

**PENGARUH VARIASI LAJU PEMANASAN (*HEATING RATES*)
DALAM PROSES *AUSTEMPERING* PADA PEMBUATAN
KACA *TEMPERED* DARI KACA BENING TERHADAP
KETANGGUHAN BAHAN KACA**

(SKRIPSI)

**Oleh
KADEK PANCA BUANA
NPM 2255021005**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI LAJU PEMANASAN (*HEATING RATES*) DALAM PROSES *AUSTEMPERING* PADA PEMBUATAN KACA *TEMPERED* DARI KACA BENING TERHADAP KETANGGUHAN BAHAN KACA

Oleh:

Kadek Panca Buana

Kaca adalah material anorganik hasil peleburan beberapa komponen dasar yang seterusnya didinginkan sampai fasa padat. Pasir silika merupakan salah satu dari bahan utamanya. Penelitian ini bertujuan agar dapat mengetahui pengaruh laju pemanasan pada perlakuan panas *quenching* terhadap kaca bening dalam upaya meningkatkan kekuatan impaknya. Proses perlakuan panas yang diterapkan yaitu perlakuan panas *austempering* pada temperatur 650°C dengan variasi laju pemanasan 10,33°C/menit, 5,16°C/menit, dan 3,44°C/menit lalu diturunkan pada temperatur 250°C, selanjutnya dilakukan pengujian impak. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas menunjukkan adanya perubahan pada kekuatan impak. Pada kaca bening yang belum diberikan perlakuan panas memiliki nilai rata-rata harga impak sebesar 0,018 J/mm². Sementara itu, spesimen yang telah melalui proses *austempering* dengan variasi laju pemanasan 10,33°C/menit, 5,16°C/menit, dan 3,44°C/menit, masing-masing menghasilkan nilai rata-rata harga impak sebesar 0,0153 J/mm², 0,0158 J/mm², dan 0,0226 J/mm². Peningkatan kekuatan impak tertinggi terjadi pada spesimen dengan laju pemanasan 3,44°C/menit, yaitu sebesar 25,55% dari *raw material*. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas *austempering* laju pemanasana 3,44°C/menit dengan media pendingin air dan air es menunjukkan terjadinya retak seribu yang mengakibatkan kaca menjadi sangat rapuh dan mudah hancur. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas *quenching* laju pemanasan 10,33°C/menit dengan pendingin oli dan resin polyester tak jenuh mendapatkan nilai rata-rata harga impak sebesar 0,0081 J/mm² dan 0,0163 J/mm². Penelitian ini menunjukkan bahwa laju pemanasan memiliki peran penting dalam meningkatkan kekuatan impak pada kaca *tempered* dan meminimalkan terjadinya *thermal shock* pada kaca.

Kata kunci: Laju Pemanasan, *Austempering*, Kaca, *Tempered*, Impak.

ABSTRACT

THE EFFECT OF HEATING RATES VARIATIONS IN THE AUSTEMPERING PROCESS IN MAKING TEMPERED GLASS FROM CLEAR GLASS ON THE TOUGHNESS OF GLASS MATERIALS

By:

Kadek Panca Buana

Glass is an inorganic material resulting from the melting of several basic components which are then cooled to a solid phase. Silica sand is one of the main ingredients. This study aims to determine the effect of heating rate on quenching heat treatment on clear glass in an effort to increase its impact strength. The heat treatment process applied is austempering heat treatment at a temperature of 650°C with variations in heating rates of 10.33°C/minute, 5.16°C/minute, and 3.44°C/minute then lowered to a temperature of 250°C, then impact testing is carried out. Glass that has undergone heat treatment shows a change in impact strength. In clear glass that has not been given heat treatment, the average impact value is 0.018 J/mm². Meanwhile, specimens that have undergone the austempering process with variations in heating rates of 10.33°C/min, 5.16°C/min, and 3.44°C/min, each produced an average impact value of 0.0153 J/mm², 0.0158 J/mm², and 0.0226 J/mm². The highest increase in impact strength occurred in specimens with a heating rate of 3.44°C/min, which was 25.55% of the raw material. Glass that has undergone austempering heat treatment at a heating rate of 3.44°C/min with water and ice water cooling media showed the occurrence of thousand cracks which resulted in the glass becoming very brittle and easily broken. Glass that has undergone quenching heat treatment at a heating rate of 10.33°C/min with oil cooling and unsaturated polyester resin obtained an average impact value of 0.0081 J/mm² and 0.0163 J/mm². This study shows that the heating rate has an important role in increasing the impact strength of tempered glass and minimizing the occurrence of thermal shock in glass.

Keywords: Heating Rates, Austempering, Glass, Tempered, Impact.

**PENGARUH VARIASI LAJU PEMANASAN (*HEATING RATES*) DALAM
PROSES *AUSTEMPERING* PADA PEMBUATAN KACA *TEMPERED*
DARI KACA BENING TERHADAP KETANGGUHAN BAHAN KACA**

**Oleh:
KADEK PANCA BUANA**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

: **PENGARUH VARIASI LAJU PEMANASAN
(HEATING RATES) DALAM PROSES
AUSTEMPERING PADA PEMBUATAN
KACA TEMPERED DARI KACA BENING
TERHADAP KETANGGUHAN BAHAN
KACA**

Nama Mahasiswa

: **Kadek Panca Buana**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2255021005**

Jurusan

: **Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**



Pembimbing 1

Pembimbing 2

Zulhanif, S.T., M.T.

NIP. 19730402 200003 1 002

Prof. Dr. Sugivanto, M.T.

NIP. 19570411 198610 1 001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 19740816 200012 1 001

Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc.

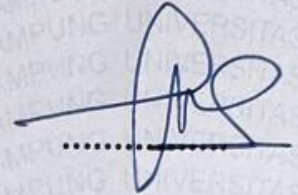
NIP. 19790821 200312 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

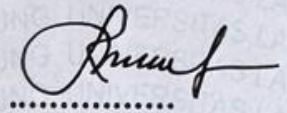
Ketua Penguji

: **Zulhanif, S.T., M.T.**



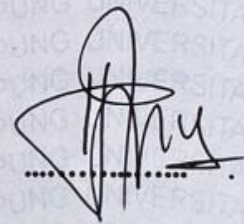
Anggota Penguji

: **Prof. Dr. Sugiyanto, M.T.**



Penguji Utama

: **Harnowo Supriadi, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



 **Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Maret 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kadek Panca Buana
Nomor Pokok Mahasiswa : 2255021005
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu naskah ini disebut dalam daftar pustaka.

Bandar Lampung, 03 Maret 2026

Yang menyatakan,



Kadek Panca Buana

NPM. 2255021005

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan Om Swasthnam astu namo sidham.

Ku persembahkan karya tulis ini kepada kedua orang tuaku yang tersayang

Bapak Ketut Nidre dan Ibu Nyoman Murti

MOTTO

Bhagavad Gita II.65

प्रसादे सर्वदुःखानां हानिरस्योपजायते
प्रसन्नासेटसो ह्याशु बुद्धिः पर्यवतिष्ठते

*prasāde sarvaduḥkhānām hānirasyopajāyate,
prasannacetaso hyāśu buddhiḥ paryavatiṣṭhate.*

“Di dalam ketenangan maka berakhirlah semua kesusahannya dan sesungguhnya bagi orang yang telah mendapatkan ketenangan pikiran kebijaksannya segera menjadi tak tergoyahkan.”

Acaa.

If not now or never

“Trabas trabas tuntas”

SANWACANA

Puji serta syukur saya panjatkan kehadapan Ida Sang Hyang Widhi Wasa/Tuhan Yang Maha Esa, karena atas Asung Kertha Wara Nugrahan-Nya lah Penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“PENGARUH VARIASI LAJU PEMANASAN (*HEATING RATES*) DALAM PROSES *AUSTEMPERING* PADA PEMBUATAN KACA *TEMPERED* DARI KACA BENING TERHADAP KETANGGUHAN BAHAN KACA**”. Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib perkuliahan jenjang Sarjana (S1) Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

Penulis menyadari sepenuhnya adanya kekurangan maupun keterbatasan dalam pengetahuan, pengalaman, dan kemampuan yang dimiliki. Meskipun demikian, Penulis tetap berharap agar karya ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak serta menjadi kontribusi pemikiran bagi dunia akademik maupun bidang lainnya. Pada kesempatan ini, Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih atas kritik, saran, bimbingan, dan petunjuk dari semua pihak yang sangat Penulis butuhkan demi kelengkapan dan penyempurnaan skripsi ini.

Penulis tidak akan mampu mencapai hasil yang baik tanpa bantuan serta dukungan dari berbagai pihak, baik yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama, yang dengan penuh kesediaan telah membimbing serta memberikan berbagai masukan dan arahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Prof. Dr. Sugiyanto, M.T. selaku dosen pembimbing pendamping Tugas Akhir, yang dengan penuh kesediaan dan ketulusan telah berbagi ilmu, memberikan

bimbingan, serta menyampaikan kritik sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya.

3. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku dosen pembahas dalam Tugas Akhir ini, yang telah memberikan kritik dan masukan yang sangat bermanfaat bagi Penulis.
4. Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung, yang telah memberikan dukungan, kebijakan, serta fasilitas yang telah diberikan selama penulis menempuh pendidikan di lingkungan Fakultas Teknik.
5. Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, yang telah menciptakan suasana perkuliahan yang nyaman bagi Penulis.
6. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi Sarjana S1 Teknik Mesin Universitas Lampung, yang telah memberikan berbagai arahan terkait pelaksanaan perkuliahan.
7. Ir. Tarkono, S.T., M.T., IPP. selaku dosen Pembimbing Akademik, yang telah membimbing Penulis sepanjang masa perkuliahan serta membantu menyelesaikan berbagai permasalahan akademik yang Penulis hadapi.
8. Kedua orang tua penulis yang sangat disayangi (Bapak Ketut Nidre & Ibu Nyoman Murti) yang tiada henti memberikan dukungan, arahan, nasehat, serta doa yang tulus untuk penulis dari awal hingga selesai masa perkuliahan.
9. Kakak tersayang penulis (Wayan Reka Aryani) yang selalu memberikan semangat dan memotivasi penulis selama masa perkuliahan.
10. Hindu unila angkatan 2022 yang menjadi keluarga kecil kedua penulis, yang menjadi penuntun dan pengarah dalam melaksanakan perkuliahan.
11. Teman-teman seperjuangan angkatan 2022 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
12. Seseorang yang memanggil penulis dengan sebutan Acaa, yang selalu ada untuk membantu dalam keadaan apapun, baik dalam masa perkuliahan dan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

13. Semua orang yang menyayangi dan selalu memberikan doa dukungan untuk penulis dalam penyelesaian dari awal hingga akhir masa perkuliahan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
14. Bapak Ruwanto sebagai plp laboratorium material jurusan teknik mesin dan Bapak Heru sebagai plp laboratorium energi baru & terbarukan jurusan teknik kimia yang selalu memberikan arahan masukan saat melakukan penelitian.

Akhir kalimat, Penulis menyampaikan terimakasih banyak yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah berperan serta membantu dalam penyusunan skripsi ini dari awal hingga akhir.

Bandar Lampung, 03 Maret 2026

Kadek Panca Buana
NPM. 2255021005

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.3 Manfaat Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Definisi Kaca.....	7
2.1.1 Karakteristik Kaca Secara Umum:.....	9
2.1.2 Karakteristik Kaca Berdasarkan Sifat Fisik:	10
2.1.3 Karakteristik Kaca berdasarkan Sifat Mekanik:	10
2.2 Material Viskoelastis	11
2.3 Jenis-jenis kaca.....	13
2.3.1 Kaca Normal (<i>Annealed Glass</i>)	13
2.3.2 Kaca laminasi (<i>Laminated Glass</i>)	14
2.3.3 Kaca tempered (<i>Toughened Glass</i>)	14
2.3.4 Kaca reflektif (<i>Reflective glass</i>)	15
2.3.5 Cermin (<i>Mirror</i>)	16

2.4	Kaca Tempered.....	17
2.5	Perlakuan Panas.....	20
2.6	Perlakuan Panas pada Kaca.....	23
2.7	Laju Pemanasan (<i>Heating Rates</i>).....	25
2.8	Perlakuan Panas <i>Quenching</i>	27
2.8.1	Air	29
2.8.2	Minyak atau Oli	29
2.9	Perlakuan Panas <i>Austempering</i>	30
2.10	Pengujian Impak.....	32
2.10.1	Metode <i>Charpy</i>	33
2.10.2	Metode <i>Izod</i>	34
2.11	Perhitungan Kekuatan Impak	35
2.11.1	Perhitungan energi potensial	36
2.11.2	Perhitungan energi kinetik	36
2.11.3	Harga impak (HI)	37
III.	METODE PENELITIAN	38
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	38
3.2.1	Bahan Penelitian.....	38
3.2.2	Gerinda Potong	39
3.2.3	Tungku (<i>Furnace</i>)	39
3.2.4	Penjepit Spesimen	40
3.2.5	Sarung Tangan.....	41
3.2.6	Media Pendingin Oli	42
3.2.7	Alat Uji Impak	42
3.3	Metode Penelitian.....	43

3.3.1	Persiapan Spesimen.....	43
3.3.2	Perlakuan Panas	44
3.3.3	Pengujian Impak	45
3.4	Variabel Penelitian.....	45
3.5	Diagram Alir.....	47
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1	Hasil Perlakuan Panas	48
4.2	Hasil Pengujian Impak	52
4.3	Pembahasan.....	57
V.	PENUTUP	65
5.1	Simpulan.....	65
5.2	Saran.....	66
	DAFTAR PUSTAKA	67
	LAMPIRAN.....	73

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Kaca Normal	13
Gambar 2. 2 Kaca Laminasi.....	14
Gambar 2. 3 Kaca Tempered.....	15
Gambar 2. 4 Kaca Reflektif	16
Gambar 2. 5 Cermin (Mirror).....	16
Gambar 2. 6 Pecahan Kaca Bening Biasa (Kiri) Dan Tempered (Kanan)	19
Gambar 2. 7 Air.....	29
Gambar 2. 8 Oli.....	30
Gambar 2. 9 Ilustrasi Pengujian Impak.....	33
Gambar 2. 10 Skematik Uji Impak Charpy.....	34
Gambar 2. 11 Skematik Uji Impak Izod	35
 Gambar 3. 1 Bahan Penelitian (Kaca Bening)	 39
Gambar 3. 2 Gerinda Potong.....	39
Gambar 3. 3 Tungku (Furnace)	40
Gambar 3. 4 Penjepit Spesimen	41
Gambar 3. 5 Sarung Tangan.....	41
Gambar 3. 6 Media Pendingin Oli	42
Gambar 3. 7 Alat Uji Impak.....	42
Gambar 3. 8 Spesimen Uji Impak Sesuai Standar ASTM E-23.....	44
Gambar 3. 9 Diagram Alir.....	47
 Gambar 4. 1 Hasil Perlakuan Panas Austempering Laju Pemanasan 3,44°C/menit Media Pendingin Air	 48

