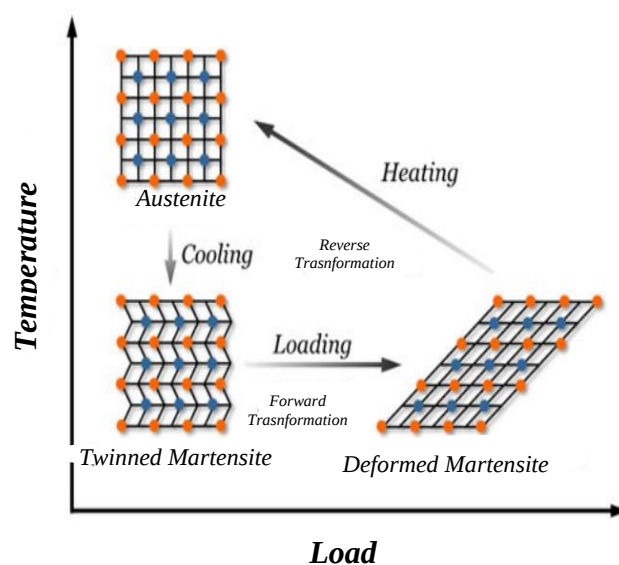


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Shape memory alloy*

Shape memory alloys (SMA) merupakan jenis material yang memiliki kemampuan luar biasa untuk kembali ke bentuk atau ukuran tertentu dengan aktivasi dari perubahan termal atau tegangan. Ketika terpapar stimulus termal atau mekanikal yang sesuai. Paduan ini telah menarik perhatian signifikan karena sifat-sifat uniknya, seperti efek memoris bentuk dan superelastisitas [6]. Umumnya, Paduan NiTi memiliki sifat ingat bentuk yang memiliki transformasi fase sehingga memungkinkan untuk mengalami perubahan bentuk secara reversible. SMA sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti penggunaan implant dalam biomedis [7].



Gambar 2.1 Prinsip *Shape memory alloy* [7].

SMA memiliki karakteristik termo-mekanis karena adanya transformasi antara austenit dan martensit. Hal ini terkait dengan temperatur dan tegangan internal material, dan *Shape memory effect* (SME). Pada temperatur tinggi, SMA berada di fase austenit tanpa deformasi. Ketika diberikan tegangan, austenit berubah menjadi martensit terdeformasi. Pada temperatur rendah, austenit juga bisa berubah menjadi martensit kembar tanpa deformasi. Ketika martensit terdeformasi dipanaskan, SMA kembali ke fase austenit dan bentuk aslinya melalui transformasi balik yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 [7]. Prinsip SMA bersumber dari kemampuan uniknya untuk mengalami transformasi fase yang dapat dibalik, terutama antara fasa martensit dan austenit, sebagai respons terhadap stimulus eksternal seperti temperatur atau tekanan. Fenomena ini memungkinkan SMA "mengingat" bentuk asli material dan memulihkannya setelah deformasi, sifat ini dikenal sebagai efek memori bentuk (SME) [8].

Potensi aplikasi dari SMA sangat beragam, melibatkan berbagai sektor mulai dari industri *aerospace* dan otomotif hingga sektor biomedis dan konstruksi. Sebagai contoh, SMA telah dieksplorasi penggunaannya dalam material komposit guna meningkatkan perilaku struktural seperti *buckling*, getaran, dan kelelahan. Pengembangan terus menerus dilakukan untuk meningkatkan performa SMA, seperti mengoptimalkan komposisi bahan, kontrol temperatur, dan aplikasi struktur. Meskipun SMA menawarkan banyak keunggulan, tantangan seperti biaya produksi dan keterbatasan pada temperatur operasional tertentu masih menjadi fokus penelitian. Namun, potensi aplikasi yang luas membuat SMA tetap menjadi area penelitian yang menarik dan berpotensi membentuk masa depan teknologi yang lebih pintar [9].

2.2 *Shape memory alloy Fe-Based*

Fe-based Shape memory alloy (SMA) Fe-based adalah jenis paduan ingat bentuk yang menggunakan besi (Fe) sebagai unsur utamanya. Paduan ingat bentuk berbasis besi (Fe-SMA) adalah jenis material yang telah menarik perhatian karena potensi aplikasinya di berbagai bidang, khususnya dalam konstruksi dan rekayasa struktural. Fe-SMA menunjukkan kekuatan tarik tinggi sebesar 700 MPa, pemulihan bentuk yang sangat baik, dan kekakuan elastis yang tinggi dengan nilai *tensile strain recovery* sebesar 8,1%, sehingga cocok untuk memperkuat material beton bertulang dan balok logam [10]. Khususnya, *SMA Fe-Based* sering menggabungkan besi dengan elemen lain seperti nikel (Ni) atau mangan (Mn) untuk memperoleh sifat transformasi fase yang diperlukan untuk efek ingat bentuk. Penelitian ini membahas komposisi kimia dari empat variasi paduan SMA berbasis besi (Fe) yang dikembangkan dengan menambahkan unsur paduan molibdenum (Mo), nikel (Ni), dan kromium (Cr) secara bertahap. Paduan dasar yang digunakan adalah Fe, yaitu SMA berbasis besi yang dikenal karena kemampuannya menunjukkan efek memori bentuk. Unsur paduan seperti mangan (Mn) dan nikel (Ni) dapat menstabilkan fasa austenit, serta membantu transformasi martensit. Hal ini sangat penting dalam menentukan efektivitas SMA, terutama dalam hal kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi. Sementara itu, silikon (Si) memperkuat paduan dan membantu dalam proses pemulihan bentuk, paduan yang mengandung penambahan silikon juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dari paduan [11]. Kombinasi unsur-unsur paduan ini juga berperan dalam mengoptimalkan transformasi fasa martensit-austenit yang menjadi kunci efek ingat bentuk.

