

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian *Silicon Steel***

Baja listrik merupakan bahan magnet lunak yang mengandung besi dan silikon dengan kandungan 1 ~ 4% silikon dan baja listrik ini disebut juga sebagai paduan besi-silikon. Penambahan silikon pada baja listrik dinilai dapat meningkatkan resistivitas listrik hingga 5 kali lipat besarnya dan dapat meningkatkan magnetisasi baja. Sifat utama yang mempengaruhi kinerja dari baja listrik itu sendiri adalah tekstur kristalografi dan ukuran butirnya, dimana pada pembuatan baja silikon lebih memperhatikan komponen kristalografinya dimana hal ini dapat memberikan permeabilitas magnetik yang tinggi. Baja listrik termasuk ke dalam bahan magnet lunak dengan sifat listrik yang ditingkatkan dimana baja listrik ini merupakan bahan feromagnetik yang terbuat dari besi yang mengandung silikon (Si) dan digunakan untuk menghasilkan inti magnetik tertentu (You & Park, 2018).

Baja listrik digunakan karena dinilai lebih efisien dalam menahan panas sehingga apabila baja listrik digunakan pada suhu tinggi contohnya pada aplikasi mesin manufaktur dan saluran listrik. Dimana apabila dibuat dengan baja listrik maka akan lebih baik dalam efisiensi energi sehingga dapat meningkatkan umur peralatan menjadi lebih panjang. Jenis inti pada baja listrik memiliki nilai kerapatan fluks magnet saturasi tertinggi karena adanya sifat magnetoelektrik yang baik, produksi massal yang mudah, harga rendah, dan tekanan mekanis yang rendah. Dimana hal inilah baja listrik banyak digunakan dalam industri elektronika daya seperti trafo daya, trafo distribusi, trafo arus dan inti besi lainnya (You & Park, 2018).

Sifat magnetik yang sesuai dalam baja listrik dapat dicapai dengan berbagai desain metalurgi melalui asosiasi komposisi kimia dan kontrol proses. Telah diketahui bahwa sifat magnetik utama dari baja listrik bergantung pada tekstur magnetik dan induksi magnetik yang diinginkan dapat dicapai dengan pengontrolan

tekstur. Banyak penelitian telah menunjukkan dengan menambahkan sejumlah kecil elemen tertentu ke dalam baja listrik jenis baja listrik non-berorientasi dengan anil pita panas akan berpengaruh yaitu dapat meningkatkan evolusi tekstur. Hal ini dapat terjadi karena unsur-unsur ini akan memisahkan pada batas butir selama anil pita panas, dimana unsur-unsur tersebut mencegah adanya nukleasi rekristalisasi di dekat batas butir asli, sehingga dapat mengakibatkan adanya penurunan pembentukan butir setelah proses *cold rolling* dan *final annealing* (You & Park, 2018).



**Gambar 2.1** *Silicon Steel* (Dough, 2019)

Baja listrik menggunakan bahan magnetic dalam jumlah yang besar, dimana bahan magnetic ini merupakan bahan fungsional logam hemat energi. Baja listrik, terutama dengan jenis baja silikon berorientasi, memiliki proses dan peralatan manufaktur yang kompleks, kontrol komposisi yang ketat, proses manufaktur yang lama. Oleh karena itu, kualitas produk baja silikon yang berorientasi sering dianggap sebagai indikator penting untuk mengukur tingkat teknis manufaktur baja khusus suatu negara. Perkembangan baja listrik didorong oleh banyaknya perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dinilai dapat mengurangi pembuangan panas (Diniz & Brandao, 2015).

Baja tanpa penambahan silikon dimana hal ini merupakan masalah yang mengakibatkan pemborosan energi. Adanya masalah ini maka besi dengan tambahan silikon ditemukan sebagai pilihan yang paling ekonomis. Lembaran baja

listrik terbuat dari bahan fungsional yang diproduksi dengan memodifikasi sifat magnetik baja untuk magnetisme yang efisien dan konversi listrik. Dimana baja listrik dapat dinilai sebagai solusi dari kerugian dalam pembangkit listrik, transmisi, dan konsumsi berkurang sehingga baja listrik dapat berkontribusi pada penghematan energi (Diniz & Brandao, 2015).

## **2.2 Sejarah Silicon Steel**

Baja silikon pertama kali diperoleh pada tahun 1900 berdasarkan hasil penelitian E. Gumlich di Jerman dan W. Barret, W. Brown, dan R. Hadfield di Inggris (Honda et al., 1998). E. Gumlich di Jerman dan W. Barret, W. Brown, dan R. Hadfield di Inggris merumuskan bahwa besi dapat dikurangi secara signifikan jika sejumlah silikon ditambahkan ke dalam baja paduan. Paduan besi dengan silikon secara substansial dapat meningkatkan resistivitas, sehingga dengan demikian dapat menurunkan kerugian arus eddy dan histeresis pada magnetisasi pembalikan. Contohnya ditahun 1900, lembaran baja karbon rendah canai panas dengan tebal 0,35 mm banyak digunakan untuk memproduksi inti motor dan transformator. Hal ini masih dipertanyakan kualitasnya, karena baja karbon rendah memiliki resistivitas rendah sehingga tingkat kehilangan intinya lebih besar, kandungan karbon dan nitrogennya tinggi, dan penuaan magnetiknya tinggi. Pada tahun 1903, Amerika Serikat memperoleh hak untuk menggunakan paten dari peneliti Hardfield dan pada tahun yang sama, maka di tahun 1903 Amerika Serikat dan Jerman mulai memproduksi lembaran baja silikon canai panas yang mengandung 1,0 hingga 4,5% silikon (Honda et al., 1998).

Pada tahun 1905, Amerika Serikat terus memproduksi massal, sehingga dalam waktu yang sangat singkat, baja silikon sepenuhnya sudah menggantikan baja karbon rendah canai panas biasa untuk memproduksi motor dan transformator. Periode 1906-1930 adalah tahun di mana produsen dan pengguna memiliki pemahaman terpadu tentang biaya, sifat mekanik, desain dan reformasi manufaktur lembaran baja silikon canai panas, serta peningkatan kualitas produk dan output dimana hal ini sangat memperkuat sepenuhnya baja silikon menggantikan baja karbon rendah canai panas biasa. Pada tahun 1930, peneliti Gauss di Amerika mulai

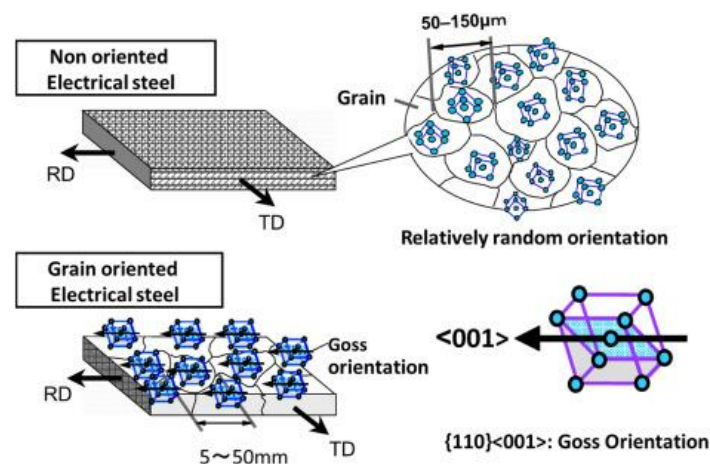
melakukan lagi eksperimen lain dengan menggunakan metode *cold rolling* dan *annealing*, metode ini digunakan untuk mengeksplorasi proses pembuatan strip baja silikon yang berorientasi dengan magnetisasi butiran yang mudah dan magnetisasi yang memiliki arah sejajar dengan arah *rolling*. Pada tahun 1934, peneliti NP Goss membuat dua lembaran baja silikon dengan proses canai dingin dengan kandungan silikon 3% berorientasi biji-bijian dengan dua proses pengerolan dingin (Morito et al., 1998).