Gambar 4. 2 Hasil Perlakuan Panas Austempering Laju Pemanasan 3,44°C/menit Media Pendingin Air Es	49
Gambar 4. 3 Hasil Perlakuan Panas Quenching Laju Pemanasan 10,33°C/menit Media Pendingin Resin Polyester Tak Jenuh.....	49
Gambar 4. 4 Hasil Perlakuan Panas Quenching Laju Pemanasan 10,33°C/menit Media Pendingin Oli	50
Gambar 4. 5 Hasil Perlakuan Panas Austempering Laju Pemanasan 10,33°C/menit	51
Gambar 4. 6 Hasil Perlakuan Panas Austempering Laju Pemanasan 5,16°C/menit	51
Gambar 4. 7 Hasil Perlakuan Panas Austempering Laju Pemanasan 3,44°C/menit	52
Gambar 4. 8 Patahan Hasil Uji Impak Raw Material.....	53
Gambar 4. 9 Patahan Hasil Uji Impak Laju Pemanasan 10,33°C/menit Quenching Temperatur 650°C Media Pendingin Resin Polyester Tak Jenuh	54
Gambar 4. 10 Patahan Hasil Uji Impak Laju Pemanasan 10,33°C/menit Quenching Temperatur 650°C Media Pendingin Oli	55
Gambar 4. 11 Patahan Hasil Uji Impak Austempering Laju Pemanasan 10,33°C/menit	55
Gambar 4. 12 Patahan Hasil Uji Impak Austempering Laju Pemanasan 5,16°C/menit.....	56
Gambar 4. 13 Patahan Hasil Uji Impak Austempering Laju Pemanasan 3,44°C/menit.....	56
Gambar 4. 14 Grafik Hasil Pengujian Impak Quenching	61
Gambar 4. 15 Grafik Hasil Pengujian Impak Austempering Variasi Laju Pemanasan Media Pendingin Oli	62

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Kaca Bening	9
Tabel 3. 1 Spesifikasi Furnace	40
Tabel 3. 2 Spesifikasi Alat Uji Impak	43
Tabel 3. 3 Pengambilan Data Pengujian Impak	46
Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Impak.....	52

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kaca merupakan material cair yang melalui berbagai proses kimia, fisika, dan biologi hingga akhirnya membentuk padatan. Bahan utama dalam pembuatan kaca adalah pasir silika, sehingga kaca memiliki sifat tembus cahaya dan tampak bening. Kombinasi bahan-bahan penyusunnya membuat kaca menjadi produk yang banyak diminati.

Pemanfaatan kaca sebagai material telah dikenal sejak ribuan tahun lalu. Pada abad ke-17, kaca mulai digunakan sebagai bahan bangunan, dan penggunaannya dalam arsitektur semakin meningkat pada abad ke-20 seiring berkembangnya industrialisasi serta kemajuan teknologi pengolahan dan produksi kaca. Proses pembuatan kaca pun kini mengalami perkembangan yang sangat pesat. Jika sebelumnya kaca bangunan hanya berbentuk kaca datar (*flat glass*), kini telah tersedia berbagai bentuk dan jenis kaca yang disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi (Lestari & Alhamdani, 2014).

Kaca banyak digunakan di gedung untuk atap dan dinding bangunan (Mingxuan dkk, 2014). Kaca juga digunakan sebagai kaca pada mobil. Kaca mobil merupakan salah satu komponen yang penting untuk dapat mencegah masuknya debu angin kencang, hingga serangga ke kabin mobil. Selain itu fungsi kaca memberikan performa aerodinamis dari sisi depan sekaligus memberi penglihatan (*visibilitas*) yang baik bagi pengendara.

Kaca sangat berperan penting dalam kehidupan sehari-hari, dikarenakan kaca sangat berpengaruh dalam perekonomian dan industri saat ini. Hingga

sekarang ini ada salah satu kaca yang digunakan dalam dunia otomotif maupun lainnya, kaca tersebut adalah kaca *tempered*. Jenis kaca ini mampu meminimalkan cedera jika terjadi kecelakaan, kaca tersebut memiliki tingkat perlindungan yang lebih baik dari kaca biasa, saat terjadi keretakan kaca ini akan menjadi butiran jagung yang mana tidak membahayakan bagi korban (Ismail dkk, 2024).

Kaca *tempered* adalah sebuah jenis kaca yang diproses pada pemanasan tinggi dan selanjutnya didinginkan secara cepat (*quenching*) menggunakan media seperti air, air garam, atau minyak seperti oli, solar, dan minyak tanah. Proses *quenching* ini adalah teknik pendinginan cepat setelah pemanasan untuk meningkatkan kekuatan kaca. Kaca *tempered* dikenal memiliki ketahanan mekanis yang tinggi serta mampu menahan tekanan. Dalam penerapannya, kaca ini banyak digunakan pada konstruksi industri yang rentan terhadap tekanan dan benturan, sehingga kekuatan impact kaca menjadi hal penting untuk memperpanjang usia pakainya. Oleh karena itu, perlakuan panas diperlukan untuk meningkatkan kemampuan kaca menahan impact.

Untuk mendapatkan kaca dengan kekuatan impact yang tinggi sesuai kebutuhan, kaca dapat diberi perlakuan berupa proses pemanasan atau *heat treatment* untuk meningkatkan sifat mekaniknya, terutama kekuatan impact. Perlakuan panas pada kaca adalah sebuah proses pemanasan serta pendinginan kaca dalam kondisi padat yang bertujuan mengubah atau memperbaiki sifat mekanik material tersebut. Terdapat berbagai metode yang dapat diterapkan dalam proses ini, salah satunya adalah metode *quenching*, yaitu pendinginan kaca secara cepat setelah dipanaskan.

Setelah kaca mengalami berbagai proses untuk meningkatkan sifat mekaniknya, perlu dilakukan pengujian guna mengetahui kemampuan kaca dalam menahan beban kejut. Salah satu metode yang umum dipakai untuk menilai kemampuan tersebut adalah uji impact. Kekuatan impact merupakan parameter penting dalam menilai performa kaca, terutama pada kondisi di

mana kaca berpotensi mengalami tekanan atau benturan secara tiba-tiba. Nilai kekuatan impak dapat diperoleh melalui pengujian impak, yaitu pengujian dengan pembebanan secara cepat (*rapid loading*). Dalam penggunaan sehari-hari, seperti pada kendaraan bermotor maupun konstruksi bangunan, kemampuan kaca menahan impak menjadi faktor penting bagi keselamatan dan daya tahan material. Oleh sebab itu, penelitian terkait pengaruh variasi perlakuan panas *quenching* terhadap kekuatan impak kaca sangat diperlukan untuk memahami serta meningkatkan performa material ini.

Pengujian terhadap variasi temperatur Hotsan dkk, (2022) mengenai kaca *tempered* untuk menganalisis pengaruh suhu pemanasan terhadap jumlah pecahan kaca. Pengujian dilakukan menggunakan kaca dengan ketebalan 3,1 mm. Dari hasil pengujian pada variasi suhu *tempering* 620°C, 650°C, dan 700°C, diperoleh bahwa jumlah pecahan kaca telah memenuhi standar, yaitu tidak kurang dari 15 pecahan pada area 50 × 50 mm. Temperatur 650°C dinyatakan sebagai suhu terbaik untuk proses pembuatan kaca *tempered* karena menghasilkan jumlah pecahan yang stabil dan sesuai standar di setiap titik pengujian.

Habiby dkk, (2022) melakukan penelitian mengenai Struktur mikro pada benda *Crucible* dengan variasi laju pemanasan yaitu laju pemanasan 2°C, 4°C, 6°C, 8°C dan 10°C/menit. Dari pengujian ini didapatkan hasil pada laju pemanasan yang paling lambat, yaitu 2°C/menit, penyebaran serta distribusi fasa terlihat paling optimal. Laju pemanasan 4°C/menit masih menunjukkan pemerataan yang baik. Namun, pada laju 6°C/menit, permukaan mulai tampak tidak merata dan bergelombang. Adapun hasil fasa yang paling kurang optimal muncul pada laju pemanasan yang lebih cepat, yaitu 8°C/menit dan 10°C/menit. Hasil ini sesuai dengan penelitian Firmansyah dkk, (2014) yang menyimpulkan bahwa laju pemanasan akan berpengaruh pada hasil mikro struktur suatu bahan.

Susanto (2007) meneliti proses *tempering* pada kaca dengan tujuan meningkatkan kekuatannya. Dalam proses tersebut digunakan tiga variasi

temperatur, yakni 500°C, 600°C, dan 700°C, kemudian setiap perlakuan panas diuji. Pengujian yang dilakukan adalah uji bending, karena kaca memiliki sifat yang sangat keras sehingga tidak memungkinkan dilakukan uji kekerasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kekuatan bending pada kaca setelah melalui proses temper dibandingkan dengan kaca tanpa perlakuan. Kaca yang ditemper pada suhu 700°C mencapai kekuatan bending tertinggi, yaitu 68,928 N/cm², sedangkan kaca tanpa proses temper memiliki kekuatan bending sebesar 62,400 N/cm².

Pemilihan temperatur dalam pengujian ini merujuk pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Pranata (2024). Proses perlakuan panas kaca yang bisa diterapkan dalam pembuatan kaca tempered adalah proses *tempering*. *Tempering* merupakan proses pemanasan yang dilakukan pada kaca untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan terhadap tekanan dan benturan. Dalam proses perlakuan panas *tempering* yang dilakukan terhadap kaca menggunakan variasi temperatur 480°C, 565°C, dan 650°C dengan metode pendinginan *quenching* media pendingin oli. Hasil pengujian didapatkan hasil peningkatan kekuatan impak terbesar terjadi pada spesimen yang diberi perlakuan panas *quenching* temperatur 650°C yaitu mengalami peningkatan sebesar 51,36%. Terjadi perbuahan kekuatan impak yang sangat signifikan ketika bahan kaca sebelum dan setelah diberikan perlakuan panas *quenching*.

Penelitian ini bertujuan agar dapat mengetahui pengaruh laju pemanasan pada perlakuan panas *quenching* terhadap kaca bening dalam upaya meningkatkan kekuatan impaknya. Diharapkan melalui penelitian ini, diperoleh wawasan baru yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi serta keselamatan dalam pemanfaatan kaca. Selain itu, hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi bagi industri dalam merumuskan standar dan prosedur yang lebih efektif terkait proses perlakuan panas pada kaca.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Menganalisis pengaruh *austempering* (medium) dengan variasi laju pemanasan terhadap kekuatan impak dari kaca.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi akademis yaitu memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami pengaruh proses *austempering* terhadap peningkatan sifat mekanik material kaca.
2. Bagi industri yaitu meningkatkan nilai tambah dan kualitas produk melalui peningkatan kekuatan, ketahanan impak, serta keamanan kaca *tempered* dibanding kaca biasa.
3. Bagi lingkungan dan masyarakat yaitu meningkatkan aspek keselamatan dan mengurangi potensi limbah akibat umur pakai kaca yang lebih panjang.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih fokus dan dapat mencapai tujuan yang telah ditentukan, beberapa batasan masalah berikut diterapkan dalam penelitian ini:

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah kaca bening.
2. Media pendingin yang digunakan berupa oli.
3. Pemanasan dilakukan pada temperatur 650°C dengan variasi laju pemanasan 10,33°C/menit, 5,16°C/menit, dan 3,44°C/menit lalu diturunkan pada temperatur 250°C.
4. Media pendingin oli digunakan pada temperatur ruangan.

5. Temperatur yang ditunjukkan oleh indikator *furnace* dianggap sama dengan temperatur yang terjadi pada spesimen uji.
6. Pengujian yang diterapkan dalam penelitian ini adalah uji impak.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

2. BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan teori-teori dasar yang relevan dengan materi yang dibahas dalam penelitian ini.

3. BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memuat informasi mengenai waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian, variabel penelitian, serta diagram alir penelitian.

4. BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data hasil penelitian serta pembahasan terkait penelitian dan pengujian yang telah dilakukan.

5. BAB V. PENUTUP

Bab ini memuat simpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran dari penulis untuk mendukung penelitian di masa mendatang.

6. DAFTAR PUSTAKA

Memuat berbagai literatur dan jurnal yang dijadikan referensi untuk mendukung penelitian yang dilakukan oleh penulis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Kaca

Kaca merupakan bahan yang awalnya berbentuk cair dan dihasilkan melalui berbagai proses kimia, fisika, dan biologi, sehingga akhirnya menjadi padatan. Salah satu bahan utama dalam pembuatan kaca adalah pasir silika. Karena itu, kaca memiliki sifat fisik yang tembus cahaya dan bening. Kaca termasuk bahan anorganik yang dibuat dengan cara melebur beberapa bahan dasar, kemudian hasil peleburan tersebut dipadatkan melalui proses pendinginan. Kaca terbentuk dari campuran silikon dioksida (SiO_2), plus Na_2O , CaO dan beberapa bahan tambahan lainnya (Purnomo & Hisyam, 2014).

Kaca didefinisikan sebagai material yang secara *inheren* bening dan transparan, memungkinkannya ditembus cahaya sepenuhnya. Secara fundamental, kaca dihasilkan dari peleburan kuarsa (SiO_2), yang merupakan komponen utama pasir silika, yang dipanaskan hingga mencapai titik leleh ekstrem, yaitu sekitar 2000°C . Sifat-sifat kaca adalah keras, transparan, bening, dan dapat pecah. Penggunaan kaca dapat diaplikasikan di berbagai elemen bangunan, di antaranya dapat digunakan untuk atap, dinding, lantai, jendela, pintu, dan anak tangga. Kaca memiliki berbagai spesifikasi yang bervariasi sehingga memudahkan penggunaan untuk berbagai keperluan (Sylvia & Mahmudah, 2018).

Kaca adalah bahan/material anorganik hasil peleburan beberapa komponen dasar yang seterusnya didinginkan sampai fasa padat. Pasir silika merupakan salah satu dari bahan utamanya. Kaca dengan kandungan silika tinggi memiliki viskositas yang meningkat lebih cepat saat suhu turun, sehingga lapisan

permukaan (membeku) lebih awal. Hal ini memperbesar perbedaan deformasi termal antara permukaan dan inti, yang akhirnya menghasilkan tegangan tekan permukaan yang lebih besar. Kaca dengan kandungan silika yang lebih tinggi cenderung menghasilkan tegangan tekan permukaan yang lebih besar dan lebih stabil, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan ketangguhan kaca hasil perlakuan panas (Daseno dkk, 2021).

Material kaca termasuk ke dalam kelompok material *amorf*, yaitu material yang tidak memiliki keteraturan struktur atom jangka panjang seperti pada material kristalin. Pada material *amorf*, susunan atomnya bersifat acak sehingga posisi atom tidak dapat dinyatakan dalam bentuk kisi periodik. Hal ini menyebabkan kaca tidak memiliki bidang kristal maupun orientasi tertentu sebagaimana yang ditemukan pada logam atau keramik kristalin. Salah satu karakteristik utama kaca sebagai material *amorf* adalah keberadaan *glass transition temperature* (T_g). Kaca tidak mengalami peleburan pada satu temperatur tertentu seperti kristal, melainkan mengalami perubahan bertahap dari kondisi padat kaku menuju keadaan lunak atau *supercooled liquid*. Transisi ini terjadi pada rentang temperatur yang disebut temperatur transisi kaca (Stachurski, 2011).

