

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TEORI PENGELASAN

2.1.1 DEFINISI PENGELASAN

Pengelasan adalah proses penyambungan logam atau non logam yang dilakukan dengan memanaskan material yang akan disambung hingga temperatur pengelasan yang dilakukan dengan atau tanpa menggunakan tekanan (*pressure*), dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi (*filler*) (AWS, 1989).

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua atau lebih material dengan menggunakan panas, tekanan, atau kombinasi keduanya, sehingga menghasilkan ikatan yang permanen. Menurut *American Welding Society* (AWS), pengelasan adalah proses yang dilakukan untuk menyatukan material, umumnya logam, dengan cara mencairkan bagian yang akan disambung dan menambahkan material pengisi jika diperlukan (AWS, 2010). Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai metode, tergantung pada jenis material, ketebalan, dan aplikasi yang diinginkan. Pengelasan memiliki peranan penting dalam berbagai industri, mulai dari konstruksi, otomotif, hingga manufaktur.

Pengelasan (*welding*) adalah penyambungan logam yang menggunakan energi panas dengan mencairkan logam induk dan logam isi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam penambah sehingga menghasilkan sambungan yang kontinyu (Wiryosumarto, 1996). Pengelasan busur logam manual (MMA atau SMAW) pertama kali ditemukan oleh seorang ahli di Rusia pada tahun 1888. Pertama kali ditemukan dengan elektroda tidak menggunakan lapisan flux untuk memberikan perlindungan dari udara luar. Pengembangan elektroda berlapis terjadi di awal tahun 1900-an, Kjellberg ditemukan di Amerika dan metode las busur diperkenalkan di Amerika (AWS).

Definisi pengelasan menurut DIN (*Deutsche Industrie Norman*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, pengelasan adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Dalam proses penyambungan ini adakalanya disertai dengan tekanan dan material tambahan (*filler material*).

Menurut (Howard, 1981) pengelasan merupakan teknik menyatukan logam dengan cara memanaskannya hingga meleleh dan menyatu, dengan atau tanpa tekanan dan bahan pengisi tambahan. Pengelasan didefinisikan oleh DIN (*Deutsches Institut für Normung*), 1910 sebagai proses penyambungan permanen antara dua atau lebih bagian material melalui pengaplikasian panas dan atau tekanan, dengan atau tanpa penggunaan bahan tambah (*filler metal*). Definisi ini menekankan pentingnya pengaplikasian panas dan tekanan sebagai elemen kunci dalam mencapai sambungan yang diinginkan. Hal yang sama dijelaskan dalam standar AWS A3.0M/A3.0 (2020).

2.1.2 JENIS JENIS PENGELASAN

Terdapat berbagai jenis pengelasan yang umum digunakan, antara lain pengelasan listrik, pengelasan gas, pengelasan busur, dan pengelasan laser. Pengelasan busur listrik, seperti SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), adalah salah satu metode yang paling banyak digunakan karena kesederhanaannya dan fleksibilitasnya dalam berbagai aplikasi. Selain itu, pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) dan TIG (*Tungsten Inert Gas*) juga populer dalam industri modern. Setiap jenis pengelasan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, yang mempengaruhi pemilihan metode berdasarkan kebutuhan spesifik proyek dan material yang digunakan (Miller Electric, 2018).

Pengelasan Busur Listrik (SMAW) atau *Shield Metal Arc Welding* (SMAW) merupakan proses pengelasan yang memanfaatkan panas dari busur listrik antara elektroda terbungkus dengan logam induk (Sonawan & Suratman, 2006). Proses ini paling banyak digunakan karena

fleksibilitasnya dalam penggunaan dan biaya operasional yang relatif rendah.

Definisi dari pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) atau pengelasan busur logam (GMAW) sebagai proses pengelasan dengan menggunakan gas pelindung dengan elektroda gulungan (*filler metal*) yang fed secara mekanis secara terus menerus (Sunaryo, 2008). Metode ini memiliki keunggulan dalam hal kecepatan pengelasan dan kualitas hasil las yang baik.