Pada tahun 1935, Armco Steel Company bekerja sama dengan Westinghouse Electric Company untuk memproduksi baja silicon dengan cara yang sesuai dengan teknologi yang dipatenkan Gaussian. Setelah itu, Armco Steel menggunakan teknologi lainnya seperti analisis karbon yang cepat dan proses peralatan manufaktur yang terus ditingkatkan untuk meningkatkan kualitas produk secara bertahap. Pada tahun 1957, Republik Federal Jerman membuat lembaran baja silikon berorientasi kubik, baja silicon yang diproduksi ini memiliki sifat magnetik vertikal dan horizontal yang tinggi, tetapi belum diproduksi secara resmi karena proses yang dipilih sangatlah rumit. Selanjutnya di tahun 1958, setelah menguasai dua proses manufaktur yaitu pra-proses inhibitor MnS dan pemanasan suhu tinggi pelat, teknologi yang dipatenkan untuk pembuatan baja silikon dinilai menjadi teknologi yang lebih sempurna karena dari teknologi ini dihasilkan baja silikon dengan sifat magnetik produk yang lebih meningkat dan lebih stabil (Morito et al., 1998).

Pada mulanya, lembaran baja silikon dibuat dengan proses penggulungan panas ingot ke ukuran akhir, biasanya ukuran ini memiliki ukuran sekitar 0,4 mm. Sifat baja dengan ukuran tersebut ditingkatkan dengan cara menurunkan konsentrasi silikon, menaikkan suhu anil, dan memajukan proses peleburan. Selanjutnya Cina mulai memproduksi lembaran baja silikon rendah silikon canai panas yaitu dengan kandungan silikon 1~2% pada tahun 1953. Selanjutnya pada tahun 1955, mulai memproduksi lembaran baja silikon tinggi-silikon canai panas dengan kandungan silicon 3,0 - 4,5% dan pada tahun 1962-1970an mulai memproduksi strip baja silikon tipis berorientasi canai dingin (Lobanov et al., 2011).

### 2.3 Jenis Jenis *Electrical Steel* dan Aplikasinya

*Electrical steel* atau baja listrik terbagi menjadi dua jenis, jenis pertama adalah *non-oriented electrical steel* dan *oriented electrical steel*, baja listrik non-berorientasi disebut sebagai isotropi magnetik (atau dikenal sebagai baja listrik isotropik) secara luas berlaku untuk pembuatan semua jenis motor listrik dan inti transformator elektronik. Baja listrik non-orientasi (NO) atau alternator adalah bahan magnet lunak yang paling umum digunakan (sekitar 80% dari total volume, nilai pasar diperkirakan mencapai USD 12,57 miliar pada tahun 2020, dengan Tingkat Pertumbuhan Tahunan Majemuk sekitar 5,19%, yang diperkirakan akan mencapai USD 18,24 miliar pada tahun 2028. Baja ini biasanya diterapkan sebagai bahan inti dalam memutar mesin listrik, di mana sifat isotropik adalah salah satu persyaratan penting. Kisaran lembaran NO yang diproduksi saat ini mencakup beberapa tingkatan, berbeda dalam ketebalan dan persentase kandungan silikon dan aluminium (biasanya 1,0-3,7% berat Si, 0,2-0,8% berat Al) (Chwastek, 2022).



**Gambar 2.2** *Non-Oriented Electrical Steel dan Oriented Electrical Steel* (Dough, 2019)

Meskipun perangkat dan mesin listrik biasanya menampilkan efisiensi tinggi, kehilangan energi total dalam sistem rekayasa tenaga listrik dapat mencapai nilai substansial, yang mengarah pada pengisian cepat sumber energi primer dan biaya energi listrik yang tinggi. Bahan terpenting yang digunakan dalam perangkat listrik adalah baja listrik, yang digunakan untuk mengatur sirkuit magnetik. Selama

proses magnetisasi, sebagian energi diubah menjadi panas. Bagian ini biasa disebut sebagai rugi-rugi besi. Di Cina, konsumsi baja listrik non-orientasi mewakili sekitar 90% dari total konsumsi baja listrik. Baja listrik non-orientasi biasanya mengandung tingkat silikon 2% -3,5% dan baja ini memiliki sifat magnetik yang serupa di segala arah, yang disebut isotropi (Chwastek, 2022).

Lembaran baja listrik non-orientasi adalah lembaran yang dirancang untuk menghasilkan sifat tertentu dan diproduksi dari paduan Fe-Si atau Fe-Si-Al. Lembaran baja listrik non-orientasi digabungkan ke dalam berbagai peralatan, dari peralatan rumah tangga paling sederhana hingga kendaraan listrik hibrida dan murni. Upaya di masa depan akan difokuskan pada pengendalian elemen sisa dalam baja, mengoptimalkan penggulangan panas dan dingin, dan mengoptimalkan pengembangan tekstur kristalografi, dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja produk jadi (Evine & Petrovi, 2010).

Lembaran baja listrik non-orientasi, secara komersial juga disebut baja laminasi, baja listrik silikon, baja silikon atau baja transformator, adalah lembaran baja khusus yang dirancang untuk menghasilkan sifat magnetik tertentu. Mereka digunakan dalam bentuk tumpukan laminasi, terutama pada motor listrik, transformator dan alternator, tergantung pada sifatnya. Lembaran baja listrik non-berorientasi dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu nilai yang diproses sepenuhnya, yang dikirim dalam kondisi jadi, terus menerus dianil dan terkadang dipernis dimana mereka memiliki sifat magnetik yang dijamin, sesuai dengan standar. Yang kedua adalah nilai semi-proses, yaitu proses yang dilakukan dan yang diberi perlakuan anil akhir untuk mengembangkan sifat magnetiknya oleh pengguna, dimana lembaran baja listrik non-orientasi biasanya diproduksi dalam bentuk lembaran/strip canai dingin dengan ketebalan (0,35, 0,50, 0,65 dan 1,00) mm dan diklasifikasikan menurut nilai kehilangan total spesifik maksimum dalam W/kg (Evine & Petrovi, 2010).

Bahan magnet lunak mudah dimagnetisasi dan didemagnetisasi, dimana hal ini dapat berubah dengan memperhatikan beberapa parameter penting yaitu permeabilitas relatif, koersivitas, magnetisasi saturasi, dan konduktivitas listrik. Baja listrik non-berorientasi dicirikan oleh sifat magnetik yang kira-kira sama di

semua arah dari bidang lembaran. Parameter mikrostruktur seperti tekstur kristalografi dan ukuran butir memiliki pengaruh yang kuat terhadap sifat magnetik baja listrik non-berorientasi. Dengan bertambahnya ukuran butir, rugi-rugi histeresis berkurang tetapi rugi-rugi arus eddy meningkat, oleh karena itu, ukuran butir penting untuk kehilangan energi (Kvackaj et al., 2017).