Menurut Shelby (2005), kaca didefinisikan sebagai padatan *amorf* yang memiliki range keteraturan struktur atom yang pendek dan menunjukkan adanya daerah kaca transisi. Kaca umumnya dibuat dari bahan silika (soda lime-silicate) dengan komposisi 72% SiO_2 , 14% Na_2O , 11% CaO dan 3% bahan campuran lainnya. Produk kaca mencakup kaca lembaran, gelas, dan berbagai produk kaca lainnya. Salah satu contoh aplikasi kaca di bidang optik yang marak dikembangkan adalah fiber optik. Sampai saat ini, sebagian besar fiber optik terbuat dari bahan utama silika (SiO_2). Bahan silika memiliki kelebihan antara lain memiliki transparansi yang baik pada rentang 0,2 μm hingga 2 μm . Menurut ASTM (*American Society for Testing and Materials*), kaca merupakan produk anorganik yang dihasilkan dari leburan menjadi padatan melalui proses pendinginan tanpa menunjukkan adanya gejala kristalisasi.

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Kaca Bening

NO	KOMPOSISI KIMIA KACA BENING	PERSENTASE (%)
1	SiO ₂ : Silikon dioksida (silica)	72,42
2	Al ₂ O ₃ : Aluminium oksida (alumina)	1,44
3	TiO ₂ : Titanium dioksida	0,035
4	Cr ₂ O ₃ : Kromium(III) oksida	0,002
5	Fe ₂ O ₃ : Besi(III) oksida (hematit)	0,07
6	CaO : Kalsium oksida (kapur tohor)	11,5
7	MgO : Magnesium oksida	0,32
8	Na ₂ O : Natrium oksida	13,64
9	K ₂ O : Kalium oksida	0,35
10	SO ₃ : Sulfur trioksida	0,21

(Sepriyanna & Khairani, 2016)

Kaca memiliki beberapa karakteristik yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

2.1.1 Karakteristik Kaca Secara Umum:

- a. Kaca dikenal memiliki sifat transparan, jernih, dan permukaannya tampak mengkilap. Karakteristik ini tidak hanya terlihat pada saat awal pembentukan, tetapi juga dapat bertahan dalam waktu yang sangat lama tanpa mengalami perubahan signifikan. Ketahanannya terhadap cuaca, korosi, serta berbagai pengaruh lingkungan membuat sifat-sifat tersebut tetap stabil, sehingga kaca terus dipilih sebagai material utama dalam berbagai bidang seperti konstruksi, optik, maupun dekorasi.
- b. Kaca memiliki kemampuan untuk didaur ulang secara efisien, sehingga proses pengolahan kembali tidak menyebabkan penurunan kualitas materialnya. Hal ini membuat kaca menjadi salah satu bahan yang ramah lingkungan, karena dapat digunakan kembali berkali-kali tanpa kehilangan sifat fisik maupun estetika aslinya. Dengan demikian, daur ulang kaca menjadi pilihan yang berkelanjutan dalam industri manufaktur dan pengelolaan limbah.

2.1.2 Karakteristik Kaca Berdasarkan Sifat Fisik:

- a. Kaca memiliki sifat termal yang memungkinkan material ini mengalami pemuaian saat terkena panas. Sebaliknya, kaca juga dapat menyusut atau mengalami kontraksi ketika suhunya menurun atau dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di sekitarnya. Perubahan ukuran ini terjadi karena partikel-partikel penyusun kaca bergerak lebih cepat pada suhu tinggi dan lebih lambat pada suhu rendah.
- b. Kaca termasuk dalam material yang tidak mampu menghantarkan panas dengan baik karena di dalamnya terdapat kandungan senyawa yang bersifat isolator. Struktur internal kaca menghambat pergerakan panas dari satu titik ke titik lainnya, sehingga energi panas tidak dapat berpindah secara efektif. Oleh sebab itu, kaca sering digunakan sebagai bahan isolasi termal dalam berbagai aplikasi, terutama pada bangunan atau peralatan yang membutuhkan penghambatan panas.
- c. Titik leleh kaca bervariasi tergantung pada jenis dan komposisi bahan penyusunnya. Meskipun demikian, secara umum kaca memiliki titik leleh yang cukup tinggi, yakni rata-rata berada di atas 1.000°C .

2.1.3 Karakteristik Kaca berdasarkan Sifat Mekanik:

- a. Kaca memiliki kekuatan tarik (*tensile strength*) yang relatif rendah, sehingga material ini bersifat rapuh dan mudah pecah ketika mendapatkan tekanan atau benturan tertentu. Karena sifat ini, kaca memerlukan penanganan yang hati-hati dan sering kali diperkuat atau diproses secara khusus, seperti melalui *tempering*, untuk meningkatkan ketahanannya terhadap gaya mekanis dan mengurangi risiko kerusakan.
- b. Kaca memiliki tingkat kekerasan yang tergolong tinggi, sehingga permukaannya cukup tahan terhadap goresan dan aus akibat kontak dengan benda lain. Sifat ini menjadikan kaca sebagai material yang awet dan cocok untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti jendela, perabot rumah tangga, dan perangkat optik, di mana ketahanan terhadap goresan menjadi faktor penting.

- c. Kaca memiliki karakteristik mekanik yang menunjukkan kemampuan lebih tinggi dalam menahan gaya tekan dibandingkan gaya tarik. Sifat ini menjadikan kaca lebih sesuai digunakan pada elemen atau struktur yang menerima beban tekan, seperti dinding, panel, maupun komponen arsitektural lainnya. Dalam kondisi menerima tekanan, kaca dapat mempertahankan bentuk dan kekuatannya dengan baik tanpa mengalami deformasi yang signifikan.

2.2 Material Viskoelastis

Material viskoelastis adalah bahan yang memiliki kombinasi dari sebuah sifat elastis dan sifat viskos. Kaca, yang kini dipahami sebagai material terkondensasi dalam keadaan non-kesetimbangan dan non-kristalin, memiliki fase transisi kaca, yaitu daerah di mana material ini akan memperlihatkan sebuah sifat viskoelastis yang sangat kuat. Karena memiliki berbagai keunggulan seperti kekerasan tinggi, daya tahan terhadap panas, indeks bias yang baik, kemampuan untuk dapat meneruskan cahaya, serta kestabilan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem seperti suhu dan juga kelembapan, kaca sekarang telah banyak digunakan untuk menggantikan polimer dalam berbagai aplikasi optik (Vu dkk, 2019).

Material viskoelastis adalah material yang hubungan antara tegangan dan regangannya bergantung pada waktu atau dalam domain frekuensi, pada frekuensi. Kemiringan plot tegangan vs regangan bergantung pada laju regangan. Padatan elastis merupakan bagian dari material viskoelastis. Material ini memiliki konfigurasi kesetimbangan yang unik dan akhirnya pulih sepenuhnya setelah beban transien dihilangkan. Setelah ditekan, material tersebut kembali ke bentuk aslinya, jika diberi waktu yang cukup (Zurik, 2022)

Ahmed (2023) material viskoelastis adalah material yang menunjukkan perilaku viskos dan elastis secara bersamaan. Material ini menunjukkan sifat dan perilaku regangan yang bergantung waktu. Regangan elastis biasanya

dihasilkan dari peregangan, tetapi bukan dari putusanya ikatan atom atau molekul dalam padatan yang teratur. Komponen viskos dari regangan viskoelastis dihasilkan dari penataan ulang atom atau molekul dalam material *amorf*. Bagian elastis (yang menyimpan energi) berperilaku sesuai dengan hukum *Hooke*. Bagian viskos (yang menghilangkan energi) berperilaku sesuai dengan hukum *Newton*. Material viskoelastis menunjukkan respons yang bergantung waktu dan tertunda ketika beban diberikan dan dihilangkan.

Fenomena *creep* terjadi pada material yang memiliki sifat viskoelastis, yaitu ketika material mengalami deformasi yang terus bertambah seiring waktu saat diberi beban tetap. Fenomena *creep* pada kaca adalah proses deformasi lambat yang terjadi ketika material kaca, baik kaca *amorf* maupun kaca keras, diberi beban konstan dalam jangka waktu lama. Meskipun kaca bersifat rapuh dan tidak memiliki dislokasi seperti logam, deformasi ini dapat terjadi karena adanya mobilitas internal partikel yang terbatas namun bertambah seiring waktu. Model Maxwell, model Kelvin, dan model Burgers diterapkan untuk mempelajari sifat viskoelastis material kaca di atas suhu transisi kaca, dan model Burgers akhirnya diadopsi untuk mempelajari proses *creep*, yang dianggap sesuai dengan hubungan antara tegangan, regangan, laju regangan, dan suhu selama deformasi dengan akurasi yang cukup baik (Zhou dkk, 2008).

Gejala *creep* ini dapat ditemukan pada berbagai material seperti logam, polimer, bahkan kaca. Walaupun kaca bukan termasuk material viskoelastis karena sifatnya yang keras dan rapuh, namun dalam kondisi tertentu kaca tetap dapat mengalami *creep*. Pada suhu tertentu, kaca mulai melunak dan menjadi lebih mudah mengalami deformasi, sehingga perubahan bentuk dapat terjadi secara perlahan saat mendapat beban konstan, meskipun tidak sebesar pada material viskoelastis lainnya. Oleh sebab itu, meskipun kaca bukan material viskoelastis, fenomena *creep* tetap bisa diamati pada kaca dalam kondisi tertentu (Ogunleye dkk, 2021).

2.3 Jenis-jenis kaca

Sekarang ini terdapat jenis kaca sangat beragam dan diproduksi sesuai dengan fungsinya masing-masing. Jenis kaca yang penting serta umum digunakan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

2.3.1 Kaca Normal (*Annealed Glass*)

Kaca normal adalah sebuah jenis kaca datar yang memiliki permukaan halus, jernih, dan tidak banyak mengalami distorsi sehingga mampu memberikan tampilan yang jelas terhadap objek di baliknya. Jenis kaca ini sangat banyak digunakan pada kehidupan sehari-hari, terutama dalam pembuatan jendela, etalase toko, sekat ruangan, maupun kebutuhan interior lainnya. Selain karena tampilannya yang sederhana dan transparan, kaca normal juga mudah diproses dan dipotong sesuai ukuran yang dibutuhkan. Secara umum, kaca normal digunakan sebagai material awal sebelum diproses lebih lanjut menjadi kaca tempered atau *laminated* sehingga banyak diaplikasikan pada kebutuhan umum. Bentuk fisik dari kaca normal dapat dilihat seperti pada gambar 2.1 (Lestari & Alhamdani, 2014).

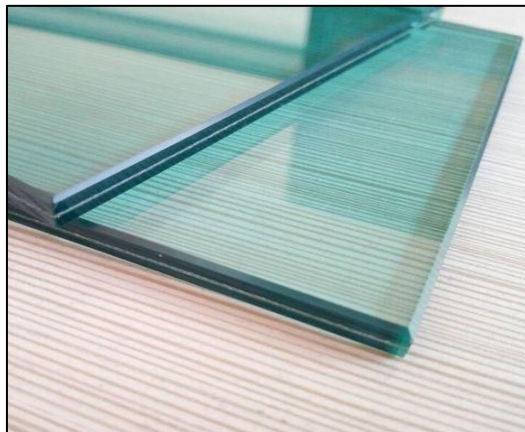


Gambar 2. 1 Kaca Normal

(<https://tamindoglass.com>)

2.3.2 Kaca laminasi (*Laminated Glass*)

Kaca laminasi merupakan jenis kaca pengaman (*safety glass*) yang tidak mudah hancur ketika terkena benturan. Jenis kaca ini ditemukan pada tahun 1903 oleh seorang ahli kimia asal Prancis, Edward Benedictus, yang mendapatkan ide tersebut dari sebuah insiden di laboratoriumnya. Kaca laminasi digunakan untuk mencegah risiko kecelakaan pada kendaraan karena dilapisi plastik khusus bernama *Polyvinyl Butyral* (PVB). Dalam proses pembuatannya, berbagai material seperti kain, kayu, hingga logam dapat disisipkan di antara dua lapisan kaca, sehingga menghasilkan efek visual yang unik dan cocok digunakan sebagai elemen pembatas ruangan yang menarik, seperti partisi kaca, pintu kaca, dan kaca dekoratif. Bentuk fisik dari kaca laminasi dapat dilihat seperti pada gambar 2.2 Kaca laminasi (Hartanti & Setiawan, 2014).



Gambar 2. 2 Kaca Laminasi

(<https://tamindoglass.com>)

2.3.3 Kaca tempered (*Toughened Glass*)

Kaca *tempered* adalah jenis kaca yang memiliki kekuatan tinggi karena melalui proses perlakuan panas secara merata pada suhu kurang lebih 650°C, kemudian segera didinginkan dengan cepat menggunakan udara bertekanan. Kaca *tempered* merupakan salah satu jenis *safety glass* yang umum digunakan sebagai kaca standar yang diperuntukan area yang berisiko tinggi. Sifat kaca *tempered* adalah tahan panas, tahan terhadap

benturan ringan, 4-5 kali lebih kuat dari kaca standar, kaca *tempered* akan pecah dengan bentuk serbuk halus, juga tidak dalam bentuk yang tajam. Ukuran kaca tempered yang umum di pasaran mulai dari 3 mm-18 mm. Bentuk fisik dari kaca *tempered* dapat dilihat seperti pada gambar 2.3 (Akmal, 2009).

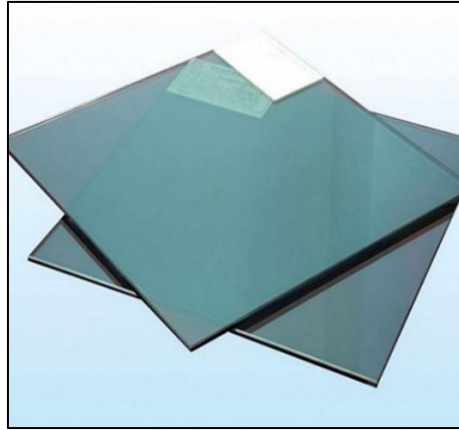


Gambar 2. 3 Kaca *Tempered*

(<https://tamindoglass.com>)

2.3.4 Kaca reflektif (*Reflective glass*)

Kaca reflektif adalah jenis kaca yang mampu memantulkan cahaya dan mereduksi sifat tembus pandang dari sisi luar, sehingga sering pula disebut dengan kaca *one way*. Pada produk Asahimas kaca ini disebut dengan istilah kaca stopsol. Dalam pembuatannya, kaca ini dilapisi dengan pelapis transparan tipis dari oksida logam (sebagai lapisan pemantul) melalui proses *pyrolysis*. Lapisan kaca refletif ini bersifat memantulkan cahaya dan panas, serta mampu memberikan penampilan yang mewah, sekaligus menurunkan beban energi pengkondisian udara. Lapisan *coating* reflektif ini dapat dilapiskan pada kaca *clear* maupun panasap (warna) *blue*, *dark blue*, *grey* dan *green*. Kaca ini biasa digunakan pada bukaan pintu atau jendela dinding luar, yang diharapkan berpenampilan mewah pada bangunan. Untuk bangunan bertingkat, terutama digunakan digunakan pada tipe dinding kaca eksterior (*curtain wall*). Bentuk fisik dari kaca reflektif dapat dilihat seperti pada gambar 2.4 (Arafah & Prianto, 2018).

