



**PENGARUH VARIASI SUDUT KAMPUH DAN KUAT
ARUS TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KEKUATAN *BENDING* HASIL SAMBUNGAN LAS
SMAW BAJA KARBON RENDAH**

Skripsi

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Mesin**

Oleh

Patrick Rangga Marcellino Anggoro

NIM.5201412043



**PENDIDIKAN TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2017**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Patrick Rangga Marcellino Anggoro

NIM : 5201412043

Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin, S1

Judul : PENGARUH VARIASI SUDUT KAMPUH DAN KUAT ARUS
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKUATAN
BENDING SAMBUNGAN LAS SMAW BAJA KARBON
RENDAH

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian
Skripsi Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas
Negeri Semarang.

Semarang, 02 Agustus 2017

Pembimbing 1,

Pembimbing 2,



Dr. Ir. Basyirun, S.Pd., M.T., IPP.

NIP. 196809241994031002



Drs. Sunyoto, M.Si.

NIP. 196511051991021001

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul Pengaruh Variasi Sudut Kampuh dan Kuat Arus terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan *Bending* Hasil Sambungan Las SMAW Baja Karbon Rendah telah dipertahan di depan sidang. Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 24 Juli 2017.

Oleh :

Nama : Patrick Ranga Marcellino Anggoro
NIM : 5201412043
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin, SI

Ketua


Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Panitia :

Sekretaris


Dr. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T.
NIP. 197509272006041002

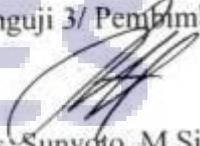
Penguji I


Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Penguji 2/ Pembimbing


Dr. Ir. Basyirun, S.Pd., M.T., IPP
NIP. 196809241994031002

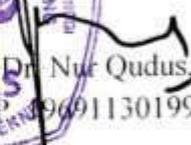
Penguji 3/ Pembimbing 2


Drs. Sunyoto, M.Si.
NIP. 196511051991021001

Mengetahui:

Dekan Fakultas Teknik UNNES




Dr. Nur Qudus, M.T.
NIP. 196911301994031001

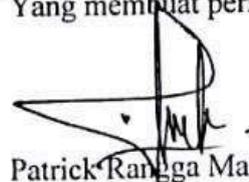
PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi/TA ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 02 Agustus 2017

Yang membuat pernyataan,



Patrick Rangga Marcellino A

NIM. 5201412043

1. Selalu ada jalan bagi mereka yang berusaha, pantang menyerah dan berdoa.
2. Kegagalan merupakan cara Tuhan untuk mendewasakan seseorang.
3. Dibalik kesulitan pasti akan ada kemudahan.

Persembahan

1. Bapak dan Ibu serta kakak yang selalu menyayangi, mencintai dan mengasihiku serta selalu mendoakan dalam kesuksesanku.
2. Teman-teman seperjuangan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang angkatan 2012.
3. Semua pihak yang telah membantu dalam menempuh gelar sarjana di Universitas Negeri Semarang.



ABSTRAK

Anggoro, Patrick Rangga Marcellino. 20017. Pengaruh Variasi Sudut Kampuh dan Kuat Arus Terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan *Bending* Sambungan Las

Kekuatan hasil sambungan las dapat dipengaruhi oleh masukan panas, masukan panas yang baik akan mengakibatkan logam las berdifusi dengan baik atau tidak sehingga akan berpengaruh terhadap kekuatan sambungan las. Besar sudut kampuh juga akan mempengaruhi penembusan logam las sehingga akan mempengaruhi kekuatan dari sambungan las. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui struktur mikro pada hasil sambungan las SMAW baja karbon rendah dan mengetahui kekuatan bending pada hasil sambungan las SMAW baja karbon rendah.

Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimen, untuk mengetahui sebab akibat berdasarkan perlakuan yang diberikan oleh peneliti yaitu berupa pengelasan dengan variasi sudut kampuh dan kuat arus. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan las SMAW pada baja karbon rendah, elektroda las yang digunakan E 7018 diameter 3,2 mm. Variasi sudut yang digunakan adalah 50° , 60° , 70° , 80° , dan 90° . Variasi kuat arus yang digunakan adalah 120 A, 140 A, dan 160 A. Analisis data yang digunakan yang digunakan pada penelitian ini menggunakan statistik deskriptif.

Foto struktur mikro yang terlihat adalah ferit, perlit dan porositas. Sudut 50° pada penggunaan arus kuat arus 140 A tampak banya terdapat porositas didaerah HAZ, sedangkan sudut 60° , 70° , 80° , dan 90° dengan variasi tampak beberapa porositas. Hasil penelitian yang didapatkan setelah melakukan pengujian *bending* sambungan las SMAW baja karbon rendah pada sudut 50° dengan kuat arus 120 A, 140 A, dan 160 A berturut-turut adalah sebesar 1221,04 N/mm², 1147,75 N/mm², dan 1285,46 N/mm². Penggunaan sudut 60° dengan arus 120 A, 140 A, dan 160 A secara berturut-turut adalah sebesar 1313,75 N/mm², 1331,12 N/mm², dan 1390,09 N/mm². Penggunaan sudut 70° dengan arus 120 A, 140 A, dan 160 A secara berturut-turut adalah sebesar 1288,28 N/mm², 1388,09 N/mm², dan 1349,64 N/mm². Penggunaan sudut 80° dengan arus 120 A, 140 A, dan 160 A secara berturut-turut adalah sebesar 1331,78 N/mm², 1335,01 N/mm², dan 1343,47 N/mm². Penggunaan sudut 90° dengan arus 120 A, 140 A, dan 160 A secara berturut-turut adalah sebesar 1364,75 N/mm², 1326,60 N/mm², dan 1402,31 N/mm². Berdasarkan uji *bending* diperoleh nilai kekuatan *bending* tertinggi pada penggunaan sudut 90° dengan kuat arus 160 A sebesar 1402,31 N/mm², kekuatan *bending* terendah terjadi pada penggunaan sudut kampuh 50° dengan kuat arus 140 A sebesar 1147,75 N/mm².

Penggunaan sudut dan kuat arus yang disarankan untuk mendapatkan kekuatan bending maksimal pada pengelasan baja karbon rendah adalah 90° dengan kuat arus 160 A.

Kata kunci: kekuatan *bending*, kuat arus, sudut kampuh, SMAW.