Baja silikon ini dibuat tanpa penekanan khusus untuk mengontrol orientasi kristal (ini adalah tekstur keseluruhan material). Dengan tumbukan butiran yang tidak berorientasi ini, menghasilkan bahan isotropik (di mana sifat magnetik bersifat omnidirectional). Ini adalah pilihan yang lebih murah dan digunakan ketika biaya lebih diprioritaskan daripada efisiensi, di mana fluks magnet tidak harus konstan. Baja ini ditemukan di generator dengan bagian yang bergerak dan motor listrik (Feng, 2022).

Baja listrik non-orientasi yang diproses sepenuhnya memiliki tingkat silikon yang bervariasi mulai dari tingkat 0,5% hingga tingkat 3,25% Si. Dimana baja ini memiliki sifat magnetik yang seragam ke segala arah. Baja listrik jenis ini tidak memerlukan proses rekristalisasi untuk mengembangkan sifat-sifatnya. Nilai paduan silikon rendah memberikan permeabilitas magnetik dan konduktivitas termal yang lebih baik (Feng, 2022).

Untuk nilai paduan tinggi, kinerja yang lebih baik sangat diharapkan pada frekuensi tinggi, dengan kerugian yang sangat rendah. Jenis ini sangat baik untuk sirkuit magnetik di motor, transformator, dan rumah sistem kelistrikan. Baja non-orientasi banyak digunakan dalam mesin yaitu mesin listrik berputar. Contoh dari mesin ini misalnya, motor dan generator) di mana arah magnetisasi diputar di bidang lembaran (Feng, 2022).

Jenis kedua adalah *grain-oriented electrical steel* atau baja listrik berorientasi butir biasanya mengandung tingkat silikon 3% dan diproses dengan cara untuk mengembangkan sifat ideal dalam arah rolling. Baja non-butir canai dingin (CRNGO) lebih murah daripada baja berorientasi butiran canai dingin (CRGO). CRNGO dapat digunakan dalam aplikasi berorientasi biaya dengan arah fluks magnet yang tidak konstan, seperti motor listrik dan generator. CRGO biasanya dalam bentuk koil dan harus dipotong menjadi laminasi lebih lanjut,

digunakan dalam aplikasi inti transformator, seperti bagian internal tertentu dalam transformator keluaran audio (Rolling, 2022).

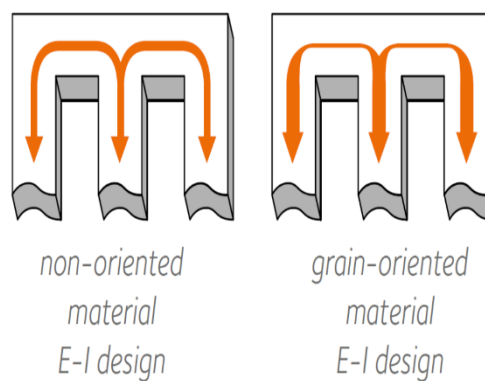
Baja silikon berorientasi butir adalah sejenis baja listrik dengan arah magnetisasi yang mudah sejajar dengan arah penggulangan dan kandungan silikon sekitar 3%. Baja silikon berorientasi butir dapat dibagi menjadi dua kategori utama termasuk baja silikon berorientasi butir umum dan baja silikon berorientasi butir induksi magnetik tinggi. Hal ini sebagian besar berlaku untuk bidang transmisi daya (seperti transformer) dan merupakan bahan logam fungsional penting dalam tenaga listrik, industri elektronik dan militer. Baja silikon berorientasi butir telah lama dikenal sebagai karya seni baja, yang berteknologi canggih dan rumit secara teknis (Rolling, 2022).

Baja listrik berorientasi butir adalah bahan inti berteknologi tinggi yang sangat canggih. Ini digunakan untuk mengubah gerakan menjadi energi listrik atau energi listrik diubah menjadi gerakan dan di mana energi listrik ditransmisikan melintasi jarak yang jauh. Baja listrik berorientasi butiran atau luka yang dilaminasi adalah bahan inti yang digunakan dalam transformator daya dan distribusi dan juga pada transformator kecil. Baja listrik berorientasi butir secara signifikan mengurangi emisi kebisingan di transformer, sebuah keuntungan tersendiri mengingat pertumbuhan urbanisasi (Rolling, 2022).

Sebelum tahun 2000, di Cina, hanya WISCO yang memiliki kemampuan volume produksi baja silikon *cold-rolled grain-oriented* dengan kapasitas tahunan sekitar 100 ribu ton, hanya memenuhi 30% dari permintaan pasar domestik. Kesenjangan yang tersisa terutama bergantung pada impor. Akibatnya, pengembangan industri listrik dibatasi. Dengan perkembangan ekonomi rendah karbon dan kenaikan biaya energi yang konstan, transmisi daya *ultrahigh-voltage*, berkapasitas besar, *low-loss* dan cerdas menjadi tren dunia. Karena itu, industri transformator Cina sangat membutuhkan baja silikon berorientasi butir bermutu tinggi. Karena teknologi untuk pembuatan baja silikon berorientasi butir bermutu tinggi hanya dimiliki oleh sejumlah kecil perusahaan yang menganggap teknologi tersebut sangat rahasia dan menolak untuk mentransfernya, salah satu aplikasi dari kedua jenis baja listrik adalah untuk penggunaan transformator, dimana untuk



penggunaan transformator ini menggunakan desain E-I, dimana jalur fluks tertentu mengikuti transversal arah baja, sehingga kelas non-berorientasi (NO) memiliki keuntungan di zona tersebut yaitu di bagian belakang E-shape, dimana ini menggunakan jenis metode pemotongan yang biasanya terbatas pada transformator yang lebih kecil (dan ballast dan kontaktor), tetapi penggunaan NO dapat dipertimbangkan untuk transformator yang lebih besar juga dan desain E-I dapat dilihat pada gambar 2.1 (Rolling, 2022).

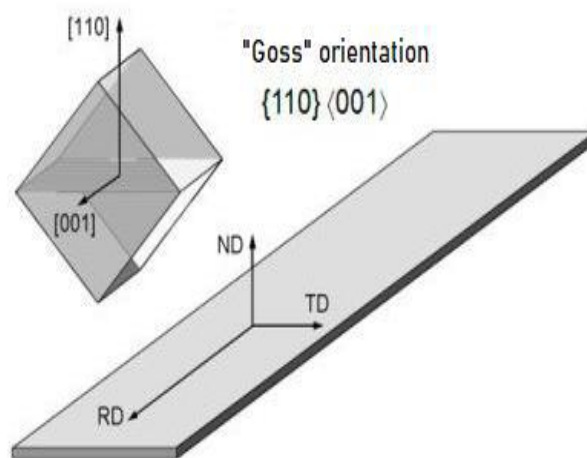


**Gambar 2.3** Desain E-I Pada 2 Jenis Baja Listrik (Dough, 2019)

Baja listrik berorientasi butir dinilai sangat hemat energi sehingga sekarang dapat memungkinkan untuk membuat trafo yang jauh lebih kecil dengan output daya yang sama. Karena ini mengurangi konsumsi sumber daya yang terbatas seperti tembaga, dan bahan isolasi, baja listrik berorientasi butir dapat dikatakan memberikan kontribusi yang berharga bagi kelestarian lingkungan. Baja listrik berorientasi butir disuplai dengan lapisan anorganik tipis pada lapisan film kaca yang terbentuk selama anil. Ketebalan lapisan 2 hingga 5 qm, dimana hal ini dapat memberikan pengaruh yang baik yaitu hambatan listrik yang baik dan faktor penumpukan yang tinggi dengan lapisan yang tahan anil hingga temperatur 840 °C, karena hal inilah memungkinkan laminasi berlubang dan berubah menjadi anil (Qaiser et al., 2021).