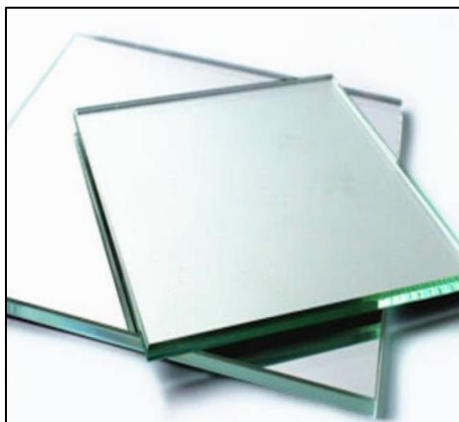


Gambar 2. 4 Kaca Reflektif

(www.ssmglass.com)

2.3.5 Cermin (*Mirror*)

Cermin adalah salah satu jenis kaca reflektif yang memiliki tingkat pantulan cahaya sangat tinggi, sehingga mampu menampilkan bayangan atau citra dari objek yang berada di depannya dengan jelas. Permukaannya dilapisi dengan bahan logam seperti perak atau aluminium pada bagian belakang kaca, yang berfungsi memantulkan hampir seluruh cahaya yang mengenainya. Karena kemampuannya tersebut, cermin tidak hanya digunakan untuk keperluan pribadi seperti pada rumah tangga, bidang arsitektur, dan optik. Bentuk fisik dari cermin atau *mirror* dapat dilihat seperti pada gambar 2.5 (Septian dkk, 2025).



Gambar 2. 5 Cermin (Mirror)

(www.ssmglass.com)

2.4 Kaca Tempered

Kaca *Tempered* adalah jenis kaca yang telah melalui proses pemanasan dan pendinginan secara mendadak. Kaca ini pertama kali ditemukan melalui fenomena *Prince Rupert's Drop*, meskipun masih terdapat perdebatan mengenai penemu aslinya. Kelebihan kaca *tempered* antara lain kekuatan yang jauh lebih tinggi (sekitar 4–5 kali dibanding kaca biasa), tahan terhadap panas, lebih awet, dan aman untuk aplikasi kendaraan, karena saat pecah kaca akan membentuk pecahan kecil menyerupai kerikil, sehingga mengurangi risiko cedera bagi penumpang. Biasanya, kaca *tempered* (tanpa laminasi) digunakan pada kaca samping dan kaca belakang kendaraan (Markhiyano dkk, 2019).

Kaca *tempered* jika pecah terkena benturan, langsung menjadi pecahan-pecahan kecil sebesar ibu jari tangan dan tidak tajam, sehingga tidak membahayakan bilamana kaca pecah. Selain itu kaca *tempered* juga dapat meredam panas sinar matahari yang mengenai langsung ke kaca sehingga risiko pecah kaca akibat perbedaan suhu bisa diperkecil. Kaca *tempered* pada dasarnya digunakan karena faktor kekuatan dan keamanannya. Sifat fraktur pada kaca temper menentukan tingkat keamanan kaca (Nielsen & Bjarrum, 2017).

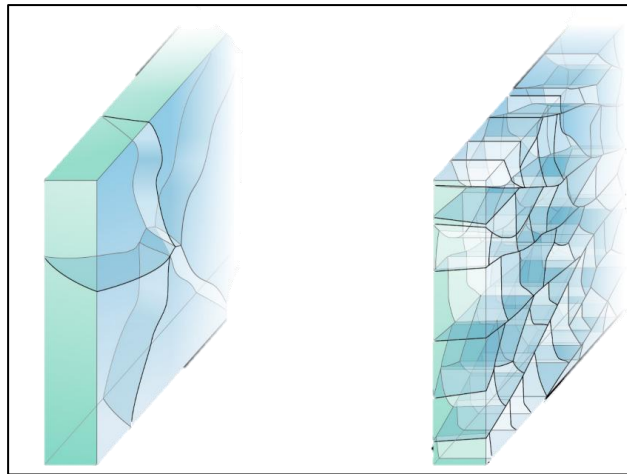
Kaca *tempered* dibuat dengan pendinginan cepat setelah memanaskan kaca normal hingga mendekati titik pelunakannya. Tegangan sisa tekan yang dihasilkan pada permukaan akibat ekspansi termal berfungsi untuk memperkuat material tersebut. Namun, tegangan sisa tarik juga terbentuk pada bagian dalam material untuk mengimbangi tegangan sisa tekan pada permukaan. Kaca *tempered* semakin banyak digunakan sebagai material yang kuat dan aman, karena kekuatannya 2–3 kali lebih besar dibandingkan kaca normal. Selain itu, kaca *tempered* akan pecah menjadi banyak bagian kecil dan tepi pecahannya menjadi tumpul. Jelas bahwa sifat fragmentasi yang baik bergantung pada pengaruh tegangan sisa dibandingkan dengan fragmentasi kaca normal (Tokunaga dkk, 2007).

Pada klasifikasi kaca yang mengalami sebuah pemanasan, terdapat jenis yang dikenal sebagai kaca *tempered*. Kaca ini diproduksi melalui proses pemanasan ulang hingga mencapai suhu sekitar 650°C, kemudian didinginkan secara cepat segera setelah pemanasan. Proses ini menghasilkan perbedaan karakteristik pada kaca, seperti kekuatan yang lebih tinggi, pola pecahan butiran kaca, dan tingkat distorsi yang berbeda dibanding kaca biasa. Dengan metode pemanasan dan pendinginan cepat ini, kaca tempered memiliki ketahanan terhadap benturan yang jauh lebih baik daripada kaca bening biasa. Sebenarnya penelitian terhadap karakteristik pecahan kaca sudah ada sejak perang dunia kedua. Studi eksperimental tentang fragmentasi kaca terutama dilakukan pada kaca anil tradisional, sementara itu literatur sangat terbatas tersedia untuk akses publik tentang kaca *tempered*. Bahkan pemecahan secara analitik dan simulasi numerik juga telah digunakan untuk mempelajari proses fragmentasi kaca (Zhang & Hao, 2015).

Kaca yang diperkuat panas atau kaca *tempered* panas harus digunakan untuk sistem kaca pengaman. Hanya penggunaan lapisan kaca *tempered* yang menawarkan perlindungan. Oleh karena itu, lapisan kaca pengaman *tempered* harus terbuat dari kaca yang diperkuat panas dan kaca *tempered* panas. *Tempering* meningkatkan biaya kaca (sekitar 1,5 kali lipat), sehingga terkadang orang mencoba menggunakan kaca *float* biasa di mana kaca yang diperkuat panas atau kaca tempered akan dibutuhkan. Untuk menyelidiki perilaku panel kaca *tempered* yang bergantung pada suhu, pendekatan eksploratif dilakukan menggunakan sejumlah besar sampel kaca tunggal dan kaca *tempered* (Hussain & Moiz, 2022).

Ketebalan minimum yang diperlukan untuk kaca bening biasa agar dapat diperkuat melalui proses *tempering* adalah 6 mm. Kaca dengan ketebalan di bawah 6 mm cenderung pecah saat dipanaskan. Dalam pembuatan kaca *tempered*, setelah kaca dipanaskan, kaca kemudian didinginkan secara cepat, di mana proses pendinginan ini menyebabkan permukaan kaca mendingin lebih cepat dibanding bagian dalamnya, sehingga tercipta tegangan internal yang

meningkatkan kekuatan kaca. Ketika kaca *tempered* mengalami tekanan atau kerusakan tegangan yang ada pada kaca *tempered* akan dilepaskan sehingga menyebabkan kaca pecah menjadi serpihan-serpihan kecil yang aman. Pada kaca yang belum diberi perlakuan panas *quenching* ketika pecah tidak ada tegangan yang sama seperti pada kaca *tempered*, sehingga kaca memecah menjadi pecahan besar yang tajam. Perlakuan panas *quenching* pada kaca menyebabkan pecahannya lebih banyak karena pecahan kaca menjadi serpihan-serpihan kecil akibat pelepasan tegangan yang terjadi pada kaca *tempered*. Bentuk dari pecahan pada kaca bening biasa dan bentuk pecahan pada kaca *tempered* dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Pecahan Kaca Bening Biasa (Kiri) Dan *Tempered* (Kanan)

(www.multiver.ca)

Ketika kaca *tempered* mengalami tekanan berlebih atau mengalami benturan yang menyebabkan kerusakan, tegangan internal yang tersimpan di dalam struktur kaca akan dilepaskan secara cepat dan merata. Pelepasan tegangan ini mengakibatkan kaca pecah menjadi butiran-butiran kecil dengan tepi yang tumpul, sehingga jauh lebih aman dibandingkan pecahan kaca biasa yang tajam dan berbahaya. Berbeda halnya dengan kaca yang tidak melalui proses perlakuan panas *quenching*, karena pada kaca jenis tersebut tidak terbentuk distribusi tegangan internal yang seimbang antara permukaan dan bagian dalam kaca.

Akibatnya, ketika pecah, kaca akan menghasilkan pecahan-pecahan besar yang tajam. Proses *quenching* pada kaca *tempered* dilakukan dengan cara mendinginkan kaca secara cepat setelah dipanaskan hingga suhu tinggi, sehingga tercipta perbedaan tegangan antara permukaan dan inti kaca. Perbedaan tegangan inilah yang memberikan sifat khas pada kaca *tempered*, yaitu ketahanan yang tinggi terhadap benturan dan pecahan yang aman saat terjadi kerusakan. Penggunaan kaca *tempered* umumnya terfokus pada bagian-bagian bangunan yang memerlukan ketahanan terhadap tekanan atau benturan, seperti dinding atau lantai dasar bangunan. Selain itu, kaca *tempered* juga dapat digunakan sebagai kaca samping maupun belakang kendaraan.

2.5 Perlakuan Panas

Perlakuan panas (*heat treatment*) merupakan suatu proses yang melibatkan tahap pemanasan dan pendinginan material dalam kondisi padat dengan tujuan untuk memperbaiki struktur mikro serta meningkatkan sifat mekanisnya. Melalui proses ini, material dapat memperoleh kekuatan, kekerasan, keuletan, maupun ketahanan aus sesuai kebutuhan. Tahapan dalam perlakuan panas biasanya dimulai dengan pemanasan hingga mencapai suhu austenisasi, di mana struktur internal mengalami perubahan fasa, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan pada kecepatan tertentu agar diperoleh karakteristik mekanis yang diinginkan. Kecepatan pendinginan yang digunakan pada tahap akhir sangat memengaruhi hasil akhir dari sebuah material, seperti tingkat kekerasan, kekuatan, serta stabilitas struktur mikronya (Farhan dkk, 2021).

Setiadi & Toruan (2022) *heat treatment* merupakan suatu proses pemanasan dan pendinginan yang terkontrol, dengan tujuan mengubah sifat fisik dari material. Proses *heat treatment* akan menyebabkan perubahan struktur yang masih terkumpul dalam suatu material menjadi terurai sehingga material menjadi lebih keras, ulet dan tangguh. Secara umum proses *heat treatment* meliputi proses sebagai berikut: *Heating* adalah proses pemanasan sampai temperatur tertentu. *Holding* adalah proses penahanan pemanasan pada

temperatur tertentu. *Cooling* adalah proses pendinginan dengan kecepatan tertentu.

Perlakuan panas adalah proses kombinasi antara proses pemanasan atau pendinginan dari suatu material atau paduannya dalam keadaan padat untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu. Untuk mendapatkan hal ini maka kecepatan pendinginan dan batas temperatur sangat menentukan. Struktur mikro yang didapatkan di akhir proses *heat treatment* akan mempengaruhi sifat yang didapatkan. Sedangkan terbentuknya struktur mikro ini selain dipengaruhi oleh komposisi kimia dari material juga dipengaruhi oleh proses *heat treatment* yang diterima dan kondisi awal material tersebut (Saktisahdan 2019).

Perlakuan panas adalah proses pemanasan dan pendinginan material yang terkontrol dengan maksud merubah sifat fisik untuk tujuan tertentu. Pemanasan material sampai suhu tertentu dengan kecepatan tertentu pula. Selanjutnya mempertahankan suhu untuk waktu tertentu sehingga temperaturnya merata. Terakhir adalah pendinginan dengan media pendingin (air, oli, atau udara). Ketiga hal di atas tergantung dari material yang akan diberi perlakuan panas (*heat treatment*) dan sifat-sifat akhir yang diinginkan, Melalui perlakuan panas yang tepat tegangan dalam dapat dihilangkan (Rusjidi dkk, 2016).

Proses perlakuan panas memiliki tujuan utama untuk mengubah dan meningkatkan sifat mekanik suatu material, seperti meningkatkan kekerasan, kekuatan, serta keuletannya, sekaligus memperbaiki kemampuan *machinability* dan menghilangkan tegangan sisa akibat proses pembentukan atau pengerjaan sebelumnya. Lebih dari sekadar proses pendukung dalam manufaktur, perlakuan panas juga berperan penting dalam meningkatkan performa dan daya tahan material, sehingga material mampu memenuhi tuntutan kerja yang lebih tinggi. Melalui pengaturan suhu dan laju pendinginan yang tepat, sifat-sifat material dapat dioptimalkan untuk aplikasi tertentu. Secara umum, perlakuan panas terbagi menjadi beberapa jenis, seperti *annealing*, *normalizing*, *quenching*, *tempering* dan *austempering*, yang

masing-masing memiliki fungsi dan juga karakteristik tersendiri dalam memodifikasi struktur mikro material (Ilham dkk, 2023).

- a. *Annealing* adalah proses perlakuan panas yang bertujuan menurunkan kekerasan material, meningkatkan keuletan, memperbaiki struktur mikro, serta menghilangkan tegangan sisa. Proses ini dilakukan dengan memanaskan material hingga mencapai temperatur tertentu, kemudian didinginkan secara perlahan di dalam tungku. Selain itu, hal penting dalam *annealing* adalah pengaturan parameter proses yang sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia material (Puspasari dkk, 2020).
- b. *Normalizing* merupakan salah satu proses perlakuan panas di mana baja dipanaskan hingga mencapai fase austenit untuk membentuk struktur mikro austenit yang homogen, kemudian didinginkan di udara terbuka hingga mencapai suhu kamar. Proses ini menyebabkan perubahan pada struktur material, sehingga mampu memperbaiki mikrostrukturnya dan menghasilkan peningkatan keuletan serta kekerasan (Wurdhani dkk, 2021).
- c. *Quenching* merupakan salah satu proses perlakuan panas pada material yang melibatkan pendinginan cepat menggunakan media seperti air, oli, larutan garam, atau polimer. Proses pendinginan yang singkat ini umumnya dilakukan untuk meningkatkan tingkat kekerasan pada material yang menjalani perlakuan tersebut (Farhan dkk, 2021).
- d. *Tempering* adalah proses pemanasan ulang pada material yang telah mengalami pengerasan (*quenching*) pada temperatur di bawah suhu kritis untuk memperoleh tingkat keuletan tertentu, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan. Tahapannya meliputi pemanasan kembali material pada kisaran suhu $\pm 450^{\circ}\text{C}$ menggunakan dapur pemanas, lalu didinginkan tanpa media khusus atau cukup dibiarkan hingga mencapai suhu ruangan (Purnomo dkk, 2019).
- e. *Austempering* adalah proses perlakuan panas isothermal, yang melibatkan pemanasan austenisasi diikuti dengan pendinginan segera hingga temperatur dibawah pembentukan struktur perlit dan diatas pembentukan martensit dan ditahan pada suhu tersebut untuk waktu yang cukup.