PRAKATA

Segala Puji dan Syukur bagi Tuhan Yang Maha Esa, atas Kuasa dan Rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyusun skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Sudut kampuh dan Kuat Arus Terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan *Bending* Hasil Sambungan Las *SMAW* Baja Karbon Rendah” dalam rangka menyelesaikan Studi Strata Satu untuk mencapai gelar Sarjana Pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Skripsi ini dapat diselesaikan berkat bimbingan, motivasi dan bantuan semua pihak. Oleh karena itu dengan rendah hati disampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, antara lain:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T, Dekan Fakultas Teknik, Rusiyanto, S.Pd., M.T, Ketua Jurusan sekaligus Koordinator Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, S1 atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
3. Rusiyanto, S.Pd., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
4. Dr. Ir. Basyirun, S.Pd., M.T., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, saran dan masukan kepada penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

5. Drs. Sunyoto, M.Si., selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, saran dan masukan kepada penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Rusiyanto, S.Pd., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.
7. Kedua orang tua yang selalu mendoakan serta memberikan motivasi.
8. Teman-teman yang telah banyak membantu dan memberikan motivasi kepada penulis dalam penyusunan skripsi.

Penulis menyadari dalam skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam perbaikan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan dunia pendidikan pada khususnya.

Semarang, 02 Agustus 2017

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Identifikasi Masalah	4
C. Pembatasan Masalah	6
D. Rumusan Masalah	6
E. Tujuan Penelitian	7
F. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Kajian Teori	9
1. Pengertian Las	9
2. <i>Las Shielded Metal Arc Welding(SMAW)</i>	10
a. Sumber Arus	11
b. Tegangan Busur	12
c. Polaritas Listrik	13
d. Elektroda Terbungkus	14
3. Baja Karbon Rendah	17
4. Kampuh V	18

5. Siklus Thermal Daerah Las	19
a. Logam Las	19
b. Logam Induk	20
c. <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ)	20
6. Struktur Mikro Pada Baja Karbon	21
a. Karbon	23
b. Ferit Batas Butir	24
c. Ferrite Acicular.....	24
d. Ferrite Widmanstatten	24
e. Bainit	25
f. Martensit.....	25
g. Sementit.....	26
h. Perlit	26
7. <i>Bending Test</i>	27
8. Pengamatan Struktur Mikro	29
B. Penelitian yang Relevan	29
C. Kerangka Berpikir	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
A. Desain Penelitian	35
B. Bahan dan Alat Penelitian	35
C. Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	36
D. Variabel Penelitian	36
E. Prosedur Penelitian	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	44
A. Hasil Penelitian.....	46
B. Pembahasan	67
BAB V PENUTUP	70
A. Simpulan.....	70
B. Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Spesifikasi arus menurut tipe elektroda dan diameter elektroda.....	16
3.1 Hasil kekuatan uji <i>bending raw material</i>	76
3.2 Hasil kekuatan uji <i>bending</i> benda hasil pengelasan	78
4.1 Hasil uji komposisi kimia baja karbon rendah A36	44
4.2 Hasil uji <i>bending raw material</i>	45
4.3 Hasil uji <i>bending</i> benda hasil pengelasan	46



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Proses Las SMAW.....	11
2.2 Mesin las SMAW DCSP (<i>Direct Current Straight Polarity</i>)	13
2.3 Mesin Las SMAW DCRP (<i>Dirrect Current Revers Polarity</i>)	14
2.4 Las ElektrodaTerbungkus	17
2.5 Bentuk Kampuh V	18
2.6 Arah Pembekuam Logam Las	19
2.7 Bagian Las	20
2.8 Diagram Fasa Besi Baja	21
2.9 Struktur Mikro <i>Accular Ferrite (AF) dan Grain Boundary Ferrite (GF)</i> atau <i>Ferrite Batas Butir</i>	24
2.10 <i>Ferrite Widmastetatten</i>	25
2.11 Bainit	25
2.12 Martensit.....	26
2.13 Perlite & Ferit.....	27
2.14 Skema Uji <i>Bending</i>	28
2.15 Kerangka Pikir.....	34
3.1 Kampuh V Terbuka.....	35
3.2 Spesimen Uji <i>Bending</i> JIS Z 2248	39
3.3 Spesimen Uji <i>Bending</i>	40
3.4 Diagram Alir	42
4.1 Pengaruh variasi sudut kampuh dengan kuat arus 120 A terhadap kekuatan <i>bending</i> dan struktur mikro baja karbon rendah	47
4.2 Pengaruh variasi sudut kampuh dengan kuat arus 140 A terhadap kekuatan <i>bending</i> dan struktur mikro baja karbon rendah	48
4.3 Pengaruh variasi sudut kampuh dengan kuat arus 160 A terhadap kekuatan <i>bending</i> dan struktur mikro baja karbon rendah	49
4.4 Struktur mikro <i>raw material</i>	51
4.5 Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 50 ⁰ dengan kuat arus 120	51

4.6	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 50° dengan kuat arus 140.....	52
4.7	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 50° dengan kuat arus 160.....	53
4.8	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 60° dengan kuat arus 120.....	54
4.9	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 60° dengan kuat arus 140.....	55
4.10	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 60° dengan kuat arus 160.....	55
4.11	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 70° dengan kuat arus 120.....	56
4.12	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 70° dengan kuat arus 140.....	57
4.13	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 70° dengan kuat arus 160.....	58
4.14	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 80° dengan kuat arus 120.....	59
4.15	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 80° dengan kuat arus 140.....	60
4.16	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 80° dengan kuat arus 160.....	61
4.17	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 90° dengan kuat arus 120.....	62
4.18	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 90° dengan kuat arus 140.....	63
4.19	Struktur mikro pengelasan sudut kampuh 90° dengan kuat arus 160.....	63

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol	Arti
$^{\circ}\text{C}$	Derajat Celcius
%	Persen
-	Negatif
+	Positif
C	Karbon
F	Gaya
L_s	Jarak antar dua tumpuan
L	Panjang batang Uji
W	Momen Inersia
b	Lebar spesimen
h	Tebal spesimen
kg	Kilogram
P	Beban maksimum Plunger
σ_b	Tegangan <i>Bending</i>
μ_m	mikromili