Baja listrik berorientasi butir diproses agar fluks magnetnya konstan dan arahnya menjadi terarah. Dimana hal ini memiliki orientasi kristal ketat yang dicapai selama proses penggulangan. CRGO disuplai dalam bentuk koil dan

kemudian digulung menjadi *strip* "cold-rolled" dengan ukuran khusus yaitu kurang dari 2 mm. Dalam kedua kasus baja listrik lembaran laminasi berorientasi non-butir dan berorientasi butir, pada awalnya koil akan digulung dan kemudian dilanjutkan pada proses selanjutnya yaitu dipotong menjadi berbagai bentuk, diantara kedua jenis baja listrik memiliki tekstur goss atau orientasi goss yang dapat dilihat seperti gambar 2.2 (Qaiser et al., 2021).



**Gambar 2.4** Tekstur Goss atau Orientasi Goss Pada Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

Baja listrik berorientasi butir terdiri dari besi dengan tambahan kandungan senyawa lain yaitu dengan tambahan 3% Si dengan berorientasi butir untuk menghasilkan permeabilitas tinggi dan nilai kehilangan energi yang rendah. Nilai berorientasi butir memiliki satu ciri yang khas yaitu memiliki sifat kristalografi yang kuat. Hal ini dikarenakan jenis ini mengalami proses rekristalisasi yang menghasilkan struktur butir yang disempurnakan yang dapat menunjukkan baja menjadi memiliki sifat magnetik yang lebih baik dalam arah penggulungan lembaran. Baja berorientasi butir banyak digunakan untuk aplikasi yang konstan atau tidak berputar, contohnya yaitu seperti transformator. Baja listrik berorientasi butir terutama digunakan sebagai bahan inti untuk peralatan statis (misalnya transformator) dimana untuk aplikasi lainnya dari kedua jenis baja listrik diatas dapat dilihat di tabel 2.1 (Qaiser et al., 2021).

**Tabel 2.1** Aplikasi *Non-Oriented Steel* dan *Grain-Oriented Steel* (You & Park, 2018)

<i>Application</i>	<i>Non-Oriented Steel</i>			<i>Grain-Oriented Steel</i>	
	<i>Silicon Free</i>	<i>Low Silicon</i>	<i>High Silicon</i>	<i>Conventional Grade</i>	<i>High Permeability Grade</i>
<i>Small motors</i>	✓	✓			
<i>Lamp ballasts</i>	✓	✓			
<i>Medium AC motors</i>	✓	✓	✓		
<i>Welding transformers</i>	✓	✓	✓		
<i>Audio transformers</i>		✓	✓		
<i>Small power transformers</i>		✓	✓	✓	
<i>Large rotating machines</i>			✓	✓	
<i>Medium generators</i>		✓	✓		
<i>Distribution transformers</i>				✓	✓
<i>Power transformers</i>				✓	✓

#### **2.4 Kandungan Silikon di *Silicon Steel***

Baja listrik adalah bahan magnetik lunak dengan sifat listrik yang ditingkatkan yang banyak digunakan di seluruh aplikasi seperti relai kecil, solenoida, motor listrik, generator, dan banyak perangkat elektromagnetik lainnya. Baja listrik juga disebut sebagai baja silikon, baja transformator, atau baja laminasi. Ini digunakan terutama dalam sistem distribusi tenaga listrik dan di industri otomotif. Baja listrik adalah bahan feromagnetik yang terbuat dari besi yang mengandung jumlah silikon (Si) yang bervariasi antara 1% hingga 6,5%. Perkembangan baja listrik didorong oleh perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dapat mengurangi pembuangan panas, masalah yang mengakibatkan pemborosan energi (Rohal' et al., 2020).

Besi ditemukan sebagai pilihan yang paling ekonomis, tetapi pengotornya tidak optimal. Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan mengurangi kehilangan histeresis. Baja listrik yang tersedia secara komersial paling banyak digunakan mengandung sekitar 3,25% Si karena kandungan silikon yang lebih tinggi cenderung membuat bahan yang dihasilkan terlalu rapuh untuk pengerolan dingin. Baja listrik dengan 6,5% Si memiliki sifat magnetik dan listrik yang paling baik, tetapi proses termomekanis tambahan diperlukan untuk mengatasi kerapuhan dan daktilitas terbatas (Rohal' et al., 2020).

Penambahan silikon dalam besi sangat berpengaruh bagi besi yaitu dapat meningkatkan sifat fisik baja listrik. Baja listrik memiliki sifat yang diinginkan berikut untuk mendukung pembangkitan, distribusi dan konsumsi listrik yang pertama ada permeabilitas tinggi yaitu peningkatan kapasitas untuk mendukung medan magnet. Yang kedua ada magnetostriksi rendah yaitu membuat kecenderungan rendah untuk mengembang atau berkontraksi dalam medan magnet. Yang ketiga yaitu resistivitas listrik tinggi yaitu mengurangi kehilangan inti dengan mengurangi komponen arus eddy. Yang terakhir yaitu kehilangan histeresis yang berkurang - kehilangan histeresis yang rendah berarti lebih sedikit energi yang terbuang dalam bentuk panas dari gaya magnetisasi bolak-balik (Rohal' et al., 2020).

Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan mengurangi kehilangan histeresis. Penambahan dari silikon ini dapat meningkatkan resistivitas listrik setrika hingga 5 kali lipat. Perubahan ini menghasilkan penurunan kerugian arus eddy paduan, yang secara langsung mempengaruhi inti magnetik. Arus eddy adalah loop arus listrik yang dilengkapi dengan konduktor yang dirancang untuk mengubah medan magnet, dan inti magnet pada dasarnya adalah bahan pemandu yang sangat magnetis (konduktor) (Rohal' et al., 2020).

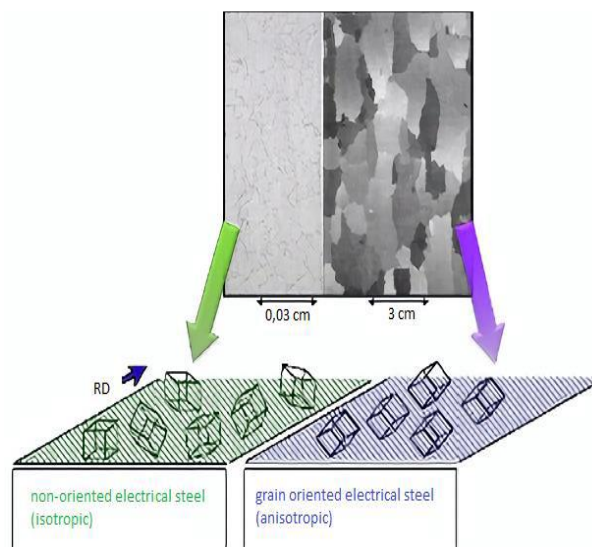
Jika arus eddy tetap konstan, tidak akan ada kehilangan inti magnetik, membuat fungsi lancar. Ketika persentase silikon yang ditambahkan melebihi 2%, terjadi penurunan suhu Curie. Suhu Curie adalah suhu maksimum di mana bahan yang diberikan kehilangan sifat feroelektrik dan piezoelektrik dengan feroelektrik adalah polarisasi listrik spontan dan piezoelektrik adalah muatan listrik akumulatif dalam bahan padat yang disebabkan oleh tekanan mekanis (biasanya tekanan dan panas) (Rohal' et al., 2020).

