrene Acrylonitrile (SAN)	• Acetals • Nylons • Polyethylene (PE) • Polypropylene (PP) • Thermoplastic Polyester (e.g. PBT, PET)
Mikro Struktur	Orientasi molekul acak dalam fase solid maupun liquid	Orientasi molekul acak pada saat fase liquid, tetapi terbentuk kristalit-kristalit pada saat fase solid



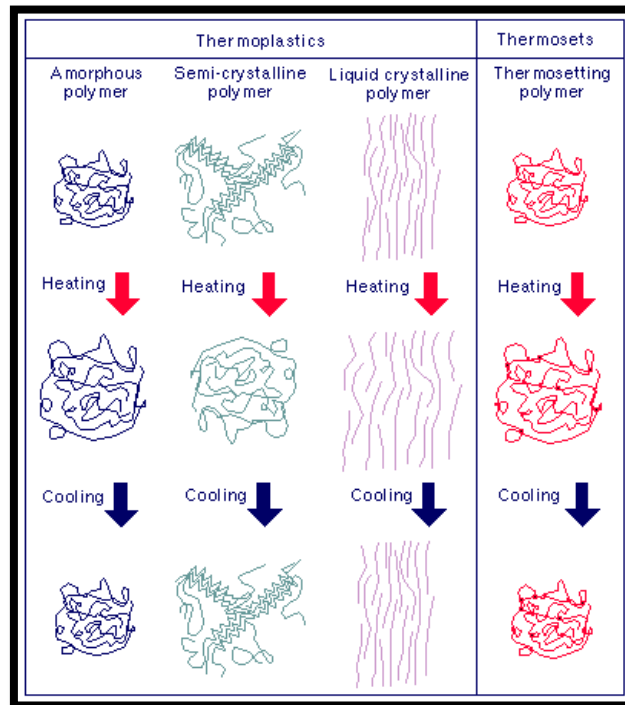
Reaksi terhadap panas	Meleleh pada rentang temperatur tertentu (tidak ada temperatur leleh yang jelas)	Ada temperatur leleh yang jelas
Sifat-sifat umum	• Transparan • Ketahanan kimia buruk • Volumetric shrinkage rendah saat molding • Umumnya kurang kuat • Viskositas melt umumnya tinggi • Heat content lebih rendah	• Translucent atau opaque • Ketahanan kimia sangat baik • Volumetric shrinkage tinggi saat molding • Umumnya kuat • Viskositas melt umumnya rendah • Heat content lebih tinggi (dengan panas dari kristalisasi)

2.2.2 Termoset

Termoset adalah polimer yang mempunyai struktur ikat silang yang rapat (jauh lebih banyak dan rapat daripada elastomer). Ikatan silang inilah yang membuat termoset tidak meleleh saat dipanaskan melainkan menjadi tambah keras. Pada pembuatan termoset dari resin pun, ada perbedaan mendasar dengan pembuatan termoplastik, yaitu jika termoplastik dibuat dengan pendinginan dari bentuk resin yang cair karena ikatan pada termoplastik tercerai-berai saat dipanaskan dan mencair dan ikatan yang tercerai-berai itu akan menyatu kembali saat pendinginan. Lain halnya dengan termoset, resin cair tidak didinginkan melainkan dipanaskan untuk mengeras. Sifat makin mengeras jika dipanaskan ini disebabkan oleh



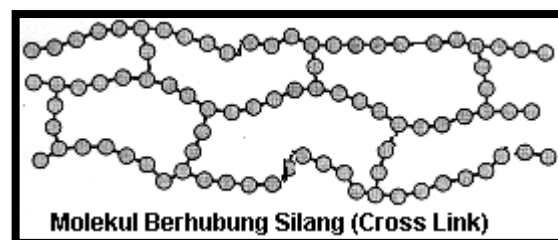
ikatan silang yang tidak dapat terlepas satu sama lain (berkaitan). Mikrostruktur dari termoplastik dan termoset selama proses pemanasan dan pendinginan diilustrasikan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Mikrostruktur dari efek pemanasan dan pendinginan selama proses pada termoplastik dan termoset

2.2.3 Elastomer

Rantai molekul dari elastomer mempunyai sedikit jumlah ikatan silang dan tersusun secara acak (ketidakteraturan). Gambar 2.6 di bawah mengilustrasikan ikatan silang elastomer.



Gambar 2.6 : Ikatan silang pada elastomer.

Termoset dan elastomer dikategorikan sebagai polimer ikatan silang (*cross-link*) karena setiap individunya dihubungkan dengan ikatan penghubung (*transverse bond*). Pada temperatur ruang, molekul yang mempunyai banyak *cross link* akan sangat keras (*hardness*) tetapi mudah patah (*brittle*) yaitu sensitif terhadap beban kejut (*impact*). Seperti halnya elastomer, termoset tidak meleleh jika dipanaskan karena banyaknya *cross link*.

Polimer kristalin umumnya terdiri dari kristal-kristal yang membaaur dengan struktur amorf. Polimer dapat membentuk kristal apabila memiliki struktur rantai atau segmen rantai yang bergabung sangat dekat sehingga gaya Van der Waals dapat memainkan peran, dan tidak terbentuk bulk dalam rantai harus tidak bersifat polar. Polimer mengkristal pada temperatur tertentu ketika segmen-segmen rantai molekul mencapai posisi lurus dalam gerakan yang tidak beraturan. Di sini temperatur memegang peranan penting, dan kecepatan kristalin akan menentukan besarnya ukuran kristal. Berdasarkan uraian diatas kita temukan plastik jenis termoplastik, termoset dan elastomer, seperti yang diberikan pada tabel 2.6 di bawah ini.

Tabel 2.6 : Jenis plastik beserta contohnya

Jenis Plastik	Contoh
Termoplastic	Polietilen, Polipropilen, Polistiren, Polivinil khlorida, ABS, Nilon, Poliester, Polikarbonat.
Termoset	Epoxy resin, Alkyd resin, UF, MF, PF, Unsaturated poliester.
Elastomer	Karet alam dan sintesis



2.2.4 Termoplastik-Elastomer

Campuran polimer dapat digambarkan sebagai campuran fisik atau reaktif dari dua atau lebih polimer atau copolimer. Pencampuran dua atau lebih polimer berbeda memunculkan bahan yang unik yang dapat menggabungkan sifat polimer. Diantara berbagai jenis campuran polimer, campuran plastik-karet umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi komersial. Termoplastik-elastomer (TPEs) termasuk dalam kategori campuran plastik-karet. (Harekrishna Panigrahi, dkk. 2019)

Termoplastik-elastomer (TPEs) berdasarkan campuran termoplastik vulkanizate dianggap sebagai kelas bahan yang menarik karena menggabungkan proses lebur termoplastik dengan sifat karet termoset konvensional. Termoplastik-elastomer biasanya memiliki ketahanan terhadap cuaca, ketahanan ozon, ketahanan kimiawi terhadap minyak dan ketahanan terhadap abrasi yang sangat baik. Namun, aplikasinya dibatasi oleh sifat mekanik yang relatif kurang. (Mufeng Liu, dkk. 2018).

a. Klasifikasi Termoplastik-Elastomer

Termoplastik-elastomer yang dikenal saat ini dapat diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok berikut:

1. *Synteric Block Copolymers (SBCs)*
2. *Crystalline Multiblock Copolymers*
3. *Miscellaneous Block Copolymers*
4. *Combinations of Hard Polymer/Elastomer*