Singkatan	Arti
A	Ampere
AC	<i>Alternating Curent</i>
AF	<i>Acicular Ferrite</i>
ASM	<i>American Standart Material</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Material</i>
DC	<i>Direct Curent</i>
DCEN	Direct Current Elektroda Negatif
DCEP	Direct Current Elektroda Positif
DCSP	<i>Direct Current Stright Polarity</i>
DCRP	<i>Direct Current Revers Polarity</i>
E	Elektroda
EBSD	<i>Electron back Scattered Diffraction</i>
FA	FeritAcicular
GF	<i>Grain boundary Ferrite</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
Kg/mm ²	Kilogram per milimeter persegi
Kg	Kilogram
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
mm	Milimeter
MMAW	<i>Manual Metal Arc Welding</i>
MPa	Mega Pascal
N	Newton

PLN

Perusahaan Listrik Negara

SMAW

Shielded Metal Arch Welding

St

Steel



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tabel Spesifikasi Elektroda Terbungkus dari baja Lunak	76
Lampiran 2	Tabel Pengambilan Data Penelitian.....	78
Lampiran 3	Surat Keterangan <i>Welder</i>	80
Lampiran 4	Dokumentasi.....	81
Lampiran 5	Hasil Pengujian Komposisi	83
Lampiran 6	Perhitungan Moment <i>Bending</i>	84
Lampiran 7	Hasil Grafik Gaya Lengkung.....	90



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang konstruksi semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena mempunyai peranan penting dalam rekayasa dan reparasi logam. Pengelasan merupakan proses penyambungan secara permanen atau lebih material logam dengan ikatan metalurgi yang dihasilkan pada waktu logam dalam keadaan lumer atau cair. Guna memperoleh hasil yang maksimal diperlukan pengetahuan yang mendalam baik pengetahuan tentang material maupun pengetahuan tentang proses pengelasan.

Secara umum, ruang lingkup dalam proses pengelasan tidak serta merta digunakan dalam industri pemesinan atau pengelasan saja. Lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam konstruksi sangat luas meliputi perkapalan, jembatan rangka baja, bejana tekan, sarana transportasi, rel, pipa, saluran dan lain sebagainya (Wiryosumarto, 2000: 1).

Kekuatan hasil sambungan las dipengaruhi oleh berbagai faktor yang sangat beragam, salah satunya adalah karena perubahan struktur akibat dari proses pemanasan. Logam yang mengalami pengaruh pemanasan akibat pemanasan nantinya akan mengalami perubahan struktur mikro disekitar daerah lasan. Bentuk struktur mikro bergantung pada temperatur tertinggi yang dicapai selama proses pengelasan, kecepatan pengelasan dan laju pendinginan daerah

lasan. Daerah logam yang mengalami perubahan struktur akibat pemanasan ini disebut daerah pengaruh panas atau *Heat Affected Zone (HAZ)*.

Kenaikan temperatur ruang pada semua jenis logam pada umumnya mampu menaikkan keuletan dan tidak selalu mengakibatkan hilangnya tegangan serta kekakuan material logam. Fase atau struktur dari logam akan berubah dengan kenaikan temperatur yang dengan sendirinya mempunyai konsekuensi terhadap sifat mekanisnya seperti: tarik, tekan, geser, puntir, lengkung dan tekuk Prawira, *et al.* (2015: 362).

Kekuatan sambungan yang tinggi membutuhkan penembusan atau penetrasi yang cukup yang dihasilkan dari masukan panas las. Pada dasarnya besar kuat arus yang tinggi akan menyebabkan terjadinya penembusan las yang semakin besar, karena dengan adanya penembusan yang besar mengakibatkan las bagian dalam semakin besar. Apabila las bagian dalam besar maka las bagian luar akan lebih semakin besar, sehingga berpengaruh besar pula terhadap kekuatan hasil pengelasan.

Agar sambungan antara dua bagian logam memiliki mutu yang baik diperlukan suatu pengelasan yang tepat dan sambungan serta bentuk kampuh las yang sesuai dengan kegunaan dari hasil lasan tersebut. Sambungan tumpul adalah jenis sambungan yang paling efisien (Wiryosumarto, 2000: 159).

Bentuk alur sambungan tumpul sangat mempengaruhi efisiensi pengerjaan sambungan dan jaminan sambungan. Pemilihan besar sudut pada alur sangat penting, pada dasarnya pemilihan sudut alur pada bentuk sambungan kampuh V ini harus menuju kepada penurunan masukan panas dan penurunan

logam las sampai kepada harga terendah yang tidak menurunkan mutu sambungan. Besar sudut sambungan akan mempengaruhi masukan panas yang selanjutnya berpengaruh pada siklus termal panas.

Penggunaan jenis kampuh V pemilihan sudut kampuh juga akan berpengaruh terhadap kekuatan hasil lasan. Machmoed (2012: 17) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa nilai tegangan tarik maksimum dan regangan tarik maksimum terdapat pada spesimen alur V 70° sebesar 1938 MPa dan 25,3% pada sambungan baja karbon rendah dengan menggunakan las *MIG*, hal ini membuktikan bahwa perencanaan yang baik akan menghasilkan hasil yang optimal.

Diantara beberapa macam proses pengelasan, salah satunya yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah proses *SMAW* (*Shielded Metal Arc Welding*) proses pengelasan ini juga disebut *MMAW* (*Manual Metal Arc Welding*). Parameter pada pengelasan dengan menggunakan mesin las *SMAW* meliputi kuat arus, tegangan listrik, serta polaritas listrik yang digunakan. Parameter inilah yang menjadikan dasar pemilihan yang tepat guna mendapatkan kualitas atau mutu sambungan yang baik. Pengelasan jenis ini dapat digunakan untuk mengelas bahan baja *ferro*, dikarenakan las *SMAW* tidak dapat mengelas bahan baja *non ferro*.

Tidak semua logam memiliki sifat mampu las yang baik. Baja karbon rendah mengandung unsur karbon (C) kurang dari 0,30%, kadar *Si* < 0,01 dan kadar *Mn* 0,25-0,45 (Wiryosumarto, 2000: 90). Penggunaan material baja karbon rendah dipilih karena baja karbon rendah memiliki kepekaan terhadap keretakan las

yang tinggi. Baja karbon rendah adalah baja dengan kepekaan retak las yang tinggi (Wiryo Sumarto, 2000: 91). Oleh karena itu, untuk menanggulangi permasalahan tersebut diperlukan suatu perlakuan terhadap variasi sudut kampuh dan variasi arus pengelasan guna untuk mengetahui variasi sudut kampuh dan variasi arus manakah yang tepat guna mengatasi masalah tersebut.

Mengingat pentingnya permasalahan untuk dicari solusinya, maka dibutuhkan suatu penelitian tentang pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap struktur mikro dan kekuatan *bending* hasil sambungan las *SMAW* baja karbon rendah.