Ketika konten Si meningkat, permeabilitas magnetik meningkat, karena anisotropi magneto-kristal rendah dan koefisien magnetostrictive. Kehilangan besi arus eddy berkurang, karena peningkatan resistivitas listrik. Namun, ketika kandungan Si meningkat lebih lanjut, magnetisasi saturasi menurun, dan penggulungan dingin menjadi sulit di atas 3% massa Si karena penggetasan. Oleh karena itu, kandungan Si biasanya dibatasi sekitar 3% massa, dan nilai ini diakui sebagai kompromi terbaik antara kinerja magnetik dan mekanis, diantara kedua jenis baja listrik yang ada keduanya memiliki karakteristik atau tekstur yang berbeda beda untuk menyokong kegunaannya yang dapat diaplikasikan pada banyak perangkat listrik, karakteristik keduanya dapat dilihat pada gambar 2.7 (Rohal' et al., 2020).

Untuk mengurangi kerugian arus eddy, pengurangan ketebalan lembaran dinilai sebagai cara yang efektif. Ketebalan baja listrik biasanya dalam kisaran 0,20 mm hingga 0,65 mm. Ketebalan dari baja dibatasi oleh biaya pembuatan dan kerumitan penanganan untuk bangunan inti. Lapisan isolasi listrik biasanya diterapkan pada baja listrik untuk membuat lapisan isolasi antara lembaran baja

laminasi untuk menghindari adanya peningkatan kehilangan arus eddy (Rohal' et al., 2020).

Parameter terpenting yang menentukan sifat magnetik lembaran baja adalah tekstur. Untuk lembaran baja silikon nonorientasi, tekstur yang ideal adalah tekstur butiran kubik dengan bidang (001) atau (110) sejajar dengan bidang lembaran dan distribusi arah yang seragam [100], sedangkan pada silikon berorientasi butiran baja tekstur butirannya adalah Goss dengan (110) [100] orientasi butiran kristalografi yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Baja silikon adalah inti dari peralatan listrik dan memberikan kombinasi terbaik untuk distribusi dan transmisi listrik. Sifat yang diinginkan dari baja ini adalah kehilangan magnet yang rendah, permeabilitas dan induksi yang tinggi, dan magnetostriksi yang rendah (Rohal' et al., 2020).



**Gambar 2.7** Karakteristik Pada 2 Jenis Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

Kerugian magnetik yang rendah mengurangi pembangkitan panas dan konsumsi daya, permeabilitas tinggi dan hasil induksi dalam ukuran dan massa bagian yang berkurang, dan magnetostriksi yang rendah mengurangi kebisingan (dimanifestasikan sebagai dengungan) pada transformator dan mesin berkapasitas besar. Perkembangan baja listrik disebabkan oleh perangkat listrik yang membutuhkan baja yang dapat mengurangi pembuangan panas, suatu masalah yang mengakibatkan pemborosan energi. Besi ditemukan sebagai pilihan yang paling

ekonomis, tetapi pengotornya tidak optimal. Ditemukan bahwa penambahan silikon meningkatkan resistivitas, meningkatkan permeabilitas, dan menurunkan kerugian hysteresis (Rohal' et al., 2020).

Baja listrik yang tersedia secara komersial paling banyak digunakan mengandung sekitar 3,25% Si. Hal ini dikarenakan kandungan silikon yang lebih tinggi cenderung membuat bahan yang dihasilkan terlalu rapuh untuk pengerolan dingin. Baja listrik dengan 6,5% Si memiliki sifat magnetik dan listrik yang paling baik. Selanjutnya untuk proses termomekanis tambahan diperlukan untuk mengatasi kerapuhan dan keuletannya yang terbatas (Rohal' et al., 2020).

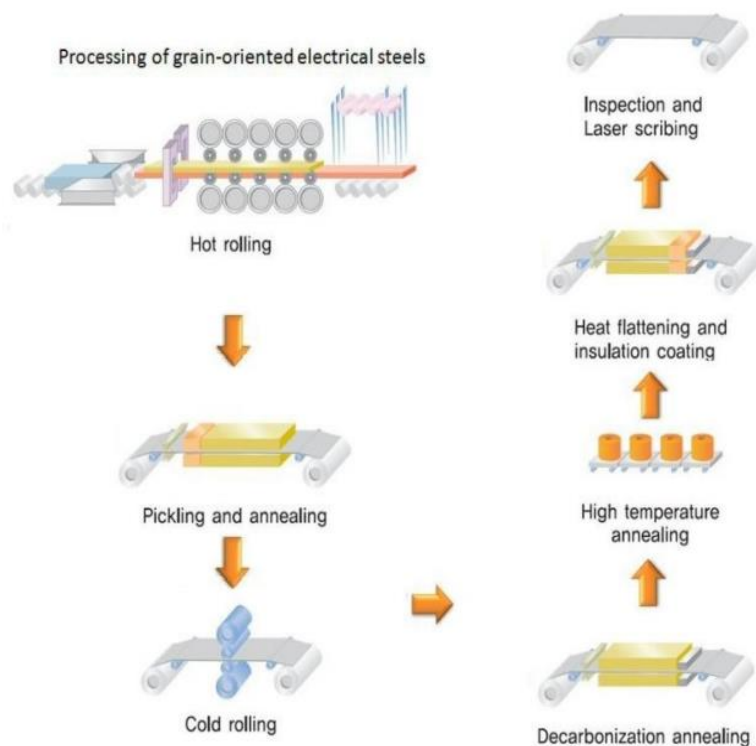
Baja listrik banyak digunakan untuk keperluan elektromagnetik seperti motor dan transformator. Silikon ditambahkan untuk meningkatkan resistivitas listrik dan untuk mengurangi anisotropi magnetik. Namun, menambahkan lebih dari 3% berat silikon membuat material lebih keras dan mengurangi kemampuan kerja dan menambahkan kurang dari 2,5% berat silikon mengarah pada transformasi fase. Sifat utama yang mempengaruhi kinerja baja listrik adalah ukuran butir dan tekstur kristalografi (Botelho et al., 2015).

Saat ini, pembuatan baja silikon lebih menyukai komponen kristalografi (110)[001], yang memberikan permeabilitas magnetik yang tinggi dalam arah penggulangan. Namun, tekstur ideal yang harus dimiliki baja listrik untuk digunakan dalam aplikasi motor adalah  $\langle 001 \rangle$  // Normal Direction (ND). Ukuran butir ideal untuk baja berorientasi non-butir, untuk meminimalkan kerugian magnetik, adalah 100 hingga 150 m. Proses pembuatannya terdiri dari tahap rolling dan annealing (Botelho et al., 2015).

Pada rolling simetris, kedua silinder memiliki diameter, kekasaran dan pelumasan yang sama. Sedangkan pada rolling asimetris, satu atau lebih variabel tersebut berbeda. Tujuan dari pekerjaan ini adalah untuk mempelajari pengaruh cold rolling asimetris. Pengaruhnya dinilai dengan atau tanpa anil menengah, pada perilaku magnetik 3% Si *Non-Grain Oriented Steel* (NGO) dan untuk menyelidiki struktur mikro dan tekstur kristalografi bahan olahan (Botelho et al., 2015).

