

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini didasarkan pada keterkaitan teoritis dan rujukan dari penelitian sebelumnya. Di bawah ini disajikan ringkasan umum studi terdahulu, beserta kesamaan dan perbedaan yang memperkuat temuan penelitian ini. Selain itu, kajian terhadap penelitian sebelumnya juga bertujuan untuk menemukan celah dalam penelitian sebelumnya sehingga penelitian saat ini memiliki tujuan yang jelas dan tujuan yang jelas.

Penelitian berjudul analisa pengaruh *stress relief annealing* terhadap perubahan sifat mekanik baja tahan karat tipe SUS 304 yang dilakukan oleh Rahmat Pemilu Harahap dan Basuki Rahmat (2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu yang digunakan pada baja tahan karat tipe SUS 304 memengaruhi sifat mekaniknya. Nilai tegangan *ultimate stress* dan *yield stress* menurun seiring dengan peningkatan suhu selama proses pengelasan dan tingkat kekerasan material juga mengalami penurunan.

Penelitian oleh Prihanto Trihutomo (2022) dengan judul pengaruh proses pengelasan pada hasil pengelasan terhadap sifat mekanik baja karbon rendah yang dilakukan dengan metode eksperimental. Penelitian ini menganalisis bagaimana nilai kekerasan baja St.42 berubah setelah perlakuan panas dengan suhu kekerasan rata-rata 5000°C. Nilai kekerasan tertinggi mencapai 5000°C, yaitu 170,03 HVN dan nilai kekerasan tidak banyak berubah sampai 6000°C, tetapi nilai kekerasan turun drastis pada 7000°C yaitu 125,13 HVN. Hal ini menunjukkan bahwa proses rekristalisasi diikuti oleh pertumbuhan butiran.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan dengan metode eksperimental oleh Andri Rudiyanto, Ratna Dewi, dan Viktor Naubnome (2022) dengan judul analisis proses stress relieving annealing terhadap sambungan las GMAW material baja SS 400. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan baku dasar yang berada di zona terpengaruh panas (HAZ) memiliki nilai kekerasan tertinggi. Di sisi lain, bagian yang telah mengalami perlakuan panas dan berada di area logam las memiliki nilai kekerasan terendah. Karena fasa ferrite meningkat selama proses annealing untuk menghilangkan tegangan, kekerasan baja turun. Ini membuat baja kurang rentan terhadap kerusakan atau keraputan.

Penelitian dengan judul "A Study on Annealing Temperature in FEM Simulation of Residual Stress in SUS316 Weld" dilakukan oleh Lina Yu, Kenji Suzuki, Hiroyuki Hirata, Kazutoshi Nishimoto, dan Kazuyoshi Saida (2025) dengan menggunakan metode eksperimental dan simulasi. Studi ini menemukan bahwa fenomena annealing yang disebabkan oleh siklus panas selama proses pengelasan pada baja tahan karat austenitik SUS316 memang terjadi dan harus dimasukkan ke dalam simulasi elemen hingga (FEM) untuk memberikan prediksi tegangan sisa yang akurat.

Penelitian terdahulu telah memberikan berbagai analisis terkait pengaruh PWHT khususnya *stress relief annealing*, namun masih terdapat beberapa *research gap* yang perlu diisi. Sebagian besar studi hanya berfokus pada pengujian sifat mekanik material setelah perlakuan *stress relief annealing*. Penelitian sebelumnya pada umumnya hanya mengukur parameter seperti kekuatan tarik, *yeild strength* dan kekerasan untuk mengetahui perubahan material setelah proses *stress relief annealing*. Padahal tegangan sisa dan distorsi adalah salah satu komponen yang mempengaruhi kualitas struktur hasil sebuah pengelasan. Penelitian sebelumnya cenderung kurang memanfaatkan simulasi numerik dengan metode elemen hingga (FEM) untuk mempelajari distribusi suhu, perilaku plastis selama pengelasan,

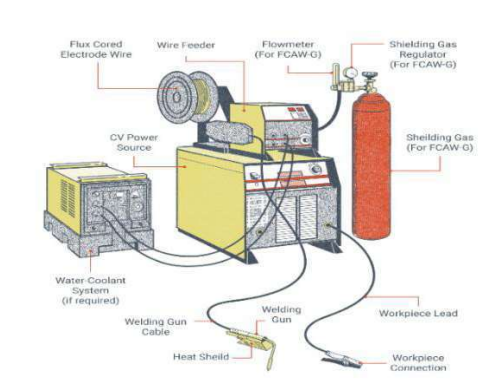
serta pelepasan tegangan sisa setelah proses *annealing*. Padahal, penggunaan FEM dapat memberikan prediksi yang lebih tepat terhadap tegangan sisa dan distorsi sekaligus memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang perilaku material yang sulit diperoleh melalui metode eksperimen.