B. Identifikasi Masalah

Bersumber dari latar belakang masalah diatas, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi struktur mikro dan kekuatan *bending* pada hasil pengelasan *SMAW* baja karbon rendah. Faktor-faktor yang mempengaruhi dari nilai kekuatan hasil pengelasan tersebut antara lain:

1. Pemilihan kuat arus pada proses pengelasan sangat berpengaruh terhadap kekuatan hasil pengelasan. Kuat arus merupakan parameter terpenting dalam pengelasan karena merupakan penghasil panas yang nantinya akan mencairkan elektroda dan *base* material. Panas dari kuat arus akan mempengaruhi dari struktur lasan pada daerah terpengaruh panas (*HAZ*) hasil sambungan las yang nantinya akan mempengaruhi dari kekuatan sambungan las tersebut. Panas yang tinggi akan mengakibatkan struktur lasan menjadi halus sehingga kekuatannya menjadi tinggi. Sebaliknya, jika panas yang

dihasilkan rendah maka struktur menjadi kasar dan tidak homogen sehingga kekuatan yang dihasilkan akan rendah.

2. Pemilihan desain sambungan dan bentuk sambungan las. Pemilihan tersebut harus menuju pada penurunan masukan panas dan penurunan logam las sampai pada titik terendah yang dapat menentukan mutu sambungan las. Besar atau kecilnya kawah kampuh akan menentukan homogenitas dari pencampuran logam las dengan logam material pada daerah *HAZ* yang nantinya akan mempengaruhi dari kekuatan hasil sambungan las tersebut. Salah satu sambungan las pada baja karbon rendah adalah dengan alur bentuk V tunggal.
3. Kecepatan laju pengelasan (*travel speed*). *Travel speed* juga merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan hasil sambungan las. Pengelasan dengan menggunakan bahan baja karbon rendah harus dilakukan dengan *travel speed* yang sesuai agar tidak terjadi pencairan pada bagian inti akibat panas berlebih karena lambatnya *travel speed*.
4. Posisi pengelasan juga berdampak pada kekuatan yang dihasilkan pada sambungan lasan. Setiap posisi pengelasan mengakibatkan penyebaran panas pada daerah *HAZ* berbeda, sehingga posisi pengelasan yang mampu menyebabkan panas secara merata pada daerah *HAZ* akan meningkatkan kekuatan dari sambungan las tersebut.

C. Pembatasan Masalah

Sebagaimana yang telah disebutkan dalam identifikasi masalah tentang beberapa faktor penyebab tingkat kekuatan *bending* dari hasil las *SMAW* baja karbon rendah, maka dalam penelitian ini dibatasi pada penggunaan variasi sudut kampuh dan kuat arus dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Proses pengelasan menggunakan *Shielded Metal Arc Welding (SMAW) DC* polaritas terbalik.
2. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah baja karbon rendah *ASTM A36*.
3. Variasi arus yang digunakan 120 A, 140 A, dan 160 A.
4. Posisi pengelasan *down hand* (bawah tangan).
5. Proses pengelasan menggunakan elektroda E 7018 dengan diameter 3,2 mm.
6. Jenis kampuh yang digunakan adalah V dengan variasi sudut 50° , 60° , 70° , 80° , dan 90° .
7. Spesimen akan di uji komposisi, uji *bending*, foto mikro .

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan pembatasan diatas, rumusan masalah penelitian ini meliputi:

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap struktur mikro hasil sambungan las *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* pada baja karbon rendah?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap kekuatan *bending* hasil sambungan las *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* pada baja karbon rendah?

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan penelitian ini meliputi:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap struktur mikro hasil sambungan las *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* pada baja karbon rendah?
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap kekuatan *bending* hasil sambungan las *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* pada baja karbon rendah.

F. Manfaat Penelitian

Sebagai peran nyata dalam pengembangan teknologi khususnya pengelasan, maka penulis berharap dapat mengambil manfaat dari penelitian ini diantaranya yaitu:

1. Setelah mengetahui pengaruh variasi sudut kampuh dan kuat arus terhadap struktur mikro dan kekuatan *bending* hasil las *SMAW* pada baja karbon rendah, maka hal ini dapat dijadikan sebagai acuan dan sumber informasi guna menentukan besar kuat arus yang tepat untuk mendapatkan kualitas dan mutu sambungan yang baik dan kuat yang biasanya diterapkan dalam pengelasan plat tebal pada dek kapal atau konstruksi yang membutuhkan penyambungan plat tebal lainnya.
2. Setelah mengetahui pengaruh variasi sudut kampuh las dan kuat arus terhadap struktur mikro dan kekuatan *bending* hasil las *SMAW* pada baja karbon rendah, maka hal ini dapat dijadikan sebagai acuan dan sumber informasi guna menentukan besar sudut kampuh las yang tepat untuk mendapatkan

kualias dan mutu sambungan yang baik dan kuat. yang biasanya diterapkan dalam pengelasan plat tebal pada dek kapal atau kontruksi yang membutuhkan penyambungan plat tebal lainnya.



BAB II

KAJIAN TEORI

A. Kajian Teori

1. Pengertian Las

Mengingat dalam penelitian ini penulis mengambil tema pengelasan, maka peneliti akan sedikit memaparkan tentang teori pengelasan. Seorang pengelas (*welder*) tidak hanya prakteknya saja yang tahu, melainkan teori pengelasan harus mengerti juga, karena pengertian dari pengelasan adalah hal dasar yang harus diketahui dari seorang pengelas atau *welder*.

Definisi pengelasan menurut *DIN (Duetche Industrie Norman)* adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, las merupakan suatu sambungan setempat dari beberapa batang logam baik itu *ferro* atau *non-ferro* dengan menggunakan energi panas untuk melelehkan logam tersebut menjadi satu.

Pengelasan dapat diartikan dengan proses penyambungan dua buah logam atau lebih sampai titik rekristalisasi logam dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah dan menggunakan energi panas sebagai pencair bahan yang dilas. Pengelasan juga dapat diartikan sebagai ikatan tetap dari benda atau logam yang dipanaskan.

Mengelas bukan hanya memanaskan dua bagian benda sampai mencair dan membiarkan membeku kembali, tetapi membuat lasan yang utuh dengan

cara memberikan bahan tambah pada waktu dipanaskan sehingga mempunyai kekuatan seperti yang dikehendaki.