Baja listrik biasanya diproduksi dengan *continuous casting* dan dilebur dalam tungku oksigen, kemudian masuk ke proses *hot rolling* setelahnya masuk ke

*annealing process* dan *descaling process*, di mana kotoran dan kerak dihilangkan dari permukaan. Setelah itu, selanjutnya masuk ke proses *cold reduction*, di mana ketebalan baja dikurangi dan dikoreksi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Selanjutnya, kandungan karbon dalam baja dikurangi dengan anil dekarbonisasi, di mana gulungan baja dipanaskan dalam campuran hidrogen, nitrogen, dan uap air. Kontaminan tambahan, seperti sulfur dihilangkan dalam proses ini dan untuk baja tipe berorientasi butir kumparan mengalami anil kumparan suhu tinggi (HTCA) pada sekitar 1100 °C untuk mencapai sifat magnetik dan pertumbuhan butir yang diperlukan, berikut merupakan alur produksi pembuatan baja listrik dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Rohal' et al., 2020).



**Gambar 2.6** Alur Produksi Pembuatan Baja Listrik (Rohal' et al., 2020)

## 2.5 Hot Working

Proses kerja mekanis yang dilakukan di atas suhu rekristalisasi logam dikenal sebagai proses kerja panas. Beberapa logam, seperti timbal dan timah, memiliki suhu rekristalisasi yang rendah dan dapat dikerjakan dengan panas bahkan



pada suhu kamar, tetapi sebagian besar logam komersial memerlukan pemanasan. Namun, suhu ini tidak boleh terlalu tinggi untuk mencapai suhu solidus, jika tidak, logam akan terbakar dan menjadi tidak layak digunakan. Dalam pengerjaan panas, suhu penyelesaian pengerjaan logam penting karena panas ekstra yang tersisa setelah bekerja membantu pertumbuhan butir (Singh, 2016).

Peningkatan ukuran butir ini terjadi oleh proses koalesensi butir yang berdekatan dan merupakan fungsi dari waktu dan suhu. Pertumbuhan butir menghasilkan sifat mekanik yang buruk. Jika pengerjaan panas selesai hanya di atas suhu rekristalisasi maka ukuran butir yang dihasilkan akan baik-baik saja. Jadi untuk setiap proses pengerjaan panas, logam harus dipanaskan sampai suhu di bawah suhu solidusnya, sehingga setelah selesainya pekerjaan panas, suhunya akan tetap sedikit lebih tinggi dari dan sedekat mungkin dengan suhu kristalisasinya (Singh, 2016).

Proses ini umumnya dilakukan pada logam yang ditahan pada suhu sedemikian rupa sehingga logam tidak bekerja-mengeraskan. Beberapa logam misalnya, Pb dan Sn (karena mereka memiliki suhu kristalisasi) dapat bekerja panas pada suhu kamar. Menaikkan suhu logam menurunkan tekanan yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi dan meningkatkan kemungkinan jumlah deformasi sebelum pengerasan kerja yang berlebihan terjadi. Pengerjaan panas lebih disukai di mana deformasi besar harus dilakukan yang tidak memiliki tujuan utama menyebabkan pengerasan kerja. Pengerjaan panas menghasilkan hasil bersih yang sama pada logam seperti pengerjaan dingin dan anil (Singh, 2016).

Dalam proses pengerjaan panas, ketidakteraturan komposisi disetrika dan pengotor nonlogam dipecah menjadi fragmen kecil yang relatif tidak berbahaya, yang tersebar secara merata di seluruh logam alih-alih terkonsentrasi dalam jumlah besar massa kerja logam yang meningkatkan tegangan. Pengerjaan panas seperti proses penggulangan memurnikan struktur butir, kolumnar kasar dendrit dari logam tuang dimurnikan menjadi butiran equiaxed yang lebih kecil dengan perbaikan sifat mekanik komponen. Permukaan akhir dari logam yang dikerjakan panas hampir tidak sebagus dengan pengerjaan dingin, karena oksidasi dan penskalaan. Harus sangat berhati-hati dalam hal suhu untuk memulai pekerjaan panas dan di mana

harus berhenti karena ini mempengaruhi sifat-sifat yang akan diperkenalkan di panas bekerja logam dan selama pengerjaan panas, terjadi self-annealing dan rekristalisasi terjadi segera setelah deformasi plastis. Tindakan self-annealing ini mencegah pengerasan dan hilangnya keuletan (Singh, 2016).

Keuntungan dari *Hot Working Process* adalah *hot-working* yang pertama yaitu cocok untuk pekerjaan produksi massal. Yang kedua yaitu bentuk dan ukuran logam dapat dengan mudah diubah. Yang ketiga, karena material berada di atas suhu rekristalisasi, pekerjaan apa pun dapat dilakukan pada logam tanpa tekanan pengerasan. Lalu yang keempat, karena material berada pada suhu tinggi sehingga memiliki jumlah daktilitas yang lebih tinggi, yang berarti tidak ada batasan pada pengerjaan panas logam (Lei et al., 2022).

Selanjutnya, karena logam yang bekerja panas memiliki struktur butir yang halus, maka dengan demikian meningkatkan sifat mekanik. Pada proses ini, porositas sangat berkurang. Jika tidak ada kesalahan, pengerjaan panas tidak akan mempengaruhi kekuatan, kekerasan, dan korosi. Suhu yang lebih tinggi menghasilkan pengurangan tegangan geser, sehingga hal ini menyebabkan lebih sedikit gaya yang diperlukan untuk deformasi yang diperlukan, karena logam dalam keadaan plastis, deformasi yang lebih besar dapat dicapai sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik, fisik dan kimia, karena ekonomis dan dapat diandalkan (Lei et al., 2022).

Kerugian dari *Hot Working Process* adalah karena adanya oksidasi, itu menyebabkan permukaan akhir yang buruk. Karena oksidasi, ada kehilangan karbon terkadang menyebabkan kekuatan yang lebih lemah. Memelihara dan menangani pengaturan kerja panas sangat tidak mudah karena kerja panas ini membutuhkan unit dengan harga yang sangat mahal seperti tungku gas atau pemanas induksi. Akurasi dimensi sulit dicapai karena ekspansi termal logam dan proses ini tidak cocok untuk semua jenis logam dan proses pengerjaan panas digunakan untuk memproduksi berbagai jenis produk seperti tabung, pipa, dan lembaran logam dan berbagai jenis produk yang kita temui sehari-hari diproduksi menggunakan metode ini seperti berbagai jenis peralatan mobil, *aerospace*, arsitektur dan dekorasi rumah (Lei et al., 2022).

## 2.6 Macam – Macam *Hot Working*

Macam – macam hot working terdiri dari *rolling*, *extrusion*, *forging* dan *hot drawing*, untuk *extrusion* terbagi lagi klasifikasinya menjadi 2 jenis yaitu ekstrusi langsung dan ekstrusi tidak langsung. Contoh yang pertama yaitu *rolling*, *rolling* atau pengerolan adalah proses pengerjaan logam yang paling penting dan dapat dilakukan pada logam panas atau dingin. Bahan dilewatkan di antara gulungan baja cor atau tempa, yang memampatkannya dan menyeretnya ke depan. Pengerolan adalah metode deformasi yang ekonomis jika logam diperlukan dalam panjang penampang yang seragam. Ingot pertama-tama digulung menjadi lembaran persegi panjang atau mekar persegi, yang diproduksi sebagai tahap perantara (Ma et al., 2016).