Tabel 2.1 Sifat yang dihasilkan Paduan SMA

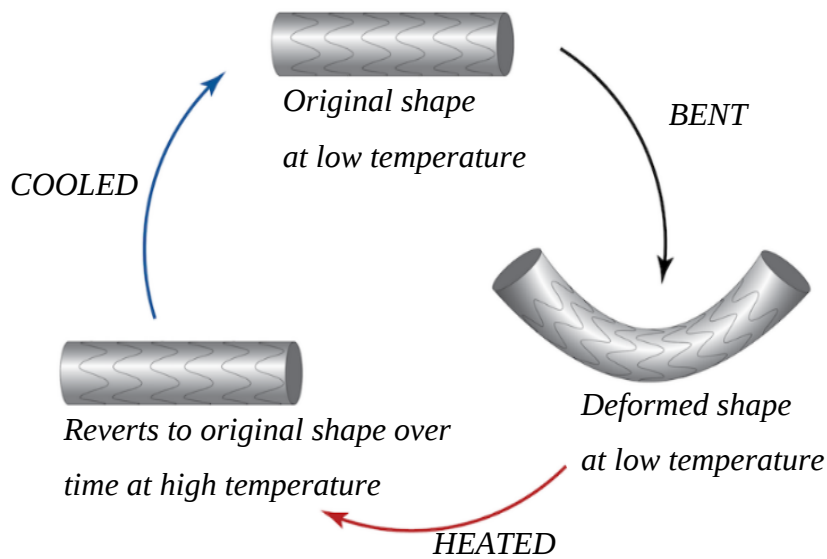
Komposisi	Sifat Yang Dihasilkan	Referensi
Fe-14Mn-3Si-10Cr-23Ni	• <i>Tensile Strain Recovery</i> 8,1% • Kekerasan 284,93 HV.	[2]
Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni	<i>Stress Recovery</i> 4%	[13]
Fe-14Mn-3Si-10Cr-8Ni	• Laju Korosi 0,0544 mpy (SCP) • Laju Korosi 3,919 mpy (NaCl)	[12]
Fe-14Mn-3.Si-2Al	Laju korosi 5,91 mpy	[12]
Fe-15Mn-7Si-9Cr-5Ni	• Laju Korosi 0,0029 mpy (H₂SO₄) • Laju Korosi 0,0023 mpy (NaCl)	[14]

Tabel 2.1 menunjukkan *shape memory alloy* base fe dengan berbagai paduan yang mengasilkan sifat mekanik sesuai yang diinginkan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa molibdenum memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan korosi, khususnya korosi *pitting*, melalui pembentukan lapisan pasif yang protektif di permukaan material [15]. Selain itu, Mo berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik paduan, seperti ketangguhan fraktur dan ketahanan mulur [16]. Ni berperan dalam meningkatkan kekerasan material dan menambah ketahanan terhadap deformasi serta korosi[4]. Kromium merupakan unsur yang banyak digunakan dalam berbagai jenis baja paduan karena

kemampuannya meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi [18]. Penambahan elemen paduan ini juga dapat meningkatkan stabilitas fasa austenit, yang penting untuk memastikan efek memori bentuk pada SMA. Kombinasi optimal Mo, Ni, dan Cr tidak hanya meningkatkan sifat mekanik tetapi juga meningkatkan ketahanan korosi pada material SMA.

2.4 Transformasi Fasa SMA

Transformasi fasa pada SMA adalah aspek penting yang menentukan sifat fungsional unik material ini. Perilaku transformasi fasa pada SMA telah banyak dipelajari, dengan berbagai faktor seperti temperatur, tekanan, mikrostruktur, dan komposisi diketahui memengaruhi proses tersebut. Transformasi fasa ini melibatkan perubahan struktur kristal tanpa melewati proses peleburan. Transformasi martensit dipengaruhi oleh temperatur [20]. Transformasi martensit terjadi ketika material didinginkan di bawah temperatur tertentu temperatur M_s , menyebabkan perubahan dari fasa austenit (fase stabil pada temperatur tinggi) menjadi fasa martensit (fase metastabil pada temperatur rendah). Fasa martensit memiliki struktur kristal berbeda yang memungkinkan terjadinya deformasi pada material. Sebaliknya, transformasi de-martensitik terjadi ketika material dipanaskan di atas temperatur A_s , material kembali ke fasa austenit dari fasa martensit, memungkinkan material kembali ke bentuk semula seperti pada Gambar 2.2. Transformasi martensit ini melibatkan pergeseran atom-atom dalam kisi kristal, atom-atom mengatur ulang posisinya untuk membentuk struktur baru. Pergeseran ini bersifat terkoordinasi, seperti barisan benda yang saling bergerak secara berurutan, menciptakan perubahan struktur kristal secara keseluruhan.



Gambar 2.2 Transformasi Fasa pada *Shape memory alloy* [20].

Saat dilakukan pemanasan, SMA mulai bertransformasi dari fase martensit menjadi austenit. Dua titik temperatur selama transformasi ini adalah “As-austenit temperatur awal pembentukan austenit”, di mana transformasi dimulai dan “Af-austenit-yaitu selesai-temperatur austenit”, di mana transformasi berakhir. Setelah SMA dipanaskan melampaui As, martensit bertransformasi menjadi struktur austenit, yaitu kembali ke bentuk aslinya. Selama proses pendinginan, transformasi mulai berbalik ke martensit pada temperatur awal pembentukan *martensite start* (Ms) dan selesai saat mencapai temperatur akhir pembentukan *martensite finish* (Mf) [21]. Temperatur Ms dan Mf sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia material SMA. Nilai Ms akan mempengaruhi kemampuan SMA untuk mengembalikan bentuknya setelah deformasi. Perhitungan Ms dapat menggunakan persamaan (2.1) untuk mengetahui nilai Ms [22].

$$Ms (^{\circ}C) = 1302 - 42(\%Cr) - 61(\%Ni) - 33(\%Mn) - 28(\%Si) - 1667(\%C + \%N) \dots\dots\dots(2.1)$$