2. Las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

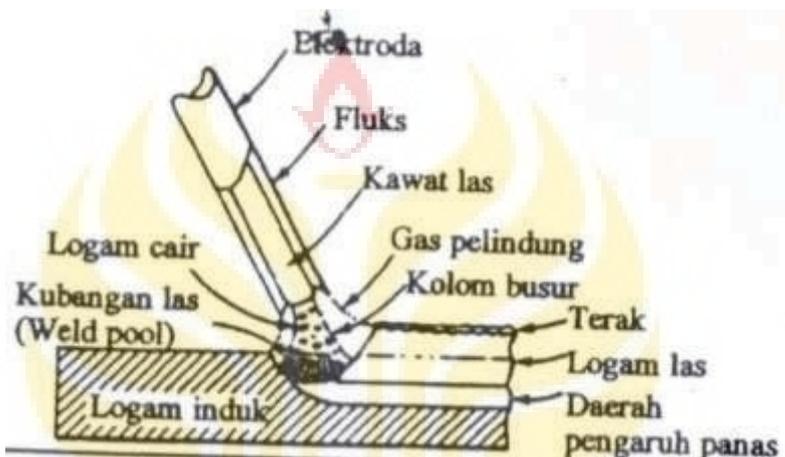
Fokus utama pada penelitian ini adalah pengelasan menggunakan las busur listrik atau SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), dalam bahasan ini penulis akan memakarkan tentang pengelasan SMAW. Menurut Suharto (1991: 77) las busur nyala listrik atau lebih dikenal dengan *Shielded Metal Arc Welding* adalah proses pengelasan dengan busur nyala listrik dimana panas diperoleh dari busur nyala yang memancar antara elektroda (dengan selubung *fluks*) dan benda kerja. Logam induk dalam pengelasan ini mengalami pencairan akibat pemanasan dari busur listrik yang timbul antara ujung elektroda dan permukaan benda kerja. Busur listrik dibangkitkan dari suatu mesin las.

Elektroda yang dipakai berupa kawat yang dibungkus pelindung berupa *fluks* dan karena itu elektroda las kadang – kadang disebut kawat las. Elektroda ini selama pengelasan akan mengalami pencairan bersama – sama dengan logam induk yang menjadi bagian kawah las, dengan adanya pencairan ini maka kawah las akan terisi oleh logam cair yang berasal dari elektroda dan logam induk.

Selain mencairkan kawat las yang nantinya membeku menjadi logam las, busur listrik juga ikut mencairkan *fluks*, karena massa jenisnya yang lebih kecil dari logam las maka *fluks* ini berada diatas logam las pada saat cair. Kemudian setelah membeku, *fluks* cair ini menjadi terak yang menutupi logam las dengan demikian *fluks* cair akan melindungi kawah las selama mencairkan terak

melindungi logam las selama pembekuan, terak ini nantinya harus dihilangkan dari permukaan logam las dengan menggunakan palu atau gerinda (Sonawan, 2006: 4).

Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* disini dipaparkan mengingat ada kaitannya dengan judul skripsi tersebut.



Gambar 2.1 Proses Las SMAW (Sonawan dan Suratman, 2004: 3)

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam proses pengelasan *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* meliputi:

a. Sumber Arus

Arus listrik yang mempunyai arus besar ini adalah menimbulkan bunga api pada elektroda las yang berhubungan dengan bagian yang akan disambung (dilas) sehingga terjadilah panas yang tinggi untuk melelehkan logam (Daryanto, 1982: 54). Sumber arus pada mesin las listrik adalah arus bolak-balik (*AC*), arus searah (*DC*) atau juga bisa *AC-DC*. Mesin las *AC* mesin yang dibutuhkan adalah arus listrik dari PLN. Kelebihan menggunakan mesin las *AC* adalah perlengkapan yang relatif lebih murah, nyala busur kecil sehingga mengurangi timbulnya keropos pada rigi-rigi las. Kekurangannya adalah tidak dapat dipergunakan untuk semua

jenis elektroda, selain itu tidak dapat digunakan untuk mengelas semua jenis logam, dan karena menggunakan sumber listrik dari PLN maka pengelasannya hanya pada jangkauan tertentu tidak bisa dibawa kemana-mana. Mesin arus *DC* kelebihan utamanya nyala busur listrik stabil, semua jenis elektroda dapat digunakan pada mesin las *DC*, tingkat kebisingan rendah, mesin las fleksibel dapat diubah arus bolak-balik atau searah. Pengelasan ini terdapat 2 macam las *DC*, yaitu las stasioner yang tidak dapat dipindahkan dan las portabel dapat dipindahkan seperti halnya mesin las yang bersifat *mobile* dimana mesin diputar oleh motor bensin atau disel yang terpasang dengan mesin las tersebut untuk menghasilkan arus listrik yang tidak terjangkau jaringan listrik.

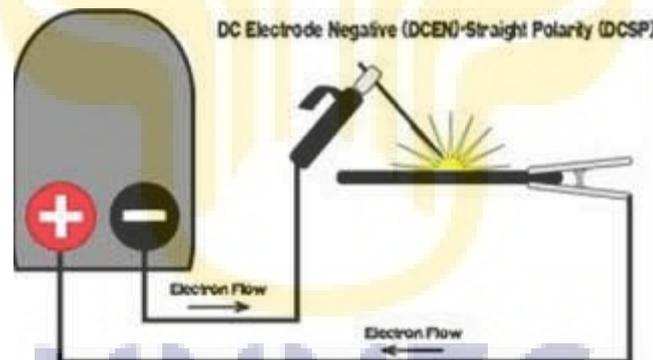
Pemilihan dalam penggunaan jenis arus baik *AC* maupun *DC* ditentukan dari jenis material yang akan dilas karena nantinya akan mempengaruhi masukan panas pada saat proses pengelasan.

b. Tegangan Busur

Secara umum dapat dikatakan bahwa arus pengelasan menentukan penetrasi las karena berbanding langsung, atau paling tidak secara eksponensial. Arus busur juga mempengaruhi tegangan. Jika voltasenya tetap maka jika arus naik maka panjang busur bertambah, sedangkan arus turun maka panjang busur akan berkurang. Tegangan yang diperlukan untuk mengelas kira-kira antara 20 sampai 30 Volt (Wiryosumarto, 2000: 224). Jadi untuk mempertahankan panjang busur pada kepanjangan tertentu, maka tegangan listrik perlu diperhatikan.