Dalam proses penggulangan ingot dilewatkan melalui gulungan polos berulang kali dalam satu arah dan kemudian ke arah sebaliknya. Pada setiap tahap, gulungan dibawa lebih dekat satu sama lain. Jika diperlukan square bloom, material diputar hingga 90° di antara operasi rolling. Proses penggulangan dapat digunakan untuk menghasilkan pelat, strip dan bagian yang digulung termasuk saluran, kolom universal, sudut dan bagian (Ma et al., 2016).

Pelat dan strip umumnya dibentuk menggunakan gulungan biasa, dimana gulungan ini bisa melengkung yang mengakibatkan pelat lebih tebal di bagian tengah. Gulungan dapat dicadangkan dalam empat pengaturan gulungan tinggi dengan gulungan tambahan untuk mengurangi kecenderungan ini. Pabrik penggilingan berdiameter kecil lebih efektif daripada yang besar dalam menyalurkan gaya guling ke logam yang mengalami deformasi. Pabrik memanfaatkan prinsip ini, dimana dari proses ini dapat mencapai pengurangan ketebalan hingga perbandingan 25:1 dimana sebuah rolling mill terdiri dari minimal sepasang gulungan, bantalan, lalu perumahan untuk menampung bagian-bagian ini dan mekanisme penggerak dengan kelengkapan satu set pengontrol (Ma et al., 2016).

Contoh yang kedua yaitu *extrusion*, proses ekstrusi dapat digambarkan sebagai sebuah siput logam atau *billet* ditempatkan di ruang tertutup. Logam tersebut kemudian didorong untuk bergerak melalui bukaan die di salah satu ujung

ruangan dengan menerapkan tekanan dengan ram yang dioperasikan secara mekanis atau hidraulik. Logam yang melewati die mempertahankan bentuk penampang lubang die. Logam lunak dapat dengan mudah berubah bentuk pada suhu kamar (Ma et al., 2016).

Logam dengan ketahanan yang lebih tinggi terhadap deformasi harus dipanaskan sampai suhu di mana mereka plastis, seperti dalam proses pengerjaan panas konvensional. Sebagai alternatif, metode deformasi kecepatan tinggi dapat digunakan. Metode Ekstrusi ada beberapa macam, yang pertama ada ekstrusi langsung yaitu dalam proses ini, aliran logam melalui lubang die searah dengan gerakan ram. Ram memiliki diameter yang sama dengan lubang wadah (Ma et al., 2016).

Yang kedua ada ekstrusi tidak langsung, dimana dalam hal ini, ram berdiameter sama dengan lubang wadah tetapi ram berongga dimana sebuah die dipasang di atas lubang ram dan logam mengalir pada ekstrusi dalam arah yang berlawanan dengan gerakan ram dan melalui lubang ram. Yang ketiga ada ekstrusi mundur, dimana diameter ram lebih kecil dari wadah dan material dipindahkan ke atas anulus yang dibentuk oleh ram dan wadah dan biasanya billet yang dipanaskan digunakan. Yang keempat, ada ekstrusi dampak dimana ini pada prinsipnya mirip dengan ekstrusi mundur tetapi dilakukan pada kecepatan yang lebih tinggi dan suhu yang jauh lebih rendah dan produk yang diekstrusi biasanya tidak memerlukan penopang setelah ekstrusi, oleh karena itu wadah dibuat sesingkat mungkin. Yang kelima, ada ekstrusi hidrostatik, dimana dalam hal ini, logam dikelilingi oleh fluida kerja, yang ditekan untuk memberikan suatu gaya yaitu gaya ekstrusi (Ma et al., 2016).

Contoh yang ketiga yaitu forging, forging atau penempaan adalah proses manufaktur yang melibatkan pembentukan logam menggunakan gaya tekan lokal. Pukulan disampaikan dengan palu (sering palu kekuatan) atau mati. Penempaan sering diklasifikasikan menurut suhu di mana itu dilakukan. Ada beberapa jenis penempaan yaitu penempaan dingin (dilakukan pada suhu kamar), penempaan hangat (dilakukan pada suhu kamar yang tinggi), dan penempaan panas (sejenis pengerjaan panas) (Ma et al., 2016).

Penempaan merupakan proses manufaktur pembentukan logam yang melibatkan pembentukan logam melalui gaya tekan local dimana ini termasuk pemanasan, deformasi, dan memberikan bentuk pada potongan logam dan kekuatan lokal ini dikirim melalui palu manual atau mesin palu dan dadu. Aplikasi dari penempaan adalah crankshaft dan Connecting rod untuk I.C. Mesin, cakram turbin, roda gigi, kepala tebal, perkakas tangan dan banyak jenis komponen structural. Manfaat penempaan yaitu meningkatkan struktur serta sifat mekanik bagian logam, komponen yang ditempa dapat menahan beban yang tidak terduga, bagian yang ditempa konsisten dalam bentuk dengan kehadiran minimum rongga dan porositas, penempaan dapat menghasilkan bagian dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan proses penempaan dinilai sangat ekonomis untuk produksi volume sedang hingga tinggi. Lalu kerugian dari penempaan adalah adanya biaya awal dan biaya perawatannya yang sangat tinggi, dalam penempaan panas, karena suhu tinggi, ada oksidasi cepat pada permukaan yang menghasilkan hasil akhir yang buruk, penempaan biasanya memiliki harga yang lebih mahal daripada casting dan operasi penempaan terbatas hanya bisa pada bentuk bentuk yang sederhana (Ma et al., 2016).

Contoh yang keempat yaitu hot drawing, hot drawing adalah proses pembentukan logam di mana logam ditarik melalui cetakan atau set cetakan untuk mencapai pengurangan diameter material. Dalam proses ini, blanko logam yang dipanaskan selanjutnya akan ditempatkan pada bukaan die, dan punch akan mendorong blanko melalui bukaan die untuk membentuk cangkir atau cangkang. Hot drawing merupakan proses di mana penampang batang, batang, atau kawat dikurangi dengan menariknya melalui lubang cetakan, selanjutnya sebuah mandrel akan mendorong benda kerja dan dengan demikian menarik pekerjaan melalui die dimana prosesnya mirip dengan proses hot working lainnya yaitu proses ekstrusi, kecuali bahwa dalam proses ini material akan ditarik melalui die, sedangkan dalam ekstrusi material didorong, hot drawing digunakan untuk membuat bagian berdinding tebal dari bentuk silinder sederhana, silinder hidrolis tugas berat, peluru artileri, dan tangki oksigen dibuat dengan proses menggambar panas (Ma et al., 2016).

## 2.7 Struktur Mikro

Struktur mikro pada suatu sampel dapat dilihat melalui metallography test. Metalografi adalah studi tentang struktur mikro berbagai logam atau dapat dijelaskan sebagai ilmu untuk mengamati struktur kimia dan atom dari bahan-bahan tersebut. Langkah-langkah untuk menyiapkan spesimen metalografi meliputi berbagai operasi, beberapa di antaranya adalah sectioning dan cutting, mounting, grinding, polishing, dan etching. Ilmu metalografi ini memberikan informasi tentang ukuran butir, struktur fasa, dan struktur pemadatan suatu sampel (Akca & Trgo, 2015).