Submerged Arc Welding (SAW) atau pengelasan busur rendam (SAW) merupakan salah satu jenis pengelasan dengan proses pengelasan secara otomatis yang menggunakan serbuk flux untuk melindungi area pengelasan (Harsono & wiryosumanto, 2004). Metode ini sangat efektif untuk pengelasan material tebal dengan produktivitas yang tinggi.

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) atau pengelasan busur tungsten gas GTAW atau yang lebih sering disebut las TIG adalah proses pengelasan yang mana pengelasan tersebut menggunakan elektroda tungsten non consumable dengan metode gas pelindung (Daryanto, 2012). Metode ini menghasilkan sambungan las berkualitas tinggi dan sering digunakan untuk mengelas material tipis.

2.2 PROSES PENGELASAN METODE SMAW

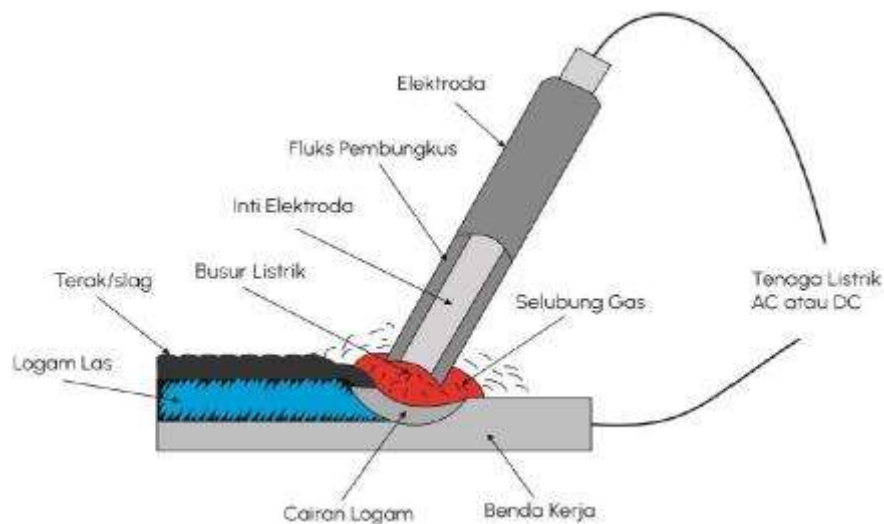
2.2.1 PRINSIP KERJA PENGELASAN SMAW

Pengelasan SMAW yang berasal dari kata (*Shielded Metal Arc Welding*) adalah proses pengelasan yang menggunakan panas untuk mencairkan material dasar atau logam induk dan elektroda atau kawat las berselaput. Panas tersebut ditimbulkan oleh lonjakan ion listrik yang terjadi antara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan benda kerja yang dilas). Panas yang timbul dari lonjakan ion listrik ini besarnya dapat mencapai 4000° sampai 4500° Celcius. Las busur listrik elektroda terlindung atau lebih dikenal dengan *Shielded Metal Arc Welding*

(SMAW) merupakan pengelasan menggunakan busur nyala listrik sebagai panas pencair logam. Busur listrik terbentuk diantara elektroda terlindung dan logam induk seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Oleh karena itu panas dari busur listrik pada logam induk dan ujung elektroda mencair dan membeku bersamaan. (Wiryosumarto, 2004).

Proses pengelasan SMAW bekerja dengan menggunakan busur listrik untuk mencairkan elektroda yang dilapisi fluks, sehingga menghasilkan logam cair yang menyatu dengan material dasar. Ketika elektroda dipanaskan, fluks pada permukaan elektroda akan meleleh dan membentuk gas pelindung yang melindungi area pengelasan dari kontaminasi udara.

Proses ini dapat dilakukan di berbagai posisi, termasuk posisi vertikal, yang sering kali menjadi tantangan tersendiri bagi para *welder* (Miller, 2015). Kelebihan dari metode ini adalah kemampuannya untuk digunakan dalam kondisi lapangan yang sulit, serta biaya peralatan yang relatif rendah.