5. Ionomers

6. Polymers with Core-Shell Morphologies

Dimana properti dari termoplastik-elastomer dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.7 : Property Ranges of Selected Thermoplastic-Elastomer (TPEs)

Thermoplastic Elastomer	Specific Gravity	Durometer Hardness
Styrenic block copolymers		
S-B-S (pure)	0.94	65A–75A
S-I-S (pure)	0.92	32A–37A
S-EB-S (pure)	0.91	65A–71A
S-B-S (compounds)	0.9–1.1	40A–45D
S-EB-S (compounds)	0.9–1.2	5A–60D
Polyurethane/elastomer block copolymers	1.05–1.25	70A* –75D
Polyester/elastomer block copolymers	1.15–1.40	35D–80D
Polyamide/elastomer block copolymers	1.0–1.15	60A–65D
Polyethylene/poly(α -olefin) block copolymers	0.85–0.90	65A–85A
Polypropylene/EPDM or EPR blends	0.9–1.0	60A–65D
Polypropylene/EPDM dynamic vulcanizates	0.95–1.0	35A–50D
Polypropylene/butyl rubber dynamic vulcanizates	0.95–1.05	50A–80D
Polypropylene/natural rubber dynamic vulcanizates	1.0–1.05	60A–45D
Polypropylene/nitrile rubber dynamic vulcanizates	1.0–1.1	70A–50D
PVC/nitrile/DOP rubber blends	1.20–1.33	50A–90A
Halogenated polyolefin/ethylene interpolymers blends	1.10–1.25	50A–80A

b. Keuntungan dan Kerugian Termoplastik-Elastomer

Termoplastik-elastomer berbagai keunggulan dibandingkan bahan karet termoset konvensional (Vulkanisir), seperti:

1. Pemrosesan yang lebih sederhana dengan langkah-langkah yang lebih sedikit karena termoplastik-elastomer menggunakan metode pemrosesan untuk termoplastik yang biasanya lebih efisien dan jauh lebih murah sehingga biaya untuk pengerjaan *finishing* jadi lebih rendah.
2. Waktu fabrikasi yang lebih cepat



3. Penggunaan energi yang lebih rendah karena siklus pencetakan yang lebih pendek dan pemrosesan yang lebih sederhana.
4. *Quality control* yang lebih baik dan toleransi yang lebih kecil karena formulasi dan proses yang lebih sederhana.
5. Biaya *quality control* yang lebih rendah karena reproduktifitas yang lebih besar dan konsistensi sifat-sifat resin termoplastik-elastomer (TPEs).
6. Karena sebagian besar termoplastik-elastomer (TPEs) memiliki densitas lebih rendah daripada senyawa karet konvensional, biaya volumenya seringkali lebih rendah.

Kerugian termoplastik-elastomer (TPEs) dibandingkan dengan bahan karet konvensional termasuk :

1. Mencair pada temperatur tinggi
2. Memiliki nilai kekerasan yang rendah
3. Pengeringan sebelum di proses

2.2.5 *High Density Polyethylene (HDPE)*

Plastik HDPE termasuk dalam kategori termoplastik, karena memiliki ikatan antar molekul yang linier sehingga dapat mengalami pelunakan atau perubahan bentuk, dengan kata lain meleleh, jika dikenai panas. Sedangkan pada beberapa jenis plastik yang lain (misalkan poliester dan epoxy) ikatan antar molekulnya terjadi bersilangan (*crosslink*). Bentuk ikatan seperti itu memiliki ketahanan temperatur yang tinggi, sehingga



plastik jenis ini tidak dapat mengalami pelelehan jika dikenai peningkatan temperatur. Plastik seperti ini disebut termoset. (Billmeyer, 1994)

Sifat-sifat plastik HDPE secara umum adalah tahan terhadap zat kimia (misalkan minyak, deterjen), ketahanan impak cukup baik, memiliki ketahanan terhadap temperatur dan tahan terhadap sinar matahari.



Gambar 2.7 : Botol-botol dari plastik HDPE



Gambar 2.8 : Simbol *recycle* HDPE

Sifat-sifat khusus plastik HDPE adalah sebagai berikut: (Modern Plastics Encyclopedia, 1998)



Density : 0.952 – 0.965 gr/cm³

Tensile strength : 3200 – 4500 psi

- 3. *Compression strength* : 2700 – 3600 psi
- 4. *Flexural strength* : 5800 psi
- 5. *Elongation* : 100 %
- 6. *Melting point* : 130 – 137°C
- 7. *Water absorption* : 0.01 %

2.2.7 Karet SBR (*Styrene Butadine*)

Jenis karet SBR (*Styrene Butadine*) merupakan yang paling banyak dipakai yaitu mencapai 75% dari pemakaian total karet sintetis. SBR tersusun dari 68-70% *butadine* dan 30-32% *styrene*.

Karet SBR termasuk dalam kategori elastomer yang merupakan bagian dari material polimer, selain plastik. Sifat yang membedakan antara plastik dengan elastomer adalah elastomer harus tanpa bentuk (*amorphous*), jika ditekan dan harus diatas temperatur *glass transition* untuk menjadi elastis. Sedangkan ada plastik pada temperatur tersebut akan mengalami kristalisasi untuk mencapai stabilitas bentuk.



Gambar 2.9 : Ban Mobil merupakan aplikasi karet sintetis jenis SBR



Pada campuran karet SBR untuk ban mobil dan motor biasanya ditambahkan filler yaitu carbon black sebagai penguat untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap abrasi. (Amari, dkk., 1999)

Serbuk karet dapat dibuat melalui beberapa metode antara lain yaitu *ambient grinding* dan *cryogenic grinding* (Alexander, 2004). Proses awal dari kedua metode tersebut sama yaitu dibuat menjadi partikel-partikel yang kasar. Pada metode *ambient grinding* atau disebut *mechanical grinding* karet dipacah menjadi partikel lebih kecil dengan bantuan *granulator* atau *cracker mills*. Sedangkan pada *cryogenic grinding*, setelah pemecahan kasar pada tahap awal, karet kemudian didinginkan pada temperatur di bawah glass transition temperature, agar terjadi penggetasan, kemudian dipisahkan antara bahan karet dengan yang lainnya.

Sifat-sifat karet secara khusus adalah sebagai berikut: (Dow Corning Corp., 1998)

1. *Density* : 1.65 gr/cm³
 2. *Tensile strength* : 1450 psi
 3. *Compression strength* : 5400 – 7000 psi
 4. *Flexural strength* : 3000 – 4800 psi
 5. *Elongation* : 250 %
 6. *Temperature Operational* : -40 – 180°C
- Water absorption* : 0.01 %



2.3 Teknologi Serbuk

Teknologi serbuk adalah ilmu tentang pemrosesan serbuk, meliputi pembuatan, karakterisasi, dan pengubahan serbuk menjadi barang-barang teknik yang berguna. Urut-urutan prosesnya meliputi penggunaan hukum-hukum dasar perpindahan panas, kerja, dan deformasi serbuk. Proses tersebut secara keseluruhan akan mengubah bentuk, sifat-sifat dan struktur dari serbuk menjadi produk akhir (German, 1994).