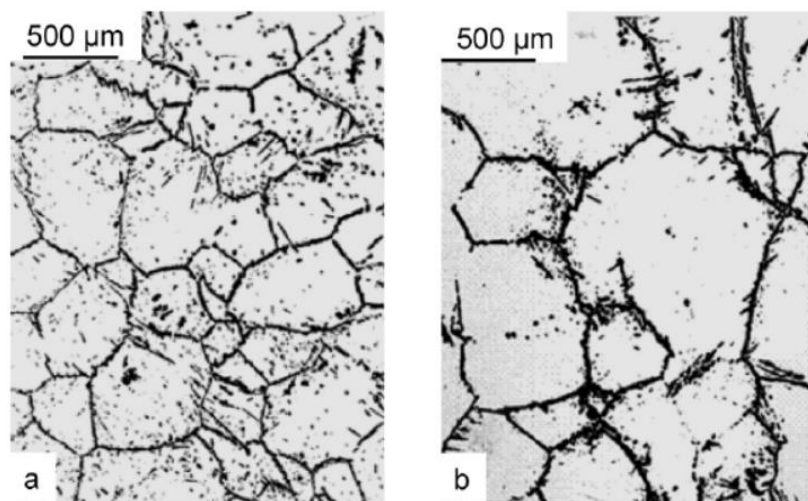
Metalografi terdiri dari studi tentang konstitusi dan struktur logam dan paduan. Pada pengujian ini menggunakan alat SEM. Teknik yang salah dalam menyiapkan sampel dapat mengakibatkan perubahan struktur mikro yang akan menghasilkan kesimpulan yang salah. SEM (Scanning Electron Microscopy) mengidentifikasi permukaan sampel dengan memindainya menggunakan berkas electron dalam pola pemindaian raster. Elektron berinteraksi dengan atom sampel menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi permukaan sampel, komposisi dan sifat lainnya seperti konduktivitas listrik (Liu et al., 2010).

Sinyal yang dihasilkan oleh SEM berasal dari interaksi berkas elektron dengan atom pada atau dekat permukaan sampel, termasuk elektron sekunder. Dengan mendeteksi elektron sekunder, SEM dapat menghasilkan gambar yang jelas dari permukaan sampel (gambar elektron sekunder atau SEI), dengan resolusi superior sekitar 1 hingga 5 nm, karena pancaran elektron yang relatif lebih sempit, SEM memiliki kedalaman bidang yang jauh lebih besar (yaitu, kedalaman di mana objek tetap berada dalam fokus). Sinar-X karakteristik dipancarkan saat berkas electron menghilangkan elektron kulit bagian dalam dari sampel, menyebabkan elektron berenergi lebih tinggi mengisi kulit dan melepaskan energi. Sinar-X ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan secara kuantitatif unsur-unsur dalam sampel (Liu et al., 2010).

BSE diproduksi oleh interaksi elastis sinar elektron dengan inti atom dalam spesimen, karena atom berat dengan nomor atom tinggi adalah penghambur yang lebih kuat daripada yang ringan, gambar dengan BSE mengandung informasi

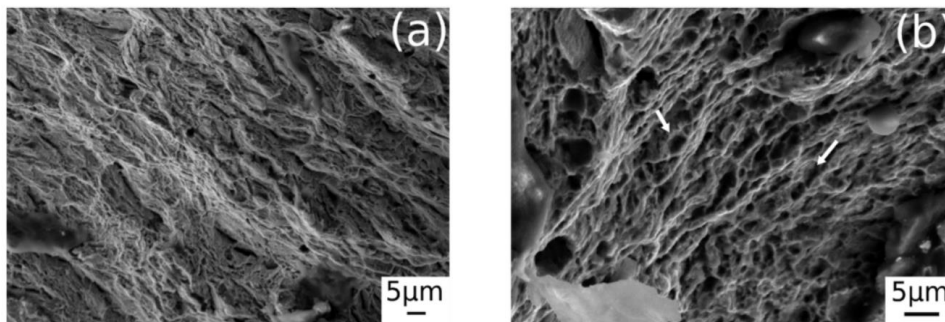
komposisi sehingga distribusi elemen yang berbeda dalam sampel dapat diperoleh dari gambar BSE. Dari alasan dan keuntungan yang ada inilah yang membuat SEM digunakan untuk menyelidiki pertumbuhan kristal atau proses evolusi struktur sampel. Spektrum sinar-X difraksi energi (EDX) yang terintegrasi dalam sistem SEM dan spektrum difraksi sinar-X (XRD) juga digunakan untuk mengidentifikasi komposisi dan fase kristal sampel. Sehingga ini menunjukkan bahwa SEM adalah alat yang sangat kuat untuk mempelajari morfologi pertumbuhan kristal dan membantu pembuatan mikro dan nano (Liu et al., 2010).

SEM (Scanning Electron Microscopy) memiliki berbagai jenis contohnya adalah SEM morfologi dan SEM fraktografi. SEM morfologi digunakan untuk mengkarakterisasi material, memberikan informasi terukur tentang kimia, ukuran, dan jumlah fase dan partikel yang ada dan memberikan informasi tentang hubungan fisik dari ukuran, kristalinitas, dan penjajaran fase yang ada. Lalu untuk SEM fraktografi digunakan untuk mempelajari permukaan patahan suatu bahan. Mempelajari karakteristik permukaan retak dapat membantu menentukan penyebab kegagalan pada produk rekayasa. Mode kegagalan yang berbeda menghasilkan fitur karakteristik di permukaan, memungkinkan analisis untuk menentukan akar penyebab kegagalan, hasil pemeriksaan sampel pengujian metalografi pada  $1050^{\circ}\text{C}$  dan  $1100^{\circ}\text{C}$  dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah ini (Wouters & Froyen, 1996).



**Gambar 2.5** Struktur Mikro Sampel Pengujian Metalografi Pada  $1100^{\circ}\text{C}$  (a) dan  $1050^{\circ}\text{C}$  (b) (Akta et al., 2005)

Hasil pemeriksaan sampel pengujian metalografi pada 1050°C dan 1100 °C terlihat bahwa ada peningkatan jumlah austenit pada 1050°C yaitu meningkat sebanyak 14% dan pada temperatur 1100 °C meningkat sebanyak 16%. Dimana struktur mikro yang didapatkan berasal dari proses quenching selama 60 menit. Dimana pada temperatur 1050°C terlihat bahwa batas butir halus dan batas butir yang direkristalisasi secara statis bebas dari substruktur. Lalu pada temperatur 1100°C terlihat bahwa batas butir lebih kasar dan batas butir yang direkristalisasi secara statis berkembang butirnya menjadi substruktur, setelah dilakukan pengujian metalografi dilanjutkan dengan fraktografi yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 dibawah ini (Akta et al., 2005).



**Gambar 2.8** Struktur Mikro Sampel Pengujian Fraktografi Pada 1100°C (a) dan 1050°C (b) (Franceschi et al., 2020)

Pada temperatur 1050°C dan 1100 °C terjadi transformasi fasa dari ferit menjadi austenite keras. Dimana pengaruh dari meningkatnya temperatur menyebabkan kekuatan tarik menurun sehingga deformasi meningkat yang membuat ukuran butir lebih besar sehingga kerapatan dislokasi menurun. Meningkatnya temperatur juga menyebabkan perpanjangan meningkat sehingga dapat mencegah pembentukan retakan belahan sehingga meningkatkan plastisitas. Meningkatnya temperature mengakibatkan tidak ada retakan ketika baja di rolling sehingga menghasilkan sifat magnetic yang sangat baik sehingga dapat memperlancar dan meningkatkan produksi dengan proses yang singkat sehingga dapat menyebabkan penghematan energi dan pengurangan emisi global (Franceschi et al., 2020).