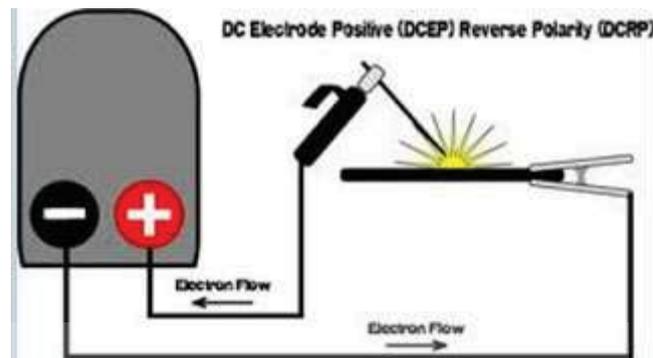
c. Polaritas Listrik

Paparan teori di bawah ini sangat membantu peneliti dalam menentukan polaritas yang baik untuk penelitian ini dikarenakan jika salah dalam menentukan polaritas akan berakibat fatal pada proses pengelasan. Menurut Wiryosumarto (2000: 225) pengelasan busur listrik dengan elektroda terbungkus dapat menggunakan polaritas lurus dan polaritas balik. Pengelasan pada mesin SMAW arus DC mempunyai dua polaritas, yaitu polaritas DCEN (*Direct Current Elektroda Negatif*) dan DCEP (*Direct Current Elektroda Positif*). Dalam bahasa Inggris juga disebut DCSP (*Direct Current Straight Polarity*) dan DCRP (*Dirrect Current Revers Polarity*).



Gambar 2.2 Mesin Las SMAW DCSP (*Direct Current Straight Polarity*)

Polaritas DCSP (*Direct Current Straight Polarity*) adalah benda kerja atau material yang akan dilas disambungkan dengan kutub positif (+) dan elektrodanya disambungkan dengan kutup negatif (-) pada mesin las DC. Kelebihan menggunakan polaritas DCSP adalah penetrasi dalam sehingga baik digunakan pada pengelasan lambat, untuk plat tebal. Kekurangannya untuk pengelasan dengan plat tipis karena penetrasi lambat akan mengakibatkan cepat mencair dan bolong.



Gambar 2.3 Mesin Las SMAW DCRP (*Dirrect Current Revers Polarity*)

Pengertian Polaritas *DCRP* (*Direct Current Revers Polarity*) adalah benda kerja atau material dasar yang akan dilakukan pengelasan disambungkan dengan kutup negatif (-) dan elektrodanya disambungkan dengan kutup positif (+) dari mesin las *DC*. Kelebihan menggunakan polaritas *DCEP* adalah pencairan elektroda banyak mengakibatkan penetrasi dangkal, sehingga baik digunakan untuk plat tipis. Kekurangannya bila digunakan untuk pengelasan plat tebal maka akan kurang efektif karena penembusan yang dangkal sehingga lasan akan kurang matang dan tidak sempurna.

Pemilihan polaritas ini tergantung pada bahan pembungkus elektroda, konduksi thermal dari bahan induk, kapasitas panas dari sambungan dan lain sebagainya. Sifat busur pada umumnya lebih stabil pada arus searah dari pada arus bolak balik, terutama pada pengelasan arus yang rendah. Akan tetapi, untuk pengelasan sambungan pendek lebih baik menggunakan arus bolak balik karena pada arus searah sering terjadi ledakan busur pada akhir dari pengelasan.

d. Elektroda Terbungkus

Pengelasan dengan menggunakan las busur listrik diperlukan kawat las (elektroda) yang terdiri dari satu inti yang terbuat dari logam yang dilapisi lapisan

campuran kimia. Elektroda terdiri dari dua bagian yaitu bagian yang berselaput (*fluks*) dan tidak berselaput yang merupakan pangkal untuk menjepit tang las. Fungsi dari *fluks* adalah untuk melindungi logam cair dari lingkungan udara, menghasilkan gas pelindung, dan menstabilkan busur.

Menurut Wiryosumarto (2000: 9) Las elektroda terbungkus dalam pengelasan ini digunakan kawat elektroda logam yang dibungkus dengan *fluks*. Busur listrik terbentuk diantara logam induk dan ujung elektroda, karena panas dari busur ini maka logam induk dan ujung elektroda tersebut mencair dan kemudian membeku bersama. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa arus busur listrik yang terjadi. Pola pemindahan cairan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan komposisi dari bahan *fluks* yang digunakan. Bahan *fluks* yang digunakan untuk membungkus elektroda selama pengelasan mencair dan membentuk terak yang menutupi logam cair yang terkumpul ditempat sambungan dan bekerja sebagai penghalang oksidasi (Wiryosumarto, 2000: 9).

Tabel yang ditunjukkan pada lampiran 1 halaman 74 menunjukkan spesifikasi dan macam – macam elektroda terbungkus yang digunakan dalam pengelasan untuk baja karbon rendah. Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah E 7018 dengan jenis *fluks* hidrogen rendah untuk mencegah terjadinya retak las pada pengelasan baja karbon rendah. Pemilihan penggunaan elektroda E 7018 juga dapat digunakan pada semua posisi dan berdasarkan kapasitasnya yaitu, bila kapasitas kecil seperti pada plat tipis maka dianjurkan untuk menggunakan mesin las polariatas terbalik.

Berdasarkan jenis elektroda dan diameter kawat inti elektroda dapat ditentukan arus dalam amper dari mesin las seperti pada Tabel 2.1.

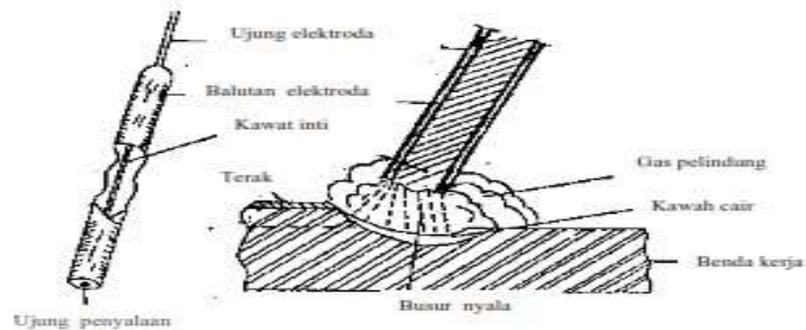
Tabel 2.1 Spesifikasi arus menurut tipe elektroda dan diameter dari elektroda