Ada tiga konsep utama dari teknologi serbuk, yaitu (German, 1994):

- a. Berkaitan dengan serbuk itu sendiri, meliputi ukuran, bentuk, proses pembuatan, dan mikrostruktur.
- b. Pemrosesan serbuk meliputi sintering, kompaksi, *hot press*, *molding*, dan *rolling*.
- c. Pengujian sifat-sifat meliputi: densitas, kekuatan, kekenyalan (*ductility*), konduktifitas, mikrostruktur.

Teknologi serbuk menjadi sangat menarik karena tiga alasan utama meliputi (German, 1994):

- a. Banyaknya aplikasi pembuatan komponen rumit dengan biaya ekonomis. Produk yang dihasilkan pun memiliki ketelitian tinggi, produktivitas tinggi, serta kemampuan otomatisasi. Contohnya adalah komponen otomotif.



- b. Kemampuan memproses sifat-sifat bahan dengan mikrostruktur unik, meliputi logam porous, *strengthened alloys*, *cermets (ceramic-metal ceramic)*.
- c. Kemampuan memproses material yang tidak mungkin dengan proses lain. Contohnya adalah material reaktif dan material tahan api.

2.4 Powder Fabrication

Secara dasar ada empat jenis cara pembentukan serbuk, yaitu : secara mekanik, kimiawi, deposisi elektrolit, dan atomisasi.

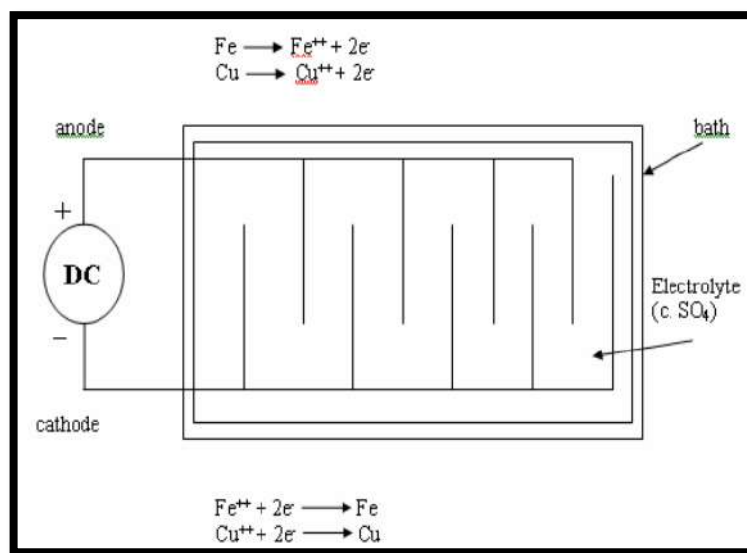
a. Fabrikasi Secara Mekanis

Porses mekanik melibatkan impaksi, pengausan, geseran, dan penekanan. Impaksi adalah proses fabrikasi serbuk dengan menggunakan tumbukan untuk mereduksi ukuran partikel. Pengausan adalah proses dengan memanfaatkan gaya gesek dari benda berputar, contohnya pada proses penggerindaan. Metode geseran, memanfaatkan gaya geser sehingga dengan demikian akan menyebabkan belahan yang akhirnya akan memotong material menjadi serbuk. Contohnya pada proses bubut, ekstrusi dan skrap. Proses penekanan adalah dengan cara menekan material sampai material mengalami reduksi ukuran menjadi serbuk, terutama untuk material yang bersifat getas. Serbuk hasil proses mekanik pada umumnya akan bersifat kasar.



b. *Electrolytic Fabrication Technique*

Pada proses deposisi elektrolit, prosesnya menggunakan larutan elektrolit yang dihubungkan dengan sumber listrik DC. Kemudian karena adanya perbedaan muatan antara anoda dan katoda sehingga akan terjadi pengendapan anoda pada katoda. Proses ini menghasilkan kemurnian serbuk yang tinggi, bentuk serbuk porus dan dendritik. Proses ini tergolong rumit, membutuhkan logam kusus untuk menjalankannya, serbuk tidak dapat langsung digunakan dan harus dicuci dan milling terlebih dahulu.



Gambar 2.10 : Sel *electrolytic* untuk mendekomposisi material (German, 1994)

c. Fabrikasi Secara Kimiawi

Pada awalnya hampir seluruh fabrikasi adalah dengan kimiawi karena ukuran partikel dapat dikontrol dengan mengatur variabel reaksi kimia. Termasuk dalam kategori proses kimiawi adalah dekomposisi padat dengan gas. Proses dimulai dengan pemurnian oksida sebagaimana



yang terjadi pada pemisahan secara magnetik oksida besi. Oksida kemudian direduksi dengan reaksi termokimia dengan temperatur rendah untuk menghasilkan serbuk dengan ukuran yang kecil berbentuk sponge. Sedangkan jika menggunakan temperatur tinggi akan dihasilkan bentuk serbuk yang poligonal. Serbuk hasil proses ini akan mengalami proses anil sebelum digunakan untuk memperbaiki sifat mampu kompaknya.

2.5 *Powder Tailoring*

Powder Tailoring adalah perlakuan terhadap serbuk sebelum serbuk tersebut di kompaksi (*compaction*) dan disinter. Perlakuan tersebut diantaranya meliputi klasifikasi serbuk, *blending-mixing*, deaglomerasi, pembersihan dan lubrikasi.

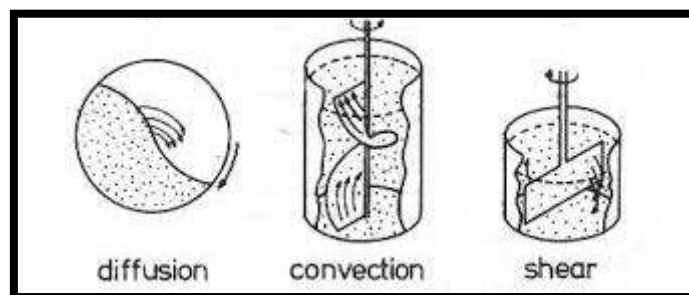
Klasifikasi serbuk meliputi karakterisasi ukuran, bentuk dan komposisi serbuk. Beberapa teknik pengukuran serbuk yang umumnya dilakukan tidaklah menunjukkan ukuran serbuk yang sebenarnya, terutama untuk serbuk yang tidak teratur bentuknya (*irregular shape*). Namun beberapa metode pengukuran serbuk dapat digunakan sebagai pendekatan. Beberapa metode pengukuran serbuk antara lain : sedimentasi, penyebaran cahaya (*light scattering*), uji ayak (*screening/sieve analysis*). Uji ayak sangat praktis dan dapat dengan cepat menganalisa ukuran serbuk. Satuan

metode ini adalah *mesh*. Ukuran *mesh* didefinisikan sebagai jumlah kawat per unit panjang. *Mesh* dengan ukuran 200 mesh berarti ada 200 kawat per



inch, dengan jarak antara pusat kawat 127 mikron, diameter kawat sebesar 52 mikron sehingga sisa lubang menjadi 75 mikron, sisa lubang sering disebut dengan *opening size*.