Tabel 2.2 Komposisi SMA terhadap Transformasi Fasa

<i>Shape memory alloy</i>	Ms (°C)	As (°C)	Referensi
Fe-28Mn-6Si	69,85	139,85	[22]
Fe-32Mn-6Si	19,85	114,85	[22]
Fe-11Mn-5Si-12Cr-7Ni	-7,15	95,85	[22]
Fe-13Mn-5Si-12Cr-7Ni	-30,15	93,85	[22]
Fe-24Mn-6Si	118,85	182,85	[23]
Fe-13Mn-5Si-9Cr-7Ni	-20		[24]
Fe-14Mn-6Si-9Cr-5Ni	17,85	119,85	[25]
Fe-15Mn-7Si-9Cr-5Ni	24	112	[14]
Fe-14Mn-5Si-4Al	35,1	150	[26]

Tabel 2.2 memperlihatkan data Ms dan As pada beberapa SMA dengan komposisi yang berbeda, Temperatur Ms adalah titik di mana paduan mulai berubah dari fase austenit, yang stabil pada temperatur tinggi, menjadi fase martensit, yang lebih stabil pada temperatur rendah dan lebih mudah terdeformasi. Transformasi martensitik terjadi ketika paduan didinginkan di bawah temperatur Ms, yang mengarah pada pembentukan martensit, fase yang umumnya lebih stabil pada temperatur rendah. Sebaliknya, saat dipanaskan di atas temperatur As, material akan bertransformasi kembali ke fase austenit, yang stabil pada temperatur tinggi. temperatur transformasi (Ms dan As) dipengaruhi oleh komposisi dan mikrostruktur paduan, serta kondisi pemrosesan yang telah dilalui [27].

Transformasi fasa martensit terbentuk dari austenit melalui proses pendinginan cepat (*quenching*). Ketika baja yang dipanaskan ke temperatur tinggi

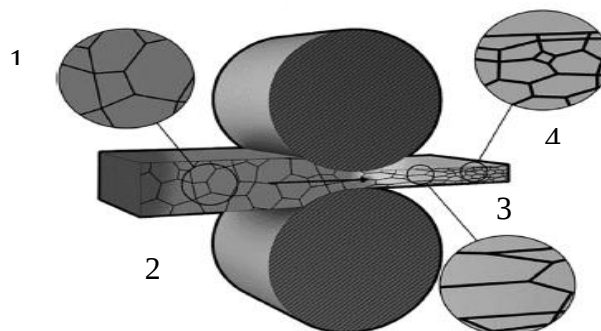
(di atas titik austenit) didinginkan dengan cepat, struktur FCC (*Face-Centered Cubic*) austenit berubah menjadi struktur BCT (*Body-Centered Tetragonal*) martensit. Proses ini terjadi tanpa difusi atom, menghasilkan struktur yang sangat keras namun rapuh. Penguatan karena fasa martensit dalam baja merupakan hasil dari kombinasi beberapa mekanisme penguatan, terutama melalui mekanisme *transformation strengthening* [27].

2.5 Pengaplikasian *Shape memory alloy*

SMA telah dimanfaatkan untuk meningkatkan perilaku struktural seperti *buckling*, getaran, dan kelelahan karena memiliki *shape memory effect* [28]. Selain itu, sifat unik dari SMA juga telah diterapkan dalam kontrol respons seismik, anggota beton *self-pre-stressing*, dan kontrol seismik dinding geser beton, menyoroti potensi material dalam mengurangi dampak peristiwa seismik pada struktur [29]. Di industri *aerospace*, sifat-sifat SMA telah dimanfaatkan untuk mewujudkan struktur adaptif, menunjukkan signifikansinya dalam mencapai solusi inovatif dan adaptif [9]. Sifat-sifat SMA juga telah dimanfaatkan dalam bidang biomedis, di mana efek memori bentuk dan pseudo-elastisitas material telah digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk alat dan implan biomedis [30]. Material ini sedang digencarkan untuk digunakan sebagai material anti gempa karena memiliki superelastisitas. Oleh karena itu potensinya yang sangat luas SMA perlu mengatasi masalah utama yang dihadapi yaitu korosi seperti *pitting* dan *uniform*. Potensi besar dari SMA dalam berbagai bidang membuat pengembangan material ini terus berlanjut untuk meningkatkan kinerjanya. Upaya untuk meningkatkan ketahanan korosi.

2.6 Hot rolling

Hot rolling adalah proses pengolahan logam yang dilakukan pada temperatur tinggi, di mana material logam dipanaskan dan kemudian digulung untuk membentuk lembaran atau produk lainnya. Proses ini biasanya dilakukan pada temperatur di atas titik rekristalisasi material, yang memungkinkan deformasi plastis terjadi tanpa memerlukan banyak energi. Dalam konteks ini, *hot rolling* memiliki beberapa keuntungan, termasuk peningkatan sifat mekanik dan pengurangan ketebalan material, yang sangat penting dalam industri manufaktur dan konstruksi. Pada Gambar 2.3 mekanisme *hot rolling* melibatkan beberapa tahap. Pertama, material logam, biasanya dalam bentuk *slab* atau *billet*, dipanaskan dalam *furnace* hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Setelah itu, material tersebut dimasukkan ke dalam mesin *rolling*, di mana dua rol berputar untuk mengurangi ketebalan material. Selama proses ini, material mengalami deformasi plastis yang signifikan, yang menghasilkan struktur mikro yang lebih halus, mengalami perubahan bentuk pada butirnya sehingga membentuk struktur yang seragam dan meningkatkan kekuatan material [31]. Hal ini menunjukkan bahwa proses *hot rolling* tidak hanya berfungsi untuk membentuk material, tetapi juga untuk meningkatkan performa material dalam aplikasi yang lebih luas, seperti dalam pembuatan pipa baja dan komponen struktural lainnya [32].



Gambar 2.3 Mekanisme Proses *Hot rolling* [32].