2.2 Pengertian Pengelasan

Proses pengelasan secara luas diterapkan di berbagai bidang industri, seperti sektor otomotif dan industri perkapalan. Pengelasan memiliki arti teknik penyambungan yang dilakukan dengan mencairkan sebagian logam dasar dan logam pengisi tanpa melibatkan tekanan ataupun penambahan logam lain, sehingga terbentuk sambungan yang bersifat kontinu. Secara sederhana, proses las dapat diartikan sebagai penyambungan lokal menggunakan energi panas sebagai sumber utama pencairannya (Handoyo Rinto, 2020). Pengelasan berdasarkan *American Welding Society* (1989) merupakan proses penyambungan logam maupun non-logam melalui pemanasan hingga mencapai suhu tertentu, yang dapat dilakukan dengan atau tanpa tekanan serta dapat menggunakan atau tanpa memanfaatkan logam pengisi. Sementara itu, *British Standards Institution* (1983) mendefinisikan pengelasan sebagai proses penyatuan dua atau lebih material dalam kondisi plastis atau cair dengan memanfaatkan panas, tekanan, atau kombinasi keduanya dengan kemungkinan penggunaan logam pengisi yang memiliki titik lebur setara dengan logam induk (Ghony, 2022). Mutu sambungan las berpengaruh langsung terhadap kekuatan dan keamanan konstruksi, sehingga pengaturan parameter pengelasan menjadi faktor utama dalam memperoleh kualitas hasil yang optimal (Kesse, n.d.).

2.3 Pengelasan Flux Cored Arc Welding (FCAW)

Las FCAW (*flux-cored arc welding*) adalah jenis las busur listrik yang memanfaatkan kawat berinti fluks sebagai elektroda sekaligus bahan pengisi. Elektroda ini berbentuk gulungan kawat yang digerakkan secara otomatis oleh motor listrik selama proses pengelasan. Pada proses pengelasan FCAW gas argon berfungsi sebagai pelindung untuk menjaga kestabilan busur. Proses FCAW bersifat otomatis karena memanfaatkan *wire roll* sebagai sumber elektroda yang melelehkan logam induk. Dibandingkan metode pengelasan konvensional, FCAW menawarkan keunggulan berupa kontrol yang lebih baik dan kekuatan tarik hasil las yang sesuai untuk baja berkekuatan rendah (S. S. Picanussa Jovancko et al., 2024).



Gambar 2. 1 Pengelasan FCAW

Sumber: (<https://openwa.pressbooks.pub/welding1/chapter/wa9-2/>)

Variasi pengelasan FCAW yang berbeda memiliki tujuan yang berbeda tergantung pada teknik gas pelindung, yaitu:

a) FCAW-G (Gas Shielded)

Pengelasan dual shield memanfaatkan kawat berinti fluks yang dikombinasikan dengan gas pelindung eksternal untuk memberikan perlindungan ganda pada area pengelasan. Metode ini memungkinkan peningkatan laju deposisi material serta menghasilkan penetrasi yang lebih optimal, terutama saat digunakan pada logam dengan ketebalan tinggi. Proses (FCAW-G) atau berpelindung gas membutuhkan shielding gas yang berasal dari sumber luar (biasanya CO₂ atau campuran argon-CO₂).

b) FCAW-SS (Self-Shielded)

Proses pengelasan self-shielded memanfaatkan gas pelindung yang dihasilkan dari inti fluks serta lapisan terak yang terbentuk selama pengelasan. Metode ini umumnya diterapkan pada pekerjaan di luar ruangan, terutama pada kondisi lingkungan yang sulit dikendalikan atau sulit diprediksi.

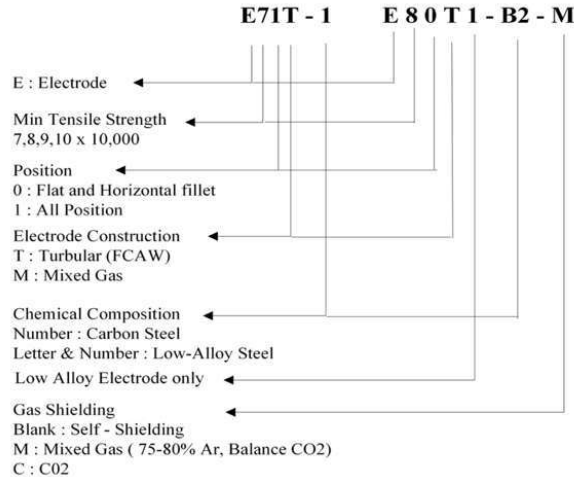
2.3.1 Klasifikasi Elektroda Pengelasan FCAW