Gambar 1 Proses Pengelasan SMAW
(Aminatul Hamidah, 2022)

Menurut penelitian yang dilakukan las busur berselaput atau biasa disebut dengan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) adalah proses pengelasan menggunakan panas yang muncul diantara benda kerja dan busur las berselaput dengan elektroda konsumtif sehingga menghasilkan

sambungan las. Pengelasan logam dengan cara meleburkan ujung benda kerja atau logam induk dan elektroda (Djarmiko, 2020). Proses peleburan tersebut terjadi akibat timbulnya panas yang dihasilkan dari hubungan pendek arus listrik antara benda kerja dengan ujung elektroda.

Proses terjadinya pengelasan ini karena adanya kontak antara ujung elektroda dan material dasar sehingga terjadi hubungan pendek dan saat terjadi hubungan pendek tersebut seorang *welder* harus menarik elektroda sehingga terbentuk busur listrik (*arc*) yaitu lompatan ion yang menimbulkan panas. Panas akan mencairkan elektroda atau logam pengisi dan material dasar sehingga cairan elektroda dan material dasar akan menyatu membentuk logam lasan (*weld metal*).

2.2.2 PERALATAN YANG DIGUNAKAN

Peralatan yang digunakan dalam pengelasan SMAW meliputi mesin las (trafo las), Busur elektroda, dan perlengkapan pelindung diri (APD). Mesin las atau Trafo las berfungsi untuk menyediakan arus listrik yang diperlukan untuk menciptakan busur listrik, sedangkan busur elektroda berfungsi sebagai sumber material pengisi. Selain itu, perlengkapan pelindung seperti helm las, sarung tangan (*apron*) dan pakaian lapangan *waerpack* sangat penting untuk melindungi welder dari percikan api dan radiasi yang dihasilkan selama proses pengelasan. Menurut data dari *Welding Equipment Manufacturers*, penggunaan peralatan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil pengelasan (*Welding Equipment Manufacturers*, 2019).

2.2.3 PARAMETER PENGELASAN SMAW

Parameter pengelasan adalah acuan yang mempengaruhi dari hasil pengelasan, baik dari hasil pengujian mekanis maupun inspeksi visual. Jika pemilihan parameter las kurang tepat maka dapat mengakibatkan terjadinya cacat las dan kekuatan mekanik hasil dari pengelasan yang kurang dari syarat keberterimaan yang ditentukan oleh standar atau kode pengelasan, berikut penjelasan dari parameter pengelasan. Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) merupakan salah satu proses

pengelasan yang cukup banyak digunakan dalam industri manufaktur dan konstruksi karena dinilai fleksibilitas dan efisiensi dalam hitungan biayanya (Wiryosumarto & Okumura, 2004). Dalam proses pengelasan SMAW, terdapat beberapa parameter kritis yang mempengaruhi kualitas hasil pengelasan.

Setiap proses pengelasan SMAW, ada baiknya seorang *welder* mengetahui tentang parameter setiap melakukan pengelasan agar hasil dari pengelasan lebih optimal. Adapun beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan parameter pengelasan, yaitu:

a. Arus Listrik Pengelasan

Besar kecilnya arus yang digunakan bergantung dari bahan, posisi pengelasan, elektroda yang digunakan, geometri sambungan, dan diameter inti elektroda. Jika daerah pengelasan berdimensi besar atau luas maka kapasitas panas yang dibutuhkan arus las yang besar dan memungkinkan untuk proses pemanasan tambahan untuk menghindari retak saat proses pengelasan dan retak setelah proses pengelasan, untuk proses pengelasan baja paduan, dimana daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dapat mengeras dengan durasi yang cepat, maka harus mengusahakan pendinginan bertahap atau secara perlahan, untuk pengelasan baja paduan diperlukan arus yang besar dan mungkin akan melakukan pemanasan terlebih dahulu atau *Pre Heating*.