Austempering dapat meningkatkan sifat mekanik material mulai dari kekerasan, kekuatan impak, ketahanan aus dan keuletan material (Widyansyah dkk, 2023).

2.6 Perlakuan Panas pada Kaca

Salah satu material yang dapat diberikan perlakuan panas adalah kaca. Perlakuan panas pada kaca memiliki peran penting dalam industri karena mampu mengubah sifat fisik maupun mekaniknya. Proses ini dilakukan dengan cara memanaskan kaca hingga mencapai suhu tertentu, kemudian didinginkan dengan kecepatan yang sesuai untuk memperoleh sifat yang diinginkan. Melalui pengaturan suhu dan laju pendinginan, karakteristik kaca seperti kekuatan, ketahanan terhadap tegangan, dan kestabilan dimensi dapat ditingkatkan.

Salah satu teknik perlakuan panas yang umum diterapkan pada kaca adalah proses *annealing*, proses ini berfungsi untuk mencegah timbulnya tegangan-tegangan antar molekul pada kaca yang tidak merata sehingga dapat menimbulkan pecahnya kaca. Selama proses *annealing* pada temperatur konstan dan sebelum kondisi kesetimbangan tercapai, keadaan kaca pada waktu tertentu selalu mendekati kondisi kesetimbangan pada temperatur yang lebih tinggi atau lebih rendah, yang selama proses *annealing* berlangsung terus-menerus mendekati temperatur *annealing* sebenarnya. Temperatur kesetimbangan ini, atau disebut juga *fictive temperature*, yang terus berubah selama kaca mengalami *annealing* (Tool, 1945).

Dalam proses ini, kaca yang sebelumnya telah dipanaskan akan didinginkan secara perlahan dan terkendali agar distribusi suhu di seluruh bagiannya menjadi merata. Pada saat produksi, kaca cair yang dituangkan ke dalam cetakan biasanya mengalami pendinginan cepat, yang dapat menimbulkan tegangan sisa di dalam struktur kaca. Tegangan tersebut, jika tidak dihilangkan, dapat menyebabkan kaca mudah retak atau bahkan pecah secara spontan ketika

mencapai suhu kamar. Oleh karena itu, proses *annealing* dilakukan dengan menurunkan suhu kaca secara bertahap hingga mencapai kondisi stabil pada suhu ruang. Melalui proses ini, kaca menjadi lebih kuat, stabil secara struktural, serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan suhu dan tekanan mekanik, sehingga kualitas dan keamanannya dalam penggunaan meningkat secara signifikan (Mediastika, 2021).

Perlakuan panas untuk melepaskan tegangan sisa pada kaca *tempered* termal dengan tujuan memungkinkan proses pemesinan pada akhir masa pakai, sehingga dapat dilakukan remanufaktur. Suhu memainkan peran penting dalam produksi kaca lembaran (*flat glass*) dan pemrosesan lebih lanjut menjadi berbagai produk. Dalam proses *tempering* termal, kaca *float* yang telah dianil dipanaskan hingga sekitar 100 °C di atas suhu transisi kacanya, mencapai kondisi viskoelastis, lalu didinginkan cepat (*quenched*) dari kedua sisi. Proses ini menghasilkan distribusi tegangan sisa yang secara struktural menguntungkan, namun pada saat yang sama menghambat proses mekanis selanjutnya seperti pemotongan atau pengeboran (Silvestru, 2025).

Pengerasan termal atau *tempering* didasarkan pada perlakuan panas pada kaca. Dalam proses ini, kaca pertama-tama dipanaskan hingga di atas temperatur transisi di dalam tungku. Pada temperatur di atas temperatur transisi, kaca cukup kental sehingga menghasilkan regangan viskos alih-alih regangan elastis. Beberapa deformasi dapat terbentuk akibat terjadinya *creeping* pada kaca. Setelah pemanasan, kaca memasuki bagian pendinginan, di mana kaca didinginkan dengan cepat (*di-quick*) hingga di bawah temperatur transisi menggunakan konveksi paksa oleh semburan udara. Pada awal pendinginan, suhu permukaan turun lebih cepat daripada bagian tengah sehingga permukaan berusaha menyusut lebih banyak dibandingkan bagian tengah. Dalam kasus pendinginan simetris, total regangan seharusnya seragam sepanjang ketebalan kaca dan perbedaan akibat regangan termal disamakan oleh regangan elastis dan viskos, bergantung pada suhu (Aronen, 2012).

Proses perlakuan panas kaca yang bisa diterapkan dalam pembuatan kaca tempered adalah proses *tempering*. *Tempering* merupakan proses pemanasan yang dilakukan pada kaca untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan terhadap tekanan dan benturan. Meninjau hasil penelitian yang dilakukan Pranata (2024), dalam proses perlakuan panas *tempering* yang dilakukan terhadap kaca dengan variasi temperatur 480°C, 565°C, dan 650°C dengan metode pendinginan *quenching* media pendingin oli. Hasil pengujian didapatkan hasil peningkatan kekuatan impak terbesar terjadi pada spesimen yang diberi perlakuan panas *quenching* temperatur 650°C yaitu mengalami peningkatan sebesar 51,36%. Terjadi perubahan kekuatan impak yang sangat signifikan ketika bahan kaca sebelum dan setelah diberikan perlakuan panas *quenching*.

Perlakuan panas pada kaca tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan sifat mekaniknya, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk membentuk kaca sesuai bentuk yang diinginkan. Proses ini dikenal dengan istilah pembentukan panas atau *molding*. Dalam proses tersebut, kaca dipanaskan hingga mencapai suhu tinggi di mana material menjadi cukup lunak dan lentur untuk dibentuk. Setelah mencapai kondisi plastis, kaca kemudian dibentuk menggunakan cetakan atau alat bantu pembentuk sesuai dengan desain yang diharapkan, seperti lengkungan, lekukan, maupun bentuk khusus lainnya.

2.7 Laju Pemanasan (*Heating Rates*)

Laju pemanasan (*heating rates*) merupakan kecepatan kenaikan temperatur selama proses pemanasan atau pembakaran yang berperan penting dalam menentukan sifat akhir dari suatu material. Parameter ini harus dikendalikan dengan cermat karena berpengaruh langsung terhadap struktur mikro dan kekuatan material yang dihasilkan. Dalam proses perlakuan panas kaca, pengaturan laju pemanasan menjadi hal yang sangat penting untuk mencegah terjadinya *thermal shock*, yaitu kondisi ketika kaca mengalami perubahan suhu

yang terlalu cepat sehingga timbul tegangan internal yang menyebabkan retak atau pecah (Habiby dkk, 2022).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sari dkk (2017) semakin tinggi variasi suhu *thermal shock* menyebabkan nilai kekuatan impak mengalami penurunan, maka ketangguhan dan kekerasan yang dimiliki menjadi semakin rendah. Perbedaan laju pemuaiian ini menimbulkan tegangan internal yang tinggi, sehingga struktur kaca tidak mampu menahannya dan akhirnya mengalami retakan atau pecah secara tiba-tiba. Oleh karena itu, proses pemanasan pada perlakuan panas kaca harus dilakukan dengan pengendalian suhu yang tepat dan bertahap untuk menjaga kestabilan termal material. Pengaturan laju pemanasan dan pendinginan yang hati-hati menjadi kunci dalam mencegah terbentuknya tegangan sisa serta menjaga kekuatan dan kualitas kaca secara keseluruhan. Oleh sebab itu, proses pemanasan pada kaca harus dilakukan secara bertahap dan merata agar distribusi suhu di seluruh bagian kaca seimbang, sehingga kualitas, kekuatan, dan kestabilan dimensi kaca dapat terjaga dengan baik.

Laju pemanasan dalam perlakuan panas adalah kecepatan kenaikan suhu suatu material selama proses pemanasan yang disengaja, biasanya dinyatakan dalam satuan derajat Celsius per menit ($^{\circ}\text{C}/\text{menit}$) atau Kelvin per detik (K/s). Parameter ini menjadi salah satu faktor penting dalam perlakuan panas karena memengaruhi distribusi suhu di seluruh material, terbentuknya tegangan internal, serta perubahan sifat mekanik dan mikrostruktur. Laju pemanasan yang terlalu cepat dapat menyebabkan tegangan termal tinggi, retakan, atau bahkan kegagalan material, sedangkan laju pemanasan yang terlalu lambat dapat memerlukan waktu proses lebih lama dan memengaruhi efisiensi energi. Dengan demikian, pengaturan laju pemanasan yang tepat menjadi kunci dalam memastikan material memperoleh sifat mekanik yang diinginkan, seperti kekerasan, kekuatan, dan keuletan, sekaligus mencegah kerusakan akibat kejutan termal selama perlakuan panas (Callister & Rethwisch, 2018).

Kerusakan kaca pada saat dibakar yang dapat menyebabkan tegangan panas *thermal stress* / tegangan panas, terjadi ketika gradien termal menyebabkan bagian-bagian kaca berbeda dari suatu objek, pada satu titik waktu *stress* ini dapat melebihi kekuatan material, yang menyebabkan keretakan terbentuk. Tekanan termal maksimum terletak pada bagian kaca yang diarsir panas dan dingin, kaca sangat rentan terhadap kegagalan dari *thermal shock* dari kekuatannya yang rendah dan konduktivitas termal yang rendah. Jika kaca tiba-tiba terkena panas yang ekstrem atau kejutan maka akan menyebabkan kaca pecah (Julianto dkk, 2019).

Thermal stress merupakan tegangan yang muncul akibat perubahan suhu pada suatu material. Tegangan ini dapat menimbulkan fraktur atau deformasi plastis, bergantung pada variabel lain dalam proses pemanasan, seperti jenis material dan kondisi pembebanannya. Peningkatan panas menyebabkan terjadinya ekspansi termal yang tidak merata, sehingga perbedaan pemuaian pada kaca dapat menimbulkan tekanan di dalam struktur (Chowdhury & Cortie, 2007).

2.8 Perlakuan Panas *Quenching*

Quenching adalah proses perlakuan panas pada material, dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu, kemudian didinginkan secara cepat menggunakan berbagai media pendingin. Pemilihan media pendingin ini sangat menentukan sifat akhir dari material setelah perlakuan panas. Tujuan utama dari proses *quenching* adalah untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan mekanik, dan batas kelelahan (*fatigue limit*) material, sehingga kemampuan material dalam menahan beban, benturan, atau siklus kerja berulang menjadi lebih baik (Mustofa dkk, 2018).

Proses *quenching* merupakan tahap perlakuan panas yang dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling terkait. Faktor utama yang berperan adalah jenis media pendingin serta kondisi proses yang diterapkan. Selain itu, komposisi kimia dan kemampuan pengerasan (*hardenability*) dari material juga menjadi

faktor penting. *Hardenability* sendiri dipengaruhi oleh komposisi kimia dan ukuran butir pada suhu tertentu (Triadi, 2022).

Menurut Syarief & iman (2024) *quenching* adalah proses perpindahan panas secara sangat cepat yang berlangsung dalam tahap pendinginan. Proses *quenching* pada kaca merupakan proses di mana kaca dipanaskan hingga mencapai temperatur tinggi, namun tetap di bawah titik lebur, kemudian didinginkan secara cepat menggunakan media pendingin seperti air atau minyak. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekuatan mekanik kaca, sehingga kaca menjadi lebih tahan terhadap benturan dan perubahan suhu mendadak. Kaca yang telah melalui perlakuan panas *quenching* ini dikenal sebagai kaca *tempered*, yang memiliki sifat lebih kuat dibandingkan kaca biasa dan aman digunakan dalam berbagai aplikasi.

Selain media pendingin umum seperti air, oli, dan air garam, penggunaan larutan polimer kini mulai dimanfaatkan dalam proses perlakuan panas untuk memperbaiki sifat mekanik material. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Zainulabdeen dkk (2018), baja karbon sedang jenis CK45 digunakan sebagai material uji yang dipanaskan hingga suhu 840°C dengan waktu tahan (*holding time*) selama 15 menit sebelum memasuki proses *quenching*. Pengujian ini membandingkan efektivitas media air dengan larutan polimer *Polyvinyl pyrrolidone* (PVP) pada variasi konsentrasi 15%, 20%, dan 25%, serta variasi suhu bak celup 40°C, 50°C, dan 60°C. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa penggunaan media *quenching* PVP 20% pada suhu 40°C menghasilkan kombinasi sifat mekanik paling optimal, mencakup kekerasan, ketangguhan, dan kekuatan tarik.

Dalam proses pendinginan spesimen, berbagai media pendingin umum digunakan untuk mengatur laju dan distribusi pendinginan, antara lain air, oli, udara, dan larutan air garam. Pemilihan media pendingin disesuaikan dengan kemampuan masing-masing dalam mencapai hasil yang diinginkan, baik dari

segi kecepatan pendinginan maupun sifat mekanik akhir spesimen. Berikut adalah beberapa jenis media pendingin dengan metode pendinginan cepat:

2.8.1 Air

Air adalah senyawa yang tersusun atas unsur hidrogen (H) dan oksigen (O) dengan perbandingan dua atom hidrogen dan satu atom oksigen (H_2O). Kedua unsur tersebut memiliki sifat yang saling berlawanan, di mana hidrogen merupakan unsur yang berperan dalam proses pembakaran. Namun, ketika keduanya bergabung membentuk air, sifat yang dihasilkan menjadi berbeda, yaitu tidak mudah terbakar. Selain itu, penggunaan air sebagai media pendingin mampu memberikan efek pendinginan yang cepat. Penampakan oli dapat dilihat pada gambar 2.7 (Wibowo & Samlawi, 2020).



Gambar 2. 7 Air

(www.honestdocs.id)

2.8.2 Minyak atau Oli

Minyak merupakan mineral yang berasal dari sisa-sisa tumbuhan dan hewan laut (*plankton*) yang tertimbun selama jutaan tahun, dan memiliki karakteristik mudah melekat serta menyebar pada permukaan yang mengalami gesekan. Viskositas oli serta bahan dasarnya sangat berpengaruh dalam proses pendinginan suatu spesimen. Oli yang baik

adalah oli dengan nilai viskositas yang sesuai. Perubahan viskositas akibat pengaruh suhu atau temperatur pada oli dikenal dengan istilah indeks viskositas. Penampakan oli dapat dilihat pada gambar 2.8 (Prihatin dkk, 2022).