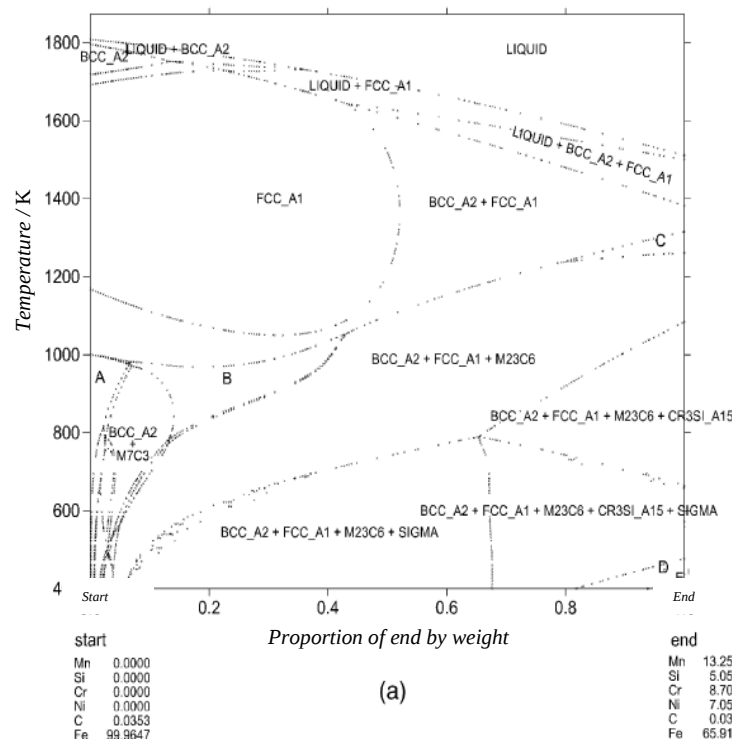
Keterangan:

1. Material awal
2. Material saat ditekan
3. Material setelah *roll*
4. Material akhir

2.7 *Solution treatment*

Solution treatment adalah proses perlakuan panas yang dilakukan untuk mengubah struktur mikro dari paduan logam dengan cara melarutkan fase-fase tertentu ke dalam matriks logam. Proses ini biasanya dilakukan pada temperatur tinggi, di mana paduan dipanaskan hingga mencapai temperatur tertentu, kemudian didinginkan dengan cepat (*quenching*) untuk menghasilkan struktur yang diinginkan. Tujuan utama *solution treatment* adalah meningkatkan sifat mekanik material, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi. Mekanisme dari *solution treatment* melibatkan beberapa langkah. Pertama, paduan logam dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi untuk melarutkan unsur-unsur paduan yang tidak terdistribusi merata. Setelah mencapai temperatur yang diinginkan, paduan tersebut kemudian didinginkan dengan cepat, biasanya menggunakan air atau media pendingin lainnya, untuk mengendalikan fase yang telah terbentuk. Proses pendinginan yang cepat ini mencegah pembentukan kembali fase yang tidak diinginkan, sehingga meningkatkan kekerasan material [33]. Penguatan melalui *solid solution treatment* merupakan metode untuk meningkatkan kekuatan logam dengan mendispersikan atom-atom *solute* ke dalam kisi atom dari logam dasar (*solvent*). Mekanisme penguatannya didasarkan pada interaksi atom-

atom *solute* yang menyebabkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi. Ketika atom paduan ditambahkan ke dalam logam, maka dapat berfungsi sebagai atom interstitial. Penambahan ini menciptakan tegangan kisi di sekitar atom paduan, yang menyebabkan peningkatan kekuatan material [34]. Terdapat mekanisme penguatan presipitat (*Precipitation Hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi, sehingga akan terjadi mekanisme penguatan [35]. Pada *Shape memory alloy* terdapat penambahan kromium dan molibdenum untuk meningkatkan sifat mekanik atau korosinya. Pada SMA terdapat potensi pembentukan presipitasi. Gambar 2.4 menunjukkan bahwa fasa-fasa yang diprediksi terbentuk pada temperatur 1000 °C adalah austenit (FCC), ferit (BCC), dan karbida M₂₃C₆. M₂₃C₆ merupakan senyawa karbida logam dengan symbol M mewakili campuran jenis logam seperti Fe dan Cr [36].



Gambar 2.4. Diagram Keseimbangan Fasa [36].

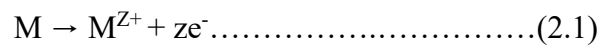
2.8 Korosi

Korosi merupakan degradasi material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dan elektrokimia antara material logam dengan lingkungan sehingga menyebabkan penurunan mutu material logam. Sedangkan reaksi elektrokimia yang dimaksud apabila reaksinya berlangsung dalam suatu elektrolit dan terjadi perpindahan elektron baik pelepasan elektron (reaksi oksidasi) atau penerima elektron (reaksi reduksi) antara material yang digunakan. Dari kedua reaksi ini dapat dibedakan secara sederhana dilihat dari ada atau tidaknya uap air [37]. Korosi merupakan proses alami yang tidak akan pernah berhenti atau akan terus terjadi selama material logam tersebut mengalami kontak dengan lingkungannya. Akan tetapi, proses korosi dapat diminimalisasi, dikendalikan atau diperlambat lajunya dengan memperlambat proses perusakannya [37].

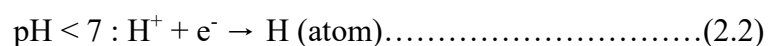
Korosi merupakan masalah utama pada material. Korosi adalah kehancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungannya. Korosi pada logam juga dapat diartikan sebagai reaksi kebalikan dari pemurnian logam. Korosi ini sendiri bisa mengakibatkan menurunnya kualitas baja sehingga mengakibatkan baja menjadi cepat rusak. Korosi didefinisikan sebagai penghancuran paksa zat seperti logam dan bahan bangunan mineral media sekitarnya, yang biasanya cair (agen korosif) [38]. Korosi akan menyebabkan logam kehilangan fungsinya sebagai komponen dalam suatu sistem. Unsur logam yang sudah bereaksi dengan lingkungannya sehingga membentuk komponen baru. Proses biasanya dimulai pada permukaan dan disebabkan oleh reaksi elektrokimia. Kehancuran kemudian dapat menyebar ke bagian dalam materi. Produk korosi *uniform* dan *pitting* berupa karat dengan warna merah bata atau coklat tua. Organisme juga dapat berkontribusi pada

korosi bahan bangunan. selain itu korosi juga dapat diartikan sebagai penurunan mutu logam yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia antara logam dengan lingkungan sekitarnya. Korosi juga dapat jelaskan sebagai penurunan kualitas yang disebabkan oleh reaksi kimia bahan logam dengan unsur-unsur lain yang terdapat di alam [38]. Korosi dapat terjadi apabila terdapat empat elemen di bawah ini [38]:

- a. Anoda, anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion-ion ini mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Selama proses korosi, atom logam di anoda kehilangan elektron dan membentuk ion positif. Anoda adalah area pada logam yang mengalami oksidasi, Anoda bisa berupa bentuk jenis logam apapun apabila nilai potensialnya lebih tinggi. Reaksi pada anoda dapat dituliskan dengan persamaan [39].