Las FCAW merupakan proses pengelasan listrik yang memanfaatkan kawat elektroda sebagai bahan pengisi, yang secara otomatis dan kontinu disuplai ke dalam busur listrik yang muncul antara ujung elektroda dan logam dasar. Elektroda dalam metode ini berbentuk tabung logam tipis berongga yang diisi dengan fluks sesuai dengan jenis dan fungsi pengelasannya (Utama et al., n.d.). Beberapa varian kawat elektroda mampu melindungi seluruh proses secara mandiri, yaitu fluksnya dapat menjaga logam cair dari pencemaran udara eksternal selama pengelasan berlangsung dan menghasilkan terak pelindung selama pembekuan. Akan tetapi terdapat varian kawat elektroda yang memerlukan gas pelindung tambahan, seperti gas Karbon Dioksida (CO₂) atau kombinasi gas Argon dengan CO₂. Terdapat beberapa sistem klasifikasi elektroda yang digunakan saat ini, termasuk yang dari *American Welding Society (AWS)*, *Australian Standard (AS)*, JIS, DIN, dan lainnya. Salah satu contoh sistem klasifikasi untuk elektroda las flux core adalah berdasarkan *Australian Standard AS 2203*.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Elektorda Pengelasan FCAW

Klasifikasi AWS	Arus Pengelasan	Gas Pelindung	Pas Tunggal/Ganda
EXXT-1	DCEP	CO ₂	Ganda
EXXT-2	DCEP	CO ₂	Tunggal
EXXT-3	DCEP	Tidak Ada	Tunggal
EXXT-4	DCEP	Tidak Ada	Ganda
EXXT-5	DCEP	CO ₂	Ganda
EXXT-6	DCEN	Tidak Ada	Ganda
EXXT-7	DCEN	Tidak Ada	Ganda
EXXT-8	DCEN	Tidak Ada	Ganda
EXXT-9	DCEN	Tidak Ada	Ganda
EXXT-10	DCEN	Tidak Ada	Tunggal
EXXT-11	DCEN	Tidak Ada	Ganda
EXXT-12	DCEN	Tidak Ada	Ganda

EXXT-13	DCEN	CO2	Tunggal
EXXT-GS	Tidak Ditemukan	Tidak Ditemukan	Ganda



Gambar 2. 2 Kode Elektroda FCAW

(Sumber: WS A5.20/A5.20M:2021)

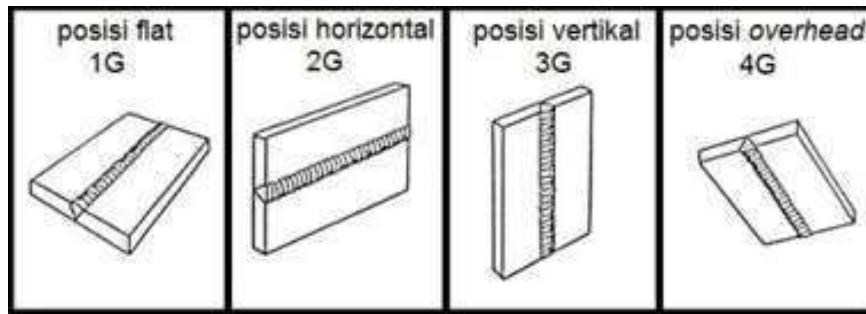
2.3.2 Parameter Pengelasan FCAW

Untuk mencapai hasil las yang optimal, ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan selama proses pengelasan. Berikut adalah penjelasan beberapa faktor tersebut:

- a) Kekuatan arus pengelasan
Pengelasan FCAW umumnya memerlukan arus yang lebih tinggi. Tujuannya adalah untuk mempercepat laju pemberian kawat. Jika laju pemberian dikurangi, maka arus pengelasan yang diperlukan juga akan berkurang secara otomatis.
- b) Tegangan busur las
Tingkat tegangan busur dipengaruhi oleh panjang busur dan tipe elektroda yang digunakan. Tegangan yang dibutuhkan sebanding dengan panjang busur. Busur listrik yang terlalu panjang tidak diinginkan karena stabilitasnya mudah terganggu, sehingga hasil pengelasan menjadi tidak merata.
- c) Kecepatan pengelasan
Laju pengelasan bergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, material yang dilas, bentuk sambungan, akurasi ukuran, dan faktor lainnya. Laju pengelasan sebanding dengan arus pengelasan.
- d) Polaritas listrik
Karakteristik mesin las FCAW berdasarkan arusnya dibagi menjadi tiga jenis, yaitu las arus searah atau *direct current* (DC), mesin las arus bolak-balik atau *alternating current* (AC), dan mesin las arus ganda yang dapat digunakan untuk pengelasan dengan arus searah (DC) serta pengelasan dengan arus bolak-balik (AC).