Gambar 2. 8 Oli

(solusiklik.co.id)

Oli merupakan media pendingin yang memiliki viskositas atau kekentalan paling tinggi dibandingkan dengan media pendingin lain, sekaligus memiliki densitas yang relatif rendah, sehingga laju pendinginan yang dihasilkannya cenderung lambat. Viskositas oli dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk komposisi kimia, temperatur, dan tekanan selama penggunaannya. Untuk mengklasifikasikan dan meninjau angka viskositas, digunakan standar SEA (*Society of Automotive Engineers*), yang memberikan kategori tertentu sehingga memudahkan dalam menentukan kelompok viskositas oli sesuai karakteristiknya (Damayanti dkk, 2018).

2.9 Perlakuan Panas *Austempering*

Perlakuan panas *austempering* merupakan proses transformasi *isothermal* pada logam *ferro* yang dilakukan pada temperatur di bawah pembentukan perlit dan di atas temperatur pembentukan martensit dengan tujuan menghasilkan struktur bainit. Proses ini umumnya dimulai dengan pemanasan hingga

mencapai temperatur austenisasi, kemudian diikuti pendinginan cepat menuju temperatur *austempering*, dan selanjutnya ditahan secara *isothermal* untuk mendorong terjadinya transformasi fasa. Beberapa keunggulan dari proses *austempering* antara lain mampu meningkatkan kekerasan, ketangguhan, dan keuletan, memperbaiki ketahanan terhadap keausan, serta dapat mengurangi terjadinya distorsi pada material (Nursyifaulkhair dkk, 2025).

Penelitian oleh Purnomo dkk (2023), menunjukkan bahwa perbandingan kekuatan impak antara baja pada kondisi anil dan baja pada kondisi *austempering* mengalami peningkatan sebesar 135,34%. Hasil pengujian kekerasan pada spesimen yang diberi perlakuan panas juga menunjukkan perubahan, di mana nilai kekerasan pada spesimen anil sebesar 24,33 HRC dan meningkat menjadi 42,00 HRC pada spesimen *austempering*. Selain itu, terjadi perubahan pada kekuatan dan ketangguhan tarik, di mana tegangan tarik maksimum pada spesimen anil sebesar 584,71 MPa dengan regangan 28,43%. Pada spesimen *austempering*, nilai tersebut meningkat sebesar 61,28% menjadi 943,03 MPa dengan regangan 13,09%. Peningkatan nilai tegangan yang disertai dengan penurunan nilai regangan menunjukkan bahwa spesimen *austempering* memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik.

Austempering merupakan salah satu proses perlakuan panas yang diterapkan dengan tujuan menghasilkan mikrostruktur yang dikenal sebagai bainit. Mikrostruktur merupakan kondisi yang menunjukkan gabungan beberapa fasa yang terdapat dalam baja, yang dapat diamati dan dianalisis menggunakan teknik metalografi. Proses perlakuan *austempering* diperlukan untuk memperoleh struktur bainit yang lebih halus, di mana karbida (Fe_3C) yang terdapat pada matriks ferit berbentuk partikel-partikel halus jika dibandingkan dengan struktur lamelar karbida (Fe_3C) yang terdapat pada perlit (Purga dkk, 2024).

Pada penelitian Suprihanto & Ilmi (2007), untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis besi cor kelabu dilakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*).

Austempering merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan untuk membentuk struktur bainit pada besi cor kelabu, sehingga diperoleh sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan struktur perlit. Proses ini dilakukan dengan menahan spesimen pada temperatur austenit sekitar 850°C–950°C selama beberapa waktu, kemudian spesimen dicelupkan ke dalam media pendingin dengan temperatur tertentu, yaitu sekitar 300°C–450°C, dan selanjutnya didinginkan di udara terbuka.

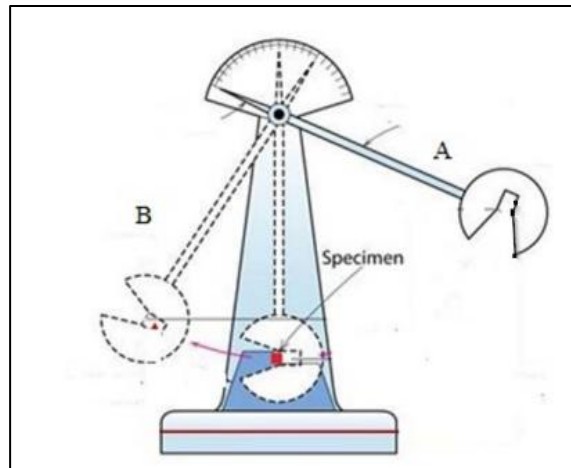
Proses *austempering* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenit menggunakan pemanas induksi selama 10 menit. Setelah itu, spesimen segera dimasukkan ke dalam larutan yang telah disiapkan, yaitu larutan garam dengan komposisi 50% NaNO₃ dan 50% KNO₃. Selanjutnya, baja ditahan pada temperatur 362°C selama 60 menit. Temperatur awal pembentukan bainit ditentukan menggunakan perangkat lunak Bhadeshia dengan memasukkan komposisi kimia baja AISI 4140. Setelah waktu penahanan selesai, baja AISI 4140 kemudian didinginkan hingga mencapai temperatur ruang dengan media udara terbuka (Sugiyanto dkk, 2023).

2.10 Pengujian Impak

Uji impak adalah metode pengujian yang bertujuan menilai ketangguhan dan ketahanan suatu spesimen ketika menerima beban secara tiba-tiba melalui tumbukan. Ketangguhan sendiri merupakan kemampuan material untuk menyerap energi sebelum mengalami patah. Dalam pengujian ini, spesimen menyerap energi yang cukup besar saat menerima tumbukan. Prinsip pengujian didasarkan pada energi potensial pendulum yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu untuk memukul benda uji hingga mengalami deformasi (Surbakti dkk, 2023).

Menurut Gunawan, (2024) Ketangguhan atau *toughness* adalah kemampuan suatu material untuk menahan beban impak atau beban kejut yang tinggi. Uji impak digunakan untuk mengetahui karakteristik material terkait potensi

kerusakan yang tidak dapat diamati melalui uji tarik. Kekuatan impak merupakan salah satu parameter penting dalam bidang metalurgi. Pengujian ini bertujuan menentukan sifat patah suatu material, termasuk tingkat keuletan maupun kerapuhannya. Ilustrasi pengujian impak ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Ilustrasi Pengujian Impak
(Nugraha dkk, 2020)

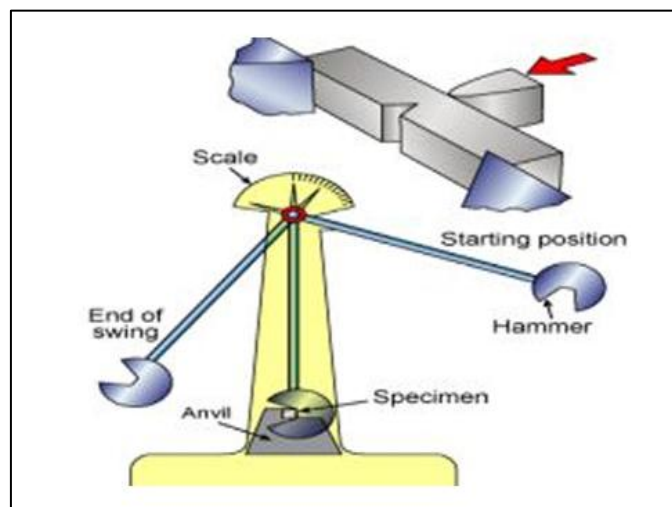
Secara umum, pengujian impak menggunakan spesimen berbentuk batang yang memiliki takik. Berbagai jenis uji impak dengan batang bertakik digunakan untuk mengetahui kecenderungan suatu material menjadi getas. Melalui metode ini, perbedaan sifat bahan yang tidak tampak pada pengujian tarik dapat diidentifikasi. Namun, dalam beberapa kasus, laju pembebanan tidak dapat dikontrol secara tepat, sehingga diperlukan kehati-hatian ketika membandingkan hasil antar pengujian (Wardani dkk, 2017).

Secara umum, terdapat dua jenis metode dalam pengujian impak yaitu pengujian impak metode *charpy* dan pengujian impak metode *izod* sebagai berikut :

2.10.1 Metode *Charpy*

Metode pengujian ini dilakukan dengan menempatkan spesimen pada tumpuan dalam posisi horizontal, sementara beban diberikan dari arah

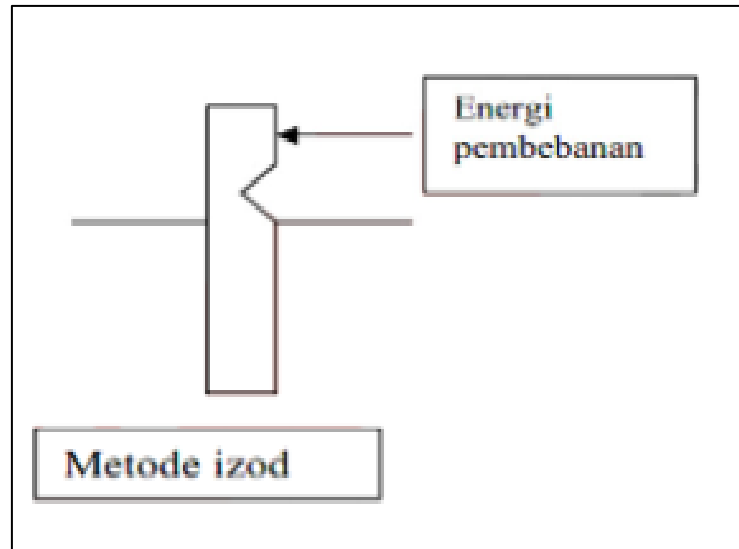
yang berlawanan dengan posisi takik. Spesimen uji *Charpy* memiliki penampang berbentuk bujur sangkar berukuran 10 x 10 mm dan dilengkapi takik V-45°, dengan jari-jari dasar 0,25 mm serta kedalaman 2 mm. Dalam pengujian, benda uji diletakkan secara mendatar di atas tumpuan, kemudian bagian yang tidak bertakik menerima beban impak dari ayunan bandul. Secara skematik uji impak *charpy* ditunjukkan pada gambar 2.10 (Munanda dkk, 2022).



Gambar 2. 10 Skematik Uji Impak *Charpy*
(Munanda dkk, 2022)

2.10.2 Metode *Izod*

Batang uji pada metode *Izod* kini lebih banyak digunakan karena memiliki bentuk penampang yang berbeda serta takik berbentuk huruf V yang terletak lebih dekat pada salah satu ujung spesimen. Dalam pengujian *Izod*, spesimen ditempatkan pada tumpuan dengan posisi dan arah pembebanan yang sejajar dengan arah takikan. Perbedaan utama metode *Izod* dibandingkan metode *Charpy* terletak pada cara maupun posisi pembebanannya. Skematik uji impak *charpy* seperti pada gambar 2.11 (Handoyo, 2013).



Gambar 2. 11 Skematik Uji Impak *Izod*

(Handoyo, 2013)

2.11 Perhitungan Kekuatan Impak

Pengujian impak bertujuan untuk mengetahui kemampuan spesimen dalam menyerap energi yang diberikan. Metode ini merupakan salah satu cara untuk mengukur tingkat kerapuhan suatu material. Selain itu, pengujian impak dilakukan guna mengetahui kekuatan bahan ketika menerima beban secara tiba-tiba atau beban kejut. Perhitungan kekuatan impak dilakukan dengan tujuan untuk menentukan besarnya energi impak serta nilai impaknya (Lubis dkk, 2022).

Menurut Dieter & Schmidt (2009) Uji impak digunakan untuk mengetahui kecenderungan suatu material bersifat rapuh atau ulet berdasarkan tingkat ketangguhannya. Namun, hasil uji impak tidak dapat menggambarkan secara langsung kondisi perpatahan pada spesimen, karena pengujian ini tidak mampu mengukur komponen tegangan tiga dimensi yang terjadi pada batang uji. Selain itu, hasil pengujian impak juga tidak memiliki kesepakatan umum mengenai cara interpretasi maupun pemanfaatannya.

Sebelum memperoleh nilai dampak tersebut, penting untuk terlebih dahulu memahami energi potensial dan energi kinetik yang ada terdapat pada alat uji dampak. Energi potensial menggambarkan energi yang dimiliki suatu benda akibat ketinggian atau posisinya terhadap titik acuan, sedangkan energi kinetik menunjukkan energi yang dimiliki benda akibat pergerakannya. Dengan mengetahui kedua jenis energi ini, maka perhitungan kekuatan dampak dapat dilakukan secara lebih akurat dan menggambarkan karakteristik energi yang terserap oleh material saat mengalami benturan. Berikut adalah perhitungan kekuatan dampak adalah sebagai berikut:

2.11.1 Perhitungan energi potensial

Pada pengujian dampak, energi potensial berperan penting karena merupakan energi awal yang dimiliki palu pendulum sebelum mengenai spesimen. Energi ini timbul akibat posisi palu yang berada pada ketinggian tertentu terhadap titik acuan. Saat palu dilepaskan, energi potensial berubah menjadi energi kinetik, dan sebagian energi tersebut kemudian diserap oleh spesimen pada saat terjadi tumbukan. Energi potensial yang dihasilkan oleh alat uji dampak *type charpy* sesuai dengan perhitungan sebagai berikut 2.1 (Derianto dkk, 2024).

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

Keterangan: E_p = Energi potensial (J)
 m = Massa benda (kg)
 h = Ketinggian benda (m)
 g = Gravitasi (m/s^2)

2.11.2 Perhitungan energi kinetik

Dalam uji dampak (seperti metode *Charpy* atau *Izod*), energi kinetik merupakan energi gerak yang dimiliki palu pendulum tepat sebelum mengenai spesimen. Energi ini berasal dari perubahan energi potensial saat palu dilepaskan dari ketinggian tertentu. Semakin tinggi posisi awal palu, semakin besar energi potensial yang kemudian berubah menjadi energi kinetik ketika palu berayun ke bawah. Energi kinetik

(E_k), yaitu energi yang dapat dimiliki benda. Besarannya dapat ditentukan dengan rumus 2.2 (Dailami dkk, 2020).