Blending dan *mixing* adalah sebuah metode pencampuran. *Blending* diistilahkan untuk serbuk dengan distribusi ukuran yang berbeda namun sifat kimianya sama, sedangkan *mixing* diistilahkan sebagai pencampuran material yang berbeda sifat kimianya (German, 1994). Kedua pencampuran ini dimaksudkan untuk mendapatkan distribusi massa yang homogen atau untuk menghindari segregasi. Pencampuran serbuk dengan komposisi sama, tetapi berbeda ukurannya, biasanya akan menghasilkan densitas yang tinggi. Beberapa contoh metode pencampuran seperti terlihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 : Mekanisme pencampuran serbuk (German, 1994)

Menurut German (1994), pencampuran serbuk yang optimal, yaitu serbuk dapat tercampur dengan baik, tergantung pada jumlah serbuk di dalam tabung dan kecepatan putar tabung. Volume pencampuran serbuk yang optimal adalah antara 20-40% dari volume tabung. Sedangkan untuk kecepatan putar tabung untuk menghasilkan campuran yang optimum dapat dihitung dari rumus berikut:



$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana : N_c = Kecepatan putar pada kondisi kritis (RPM), yaitu pada kondisi gaya sentrifugal partikel serbuk ke dinding sama dengan gaya gravitasi.

$$F_c = F_g \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{4.m.V^2}{d} = m.g \dots\dots\dots (3)$$

d = diameter tabung (mm)

Untuk mendapatkan kecepatan putar yang optimum adalah sekitar 75% dari kecepatan putar kritis (N_c). Secara teoritis densitas campuran serbuk dapat dirumuskan sebagai berikut: (German, 1994)

$$\rho_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{(W_A + W_B)}{[(W_A/\rho_A) + (W_B/\rho_B)]} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana : ρ_T = densitas campuran serbuk (g/cm^3)

W_T = massa total (g)

V_T = volume total (cm^3)

W_A = massa serbuk A (g)

W_B = massa serbuk B (g)

ρ_A = densitas serbuk A (g/cm^3)

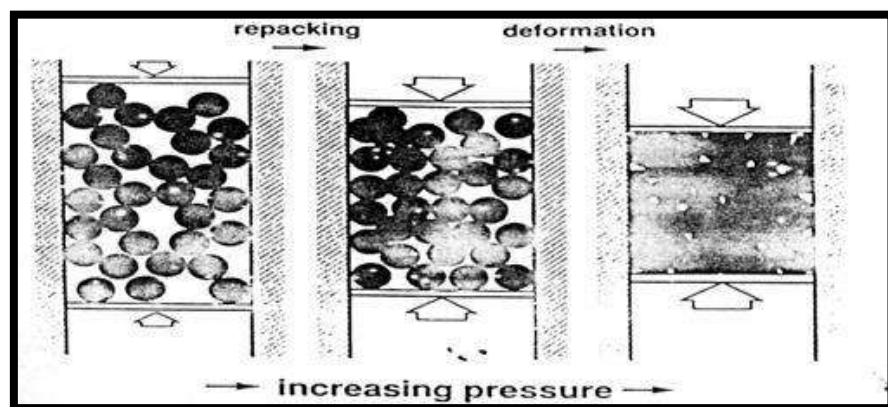
ρ_B = densitas serbuk B (g/cm^3)



2.6 Kompaksi (*compaction*)

Pada pencampuran serbuk secara umum, densitas maksimum yang dapat dicapai adalah *tap density*. Untuk mendapatkan densitas yang lebih tinggi maka diperlukan gaya atau tekanan dari luar. Dengan memberikan tekanan pada serbuk maka akan didapatkan kepadatan yang lebih tinggi karena jumlah rongga-rongga/*porous* mengecil.

Gambar 2.12 di bawah ini menggambarkan tahapan-tahapan yang dialami serbuk pada penambahan tekanan. Pada tahap awal memasukkan serbuk ke dalam cetakan, densitas serbuk sama atau mendekati *apparent density*. Apabila serbuk terkena getaran nilai densitas maksimum serbuk adalah *tap density*. Sifat *apparent* dan *tap density* adalah masih banyaknya terdapat rongga-rongga, dan serbuk masih belum memiliki kekuatan.



Gambar 2.12 : Skema perubahan partikel serbuk terhadap penambahan tekanan

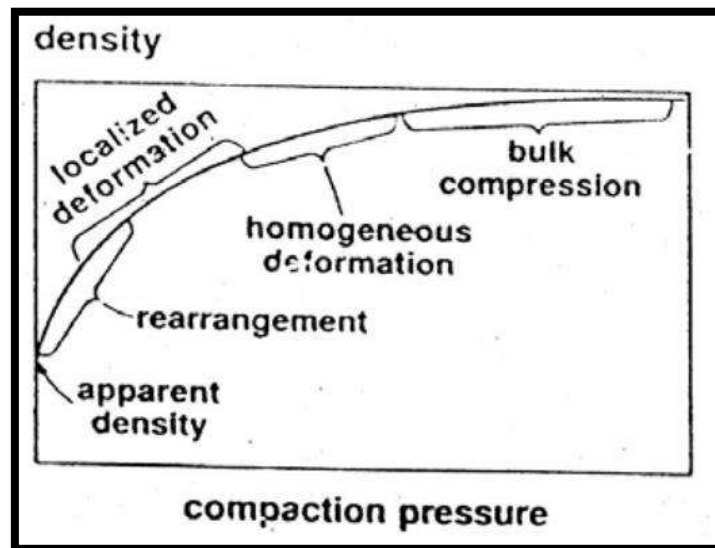
(German, 1994)



Ketika serbuk mulai diberi tekanan, maka akan terjadi penyusunan partikel-partikel kecil memasuki rongga-rongga yang lebih besar. Dengan penambahan tekanan lebih lanjut menyebabkan mengecilnya rongga-rongga

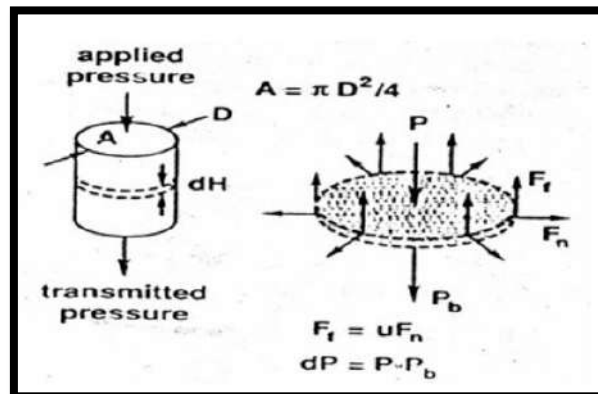
dan bertambahnya kontak antar partikel serbuk (*powder neck*). Jika tekanan diberikan lebih lanjut, maka densitas hasil kompaksi tidak akan bertambah secara signifikan terhadap penambahan tekanan. Hal ini dikarenakan sistem serbuk hanya akan bereaksi seperti material padat.