- b. Katoda, Katoda adalah tempat di mana elektron-elektron yang dilepaskan oleh anoda akan diterima kembali dan digunakan dalam reaksi kimia lainnya. Katoda adalah area yang bertindak sebagai tempat terjadinya reduksi, yaitu menerima elektron yang dilepaskan dari anoda. Katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun mungkin menderita kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Reaksi yang terjadi pada katoda berupa reaksi reduksi. Material katoda sering dipilih berdasarkan ketahanannya terhadap reaksi reduksi dan Reaksi pada katoda tergantung pada pH larutan [39].



- c. Elektrolit, elektrolit adalah zat yang memungkinkan aliran ion-ion dalam larutan. Dalam konteks korosi, air dengan kontaminan atau larutan garam seperti air laut berperan sebagai elektrolit. Elektrolit memungkinkan aliran ion-ion seperti ion logam yang terlarut dan ion oksigen, yang diperlukan untuk reaksi elektrokimia antara anoda dan katoda. Elektrolit adalah larutan yang mempunyai sifat menghantarkan listrik. Larutan elektrolit menghubungkan aliran listrik antara anoda dan katoda [39].
- d. Anoda dan Katoda harus terhubung secara elektris, Untuk menjaga reaksi elektrokimia terus berlanjut, anoda dan katoda harus terhubung secara elektris. Untuk menjaga reaksi elektrokimia terus berlanjut, anoda dan katoda harus terhubung secara elektris. Antara anoda dan katoda harus ada hubungan listrik agar arus dalam sel korosi dapat mengalir. Hubungan secara fisik tidak diperlukan jika anoda dan katoda merupakan bagian dari logam yang sama [39].

Korosi adalah proses degradasi material akibat reaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya, yang dapat mengurangi daya tahan dan umur pakai material. Salah satu faktor utama yang memengaruhi ketahanan korosi suatu material adalah komposisi unsur-unsur paduannya. Unsur-unsur ini dapat memengaruhi kemampuan material untuk membentuk lapisan pelindung yang mencegah kontak langsung dengan agen korosif, serta memperkuat struktur mikro material untuk menahan reaksi kimia yang merusak. Beberapa unsur, seperti silikon (Si), molibdenum (Mo), nikel (Ni), kromium (Cr), dan mangan (Mn), memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan korosi material. Masing-masing unsur ini

bekerja dengan cara yang berbeda, seperti membentuk lapisan oksida pelindung, meningkatkan stabilitas mikrostruktur, atau mengubah sifat mekanik material, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengurangan laju korosi. Berikut merupakan pengaruh unsur paduan terhadap ketahanan korosi :

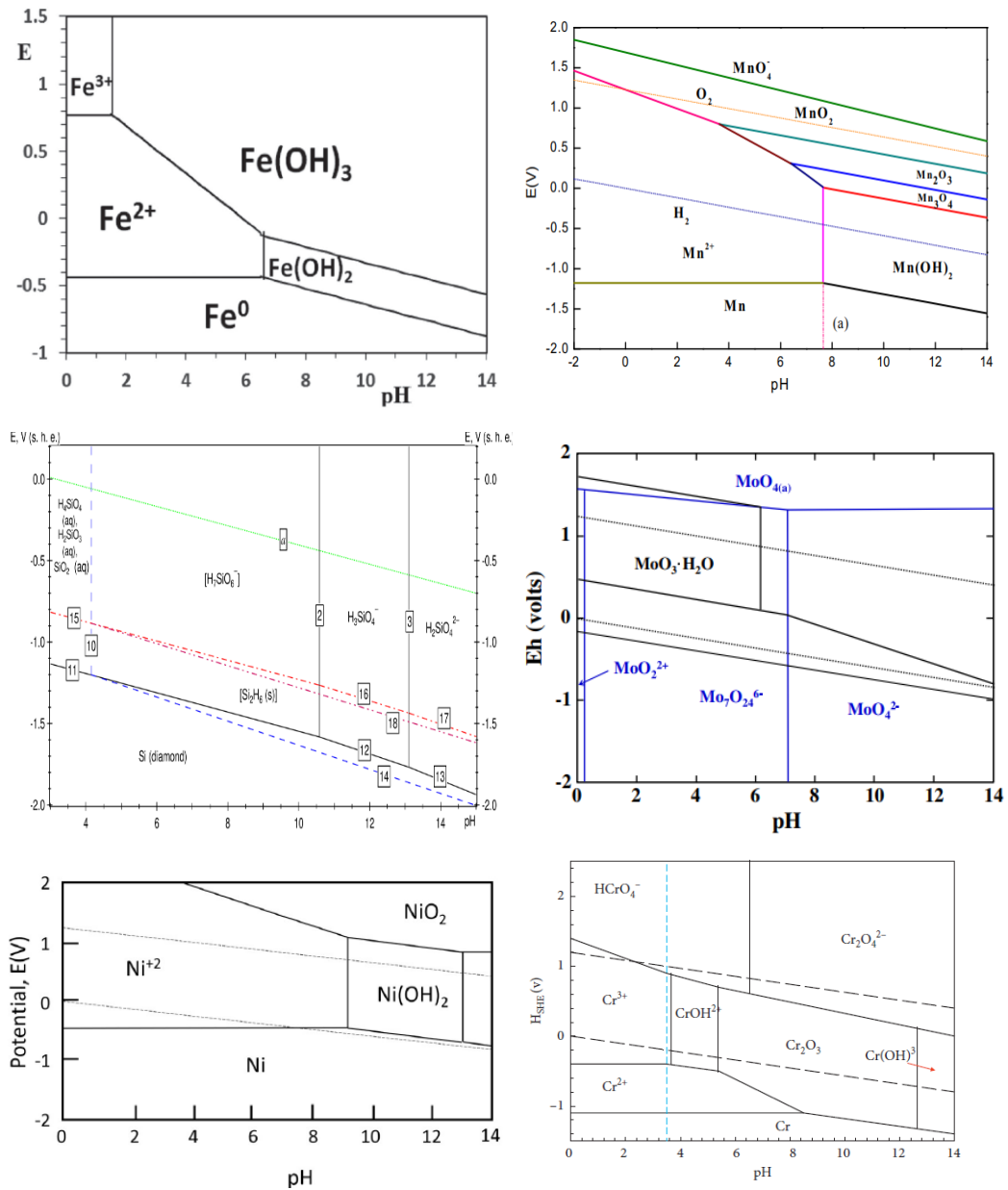
- a. Unsur silikon (Si) memiliki pengaruh signifikan terhadap ketahanan korosi pada berbagai jenis material, terutama pada paduan logam. Silikon juga berfungsi sebagai elemen paduan yang dapat membentuk lapisan oksida pelindung pada permukaan logam [40]. Hal ini menunjukkan bahwa silikon dapat berperan dalam meningkatkan stabilitas lapisan pelindung yang terbentuk, sehingga mengurangi laju korosi [40].
- b. Unsur molybdenum (Mo) memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan korosi, khususnya korosi *pitting*, melalui pembentukan lapisan pasif yang protektif di permukaan material [3]. Molibdenum berperan dalam mengubah struktur mikro paduan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan molibdenum dapat meningkatkan ketahanan korosinya. Dalam paduan berbasis besi, molibdenum dapat mempengaruhi komposisi karbida yang terbentuk. Dengan menggantikan sebagian kromium dalam karbida logam, molibdenum membantu mencegah pembentukan karbida yang tidak diinginkan, yang dapat menjadi titik lemah bagi korosi [42].
- c. Unsur Nikel (Ni) berperan dalam meningkatkan kekerasan material dan menambah ketahanan terhadap deformasi serta korosi [4]. Nikel