2.3.3 Posisi Pengelasan

Posisi pengelasan merupakan pengaturan letak dan arah gerakan elektroda selama proses pengelasan berlangsung. Penentuan posisi ini umumnya disesuaikan dengan lokasi kampuh atau celah pada spesimen yang akan dilas. Secara umum, posisi pengelasan meliputi posisi bawah tangan (*down hand*), mendatar (*horizontal*), tegak (*vertical*), dan di atas kepala (*overhead*) (Kusnadi et al., 2024).



Gambar 2. 3 Posisi Pengelasan

(Sumber: <https://www.pengelasan.net/posisi-pengelasan/>)

2.3.4 Jenis Kampuh

Kampuh las adalah bagian dari logam induk yang akan dimasukkan logam las. Ini terdiri dari kubangan las sebelum diisi dengan logam las. Logam las yang mencair akan mengisi kampuh, atau kubangan, alur yang telah dibuat. Selain itu, penggunaan sudut kampuh yang salah dapat memicu kegagalan sambungan las. Kegagalan ini disebabkan oleh tegangan sisa yang dihasilkan oleh masukan panas selama proses pengelasan. Karena itu kampuh las memainkan peran penting dalam meningkatkan kekuatan sambungan las, pemilihan sudut kampuh las memengaruhi proses pengelasan (Hanan Setia Abadi & Subagiyo, 2024). Kampuh V (single bevel) dan X (double bevel) adalah dua jenis kampuh yang paling sering digunakan dalam pengelasan. Kampuh V biasanya digunakan pada material dengan ketebalan sedang karena lebih mudah dibuat dan memerlukan volume logam pengisi yang lebih sedikit.

Single-V groove weld (2)
Butt joint (B)

Welding Process	Joint Designation	Base Metal Thickness (U - unlimited)		Groove Preparation		Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW	Notes
		T ₁	T ₂	Root Opening Root Face Groove Angle	Tolerances As Detailed (see 5.4.1.1) As Fit-Up (see 5.4.1.5)			
SMAW	B-U2	U	—	R = 0 to 1/8 f = 0 to 1/8 α = 60°	+1/16, -0 +1/16, -0 +10°, -0°	All	—	d, e, j
GMAW FCAW	B-U2-GF	U	—	R = 0 to 1/8 f = 0 to 1/8 α = 60°	+1/16, -0 +1/16, -0 +10°, -0°	All	Not required	a, d, j
SAW	B-L2c-S	Over 1/2 to 1	—	R = 0 f = 1/4 max. α = 60°	R = ±0 f = +0, -f α = +10°, -0°	F	—	d, j
		Over 1 to 1-1/2	—	R = 0 f = 1/2 max. α = 60°	+1/16, -0 ±1/16 +10°, -5°			
		Over 1-1/2 to 2	—	R = 0 f = 5/8 max. α = 60°				

Gambar 2. 4 Kampuh V

(Sumber: AWS D1.1, 2020)

2.4 Plat ABS Grade A

Plat baja ABS Grade A merupakan jenis pelat baja yang telah disertifikasi oleh *American Bureau of Shipping* (ABS). Baja ABS Grade A memiliki karakteristik mekanik, seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan nilai perpanjangan yang ditetapkan, harus memenuhi persyaratan mutu yang ketat terkait komposisi kimia dan struktur mikro sesuai dengan standar yang berlaku. Plat ini umumnya digunakan untuk pembuatan bodi kapal, struktur bawah kapal, dan komponen lainnya yang terkena tekanan tinggi dan kondisi laut yang keras. Komposisi kimia dari ABS Grade A terdiri dari baja karbon rendah dengan kandungan karbon maksimal sekitar 0,21%, yang memberikan sifat keuletan yang baik. Selain itu, ABS Grade A mengandung elemen paduan seperti mangan (0,80–1,00%), yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap keausan (Gnee Steel, n.d., 2007). Kandungan fosfor dan sulfur dalam baja ABS Grade A dibatasi pada tingkat yang sangat rendah untuk menjaga kekuatan las dan menghindari pembentukan retakan pada sambungan las. Berikut adalah komposisi utama baja ABS Grade A.