Penggunaan arus pengelasan yang terlalu besar dapat menyebabkan:

1. Lebar cairan deposit busur elektroda terlalu besar.
2. Dapat menimbulkan cacat pada hasil pengelasan (*undercut*).
3. Busur elektroda mengalami pemanasan yang berlebih sehingga merusak fluks atau selaput pelindung inti bahan tambah.
4. Perlindungan saat pencairan inti bahan tambah kurang maksimal, dapat menyebabkan hasil pengelasan berpori (*porosity*).
5. Setelah melakukan proses pengelasan terak atau slag sukar untuk

dibersihkan.

Penggunaan arus pengelasan yang terlalu kecil dapat menyebabkan:

1. Start penyalaan awal busur las (*arc*) sulit menyala serta bahan induk dan busur elektroda saling menempel atau lengket.
6. Nyala api busur las tidak stabil mengakibatkan bahan induk dan busur elektroda tidak fusi atau melebur dengan sempurna.
7. Menyebabkan peleburan bahan induk dan busur elektroda yang digunakan tidak sempurna, dapat menyebabkan cacat las (*slag inclusion*) atau kerak yang terjebak.

b. Tegangan Pengelasan

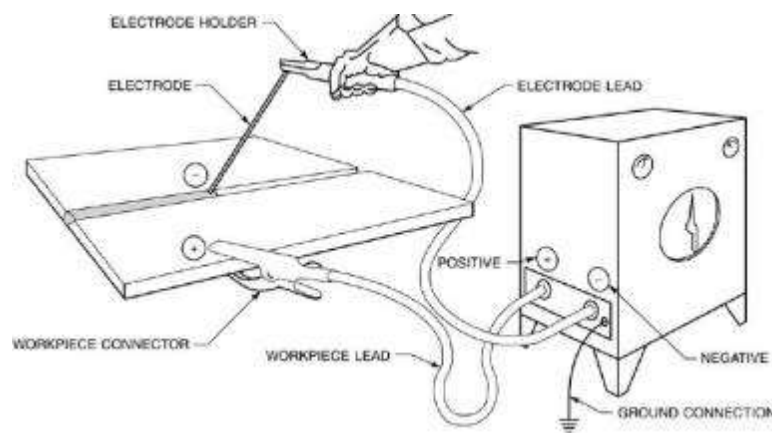
Tegangan busur las yang dibutuhkan tergantung pada ukuran busur yang digunakan dan jenis busur elektroda yang dihendaki. Tinggi tegangan busur pada busur elektroda yang sejenis berbanding lurus dengan busur. Pemakaian busur listrik yang terlalu panjang tidak dikehendaki karena stabilitasnya mudah terganggu sehingga hasil las tidak rata. Tingginya tegangan tidak mempengaruhi kecepatan pencairan, sehingga tegangan yang terlalu tinggi hanya membuang energi listrik (Wiryosumarto dan Okumura, 2000).

Kestabilan tegangan sangat menentukan kualitas pengelasan, bagi *welder* yang berpengalaman kestabilan dapat didengar dari suara selama proses pengelasan. Menjaga kestabilan jalan atau *travel speed* busur yang tetap merupakan kesulitan dalam pelaksanaan pengelasan las busur listrik. Tegangan busur las memiliki korelasi langsung dengan panjang busur yang terbentuk antara ujung elektroda dan permukaan logam induk. tegangan ideal pengelasan berkisar antara 17-30 volt, dimana variasi tegangan mempengaruhi lebar permukaan las dan konsumsi elektroda. Stabilitas busur yang optimal dapat dicapai dengan mengatur tegangan sesuai dengan karakteristik elektroda yang digunakan. (Arifin S, 2011)

c. Polaritas Pengelasan

Pemilihan polaritas ini mempengaruhi terhadap konsentrasi panas yang dihasilkan yang lebih besar terjadi pada elektroda atau pada benda kerja. Untuk konsentrasi panas setiap proses pengelasan mempunyai hasil dan karakteristik yang berbeda beda. Apabila material dasar atau material yang akan dilas disambung pada dengan kutub positif (+) dan elektroda disambungkan dengan kutub (-) pada mesin las DC maka disebut pengelasan polaritas lurus atau (*Direct Current Straight Polarity*) DCSP namun familiar menyebutnya dengan polaritas (*Direct Current Elektrode Negative*) DCEN. Saat busur listrik bergerak dari elektroda ke material induk sehingga tumbukan berada di material dasar yang berakibat 2/3 panas beradadi material dasar dan 1/3 panas berada di elektroda.