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.2)$$

Keterangan: E_k = Energi kinetik (J)
 m = Massa benda (kg)
 v = Kecepatan atau laju benda (m/s)

2.11.3 Harga impak (HI)

Pada pengujian impak metode *Charpy*, harga impak adalah besarnya energi yang diserap oleh spesimen saat mengalami patahan akibat tumbukan dari palu pendulum. Nilai ini menunjukkan ketangguhan material terhadap beban kejut atau benturan mendadak. Semakin besar harga impak, semakin tangguh material tersebut. Kemampuan suatu benda dalam menyerap Gaya Impak diketahui dengan melakukan pengujian impak. Untuk mengetahui harga impak digunakan rumus 2.3 (Susanto, 2016).

$$HI = \frac{E}{A} \quad (2.3)$$

Keterangan: E = Energi yang diserap (J)
 A = Luas penampang dibawah takikan (mm²)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2025 sampai dengan bulan Februari 2026 di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung dan Laboratorium Energi Baru & Terbarukan Teknik Kimia Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Bahan Penelitian

Kaca adalah sebuah material yang termasuk dalam kelompok dari bahan anorganik, yang pada pembuatannya melalui sebuah proses peleburan dari beberapa bahan dasar, kemudian pada hasil peleburan tersebut selanjutnya akan mengalami sebuah pemadatan melalui proses pendinginan. Kaca umumnya tersusun dari berbagai macam campuran yang terdiri atas sekitar 72% silikon dioksida (SiO_2), serta ditambah dengan Na_2O , CaO , dan beberapa bahan tambahan lainnya. Kaca bening yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Bahan Penelitian (Kaca Bening)

3.2.2 Gerinda Potong

Gerinda potong merupakan alat yang digunakan untuk memotong spesiemen agar dimensinya sesuai dengan ketentuan pengujian. Gerinda potong yang digunakan untuk penelitian ini dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Gerinda Potong

3.2.3 Tungku (*Furnace*)

Furnace digunakan dalam proses perlakuan panas *quenching*, dimana spesiemen akan dipanaskan dengan variasi temperatur yang telah

ditentukan. *Furnace* ini terdapat di Laboraturium Energi Baru & Terbarukan Teknik Kimia Universitas. Tungku pemanas (*Furnace*) yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Tungku (*Furnace*)

Tabel 3. 1 Spesifikasi *Furnace*

Model	FNC-16 2000
Capacity	16 L
Temp. Range	300-1200 °C
Timer	0-9999 min
Heating Up Time	30 minutes
Voltage	220 V/50 Hz
Hertz	50 Hz
Amps	220 Volts
Power	6000 Watt
Dimensions	Working size: 250 x 400 x 160 mm
	Exterior size: 530 x 600 x 530 mm
	Packing size: 580 x 650 x 630 mm

3.2.4 Penjepit Spesimen

Penjepit spesimen adalah alat yang berfungsi untuk mengambil dan memindahkan spesimen dari *furnace* guna menghindari paparan panas

secara langsung. Penjepit spesimen yang akan digunakan dalam penelitian ini dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Penjepit Spesimen

3.2.5 Sarung Tangan

Sarung tangan merupakan alat yang digunakan pada tangan untuk mengurangi paparan panas dari tungku pemanas ketika akan mengeluarkan spesimen dari *furnace*. Sarung tangan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Sarung Tangan

3.2.6 Media Pendingin Oli

Oli merupakan media pendinginan *quenching* yang akan digunakan setelah kaca dilakukan *heat treatment*, oli yang digunakan yaitu merek Pertamina Mesran Super dengan SAE 20W-50W dengan nilai viskositas pada temp ruangan (40°C) sebesar 155,6 cSt. Media pendingin oli yang dipakai pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Media Pendingin Oli

3.2.7 Alat Uji Impak

Impact Testing Machine adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengujian beban kejut yang diberikan pada spesimen kaca. Pengujian impact ini menggunakan metode *charpy*, dapat membuat takikan tepat di tengah spesimen. Alat uji impact yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Alat Uji Impak

Tabel 3. 2 Spesifikasi Alat Uji Impak

Model	RMU <i>Testing Equipment</i>
Pendulum Energy	300 J <i>Charpy</i> – Div. 1 J 150 J <i>Charpy</i> – Div. 0,5 J 165 J <i>Izod</i> – Div. 2,5 J
Rising angel	160o
<i>Distance between centers of pendulum spesimen</i>	380 mm
Pendulum momen	0.5 J PL=0.258 Nm 1 J P =0.516 Nm 2 J P =1.031 Nm 4 J P =2.062 Nm 5 J P =2.578 Nm
<i>Dial scale</i>	0 – 0.5 J minimum <i>scale</i> = 0.005 J 0 – 1 J minimum <i>scale</i> = 0.01 J 0 – 2 J minimum <i>scale</i> = 0.02 J 0 – 4 J minimum <i>scale</i> = 0.04 J 0 – 5 J minimum <i>scale</i> = 0.05 J
<i>Corner dimension ofstriking edge</i>	30 <i>degree</i>
<i>Round angel radius ofstriking edge</i>	R = 2mm
<i>specimen</i>	<i>Conform to ISO180</i>

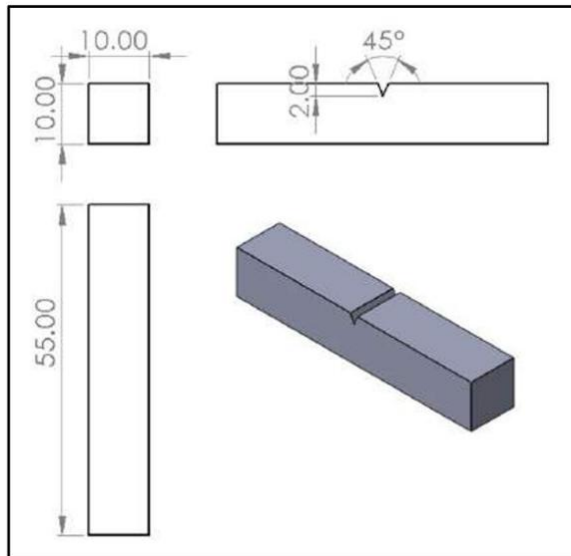
3.3 Metode Penelitian

Adapun metode penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu tahap awal berupa persiapan spesimen atau benda uji, dilanjutkan dengan tahap perlakuan panas, kemudian tahap pengujian impak, dan diakhiri dengan tahap pengambilan data.

3.3.1 Persiapan Spesimen

Penyesuaian bentuk dilakukan dari lembaran menjadi bentuk yang telah ditetapkan, diameter yang mengikuti standar ASTM E-23, yaitu dengan panjang 55 mm, lebar 10 mm, tinggi 10 mm, serta memiliki takikan sedalam 2 mm dengan sudut 45°. Proses penyesuaian bentuk ini dapat

dilakukan menggunakan gerinda potong. Adapun bentuk spesimen untuk pengujian impak ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Spesimen Uji Impak Sesuai Standar ASTM E-23

3.3.2 Perlakuan Panas

Adapun tahap perlakuan panas yang dilakukan pada kaca adalah sebagai berikut:

- Memasukkan kaca yang sudah sesuai dengan dimensinya kedalam *furnace* dengan menggunakan penjepit dan sarung tangan.
- Memanaskan *furnace* dengan laju pemanasan $10,33^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ hingga mencapai temperatur 650°C .
- Melakukan penahanan (*holding*) ketika telah mencapai temperatur yang diinginkan selama 10 menit.
- Menurunkan temperatur pemanasan hingga mencapai temperatur 250°C dan melakukan penahanan (*holding*) ketika telah mencapai temperatur yang diinginkan selama 10 menit.
- Mengeluarkan spesimen dari *furnace* dan langsung mencelupkan spesimen ke dalam oli selama 10 menit dengan menggunakan penjepit dan sarung tangan.
- Mengulangi langkah a, b, c, d dan e dengan menggunakan variasi laju pemanasan $5,16^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dan $3,44^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.

- g. Mengeringkan dan membersihkan spesimen setelah spesimen bertemperatur ruangan.

3.3.3 Pengujian Impak

Pengujian impak pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *charpy* dan alat uji yang digunakan yaitu *universal impact tester*. Adapun tahap pengujian impak adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan kalibrasi pada alat pengujian impak untuk meminimalisir kesalahan perhitungan.
- b. Meletakkan spesimen pada meja uji berukuran standar $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ dengan *notch* (lekukan) tipe V pada bagian tengah spesimen.
- c. Mengangkat pendulum pada meja uji impak.
- d. Melakukan pengereman setelah pendulum mencapai ketinggian maksimum.
- e. Menentukan jenis perpatahan yang terjadi.
- f. Melakukan analisis pada perpatahan.
- g. Menghitung energi impak yang terjadi.
- h. Lakukan semua langkah diatas pada semua spesimen yang akan dilakukan pengujian impak

3.4 Variabel Penelitian

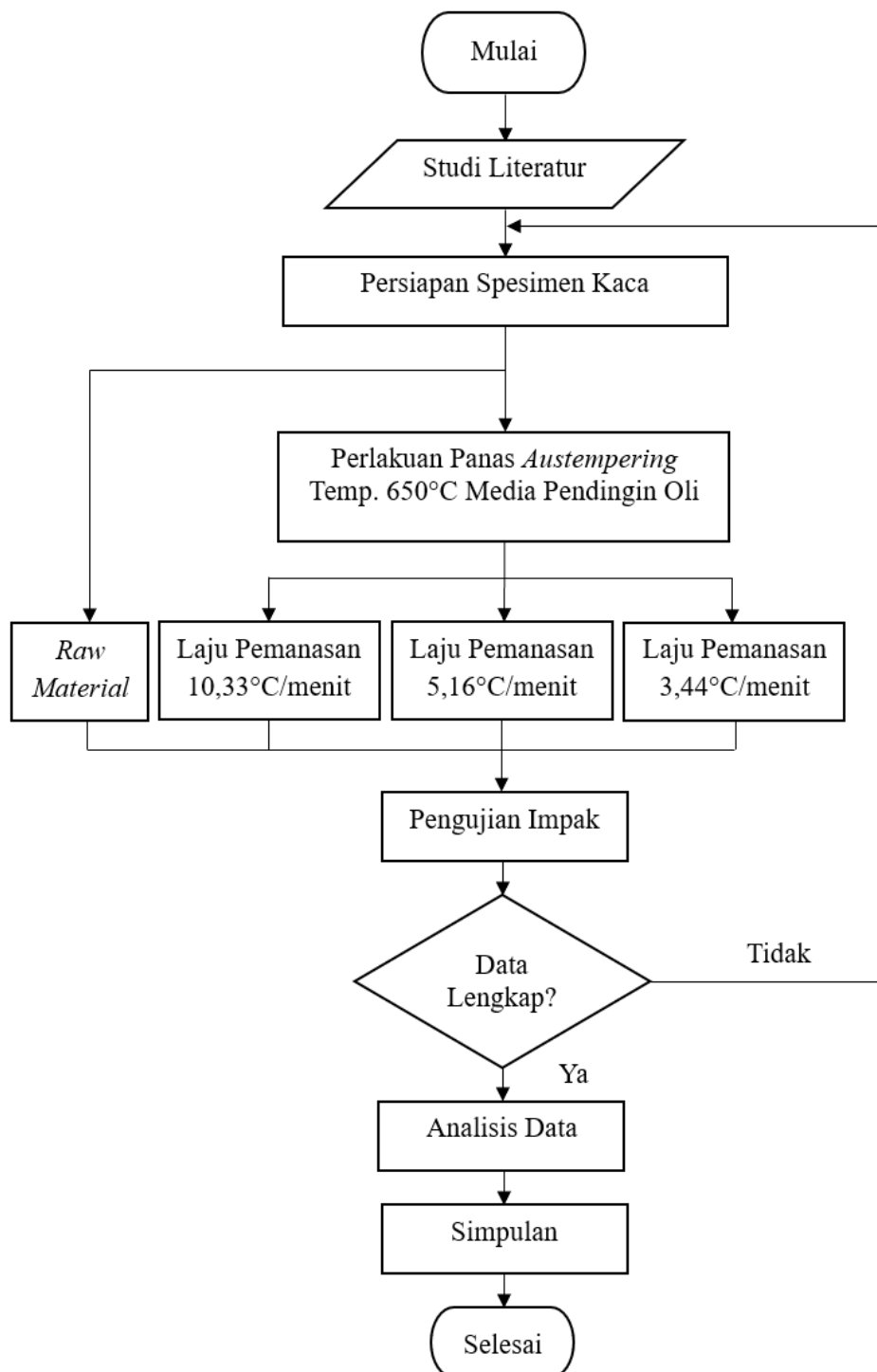
Adapun proses pengambilan data pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu pertama pengambilan data tanpa diberi perlakuan panas, kedua pengambilan data diberikan perlakuan panas *austempering* dengan variasi laju pemanasan $10,33^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, $5,16^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, dan $3,44^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ pada temperatur 650°C lalu diturunkan menjadi 250°C media pendingin oli. Tabel data untuk pengambilan data tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Pengambilan Data Pengujian Impak

Perlakuan	Temp	Medium Pendingin	Spesimen	Energi Impak (Joule)	Rata-rata Energi Impak (Joule)	Harga Impak (J/mm ²)	Rata-rata Harga Impak (J/mm ²)
Raw Material	-	-	1				
			2				
			3				
Laju Pemanasan 10,33°C/menit	650°C	Oli	1				
			2				
			3				
Laju Pemanasan 5,16°C/menit			1				
			2				
			3				
Laju Pemanasan 3,44°C/menit			1				
			2				
			3				

3.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 9 Diagram Alir

V. PENUTUP

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang diperoleh setelah dilakukannya penelitian mengenai pengaruh variasi laju pemanasan pada proses *austempering* dalam pembuatan kaca *tempered* terhadap ketangguhan material kaca adalah sebagai berikut:

1. Laju pemanasan pada proses perlakuan panas berpengaruh terhadap sifat mekanik material kaca. Semakin rendah laju pemanasan yang diterapkan, semakin baik peningkatan sifat mekanik yang dihasilkan, karena distribusi temperatur menjadi lebih merata dan pembentukan tegangan sisa dapat diminimalkan.
2. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas menunjukkan adanya perubahan pada kekuatan impak. Pada kaca bening yang belum diberikan perlakuan panas memiliki nilai rata-rata harga impak sebesar 0,018 J/mm². Sementara itu, spesimen yang telah melalui proses *austempering* dengan variasi laju pemanasan 10,33°C/menit, 5,16°C/menit, dan 3,44°C/menit, masing-masing menghasilkan nilai rata-rata harga impak sebesar 0,0153 J/mm², 0,0158 J/mm², dan 0,0226 J/mm².
3. Peningkatan kekuatan impak tertinggi terjadi pada spesimen dengan laju pemanasan 3,44°C/menit, yaitu sebesar 25,55% dari *raw material*. Pada laju pemanasan 10,33°C/menit dan 5,16°C/menit memiliki harga impak yang lebih kecil dibandingkan dengan raw material, sedangkan untuk laju pemanasana 3,44°C/menit memiliki harga impak lebih besar dari *raw material*.
4. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas *austempering* laju pemanasana 3,44°C/menit dengan media pendingin air dan air es

menunjukkan terjadinya retak seribu yang mengakibatkan kaca menjadi sangat rapuh dan mudah hancur.