Tabel 2. 2 Komposisi Material

Chemical Composition	%
Cmax	0,21
Simax	0,50
Mnmax	2,5 x C
Pmax	0,035
Smax	0,035

Tabel 2. 3 Sifat Mekanik Material

Mechanical Composition	(N/mm ²)
Yield Strengh	235
Tensile Stenght	400-520

2.5 Fenomena Termal pada Proses Pengelasan

Fenomena termal dalam proses pengelasan secara umum mengacu pada rangkaian peristiwa perpindahan panas yang bersifat transien (berubah terhadap waktu) akibat masuknya energi panas yang terpusat dari busur las ke dalam material. Proses ini bersifat kompleks karena melibatkan perubahan temperatur yang sangat tinggi dalam waktu singkat serta terjadi pada area yang terlokalisasi.

- a) **Distribusi Temperatur**
Distribusi suhu yang tidak seragam terjadi selama proses pemanasan, pendinginan, dan pengelasan. Suhu pada bagian benda kerja yang terkena pengelasan meningkat akibat panas yang dihasilkan selama pengelasan. Karena perubahan suhu berlangsung sangat cepat, terjadi perbedaan suhu antara area yang dekat dengan sambungan las dan area yang lebih jauh. Panas dari sambungan las kemudian mengalir menuju bagian yang suhu-nya lebih rendah di sekitar area pengelasan.
- b) **Masukan Panas (*Heat Input*)**
Masukan panas (*heat input*) adalah sejumlah energi termal yang terbentuk selama proses pengelasan berlangsung. Pencairan logam induk maupun logam pengisi membutuhkan energi yang memadai, dan besarnya energi ini ditentukan oleh jenis serta parameter proses pengelasan yang digunakan (Sution & Agus Jayatun, 2024). Jumlah panas yang masuk (*heat input*) selama proses pengelasan sangat berpengaruh terhadap struktur fasa, ketangguhan material, laju pendinginan, dan

tingkat distorsi. Komposisi kimia di zona las (*weld area*) dan tingkat masukan panas secara langsung mempengaruhi struktur mikro dan kekuatan sambungan las. Besar masukan panas menentukan laju pendinginan las, sehingga berpengaruh pada perubahan struktur mikro di area pengelasan. Parameter *heat input* pengelasan dan jenis gas pelindung juga akan memengaruhi struktur mikro, bentuk dendrit, serta tekstur las yang berdampak pada kekuatan sambungan hasil pengelasan pada kondisi kriogenik.

$$HI = \eta \frac{Tegangan\ Las\ (V) \times Arus\ Las\ (I)}{Kecepatan\ Pengelasan\ (V)} \quad (2. 1)$$

Dimana:

- HI : Heat Input (kJ/mm)
- η : Koefisien Efisien Pengelasan
- V : Voltase (V)
- I : Arus Busur (A)
- V : Kecepatan Las (mm/min)

c) Flux Panas (*Heat Flux*)

Istilah *heat flux* mengacu pada kecepatan pergerakan energi panas per satuan area dalam satuan waktu tertentu. *Heat flux* ini memegang peran penting dalam mempengaruhi perpindahan panas dan pola distribusi temperatur selama proses pengelasan berlangsung.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2. 2)$$

Dimana:

- q_1 : Heat flux pada elemen (J/mm^2)
- q_e : Heat flux yang dihasilkan elektroda (mm^2)
- A_1 : Luas permukaan elemen (mm^2)
- A_f : Luas flux yang dihasilkan elektroda (mm^2)

2.6 Distorsi dan Tegangan Sisa

1. Distorsi

Perubahan bentuk yang dikenal sebagai distorsi terjadi setelah proses pengelasan, sehingga geometri benda kerja menyimpang dari desain awal, ukuran menjadi kurang presisi, dan memerlukan biaya perbaikan yang relatif besar (Kusnadi et al., 2024b). Distorsi pada proses pengelasan salah satu permasalahan utama dalam industri manufaktur dan konstruksi logam. Fenomena ini terjadi akibat distribusi pemanasan dan pendinginan yang tidak seragam selama proses penyambungan, sehingga menimbulkan perubahan bentuk permanen pada material, khususnya di daerah sambungan las. Jenis-jenis distorsi pada pengelasan:

a) Distorsi Melintang

Pada saat pengelasan berlangsung, bagian material yang dipanaskan akan mengalami pemuaian sehingga salah satu ujung bertambah panjang. Selanjutnya, ketika proses pendinginan terjadi, bagian logam tersebut mengalami penyusutan dan saling menarik satu sama lain, yang dapat menyebabkan.

b) Distorsi Memanjang

Setelah proses pendinginan, hasil las mengalami penyusutan sehingga terjadi pemendekan sepanjang arah garis pengelasan.