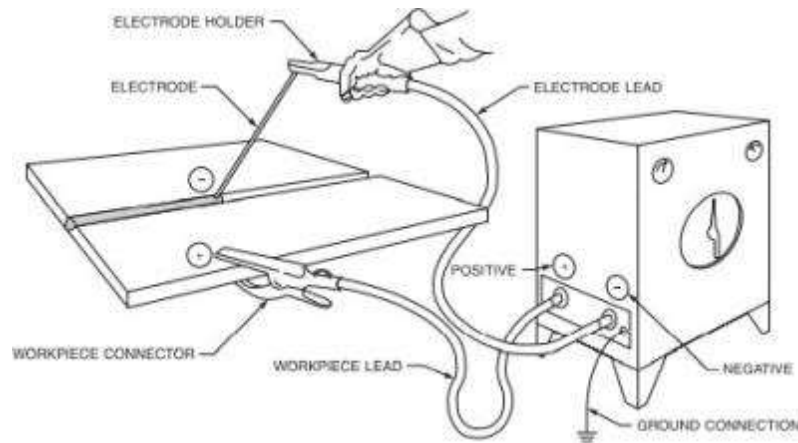
Cara ini akan menghasilkan pencairan material dasar lebih banyak elektrodanya sehingga hasil las mempunyai penetrasi yang dalam dan baik digunakan pada pengelasan yang lambat serta manik las yang sempit dan untuk pelat yang tebal.



Gambar 2 Polaritas Lurus Direct Current Elektrode Negative (DCEN).
(AWS A3.0M, 2020).

Polaritas terbalik atau *Direct Current Elektrode Positif* (DCEP) merupakan proses pengelasan dengan kutub negatif (-) mesin las dihubungkan dengan material dasar, dan kutub positif (+) dihubungkan dengan elektroda. Proses hubungan ini, 1/3 bagian panas pengelasan terjadi di benda kerja sedangkan 2/3 bagian memanaskan elektroda. Polaritas ini menghasilkan pencairan elektroda lebih banyak sehingga

penetrasi dangkal dan sangat cocok untuk pengelasan *filler* dan *capping*.



Gambar 3 Polaritas Lurus Direct Current Elektode Positive (DCEP)
(AWS A3.0M, 2020)

d. Kecepatan pengelasan (*Welding Speed*)

Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan induk, posisi sambungan, ketelitian sambungan, dan bergantung pada keterampilan juru las (*welder*). Sedangkan besarnya arus yang diperlukan tergantung dari bahan dan ukuran lasan, selebihnya sama dengan kecepatan pengelasan. Kecepatan las tidak ada hubungannya dengan tegangan las tetapi berbanding lurus dengan arus las, karena pengelasan yang cepat memerlukan arus las yang tinggi.

Kecepatan pengelasan (*welding speed*) mempengaruhi masukan panas (*heat input*) dan geometri hasil pengelasan. Kecepatan yang terlalu cepat atau tinggi menghasilkan penetrasi yang dangkal dan hasil las (*weld bead*) yang tidak seragam, sedangkan kecepatan yang terlalu pelan atau rendah menyebabkan hasil las (*weld bead*) yang terlalu lebar dan pemborosan pada elektroda (Daryanto, 2012).