Diameter		Tipe Elektroda dan Amper yang digunakan					
Mm	Inch	E 6010	E 6014	E 7018	E 7024	E 7027	E 7028
2,5	3/32	-	80-125	70-100	70-145	-	-
3,2	1/8	80 – 120	110-160	115-165	140-190	125-185	140-190
4	5/32	120 –160	150-210	150-220	180-250	160-240	180-250
5	3/16	150 –200	200-275	200-275	230-305	210-300	230-305
5,5	7/32	-	260-340	260-340	275-375	250-350	275-365
6,3	¼	-	315-415	315-400	335-430	300-420	335-430
8,5	5/16	-	90-500	375-470	-	-	-

Sumber: (Soetardjo, 1997: 69)

Tabel 2.1 menunjukkan spesifikasi dari elektroda dan kisaran arus yang nantinya akan digunakan dalam pengelasan. Penelitian ini menggunakan elektroda E 7018 dengan diameter 3,2 mm atau $\frac{1}{8}$ inch. Kuat Arus yang digunakan antara 115 A sampai 165 A. Atas dasar itu peneliti menggunakan variasi arus sebesar 120 A, 140 A, dan 160 A. Nomer seri elektroda E 7018 pada penelitian ini menurut (Soetardjo,1997: 33) adalah:

- E : Elektroda las listrik (E 7018 diameter 3,2 mm).
- 70 : Tegangan tarik minimum dari hasil pengelasan (70.000 psi) atau sama dengan 492 MPa.
- 1 : Posisi pengelasan (angka 1 berarti dapat dipakai dalam semua posisi pengelasan).
- 8 : Menunjukkan jenis selaput serbuk besi hidrogen rendah dan interval arus las yang cocok untuk pengelasan.



Gambar 2.4 Las Elektroda Terbungkus (Wiryosumarto, 2000: 9)

3. Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah disini dipaparkan mengingat ada kaitannya dengan judul skripsi tersebut. Baja karbon rendah digunakan dalam penelitian ini karena baja karbon rendah merupakan mudah di las dengan menggunakan semua jenis las apapun, akan tetapi memiliki keretakan kepaakan las yang begitu tinggi. Menurut Wiryosumarto (2000: 90) Baja karbon rendah adalah baja yang dengan kadar karbon kurang dari 0,30%. Baja karbon rendah yang juga disebut baja lunak, banyak sekali digunakan untuk kontruksi umum. Baja karbon ini dibagi lagi dalam baja kil, baja semi-kil dan baja rim, dimana penamaannya didasarkan atas persyaratan deoksidasi, cara pembekuan dan distribusi rongga atau lubang halus didalam ingot.

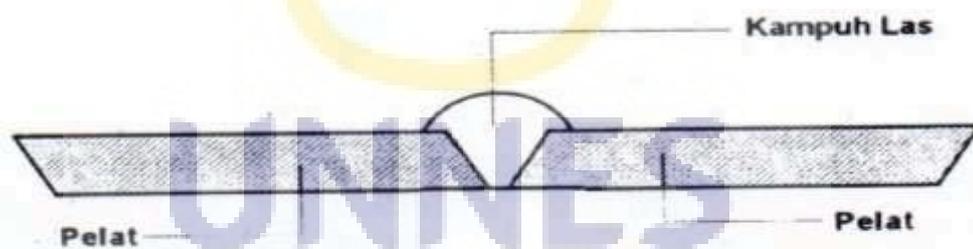
Baja karbon rendah dapat dilas dengan semua cara pengelasan yang ada didalam praktek dan hasilnya akan baik bila persiapannya sempurna dan persyaratannya dipenuhi, pada kenyataannya baja karbon rendah adalah baja yang mudah dilas. Kaitannya dengan penelitian ini menggunakan plat bahan baja karbon rendah dengan ketebalan 10 mm dengan spesifik bahan yang digunakan adalah baja karbon rendah *ASTM A36*.

4. Kampuh V

Kampuh las disini dipaparkan mengingat ada kaitannya dengan judul skripsi tersebut. Menurut Sonawan (2006:17) kampuh las merupakan bagian dari logam induk yang nantinya akan diisi oleh deposit las atau logam las (*weld metal*). Kampuh las, awalnya adalah berupa kubangan las (*weld pool*) yang kemudian diisi dengan logam las.

Sambungan kampuh V terbuka dipergunakan untuk menyambung pelat dengan ketebalan 6-15 mm dengan sudut kampuh antara 60° - 80° , jarak akar 2 mm, tinggi akar 1-2 mm (Soetardjo, 1997: 57). Alur pengelasan dinyatakan oleh sepasang sisi ujung dari dua logam yang akan disambung dengan pengelasan.

Sebuah kampuh las harus dirancang untuk pengelasan yang efisien secara ekonomis dan mudah pelaksanaannya serta untuk meminimalkan jumlah endapan tanpa menyebabkan cacat las.



Gambar 2.5 Bentuk kampuh V (Soetardjo, 1997: 57)

Kampuh las dapat dipersiapkan dengan proses pemesinan atau pemotongan panas lainnya. Metode pemotongan panas yang dapat dipakai meliputi: pemotongan gas, pemotongan busur plasma, pemotongan busur udara, pemotongan laser, dan sebagainya. Pada penelitian ini penulis akan menggunakan

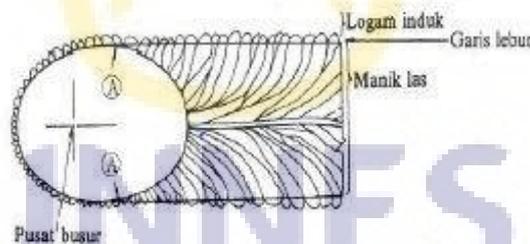
jenis sambungan alur berbentuk V tunggal karena pemilihan bentuk alur kampuh tersebut berdasarkan ketentuan dari ketebalan bahan, elektroda dan sebagainya.