- c) Distorsi Rotasi
Jenis distorsi ini disebabkan oleh pemuaian akibat penyebaran panas yang terjadi pada bidang pelat. Distorsi yang muncul pada kondisi tersebut umumnya berupa distorsi sudut.
- e) Distorsi Sudut
Fenomena tersebut terjadi akibat distribusi panas yang tidak seragam pada benda kerja, sehingga menimbulkan perubahan atau pergeseran sudut.
- f) Bending
Adalah distorsi yang muncul pada garis las serta garis melintang pengelasan.
- g) Buckling
Distorsi ini muncul ketika pelat tipis mengalami kompresi akibat panas.

2. Tegangan Sisa

Tegangan sisa merupakan gaya elastis yang mampu meningkatkan jarak antar atom tanpa tekanan dari luar. Sebuah material dapat mengalami tegangan sisa karena deformasi plastisnya yang tidak merata sebagai akibat dari perlakuan panas yang tidak seragam atau kecepatan pendinginan yang berbeda selama proses pengelasan. Tegangan sisa memang sulit untuk diukur secara langsung, tetapi dapat menjadi sangat berbahaya ketika bekerja bersamaan dengan tegangan layanan saat beban diberikan. Tingkat tegangan sisa yang tinggi dapat menurunkan ketahanan fatik, mengurangi kekuatan tarik, serta melemahkan ketahanan terhadap korosi (Radaj, 1992). Penyebab timbulnya tegangan sisa adalah:

- a) Tegangan sisa yang berasal dari tegangan termal, yang dihasilkan dari proses seperti pengelasan dan perlakuan panas.
- b) Tegangan sisa yang terjadi karena perubahan fasa, seperti yang terjadi pada baja karbon.
- c) Tegangan sisa yang disebabkan oleh deformasi plastis yang tidak seragam yang disebabkan oleh gaya mekanis. Ini terjadi dalam pekerjaan mesin dingin seperti penempaan, pengerolan, atau pembentukan logam, atau dalam jenis pekerjaan mesin lainnya.

Distribusi tegangan sisa pada proses pengelasan dapat dihitung menggunakan metode elemen hingga dengan memperhitungkan distribusi temperatur dan tegangan melalui analisis struktural.

$$\sigma = D\varepsilon[\alpha\Delta T - \alpha\Delta T]^2 \quad (2.3)$$

$$D = \frac{E}{(1-\eta^2)} \begin{vmatrix} 1 & \eta & 0 \\ \eta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\eta}{2} \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

Dimana:

- E : Modulus elastisitas bahan
- A : Angka muai bahan
- N : Jumlah kolom dan barismatrik yang bergantung total elemen
- D : Matriks konstanta bergantung pada bahan
- ΔT : Perbedaan suhu

2.7 Struktur Mikro pada Pengelasan

Daerah sambungan las secara umum terdiri atas tiga zona, yaitu daerah logam las (*weld metal*), daerah terpengaruh panas (*heat affected zone/HAZ*), dan logam induk yang tidak mengalami pengaruh panas. Logam las memiliki komposisi kimia yang merupakan hasil pencampuran antara logam induk dan bahan tambah dari elektroda, sehingga menghasilkan struktur yang bersifat tidak homogen. Struktur mikro pada daerah logam las umumnya ditandai dengan butir-butir memanjang (*columnar grains*) yang tumbuh dari logam induk menuju pusat logam las selama proses pembekuan. Menurut (D. J. Abson & R. J. Pargeter, 1986) Struktur mikro dari las biasanya kombinasi dari struktur mikro berikut ini:

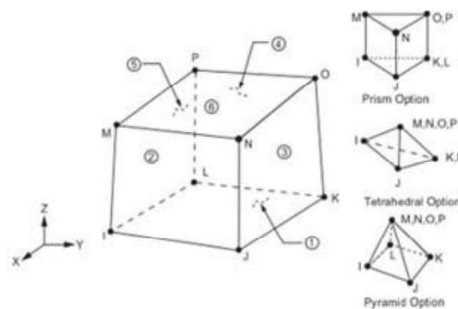
1. Ferit Batas Butir
Ferit batas butir umumnya mulai terbentuk selama transformasi fase γ menjadi α , dan proses ini biasanya terjadi di sepanjang batas butir austenit pada rentang suhu sekitar 1000 °C hingga 650 °C.
2. Ferit Widmanstätten
Struktur mikro ini muncul pada rentang suhu sekitar 750 °C hingga 650 °C dan berkembang di sepanjang batas butir austenit. Ferit Widmanstätten berukuran relatif besar dengan orientasi butir yang hampir seragam, sehingga memudahkan retak untuk merambat melalui material.
3. Ferit Acicular
Ferit acicular tersusun dari butir-butir halus yang tumbuh di dalam butir (intragranular) dengan orientasi yang tidak beraturan. Dengan arah butir yang saling acak, jalur perambatan retak menjadi berliku dan terhambat, sehingga material dengan struktur ferit acicular menunjukkan ketangguhan paling besar dibandingkan tipe struktur mikro lainnya. Fase ini umumnya mulai muncul ketika proses pendinginan melewati suhu kurang lebih 650 °C.
4. Bainit
Bainit adalah fase ferit yang tumbuh dari batas butir austenit dan berbentuk pelat-pelat sejajar, dengan karbida Fe₃C yang muncul di antara pelat-pelat tersebut atau berada di dalamnya. Struktur ini memiliki tingkat kekerasan lebih tinggi daripada ferit biasa, namun masih lebih rendah jika dibandingkan dengan martensit.
5. Martensite
Martensit terbentuk ketika proses pengelasan mengalami laju pendinginan yang sangat cepat. Fase ini bersifat sangat keras namun juga sangat getas, sehingga nilai kekuatan tarik dan ketangguhannya menjadi rendah.

2.8 Finited Element Method (FEM)

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk memperoleh solusi pendekatan dari persamaan diferensial parsial PDE (*Partial Differential Equation*) (Amal Amrullah, 2020). Pendekatan metode elemen hingga didasarkan pada pemanfaatan data di titik-titik simpul (*node*). Dalam tahap pendiskritan (*discretization*), sistem yang kompleks dipecah menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung. Setiap bagian tersebut kemudian dianalisis secara terpisah, dan hasilnya digabungkan kembali untuk memperoleh solusi keseluruhan dari sistem yang ditinjau (Sutekat, 2018). Secara garis besar, langkah-langkah dalam merumuskan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

a) Pemilihan dan Pembagian Jenis Elemen

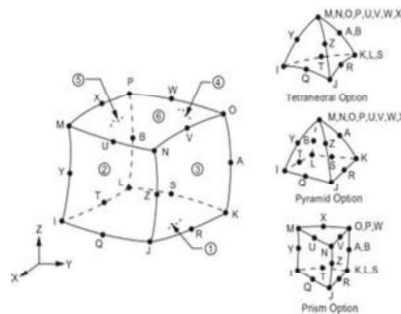
Pilihan jenis elemen adalah langkah yang sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap tingkat keakuratan hasil analisis. Jenis komponen perlu disesuaikan dengan karakteristik dan tujuan analisis agar solusi yang diperoleh mendekati kondisi nyata. Kedekatan hasil analisis dengan kondisi sebenarnya juga dipengaruhi oleh proses pembagian, yang digunakan dalam pemodelan dikenal sebagai *meshing*. Ukuran elemen yang digunakan saat *meshing* harus mampu merepresentasikan kondisi struktur sesungguhnya. Namun, semakin kecil ukuran mesh, semakin besar kebutuhan kapasitas hard disk dan memori karena jumlah data yang diolah software meningkat sehingga proses komputasi menjadi lebih berat. Jenis elemen yang dipakai dalam analisis termal adalah SOLID70 dan SOLID90. Elemen SOLID70 terdiri dari delapan node, di mana setiap node memiliki satu derajat kebebasan berupa temperatur. Elemen ini mampu menghantarkan panas sehingga dapat dimanfaatkan untuk analisis *termal transient* maupun *steady-state*. SOLID70 dapat dibentuk menjadi elemen prisma, tetrahedral, maupun piramida, dan diartikan dengan delapan node serta sifat material ortotropik. Nilai massa jenis dan kalor jenis dapat diabaikan saat melakukan analisis *steady-state*. Elemen ini juga dapat digunakan untuk analisis struktural karena konduksi panasnya.