berfungsi sebagai unsur penstabil austenit, yang membantu menciptakan struktur mikro yang lebih stabil dan tahan terhadap lingkungan korosif. Paduan dengan kadar nikel yang lebih tinggi cenderung menunjukkan laju korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan paduan yang memiliki kadar nikel rendah atau tanpa nikel sama sekali [43].

- d. Unsur Kromium (Cr) adalah unsur pembentuk ferit dan sumber ketahanan korosi. Kromium bereaksi dengan oksigen untuk membentuk lapisan oksida yang protektif. Lapisan ini berfungsi sebagai penghalang terhadap ion dan zat-zat korosif, sehingga mengurangi laju korosi. Fenomena ini umum terlihat pada baja-baja yang mengandung kromium tinggi [5].
- e. Unsur Mangan (Mn) menambahkan mangan dapat meningkatkan stabilitas fase austenit, yang berkontribusi pada pengurangan laju korosi. Mangan berfungsi untuk memperkuat struktur mikro paduan, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Paduan Fe-Mn-Si-Cr-Ni yang mengandung mangan menunjukkan peningkatan ketahanan korosi, yang dihubungkan dengan pembentukan lapisan oksida pelindung yang lebih efektif pada permukaan paduan [45].

Masing-masing unsur memiliki diagram pourbaix, diagram pourbaix menunjukkan stabilitas unsur-unsur dalam larutan berdasarkan pH dan potensial elektroda. Diagram ini membantu memahami kondisi di mana unsur berada dalam bentuk stabil, seperti logam, ion, atau senyawa oksida, yang mempengaruhi

ketahanan korosi material terhadap lingkungan asam, netral, atau basa seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.5.



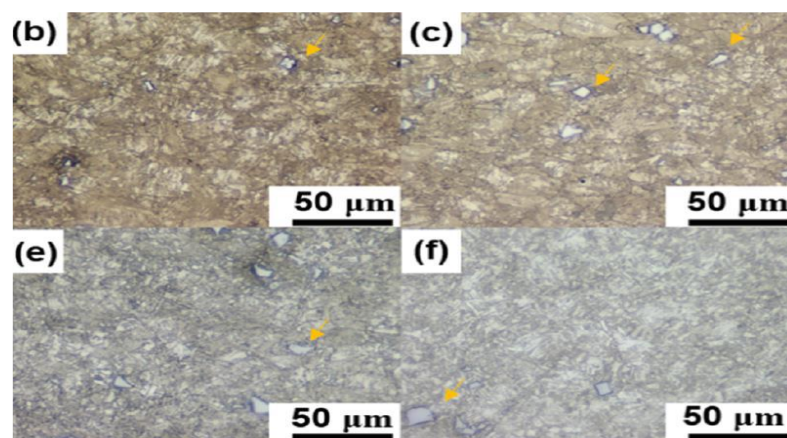
Gambar 2.5 Diagram Pourbaix Unsur Paduan

2.9 Metalografi

Metalografi merupakan analisis dari suatu struktur dan komponen fisis suatu logam atau paduan yang dapat dilihat secara langsung secara visual maupun dengan

bantuan Metode yang digunakan dalam metalografi meliputi preparasi sampel, pengamatan dengan mikroskop optik atau elektron, serta analisis menggunakan peralatan seperti spektroskopi dan difraksi sinar-X. Analisis metalografi merupakan pengujian yang cukup penting dalam proses fabrikasi karena dapat digunakan untuk menentukan fasa yang terbentuk, ukuran butir, dan berbagai karakteristik fisis lainnya [45].