Apabila tegangan dan arus tetap, sedangkan kecepatan pengelasan dinaikan maka jumlah deposit per satuan las akan menurun, disamping itu juga apabila pada kecepatan tertentu, kenaikan kecepatan akan menaikkan penembusan (Wirjosumarto dan Okumura, 2000). Kecepatan yang sesuai adalah deposit las menghasilkan hasil pengelasan yang baik, dengan tinggi

maksimal setara dengan diameter elektroda dan lebar lebar tinggi tiga kali diameter elektroda. kecepatan optimal berkisar antara 100-300 mm/menit tergantung pada ketebalan material dan posisi pengelasan. (Harsomo, 2006).

2.3 SUDUT KAMPUH PENGELASAN

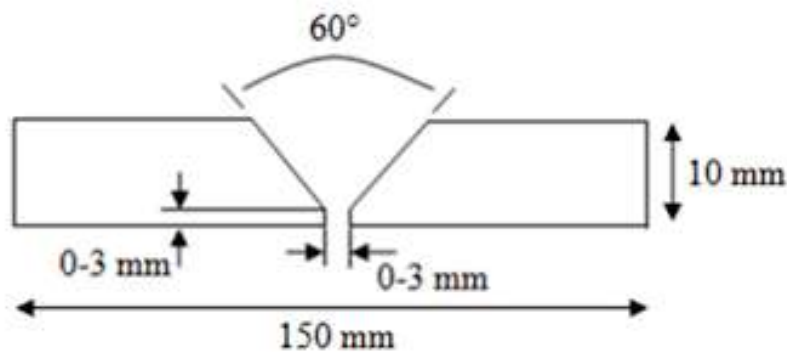
Sudut kampuh merupakan salah satu faktor penting dalam proses pengelasan yang mempengaruhi kekuatan sambungan las adalah sudut kampuh. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa sudut kampuh yang lebih besar dapat meningkatkan suhu input dan waktu proses pengelasan (Huda & Setiawan, 2016). Sudut kampuh juga mempengaruhi integritas sambungan las dalam hal tegangan sisa, distorsi, dan profil suhu las (Hamin, 2014).

Sudut kampuh pengelasan memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kekuatan mekanis sambungan las. Studi penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut kampuh dapat mempengaruhi kekuatan tarik dari sambungan las. Sebagai contoh, penelitian oleh (*Effects of Joint Preparation Angle of Single-vee Butt Welds on the Tensile Strength of ASTM A36 Carbon Steel*) menunjukkan bahwa variasi sudut kampuh yang berbeda dapat menghasilkan perbedaan yang signifikan pada kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan las pada baja karbon ASTM A36.

Standardisasi sudut kampuh pengelasan merupakan aspek kritis dalam dunia pengelasan telah diatur oleh badan standardisasi internasional seperti *American Welding Society (AWS)* dan *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. Pada standar AWS maupun ASME telah memberikan panduan spesifik untuk memastikan kualitas dan keamanan sambungan pengelasan (Wiryosumarto & Okumura, 2004).

Menurut Standar AWS D1.1 *Structural Welding Code-Steel*, untuk kampuh V tunggal (*single-V groove*) pada material baja struktural, sudut bevel yang direkomendasikan adalah $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$ dengan *root opening* $3.2 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ (Smith, 2012). Root face yang disarankan berkisar antara 1.6 mm hingga 3.2 mm, tergantung pada ketebalan material dan proses

pengelasan yang digunakan. *ASME Section IX Boiler and Pressure Vessel Code* memberikan spesifikasi yang lebih ketat untuk pengaplikasian pekerjaan bertekanan tinggi. Untuk kampuh V tunggal pada bejana tekan, ASME merekomendasikan sudut *included* antara 55° - 70° , dengan *root face* maksimum 3.2 mm (Johnson & Peters, 2015). *Root gap* yang diizinkan adalah berkisar antara 1.6 mm hingga 3.2 mm untuk memastikan penetrasi penuh.