Gambar 2. 5 Solid70

Sumber: (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

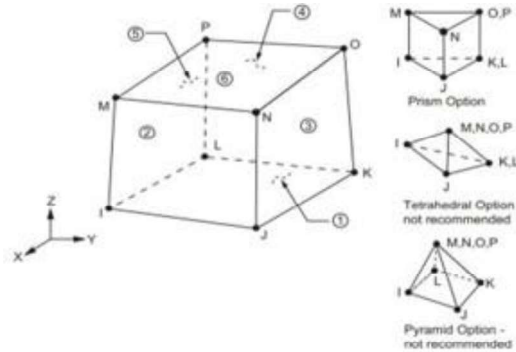
Elemen SOLID90 pada dasarnya mempunyai karakteristik serupa dengan SOLID70, namun perbedaannya terletak pada jumlah nodenya, di mana SOLID90 memiliki 20 node dengan derajat kebebasan yang lebih banyak.



Gambar 2. 6 Solid90

Sumber: (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Elemen SOLID90 pada dasarnya mempunyai karakteristik serupa dengan SOLID70, namun perbedaannya terletak pada jumlah nodenya, di mana SOLID90 memiliki 20 Jenis elemen yang dipakai dalam analisis struktural adalah SOLID185 dan SOLID186. Elemen SOLID185 terdiri atas delapan node, di mana setiap node memiliki tiga derajat kebebasan ini mampu mengalami translasi pada arah sumbu x dan y. Selain itu, SOLID185 mempunyai kemampuan untuk memodelkan plastisitas, elastisitas tinggi, serta defleksi dan regangan yang besar. Elemen ini juga dapat dibentuk menjadi elemen prisma, tetrahedral, maupun piramida node dengan derajat kebebasan yang lebih banyak.



Gambar 2. 7 Solid185

Sumber: (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

b) Menentukan Fungsi Displacement

Nilai parameter pada node elemen digunakan untuk menentukan fungsi perpindahan untuk setiap elemen. Fungsi ini umumnya dinyatakan dalam bentuk polinomial, baik linear, kuadratik, kubik, maupun menggunakan deret trigonometri.

c) Definisi Hubungan Antara Regangan-Displacement dan Tegangan-Regangan

Dimungkinkan untuk menyatakan hubungan regangan yang timbul akibat perpindahan yang telah ditetapkan pada langkah sebelumnya. Persamaan elemen hingga kemudian dibangun dengan memanfaatkan hubungan antara tegangan-regangan dan perpindahan-regangan. Untuk kasus deformasi satu dimensi sepanjang sumbu x, persamaan berikut digunakan untuk menyatakan regangan ϵ_x sebagai fungsi dari perpindahan.

$$\sigma = D \epsilon^{el} \quad (2. 5)$$

$$\epsilon = \epsilon^{el} + \epsilon^{t\eta} \quad (2. 6)$$

Dimana:

- D : Kekakuan material
- ϵ : Regangan total
- $\epsilon^{t\eta}$: Regangan termal
- ϵ^{el} : Regangan elastis

Vector thermal strain untuk isotropik medium bergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{t\eta} = \Delta T \alpha (T) \quad (2.7)$$

ΔT adalah perbedaan antara suhu referensi dengan suhu sebenarnya.

d) Matriks Kekakuan Elemen dan Persamaan Elemen Ditentukan

Dua metode berbeda dapat digunakan untuk menentukan persamaan elemen dan matriks kekakuan: metode keseimbangan langsung atau metode energi yang bergantung pada prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.8)$$

Dimana:

- U : Internal strain energi (internal work)
- P : External work
- δ : Virtual operator

Secara umum, proses analisis menggunakan Metode Elemen Hingga terdiri atas tiga proses utama, yaitu *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*.

- a) Tahap *pre-processing* mencakup pendefinisian model analisis, seperti penentuan domain geometri, jenis elemen yang digunakan, sifat material, kondisi batas (*boundary conditions*), serta parameter pendukung lainnya. Tahap ini memiliki peranan yang sangat penting, karena ketepatan hasil analisis sangat bergantung pada ketepatan perumusan masalah dan pemodelan awal yang dilakukan.
- b) Tahap *solving* merupakan proses penyelesaian numerik, di mana perangkat lunak menyusun sistem persamaan aljabar dalam bentuk matriks dan menghitung variabel medan utama yang belum diketahui. Nilai-nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung besaran turunan lainnya melalui proses substitusi, seperti gaya reaksi, tegangan pada elemen, serta distribusi aliran panas.
- c) Tahap *post-processing* meliputi analisis dan evaluasi hasil perhitungan yang diperoleh. Pada tahap ini dilakukan interpretasi hasil, antara lain dengan mengurutkan atau memvisualisasikan tegangan berdasarkan besarnya, memeriksa keseimbangan struktur, menghitung faktor keamanan, menampilkan perubahan bentuk struktur, menganimasikan respons dinamis model, serta menyajikan distribusi temperatur dalam bentuk kontur warna.