Grafik hubungan antara penambahan tekanan dengan peningkatan densitas dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 : Grafik hubungan penambahan tekanan terhadap densitas (German, 1994)

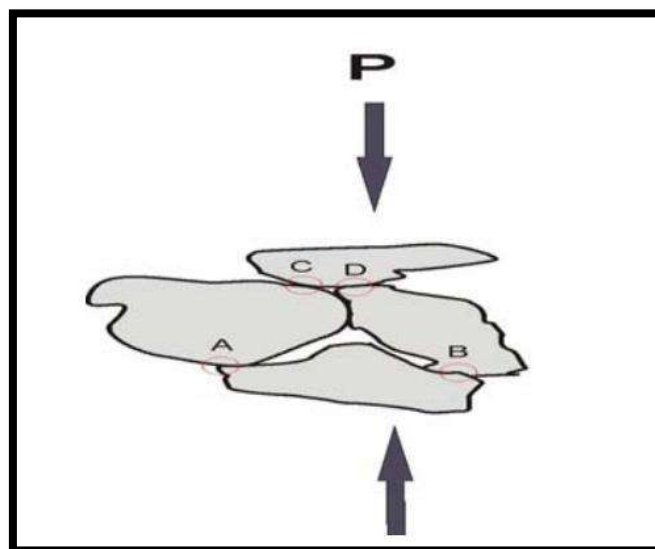
Selama kompaksi distribusi tekanan pada cetakan terlihat dalam seperti dalam gambar 2.13. Tekanan yang diberikan (P) nilainya akan berbeda dengan tekanan yang diteruskan (P_b). Hal ini dikarenakan adanya gaya gesek antara sistem serbuk dengan cetakan (F_f). Gaya gesek timbul karena adanya kecenderungan timbulnya gaya normal yang arahnya keluar (sentrifugal) ke cetakan, sehingga saat telah mencapai tepi cetakan serbuk akan bergesekan dengan cetakan. Fenomena ini nantinya akan menyebabkan perbedaan *green density* antara bagian tengah dan pinggir.



Gambar 2.14 : Skema distribusi tekanan sistem serbuk terhadap kompaksi pada cetakan
(German, 1994)

Metode kompaksi akan sangat menentukan dalam keseragaman distribusi partikel yang dihasilkan. Pada kompaksi jenis *uniaxial single compaction* tidak akan didapatkan distribusi partikel yang homogen.

Distribusi partikel akan homogen hanya pada sumbu yang dikenai beban tekanan, sedangkan pada sumbu yang tidak diberi beban, pengaturan partikel hanya sebagai efek gaya normal. Mekanisme tersebut terskema dalam gambar 2.15.

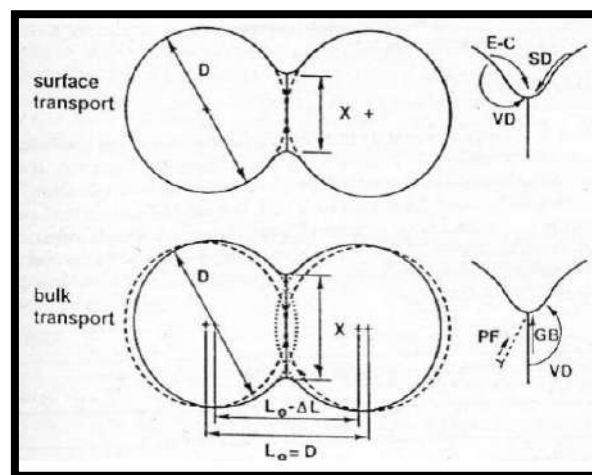


Gambar 2.15 : Distribusi partikel pada *uniaxial single compaction*

Dalam proses metalurgi serbuk, densitas hasil pengepresan menentukan baik buruknya sifat fisik dan mekanik produk akhir dengan material serbuk aluminium (Sukanto, 2004).

2.6 Sintering

Sintering adalah pengikatan bersama antar partikel pada temperatur tinggi. *Sintering* dapat terjadi di bawah temperatur leleh (*melting point*) dengan melibatkan transfer atomik pada kondisi padat. *Sintering* juga bisa terjadi pada fase cair, bahkan sekitar 70 % dari proses *sintering* melibatkan fase cair (German, 1994). Pada skala mikrostruktural mekanisme sintering adalah berupa pengikatan yang terjadi sebagai pertumbuhan *neck* pada daerah kontak antar partikel. Pertumbuhan *neck* terjadi karena adanya perpindahan massa serbuk berupa *bulk transport* dan *surface transport*. Mekanisme *surface* dan *bulk transport* terskema pada gambar 2.16.

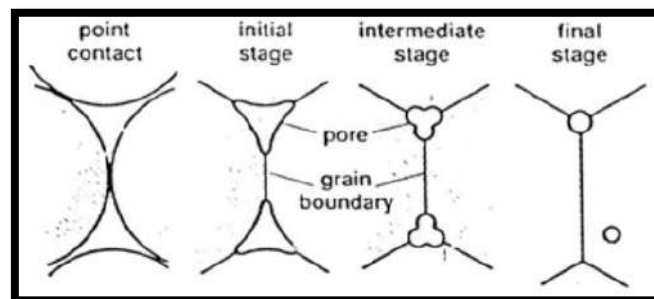


Gambar 2.16 : Mekanisme perpindahan massa serbuk (German, 1994)

Proses *sintering* melalui pergerakan atom akan mengurangi energi permukaan (*surface energy*) antar partikel. Energi permukaan per unit

volume berbanding terbalik dengan diameter partikel. Sedangkan energi permukaan tergantung dari luas permukaan. Oleh karena itu, partikel serbuk dengan ukuran partikel kecil dengan luas permukaan spesifik besar memiliki energi yang lebih besar dan lebih cepat terjadi *sintering*. Luas permukaan spesifik adalah luas permukaan serbuk dibagi dengan massa serbuk (German, 1994).

Pada saat *sintering*, *green body* akan menyusut (*shrink*) yang akan menaikkan densitas. Meskipun demikian untuk mendapatkan hasil yang baik perlu mengatur temperatur dan waktu sintering sehingga setiap tahap yang ada dalam *sintering* dapat dilalui dengan sempurna. *Sintering* akan berlangsung lebih cepat pada temperatur yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama, dikarenakan meningkatnya jumlah atom yang aktif sehingga atom akan lebih mudah bergerak yang akan meningkatkan aliran massa serbuk. Mekanisme *sintering* terbagi menjadi 3 tahapan, sesuai pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 : Skema penyusutan rongga-rongga selama proses *sintering* (German, 1994)

1. *Initial Stage*

Pada tahap ini mana akan terjadi peningkatan area kontak antar partikel, berkurangnya rongga dan meningkatnya “*neck*”. Pada tahap ini terjadi mekanisme aliran massa berupa *surface transport* dimana mekanisme tidak berperan terhadap terjadinya *shrinkage*.

2. *Intermediate Stage*

Pada tahap ini terjadi mekanisme aliran massa berupa *bulk transport* yang berperan terhadap terjadinya *shrinkage*, selain itu *surface transport* juga masih berlangsung. Porus berkurang karena terjadi difusi porus sebagai akibat meningkatnya *neck ratio*, kemudian porus bergerak menuju *grain boundary* membentuk saluran rongga (*open channels*), kemudian akan terlokalisir pada sudut butir dan menjadi lebih *smooth*. Pada tahap ini densitasnya bisa mencapai 90 %.