Dengan menguji dan mengamati mikrostruktur suatu material, maka performa material tersebut dapat dilihat. Metalografi digunakan di semua tahap selama pembuatan material tersebut dari mulai pengembangan, produksi, *manufacturing process control*, dan bahkan analisis kegagalan logam [46]. Metalografi biasanya dilakukan dengan alat mikroskop optik yang sudah dihubungkan dengan komputer yang dilengkapi dengan sistem analisis gambar yang akurat [45]. Gambar 2.6 menunjukkan hasil pengamatan metalografi SMA Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Ti dengan mikroskop optik perbesaran 50x setelah dilakukan proses homogenisasi 1250 °C selama 6 jam, dilanjutkan dengan *Hot Rolled* pada 1000°C hingga ketebalan 5 mm dan kemudian di *cold rolled* pada temperatur ruang dengan 10% reduksi ketebalan.



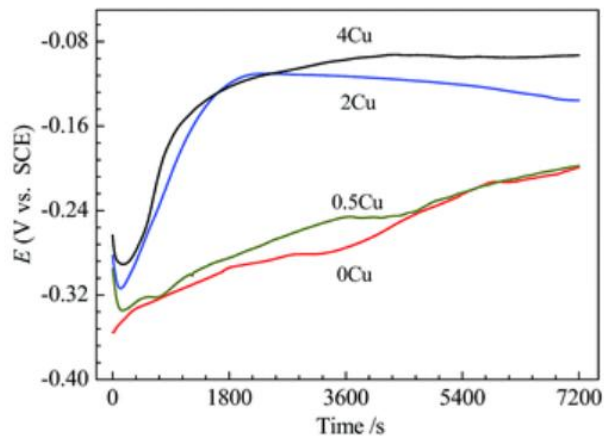
Gambar 2.6 Hasil Pengamatan Metalografi SMA

Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Ti [47]

2.10 Pengujian *Open Circuit Potential* (OCP)

Open Circuit Potential (OCP) merupakan sebuah metode atau teknik yang digunakan untuk monitoring proteksi katodik pada material yang akan dianalisis laju korosi yang disesuaikan dengan kriteria standar NACE SP0290. Standar ini menjelaskan bahwa baja dalam kondisi terproteksi dapat dicapai ketika potential decay minimum 100 mV selama periode antara 4 dan 24 jam. Untuk menghindari terjadinya penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*) potensial pada saat “off” (“instant-off” voltage) lebih besar dari -950 mV (SCE). Arus DC yang berasal dari power supply di nyalakan pada masing-masing arus proteksi (100, 150 dan 200 mA/m²) selama 30 menit. Setelah itu *power supply* di matikan untuk menguji potential decay dengan menggunakan teknik OCP menggunakan alat *Gamry Instruments* seri G750. Sampel dianggap bisa digunakan pada analisis laju korosi jika hasil kurva OCP-nya stabil. Kondisi stabil hasil pengujian sampel akan ditunjukkan dengan kurva pada monitor computer [48]. Pengujian korosi menggunakan metode *Open Circuit Potential* (OCP) merupakan teknik yang umum digunakan untuk mengevaluasi perilaku korosi material dalam lingkungan tertentu. OCP mengukur potensi elektroda dalam kondisi terbuka, yaitu tanpa arus yang mengalir, sehingga memberikan informasi tentang kecenderungan material untuk terkorosi. Grafik yang dihasilkan dari pengujian menunjukkan perubahan potensi seiring waktu, yang dapat memberikan stabilitas dan ketahanan korosi material yang diuji. Potensial OCP yang tinggi biasanya memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dari paduan, karena menunjukkan kecenderungan material untuk teroksidasi atau melepaskan komponen terlarut. Gambar 2.7 menunjukkan grafik *Open Circuit Potential* (OCP) perubahan potensial elektroda material terhadap

elektroda referensi seiring waktu tanpa arus eksternal. Peningkatan OCP positif menandakan material lebih pasif dan tahan korosi, sedangkan penurunan OCP negatif menunjukkan korosi aktif. OCP yang stabil menunjukkan keseimbangan material dengan larutan elektrolit, dan puncak atau lembah dalam grafik bisa menunjukkan perubahan dalam tingkat korosi.

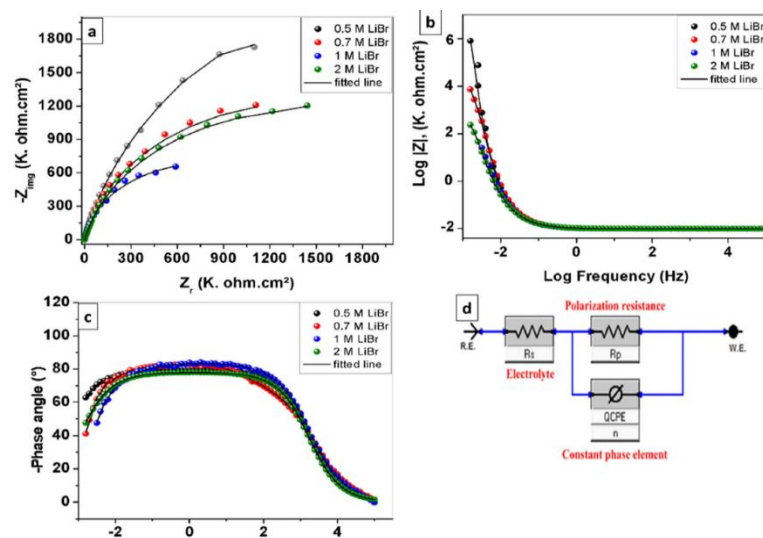


Gambar 2.7 Grafik Open Circuit Potensial [49].

2.11 Pengujian *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) adalah suatu metode yang digunakan untuk mengetahui perilaku korosi pada suatu elektroda dengan mengamati karakterisasinya. Karakterisasi elektroda yang dimaksud adalah ketahanan polarisasi (R_p), laju korosi (CR) dan mekanisme elektrokimia. Penggunaan metode ini berdasarkan model dari proses korosi oleh sirkuit elektrik. Metode *electrochemical impedance spectroscopy* adalah metode yang menggunakan prinsip polarisasi sangat berguna untuk mengetahui karakteristik logam yang terkorosi. Metode ini menganalisis respon suatu elektroda terkorosi terhadap suatu sinyal potensial AC pada amplitudo rendah (± 10 mV) dari rentang frekuensi yang sangat lebar. Gambar 2.8 menjelaskan tentang data impedansi yang diperoleh dapat direpresentasikan secara grafis dalam plot *Nyquist* dan Bode. Pada

gambar a kurva *Nyquist* menunjukkan hubungan antara resistansi dan kapasitansi sistem., gambar b kurva bode menampilkan magnitudo dan fase impedansi terhadap frekuensi, gambar c kurva phase menunjukkan perubahan sudut fase impedansi terhadap frekuensi, gambar d digunakan untuk memodelkan impedansi sistem elektrokimia yang melibatkan resistansi, kapasitas, dan induktansi, menggambarkan proses elektrokimia pada antarmuka elektrode [50].