Gambar 4 Sudut Kampuh Single V groove
(Rofi Amzamah, 2021)

2.4 MATERIAL BAJA ASTM A36

Baja ASTM A36 adalah salah satu jenis baja karbon rendah yang banyak digunakan dalam dunia konstruksi dan aplikasi struktural, seperti konstruksi jembatan, jaringan pipa, bangunan baja dan struktur umum yang menggunakan baut atau las. Material ini dikenal karena kekuatan tarik yang baik dan kemudahan dalam pengelasan. Menurut (Kayode et al., 2020), kekuatan mekanis baja A36 dapat dipengaruhi oleh berbagai parameter pengelasan, termasuk sudut kampuh dan heat input.

Komposisi kimia dari material baja ASTM A36 termasuk dalam kategori baja karbon rendah, dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Selain itu, baja ASTM A36 mengandung beberapa unsur lain seperti belerang, fosfor, mangan dan silikon. Komposisi kimia baja ASTM A36 menurut (Mitchell, 2022) terdiri dari:

1. Karbon (C): Sekitar 0,26% maksimum. Kandungan karbon yang lebih rendah memberikan sifat ketangguhan yang baik.
2. Mangan (Mn): Sekitar 0,60% - 0,90%. Mangan meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi.
3. Fosfor (P): Maksimum 0,04%. Fosfor dapat meningkatkan kekerasan tetapi juga dapat mengurangi ketangguhan.
4. Belerang (S): Maksimum 0,05%. Belerang dapat mempengaruhi sifat pengelasan dan ketangguhan baja.
5. Silicon (Si): Sekitar 0,40% maksimum. Silicon dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap oksidasi.

Table 1 Komposisi kimia material baja ASTM A36

Product form	Thickness (T)	Carbon, max, %	Manganese, %	Phosphorus, max, %	Sulphur, max, %	Silicon, %	Copper, min, % (when specified)
Shapes	All thickness	0.26		0.04	0.05	0.40 max	0.20
Plates (Width more than 380 mm or 15in.)	T ≤ 20 mm	0.25		0.030	0.030	0.40 max	0.20
	20 < T ≤ 40	0.25	0.80 – 1.20	0.030	0.030	0.40 max	0.20
	40 < T ≤ 65	0.26	0.80 – 1.20	0.030	0.030	0.15–0.40	0.20
	65 < T ≤ 100	0.27	0.85 – 1.20	0.030	0.030	0.15–0.40	0.20
	T > 100 mm	0.29	0.85 – 1.20	0.030	0.030	0.15–0.40	0.20
Bars, Plates (Width less than 380 mm or 15in.)	T ≤ 20 mm	0.26		0.04	0.05	0.40 max	0.20
	20 < T ≤ 40	0.27	0.60–0.90	0.04	0.05	0.40 max	0.20
	40 < T ≤ 100	0.28	0.60–0.90	0.04	0.05	0.40 max	0.20
	T > 100 mm	0.29	0.60–0.90	0.04	0.05	0.40 max	0.20

Sumber : <https://www.weldingandndt.com/astm-a-36-steel/>

Pada kekuatan mekanis material baja ASTM A36 memiliki kombinasi kekuatan, kemampuan bentuk dan sifat yang baik. kekuatan mekanis utama baja ASTM A36 meliputi:

1. Kekuatan Tarik: 400 - 550 MPa
2. Kekuatan Luluh: sekitar 250 MPa
3. Perpanjangan saat putus: sekitar 20% dalam panjang 200 mm atau 23% dalam 50 mm
4. Modulus Elastisitas: kira-kira 200 GPa
5. Kekerasan Brinell: berkisar antara 119 hingga 159
6. Kepadatan: 7,85 g/cm³

Table 2 Mechanical Properties Material Baja ASTM A36

Mechanical Properties	A36 Plates	A36 Shapes	A36 Bars
Ultimate Tensile strength	400 MPa – 550 MPa (58 Ksi – 80 Ksi)		
Yield strength minimum	250 MPa (36 Ksi)		
% Elongation (min) in 200 mm (8 in.)	20		
% Elongation (min) in 50 mm (2 in.)	23	21	23