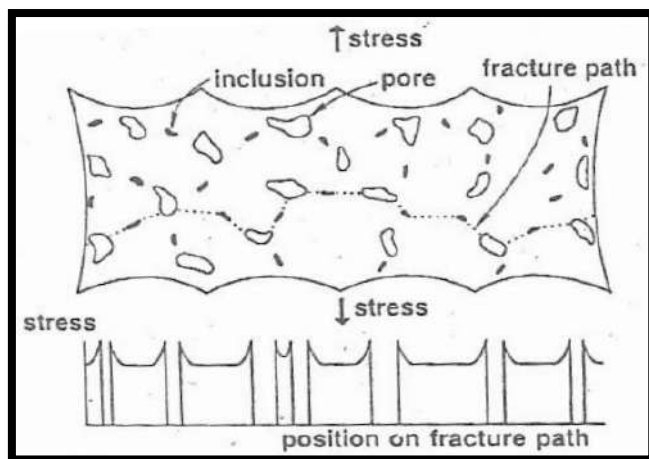
3. *Final Stage*

Pada tahap ini porus akan terisolasi dan *grain boundary* berdifusi (menyatu), jika proses terus dilanjutkan akan terjadi pertumbuhan butir. Terisolasinya porus menyebabkan tidak akan terjadi densifikasi lanjut. Titik kontak antar partikel tumbuh menjadi daerah *neck*. Setelah tahap awal yang ditandai dengan terjadinya *neck growth* yang besar, sintering dilanjutkan dengan pembentukan batas butir dan penyusunan pola rongga-rongga. Pada awal *intermediate stage*, geometri rongga tampak sangat kusut dan terletak pada interface batas butir membentuk *open channel*. Hal ini akan mengakibatkan rongga akan terlokalisir pada



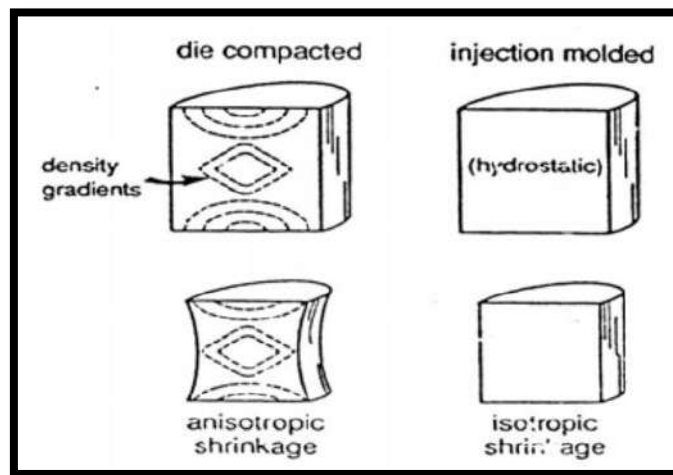
sudut butir dan berbentuk lebih halus (*smooth*). Pada sintering tahap akhir, geometri dari rongga mencapai bentuk bola (*sphere*) artinya telah terjadi densifikasi (*densification*) yang sempurna dengan mekanisme pengurangan ukuran radius rongga. Pada *sintering* tahap akhir densifikasi dan pengurangan radius porus terisolasi berlangsung sangat lambat. Pada sebagian besar kasus, serbuk yang digunakan adalah logam, meskipun dalam beberapa hal juga melibatkan material lain seperti keramik atau polimer.

Kekuatan material teknologi serbuk berasal dari kekuatan ikatan antar serbuk, selain itu dipengaruhi pula oleh densitas, porositas, bentuk pori, ukuran partikel. Material dengan porositas yang lebih besar memiliki kekuatan yang rendah. Porositas yang besar menyebabkan luas efektif material dalam menahan beban menjadi lebih sedikit, selain itu juga akan meningkatkan perambatan retak. Pori merupakan *initial crack* pada suatu material. Proses perambatan retak bisa dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 : Crack propagation pada material berpori (German, 1994)

Dampak proses kompaksi terhadap hasil *sintering* adalah berkurangnya rongga-rongga, serta menambah luas area kontak antar partikel, sehingga sifat material hasil proses *sintering* akan mengalami peningkatan kekuatan, densitas, serta berkurangnya *shrinkage* saat proses *sintering*.



Gambar 2.19 : Penyusutan (*Shrinkage*) material setelah *sintering* (German, 1994)

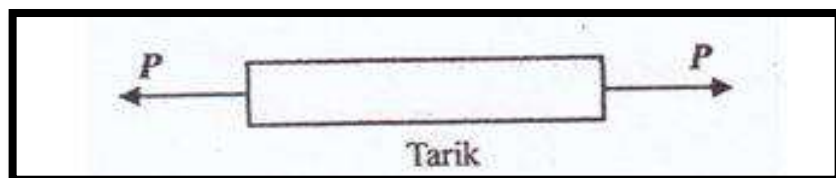
Pada Gambar 2.18 tampak bahwa *sintering* hasil *injection molding* akan mengalami penyusutan yang relatif seragam. Hal ini dikarenakan tekanan yang diberikan pada material terjadi saat proses *sintering*, sehingga menghasilkan tekanan yang relatif seragam di setiap bagian material. Sedangkan pada *sintering* hasil kompaksi cenderung akan mengalami penyusutan yang tidak seragam. Hal ini terjadi karena tekanan yang diterima material saat kompaksi cenderung lebih besar pada bagian tepi atau ujung-ujung cetakan.

2.7 Pengujian

2.7.1 Uji Tarik

Uji tarik mungkin adalah cara pengujian bahan yang paling mendasar. Pengujian ini sangat sederhana, tidak mahal dan sudah mengalami standarisasi di seluruh dunia, misalnya di Amerika dengan ASTM E8 dan Jepang dengan JIS 2241. Dengan menarik suatu bahan kita akan segera mengetahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap tenaga tarikan dan mengetahui sejauh mana material itu bertambah panjang. Alat eksperimen untuk uji tarik ini harus memiliki cengkeraman (*grip*) yang kuat dan kekakuan yang tinggi (*highly stiff*).

Proses pengujian tarik mempunyai tujuan utama untuk mengetahui kekuatan tarik bahan uji. Bahan uji adalah bahan yang akan digunakan sebagai konstruksi, agar siap menerima pembebanan dalam bentuk tarikan. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya yang berlawanan pada benda dengan arah menjauh dari titik tengah atau dengan memberikan gaya tarik pada salah satu ujung benda dan ujung benda yang lain diikat.



Gambar 2.20 : Pembebanan Tarik

Penarikan gaya terhadap bahan akan mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) bahan tersebut. Kemungkinan ini akan



diketahui melalui proses pengujian tarik. Proses terjadinya deformasi pada bahan uji adalah proses pergeseran butiran-butiran kristal logam yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam hingga terlepasnya ikatan tersebut oleh penarikan gaya maksimum. Penyusunan butiran kristal logam yang diakibatkan oleh adanya penambahan volume ruang gerak dari setiap butiran dan ikatan atom yang masih memiliki gaya elektromagnetik, secara otomatis bisa memperpanjang bahan tersebut.

Hasil yang diperoleh dari proses pengujian tarik adalah grafik tegangan regangan, parameter kekuatan dan keliatan material pengujian dalam prosen perpanjangan, kontraksi atau reduksi penampang patah, dan bentuk permukaan patahannya.