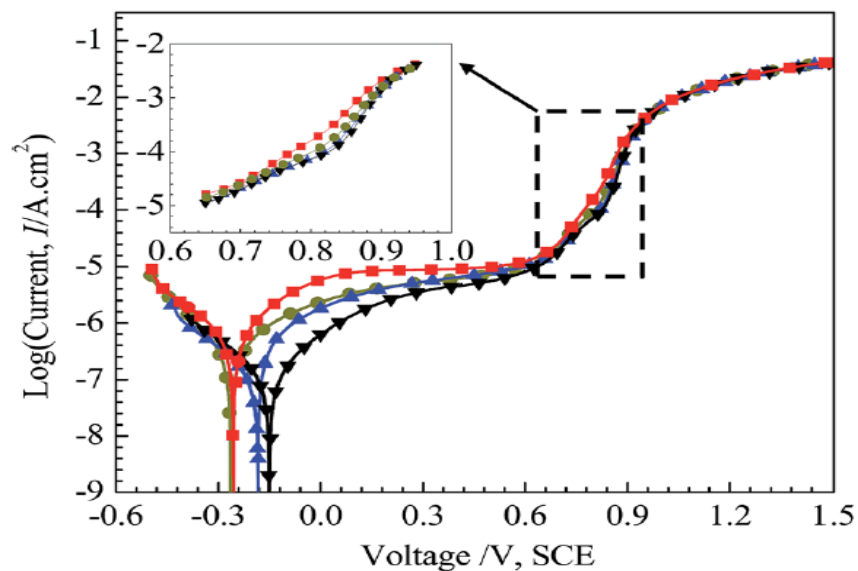


Gambar 2.8 (a) Plot *Nyquist* (b, c) Bode dan phase (d) rangkaian ekivalen yang digunakan dalam proses *fitting* [50].

2.12 Pengujian *Potentiodynamic*

Uji polarisasi potensiodinamik adalah salah satu teknik yang banyak digunakan untuk mengukur korosi pada suatu benda. Teknik ini melibatkan pengukuran perbedaan potensial antara dua elektroda, yaitu elektroda referensi dan elektroda kerja, serta pengukuran arus yang dihasilkan. Arus yang diukur memberikan indikasi tentang seberapa cepat korosi terjadi pada elektroda kerja, biasanya dalam satuan arus per satuan luas, yang disebut sebagai rapat arus. Metode ini berguna untuk menentukan laju korosi aktif/pasif pada potensial yang berbeda

dan membantu dalam memahami proses yang terjadi pada permukaan logam [51]. Gambar 2.9 menunjukkan. ketika logam terpapar pada medium korosif, reaksi reduksi dan oksidasi terjadi, membentuk mikrosel katodik dan anodik pada logam. Proses ini menghasilkan arus dari kedua mikrosel, yang mengakibatkan terbentuknya potensial korosi, E_{corr} , di mana potensial anoda dan katoda saling menyamakan. Parameter elektrokimia yang diukur melalui polarisasi ini mencakup E_{corr} (potensial korosi), I_{corr} (Arus Korosi), CR (Laju Korosi), dan Epasivasi yang terbentuk [49].



Gambar 2.9 Grafik Potensiodinamik [49].

2.13 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan (*hardness test*) adalah suatu proses yang bertujuan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap deformasi pada daerah lokal atau permukaan material yaitu deformasi plastis. Deformasi plastis adalah suatu keadaan dari material yang ketika diberikan gaya maka material tidak akan kembali ke bentuk semula [52]. Pengujian kekerasan atau hardness test merupakan salah satu cara untuk mengetahui kekuatan atau ketahanan suatu material. Harga kekerasan

bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan. Secara garis besar terdapat tiga metode pengujian kekerasan logam yaitu penekanan, goresan, dan dinamik. Proses pengujian yang mudah dan cepat dalam memperoleh angka kekerasan yaitu dengan metode penekanan. Dikenal ada tiga jenis metode penekanan, yaitu: Rockwell, Brinnel, Vickers yang masing-masing memiliki perbedaan dalam cara menentukan angka kekerasannya [53].

Metode vickers sebagai pengujian kekerasan material dilakukan dengan cara menekan material atau spesimen uji dengan menggunakan indentor piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136° . Pengujian ini dapat digunakan untuk menguji hampir semua jenis logam mulai dari yang lunak hingga yang keras. Pengujian kekerasan pada material mikro dapat dilakukan menggunakan vickers. Rentang beban uji yang digunakan pada pengujian kekerasan vickers berkisar antara 1 kgf sampaj 120 kgf, dan beban uji yang umum digunakan adalah 5, 10, 30 dan 50 kgf. Sedangkan waktu penerapan beban uji (*dwell time*) standar biasanya dilaksanakan selama 10 -15 detik. Di dalam pengujian kekerasan vickers perlu diperhatikan mengenai jarak minimal dari titik pusat jejak ke bagian pinggir spesimen, di mana menurut standar ASTM adalah sebesar 2,5 kali diagonal jejak. Jarak minimal antara jejak-jejak yang berdekatan juga 2,5 kali diagonal jejak. Sedangkan menurut standar ISO, jarak minimal dari titik pusat jejak ke bagian pinggir benda uji adalah 2,5 d untuk baja dan paduan tembaga dan 3 d untuk logam-logam ringan, sementara jarak minimal antara jejak adalah 3 d untuk baja dan paduan tembaga, dan 6 d untuk logam-logam ringan [54].