5. Kaca yang telah mengalami perlakuan panas *quenching* laju pemanasan $10,33^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dengan pendingin oli dan resin polyester tak jenuh mendapatkan nilai rata-rata harga impact sebesar $0,0081 \text{ J}/\text{mm}^2$ dan $0,0163 \text{ J}/\text{mm}^2$. Dimana kedua media pendingin tersebut menghasilkan perubahan harga impact masih dibawah harga impact *raw material*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan penulis untuk menunjang penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Waktu penahan (*holding time*) diusahakan lebih lama agar struktur dan temperatur pada kaca menjadi seragam sebelum pendinginan.
2. Pada penelitian selanjutnya, disarankan untuk kembali menentukan laju pemanasan yang paling sesuai serta melakukan kajian lebih lanjut terkait penggunaan laju pemanasan pada kaca yang lebih lambat.
3. Pada penelitian selanjutnya, disarankan untuk dikembangkan dan dikaji kembali pemilihan temperatur *austempering* yang lebih tepat dalam proses perlakuan panas pada kaca, sehingga didapatkan peningkatan ketangguhan kaca yang sesuai.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M. A. (2023). Time Dependents Properties Viscoelasticity Models. *Biomaterials Journal*, 2(3).
- Akmal, I. (2009). *Seri Rumah Ide: Kaca dan Fiber Glass*. Edisi Pertama, Jakarta: Gramedia.
- Aronen, A. (2012). *Modelling of Deformations and Stresses in Glass Tempering*. Tampere University of Technology.
- Arafah, S. Z., & Prianto, E. (2018). Kajian Pilihan & Penerapan Kaca Pada Gedung Suara Merdekasamarang Dalam Mewujudkan Green Building. *Prosiding SNST ke-9*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th Edition. John Wiley & Sons.
- Chowdhury, H., & Cortie, M. B. (2007). Thermal stresses and cracking in absorptive solar glazing. *Construction and Building Material*, 21(2), 464–468.
- Damayanti, Y., Lesmono, A. D., & Prihandono, T. (2018). Kajian Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Goreng Sebagai Rancangan Bahan Ajar Petunjuk Praktikum Fisika. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, 7(3), 307-314.
- Daseno, A. W., Komari, A., & Santoso, H. B. (2021). Perencanaan Pengelolaan Limbah Kaca Grafir Menjadi Produk Inovasi Baru Guna Menambah Pendapatan Perusahaan (Studi Kasus Pada UD. Pelangi Art Glass). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Industri Universitas Kadiri*, 3(1).
- Dailami., Hamdani., & Bahri, S. (2020). Desain Alat Uji Impak Jatuh Bebas Untuk Pengujian Baja Struktur. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 1(2), 28-36
- Derianto, R., Taufiqurrahman, M., & Ivanto, M. (2024). Rancang Bangun Alat Uji Impact 100 Joule Type Charpy Skala Laboratorium. *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, 5(2).
- Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2009). *Engineering design*. Boston: McGraw-Hill Higher Education.

- Firmansyah, R., Fadli, A., dan Bahruddin. (2014). Pengaruh Kecepatan Pengadukan dan Laju Pemanasan Sintering Pada Pembuatan Trikalsium Fosfat Berpori Dengan Menggunakan Metode Starch-Consolidation. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Riau*. 1(1), 1-6.
- Farhan., Bukhari., Hamdani., Yusuf, I., & Zuhaimi. (2021). Pengaruh Temperatur Pemanasan (Austenisasi) Perlakuan Panas Quenching Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja St 60. *JURNAL MESIN SAINS TERAPAN*, 5(1).
- Gunawan, S. (2024). Pengaruh Perlakuan Panas Quenching terhadap Ketangguhan Impak pada Paduan Aluminium AC7A. *Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)*, 4(2), 483-490.
- Hartanti, G., & Setiawan, B. (2014). Aplikasi Kaca Pada Perancangan Desain Interior dan Arsitektur. *HUMANIORA*, 5(2).
- Handoyo, Y. (2013). Perancangan Alat Uji Impak Metode Charpy Kapasitas 100 Joule. *Jurnal Imiah Teknik Mesin*, 1(2).
- Habiby, M. N. A., Rusiyanto., Widodo, R. D., & Sumbodo, W. (2022). Pengaruh Laju Pemanasan Green Body Terhadap Sifat Mekanis dan Fisis Material Crucible Berbahan Limbah Evaporation Boats. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 7(1).
- Hotsan, P. S., Da Silva, P., Paristiawan, P. A., & Andriyanto, A. (2022). Analisis Pecahan Kaca Temper Bz 321rcb Dengan Variasi Temperatur. *Ismetek*, 14(2).
- Hussain, S., & Moiz, S. (2022). An Overview of Tempered Glass Load Bearing Capability and Mechanical Behavior. *ENG Transactions*, 3(1-9).
- Ismail, M., Fuazen., & Julianto, E. (2024). Experiment Media Pendingin Pada Perlakuan Panas Kaca Soda Lime Glass Terhadap Kekerasan. *Suara Teknik - Journal*, 15(1), 36-40.
- Ilham, A., Adzima, M. F. F., Heryanto, O. D., Ferdinand, F. A., Azmy, I. (2023). Pengaruh Variasi Proses Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Baja Aisi 1018. *Sigma Teknika*, 6(1).
- Julianto, E., Sarwono, E., & Mursalin. (2019). Perubahan Temperatur Lembaran Kaca Terhadap Perpindahan Kalor Tunak/ Steady State. *Simposium Nasional RAPI XVIII*.
- Lestari, L., & Alhamdani, M. R. (2014). Penerapan Material Kaca Dalam Arsitektur. *LANGKAU BETANG: JURNAL ARSITEKTUR*, 1(2), 30
- 42.Mandala, A. B. (2017). Ice Skating Center di Makassar dengan

Pendekatan Arsitektur Modern-Transparan. Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.

- Lubis, P. C., Budiarto, U., & Jokosisworo, S. (2022). Analisa Pengaruh Variasi Waktu Post Weld Heat Treatment Pada Pengelasan SMAW Baja A36 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji Impak dan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 10(3).
- Markhiyano, R., Murti, H. T. B., & Tontowi, A. E. (2019). Pemanfaatan Cerium Oxide Dan Analisis Ekonomi Usaha Pada Polishing Kaca Mobil Tempered dan Laminated Universitas Gadjah Mada.
- Mingxuan, L. I., Guojian, L. U., Zhongri, H. U., Xiujuan, M. E. I., Le, L. I., & Liping, W. A. N. G. (2014). Research on fire endurance of tempered glass based on infrared imaging technology. *Procedia Engineering*, 84, 553-557.
- Mustofa, A., Jokosisworo, S., & Budi, A. W. (2018). Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Lentur Putar dan Kekuatan Puntir Baja ST 41 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Quenching. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1).
- Munanda, A., Ibrahim, A., & Ismy, A. S. (2022). Efek Suhu Annealing Terhadap Kekerasan Dan Ketangguhan Impak Pada Kuningan C38500. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 6(1).
- Nielsen, J. H., & Bjarrum, M. (2017). Deformations And Strain Energy In Fragments Of Tempered Glass: Experimental And Numerical Investigation. *Glass Structures & Engineering*, 2(2), 133-146.
- Nuhgraha, Y., Rosa, M. K. A., & Agustian, I. (2020). Perancangan Alat Uji Impak Digital dengan Metode Charpy Untuk Mengukur Kekuatan Material Polimer. *Jurnal Amplifier*, 10(2).
- Nursyifaulkhair, D., Herningtyas, A. S., Rachmawati, A. D., & Zulfika, D. N. (2025). Optimasi Perlakuan Panas Austempering Untuk Meningkatkan Performa Baja Aisi 4340. *Jurnal CRANKSHAFT*, 8(4).
- Ogunleye, R. O., & Rusnakova, S. (2021). A review of prestressed fibre-reinforced polymer matrix composites. *Polymers*, 14(1), 60.
- Purga, A. K., Badaruddin, M., & Sugiyanto. (2024). Analisis Perambatan Fatik Baja Pegas JIS SUP9 Yang Diberi Perlakuan Panas Austempering. *Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, 5(2).
- Purnomo, H., & Hisyam, E. S. (2014). Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen Pada Campuran Beton Ditinjau Dari Kekuatan Tekan Dan Kekuatan Tarik Belah Beton. In *Forum Profesional Teknik Sipil* (Vol. 2, No. 1, P. 55681). Bangka Belitung University.

- Purnomo, D. J., Jokosisworo, S., & Budiarto, U. (2019). Analisa Pengaruh Holding Time Tempering Terhadap Kekerasan, Keuletan, Ketangguhan Dan Struktur Mikro Pada Baja ST 70. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 07(1).
- Purnomo., Badaruddin, M., Sugiyanto., Zulhanif., & Nafrizal. (2023). Pengaruh Proses Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja AISI 4140. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro, TURBO*, 12(02)
- Puspasari, V., Prasetyo, M. A., Hala, J. V. T., Anwar, M. S., Herbirowo, S., & Mabruri, E. (2020). Pengaruh Annealing Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Baja Tahan Karat Aisi 410-3mo-3ni. *Metalurgi*, 2(75 – 82).
- Pranata, K. A. (2024). Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Dalam Proses Quenching Pada Pembuatan Kaca Tempered Dari Kaca Bening Terhadap Ketangguhan Bahan Kaca. Skripsi Sarjana, Universitas Lampung.
- Prihatin, J. Y., Ardiyanto, F., & Pambudi, S. (2022). Kajian Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Viskositas Oli Kendaraan SAE 20w-50 5w-40 15w-40. *Jurnal Teknik*, 7(3).
- Rusjidi, H., Pramono, A. W., & Faathir, W. B. (2016). Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja AISI 4340. *Jurnal Power Plnt*, 4(2).
- Saktisahdan, J. T. (2019). Pengaruh Proses Heat Treatment Terhadap Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah. *Jurnal Laminar*, 1(1).
- Sari, D. R., Rusiyanto., Rahmat, D.W., & Pramono. (2017). Pengaruh Thermal Shock Resistance terhadap Makro Struktur dan Ketahanan Impact Kowi Pelebur (Crusible) Berbahan Komposit Abu Sekam Padi/Grafit/Kaolin. *Jurnal Kompetensi Teknik*9(1): 53-59.
- Setiadi, B., & Toruan, L. M. D. L. (2022). Analisa Sifat Mekanis Velg Aluminium Sepeda Motor Menggunakan Metode Heat Treatment Dengan Variasi Waktu Kelipatan 3 Jam Pada Suhu Aging 150°C. *Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, 32(4).
- Sepriyanna, I., & Khairani, F. (2016). Penggunaan Limbah Keramik Dan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Rawa. *Jurnal Forum Mekanika*, 5(2).
- Septian, D., Sidabutar, Y., Subkhan., & Yuristiary, Y. (2025). Bahan Bangunan Ramah Lingkungan (Penerapan Material Kaca Dalam Arsitektur). *Jurnal Ilmiah*, 15(2).
- Silvestru, V. A. (2025). Experimental Study On Using Thermal Treatment For Stress Relief In Thermally Tempered Glass. Department of Civil,

Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

- Stachurski, Z. H. (2011). On Structure and Properties of Amorphous Materials. *Journal Materials*, 4, 1564-1598.
- Sugiyanto., Badaruddin, M., & Sugiyanto. (2023). Perilaku Fatik Baja Kekuatan Tinggi AISI 4140 Pada Kondisi Austempering. *Artikel Teknik Mesin & Manufaktur, ARMATUR*, 04(02).
- Surbakti, G. E., Maukar, D. D., & Manongko, J. D. I. (2023). Pengaruh Penambahan Unsur Magnesium Pada Paduan (AL-SI) Terhadap Kekerasan Dan Kekuatan Impact. *Actuator Jurnal Teknik Mesin*, 4(2).
- Suprihanto, A., & Ilmi, M. (2007). Pengaruh Temperatur Quenching Pada Proses Austempering Terhadap Kekuatan Lelah Austempering Grey Iron. *ROTASI*, 9(2).
- Susanto, A. (2007). Efek Proses Tempering Terhadap Kekuatan Bending Kaca. *University of Muhammadiyah Malang*.
- Susanto, E. (2016). *Momentum , Impuls dan Tumbukan*. 1. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Shelby, J. E. (2005). *Introduction to Glass Science and Technology* 2nd edition. USA: The Royal Society Of Chemistry. pp.202-221.
- Sylvia, N., & Mahmudah, N. L. (2018). Tinjauan Proses Dan Teknik Flameworking Pada Limbah Kaca. *NARADA, Jurnal Desain & Seni*, 5(2).
- Syarief, A., & Iman, N. (2024). Pengaruh Variasi Pendinginan dan Holding Time terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro pada Perlakuan Panas Baja ASSAB 88. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, 13(2).
- Triadi, D. R. (2022). Analisis pengaruh Media Pendingin Pada Perlakuan Panasterhadap Kekerasan Baja Aisi 1045. *PISTON*, 6(2).
- Tokunaga, H., Kaizu, K., Ikeda, K., & Kobori, O. (2007). Impact Fracture Analysis of Thermally Tempered Glass by the Extended Distinct Element Method. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1(8).
- Tool, A. Q. (1945). Relaxation of Stresses in Annealing Glass. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 34.
- Vu, A. T., Vu, A. N., Grunwald, T., & Bergs, T. (2019). Modeling Of Thermo-Viscoelastic Material Behavior Of Glass Over A Wide Temperature Range In Glass Compression Molding. *Journal Ceramic Society*, 10.1111/jace.16963.

- Wurdhani, R., Budiarto, U., & Amiruddin, W. (2021). Pengaruh Perlakuan Panas (Heat Treatment) Normalizing Terhadap Kekuatan Impak Aluminium 6061 Pengelasan MIG dengan Variasi Posisi dan Bentuk Kampuh. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 9(1).
- Wardani, C. U., Samantha, Y., & Budiman, H. (2017). Analisis Pengujian Impak Metoda Izod Dan Charpy Menggunakan Benda Uji Aluminium Dan *Baja ST37*. *Proceeding STIMA*.
- Widyansyah, F., Maburri, E., & Alfirano. (2023). Pengaruh Temperatur Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Besi Cor Kelabu Dengan Nikel 10% Untuk Komponen Boiler PLTU. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(3).
- Wibowo, A. T., & Samlawi, A. K. (2020). Pengaruh Proses Quenching Dengan Media Pendingin Air Dan Oli Terhadap Kekerasan Baja Dan Struktur Mikro Baja S45C. *ROTARY*, 2(2).
- Zainulabdeen, A. A., Mahmood, N. Y., & Mohmmmed, J. H. (2018). The Effect Of Polymeric Quenching Media On Mechanical Properties Of Medium Carbon Steel. *International Conference on Materials Engineering and Science*, 454.
- Zhang, X., & Hao, H. (2015). Fragmentation Characteristics Of Tempered Glass Windows Under Air Blast Wave. In *the 3rd International Conference Of Protective Structures (ICPS3)*. Newcastle, Australia.
- Zhou, T., Yan, J., & Kuriyagawa, T. (2008). Evaluating the Viscoelastic Properties of Glass above Transition Temperature for Numerical Modeling of Lens Molding Process. *The International Society for Optical Engineering*, 6624.
- Zurik, K. (2022). Viscoelastic Behavior of Engineering Materials. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 11(4).