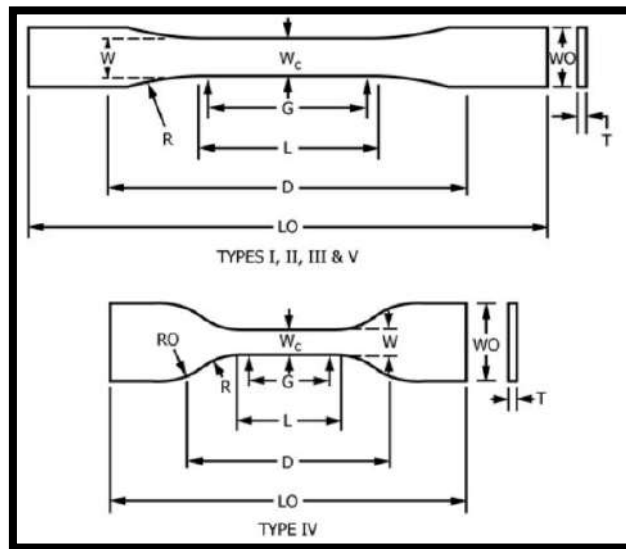
Tegangan dapat diperoleh dengan membagi beban dengan luas penampang mula-mula benda uji (George E. Dieter, 1993) :

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana: σ = Tegangan nominal (kg/mm²)
 P = Gaya tarik aksial (kg)
 A_0 = Luas penampang normal (mm²)

Pengujian kekuatan tarik pada material polimer menggunakan standar pengujian ASTM D638.





Gambar 2.21 : Standar spesimen *cutting dumbbell*

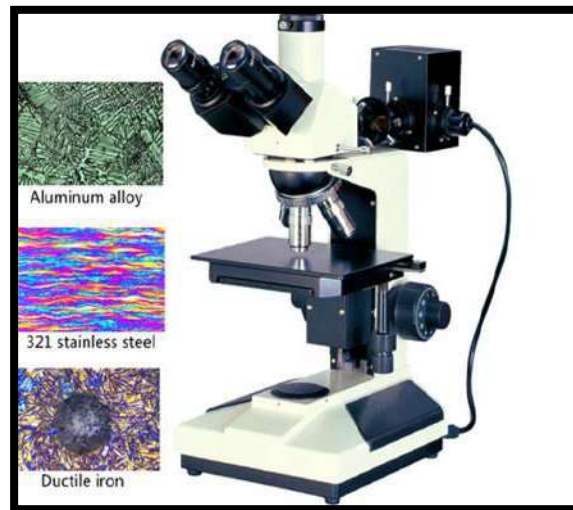
2.7.2 Struktur Mikro

Analisa mikro adalah suatu analisa mengenai struktur logam melalui pembesaran dengan menggunakan mikroskop khusus *metallography*. Dengan analisa mikro struktur, kita dapat mengamati bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam akibat proses deformasi, proses perlakuan panas, dan perbedaan komposisi. Sifat-sifat logam terutama sifat mekanis dan sifat teknologis sangat dipengaruhi oleh mikro struktur logam dan paduannya. Struktur mikro dari logam dapat diubah dengan jalan perlakuan panas ataupun dengan proses perubahan bentuk (deformasi) dari logam yang akan diuji. Pengamatan *metallography* dengan mikroskop optik dapat dibagi dua, yaitu *metallography* makro yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran 10-100 kali dan *metallography* mikro yaitu pengamatan struktur dengan perbesaran diatas 100 kali.

Pengamatan struktur mikro terhadap material yang akan dilakukan uji



mekanis dengan menggunakan alat seperti pada gambar 2.22 dapat dijadikan sebagai data pendukung bahwa material secara mikro memang telah sesuai dengan spesifikasi yang tertera dalam sertifikat manufaktur (*mill certificate*) atau dengan kata lain sebagai proses identifikasi material.



Gambar 2.22 : Pengujian mikrostruktur (Djodi, 2012)

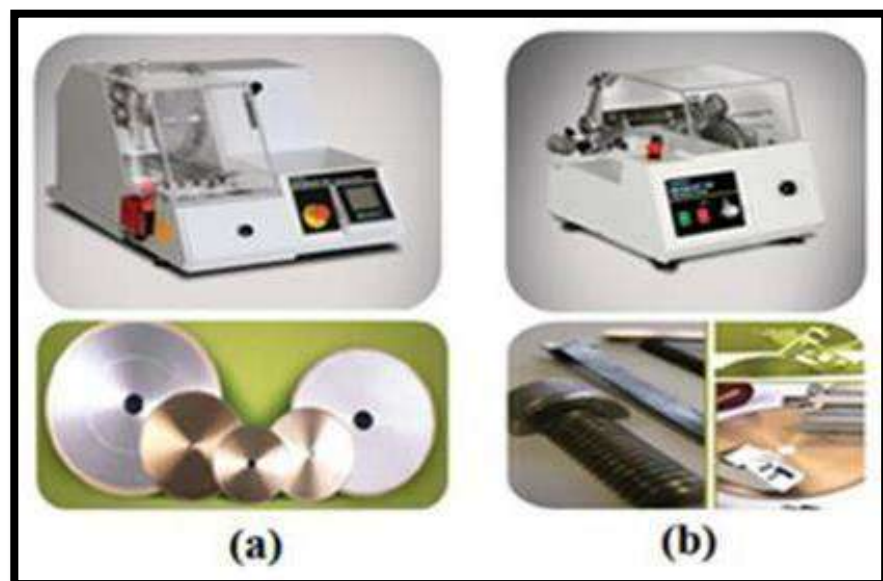
Tahapan proses metalografi dapat dilihat pada Gambar 2.22, proses pemotongan benda uji harus mempertimbangkan kekerasan dan lunaknya bahan material tersebut, agar material uji tidak mengalami deformasi dan perubahan struktur yang akan berakibat terhadap keakuratan dan kejelasan objek hasil pencitraan lensa mikroskop. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk memilih tipe piringan (*disc*) pemotong yang benar, ketebalan piringan pemotong, bahan material dari piringan pemotong, bahan pendingin, tekanan, dan kecepatan pemotongan. Alat potong metkon yang tersedia antara lain, seperti mesin potong presisi yang diperlihatkan pada

gambar 2.24.





Gambar 2.23 : Tahapan proses metalografi (Djodi, 2012)



Gambar 2.24 : Mesin pemotong sampel presisi metkon a) piringan diamond b) piringan CNB (*cubic boron nitride*)

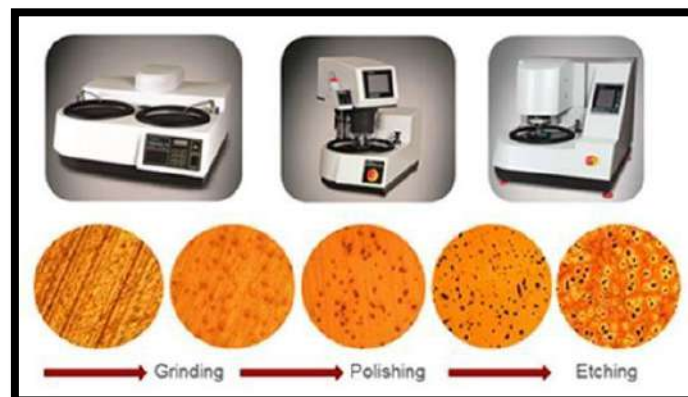
Sampel yang telah dipotong dengan dimensi yang akurat dan presisi kemudian dilakukan proses mounting, agar mudah diletakkan di meja pengamatan lensa mikroskop. Proses mounting yang disediakan oleh etkon dapat dilakukan pada temperatur tinggi (*hot mounting*) dan rendah

(*cold mounting*). Gambar 2.25 memperlihatkan mesin *mounting* metkon dan hasil sampel yang telah selesai di *mounting*.