Sumber : <https://www.weldingandndt.com/astm-a-36-steel/>

2.5 PENGARUH SUDUT KAMPUH TERHADAP KEKUATAN MEKANIS

Variasi sudut kampuh dalam pengelasan groove memiliki dampak signifikan terhadap sifat mekanis hasil lasan, terutama dalam hal kekuatan tarik, kekerasan, dan ketangguhan material. Menurut (Pratiwi dan Arifin, 2023), sudut kampuh yang lebih besar memungkinkan penetrasi lebih dalam dan distribusi panas yang lebih merata, tetapi juga meningkatkan volume logam pengisi yang dibutuhkan. Sebaliknya, sudut yang lebih kecil dapat mengurangi konsumsi material las, namun meningkatkan risiko kurangnya fusi dan lemahnya kekuatan tarik pada sambungan las.

Studi yang dilakukan oleh (Arifin, 2023) pada baja ASTM A36 menunjukkan bahwa sudut kampuh optimal berada dalam rentang 40° hingga 50° untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan tarik dan ketangguhan. Hasil uji tarik yang dilakukan pada spesimen dengan sudut 45° menunjukkan peningkatan kekuatan tarik hingga 520 MPa, lebih tinggi

dibandingkan spesimen dengan sudut 30° dan 60° yang masing-masing memiliki kekuatan tarik 480 MPa dan 495 MPa (Arifin, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa sudut kampuh yang terlalu kecil dapat mengurangi penetrasi, sedangkan sudut yang terlalu besar menyebabkan peningkatan konsumsi material pengisi tanpa keuntungan signifikan dalam kekuatan mekanis.

Selain itu, penelitian oleh (Wakeel et al., 2024) menyoroti bahwa sudut kampuh juga berpengaruh terhadap distribusi tegangan sisa dalam material. Tegangan sisa yang tinggi akibat pemanasan berlebih pada sudut kampuh yang besar dapat meningkatkan risiko distorsi dan retak pada sambungan lasan. Oleh karena itu, pemilihan sudut kampuh harus mempertimbangkan keseimbangan antara penetrasi optimal dan minimisasi tegangan sisa untuk menghindari cacat las seperti porositas (*Porosity*) dan retak (*Crack*).

Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sudut kampuh berperan penting dalam menentukan kualitas mekanis sambungan lasan. Penggunaan sudut kampuh yang optimal pada pengelasan *groove vertical up* dengan SMAW pada baja ASTM A36 sangat dianjurkan dalam rentang 40° hingga 50° untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan tarik, ketangguhan, dan efisiensi penggunaan material pengisi. Kesimpulan ini diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa sudut kampuh yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan integritas struktural akibat penetrasi yang tidak merata dan tegangan sisa yang tinggi. Berikut adalah beberapa hasil rangkuman penelitian yang membahas pengaruh variasi sudut kampuh terhadap kekuatan mekanis dalam pengelasan SMAW pada baja ASTM A36 dan material serupa :

Table 3 Penelitian Terdahulu

NO	PENULIS	TAHUN	VARIASI SUDUT KAMPUH	MATERIAL	METODE PENGUJIAN	HASIL PENELITIAN
1	Wahyudi et al.	2022	30°, 45°, 60°	ASTM A36	Uji tarik, kekerasan	Sudut 45° memberikan kekuatan tarik tertinggi (520 MPa)
2	Pigozzo & Gonçalves	2022	35°, 50°, 65°	ASTM A36	Uji tarik, uji impak	Sudut 50° memiliki ketangguhan terbaik
3	Ahmad et al.	2024	40°, 50°, 60°	ASTM A36	Uji tarik, kekerasan mikro	Sudut 50° menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata
4	Arifuddin et al.	2022	30°, 40°, 50°	Baja karbon rendah	Uji tarik, analisis mikrostruktur	Sudut 40° memberikan keseimbangan optimal
5	Baghel et al.	2022	30°, 45°, 60°	ASTM A36	Uji tarik, uji kekerasan	Sudut 60° memiliki penetrasi terbaik tetapi menyebabkan distorsi lebih tinggi