Gambar 2.25 : Mesin *mounting* metkon dan hasil *mounting* (Djodi, 2012)

Hasil *mounting* sampel, selanjutnya dilakukan proses penghalusan gerinda dan pemolesan dengan menggunakan mesin gerinda dan poles seperti yang terlihat pada gambar 2.26. Tujuan dari proses gerinda dan poles, agar permukaan sampel menjadi halus secara merata dan ketika diberi etsa sesuai dengan jenis materialnya dapat menghasilkan gambar yang jelas saat diamati menggunakan lensa mikroskop.



Gambar 2.26 : Mesin gerinda dan poles metkon dan permukaan sampel (Djodi, 2012)

Penggunaan alat-alat potong, *mounting*, gerinda dan poles produksi metkon tersebut akan menghasilkan kualitas sampel yang baik dengan proses pengerjaan yang cepat sehingga secara mengurangi biaya produksi yang tinggi karena waktu tunggu (*idle time*) dapat diminimalisir. Pengamatan material yang telah dihaluskan dan diberi etsa pada permukaannya yang menggunakan mikroskop. Lalu struktur mikro yang terlihat dari alat pembesar kemudian direkam.

2.7.3 Pengukuran Getaran (*Vibration*)

Vibrasi adalah gerakan bolak balik dalam suatu interval waktu tertentu yang disebabkan oleh gaya. Vibrasi atau getaran mempunyai tiga parameter yang dapat dijadikan sebagai tolak ukur yaitu :

a. Frekuensi

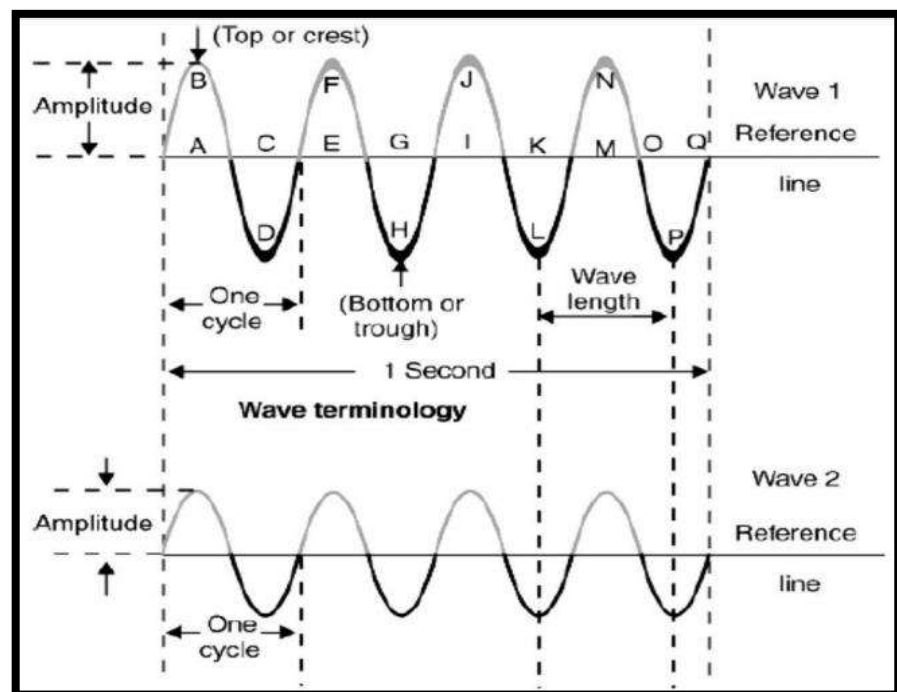
Frekuensi adalah banyaknya periode getaran yang terjadi dalam satu putaran waktu. Besarnya frekuensi yang timbul pada saat terjadinya vibrasi dapat mengidentifikasikan jenis-jenis gangguan yang terjadi. Gangguan yang terjadi pada mesin sering menghasilkan frekuensi yang jelas atau mengasilkan contoh frekuensi yang dapat dijadikan sebagai bahan pengamatan. Dengan diketahuinya frekuensi pada saat mesin mengalami vibrasi, maka penelitian atau pengamatan secara akurat dapat dilakukan untuk mengetahui penyebab atau sumber dari permasalahan. Frekuensi biasanya ditunjukkan dalam bentuk *Cycle per second* (CPS), yang biasanya disebut dengan istilah



Hertz (dimana $\text{Hz} = \text{CPS}$).Biasanya singkatan yang digunakan untuk *Hertz* adalah Hz .

b. Amplitudo

Amplitudo adalah ukuran atau besarnya sinyal vibrasi yang dihasilkan. Amplitudo dari sinyal vibrasi mengidentifikasi besarnya gangguan yang terjadi. Makin tinggi amplitudo yang ditunjukkan menandakan makin besar gangguan yang terjadi, besarnya amplitudo bergantung pada tipe mesin yang ada. Pada mesin yang masih bagus dan baru,tingkat vibrasinya biasanya bersifat relatif.



Gambar 2.27 : Dua gelombang yang berberda amplitudo (Dwi Prasetyo, 2014)



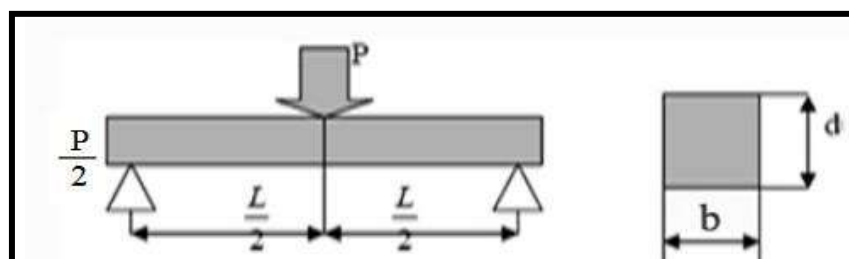
Dua buah gelombang dengan frekuensi yang sama tetapi dengan amplitudo yang berbeda. Amplitudo adalah simpangan vibrasi, yaitu seberapa jauh jarak dari titik keseimbangan massa jika dilihat pada

gambar pegas dan diagram harmonic diatas. Ada tiga cara untuk menggambarkan besarnya amplitudo yaitu :

1. *Displacement* (perpindahan) satuannya adalah *mills, inch* atau *micron*.
2. *Velocity* (kecepatan) satuannya adalah inch per sekon atau mm/s.
3. *Accelerations* (percepatan) satuannya adalah g, mm/s², inch/s².

2.7.4 Uji Bending

Material komposit mempunyai sifat tekan lebih baik dibanding tarik, pada perlakuan uji *bending* spesimen, bagian atas spesimen terjadi proses tekan dan bagian bawah terjadi proses tarik sehingga kegagalan yang terjadi akibat uji bending yaitu mengalami patah bagian bawah karena tidak mampu menahan tegangan tarik. Dimensi balok dapat kita lihat pada gambar 2.28 berikut ini : (Standar ASTM D 790-03)



Gambar 2.28 : Penampang uji *bending* (Standart ASTM D 790-03)

Momen yang terjadi pada komposit dapat dihitung dengan persamaan:

$$M = \frac{P}{2} \times \frac{L}{2} \dots\dots\dots (6)$$



Menentukan kekuatan *bending* menggunakan:

$$\sigma_b = \frac{3.P.L}{2.b.d^2} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

σ_b = kekuatan bending (MPa)

P = beban yang diberikan(N)

L = jarak antara titik tumpuan (mm)

B = lebar spesimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