5. Siklus Thermal daerah Lasan

Menurut Wiryosumarto (2000: 56), daerah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas yang dalam bahasa Inggrisnya adalah “*Heat Affected Zone*” dan disingkat menjadi daerah HAZ dan logam induk yang tak terpengaruhi.

a. Logam Las

Menurut Widharto, Sri (2013: 455) logam las adalah perpaduan antara bahan pengisi (*filler metal*) dengan logam induk yang kemudian setelah membeku membentuk jalur las. Logam didaerah pengelasan mengalami siklus termal yakni pencairan kemudian pembekuan. Kondisi ini menyebabkan perubahan struktur mikro dari logam yang bersangkutan



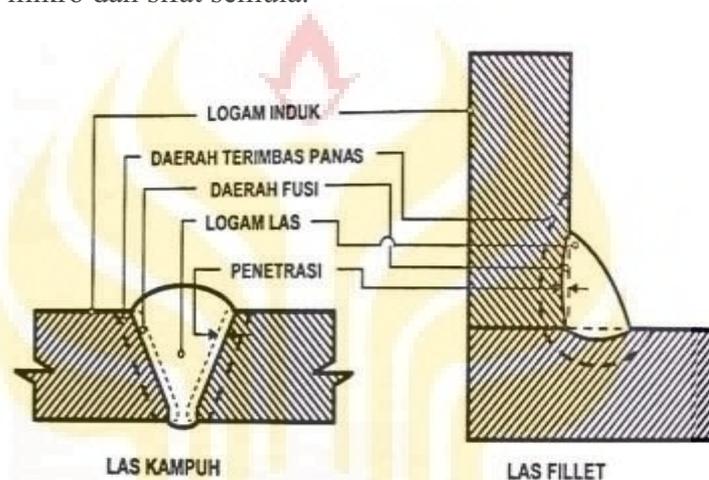
Gambar 2.6 Arah pembekuan dari logam las (Wiryosumarto, 2000: 57)

Pada Gambar 2.6 ditunjukkan secara skematik proses pertumbuhan dari kristal-kristal logam las yang berbentuk pilar. Titik A dari gambar tersebut adalah titik mula dari struktur pilar yang selalu terletak dalam logam induk. Titik ini tumbuh menjadi garis lebur dengan arah yang sama dengan gerakan sumber panas. Pada garis lebur sebagian dari logam dasar turut mencair dan selama proses

pembekuan logam las tumbuh pada butir-butir logam induk dengan sumbu kristal yang sama (Wiryosumarto, 2000: 57).

b. Logam Induk

Menurut Widharto, Sri (2013: 456), logam induk adalah bagian logam yang jauh dari bagian las sehingga tidak terpengaruh oleh suhu panas las dan tetap dalam struktur mikro dan sifat semula.



Gambar 2.7 Bagian las (Widharto, 2013: 456)

c. *Heat Affected Zone (HAZ)*

Menurut Sonawan (2006: 66), pemanasan lokal pada permukaan logam induk selama proses pengelasan menghasilkan daerah pemanasan yang unik, artinya disetiap titik yang mengalami pemanasan itu memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Pengelasan busur listrik menunjukkan permukaan logam yang berhubungan langsung dengan busur listrik akan mengalami pemanasan paling tinggi yang memungkinkan daerah tersebut mencapai titik cairnya.

Menurut Wiryosumarto (2000: 56), daerah terimbas panas atau *HAZ* adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat.

Gambar 2.8 menunjukkan diagram kesetimbangan besi karbon sebagai dasar dari bahan besi baja. Pada paduan besi karbon terdapat fasa karbida yang disebut sementit dan juga grafit. Yang dibahas di sini hanyalah diagram Fe-Fe₃C (sementit mempunyai kadar C = 6,67 %). Titik penting pada diagram fasa ini adalah:

A : Titik cair besi.

B : Titik pada cairan yang ada hubungannya dengan reaksi peritektik.

H: Larutan padat δ yang ada hubungannya dengan reaksi peritektik. Kelarutan karbon maksimum adalah 0,1 %.

N: titik transformasi dari besi $\delta \leftrightarrow$ besi γ , titik transformasi A₄ dari besi murni.

J: Titik peritektik. Selama pendinginan austenit pada komposisi J, fasa γ terbentuk dari larutan padat δ pada komposisi H dan cairan pada komposisi B.

C: titik eutektik. Selama pendinginan fasa γ dengan komposisi E dan sementit pada komposisi F (6,67% C) terbentuk dari cairan pada komposisi C. Fase eutektik ini disebut ledeburit.

E: titik yang menyatakan fasa γ , ada hubungan dengan reaksi eutektik. Kelarutan maksimum dari karbon 2,14%. Paduan besi karbon sampai pada komposisi ini disebut baja.

G: pada transformasi besi $\delta \leftrightarrow$ besi α . Titik transformasi A₃ untuk besi.

P: titik yang menyatakan ferit, fasa α , ada hubungan dengan reaksi eutektoid. Kelarutan maksimum dari karbon kira-kira 0,02%.

S: titik eutektoid. Selama pendinginan ferit pada komposisi P dan sementit pada komposisi K (sama dengan F) terbentuk simultan dari austenit pada

komposisi S. Reaksi eutektoid ini dinamakan transformasi A_1 dan fasa eutektoid ini dinamakan perlit.

GS: garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dan komposisi, dimana mulai terbentuk ferit dari austenit. Garis ini disebut garis A_3 .

ES: garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dan komposisi; dimana mulai terbentuk sementit dari austenit, dinamakan garis A_{cm} .

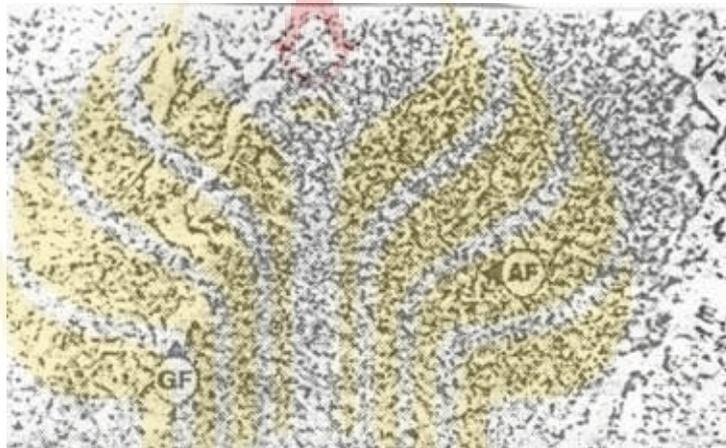
A_2 : titik transformasi magnetik untuk besi atau ferit.

A_0 : titik transformasi magnetik untuk sementit.

Pendinginan lambat akan menurunkan temperatur transformasi, sebagai contoh titik A_1 akan turun dari temperatur 723°C menjadi 690°C . Besar kecilnya penurunan temperatur A_1 sangat dipengaruhi oleh cepat lambatnya laju pendinginan. Proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi pada pengelasan memiliki pengaruh yang cukup berarti pada temperatur transformasi ini, sehingga prediksi metalurgi las yang menggunakan diagram ini menjadi sulit. Butiran struktur mikro yang berhubungan dengan diagram di atas dijelaskan sebagai berikut:

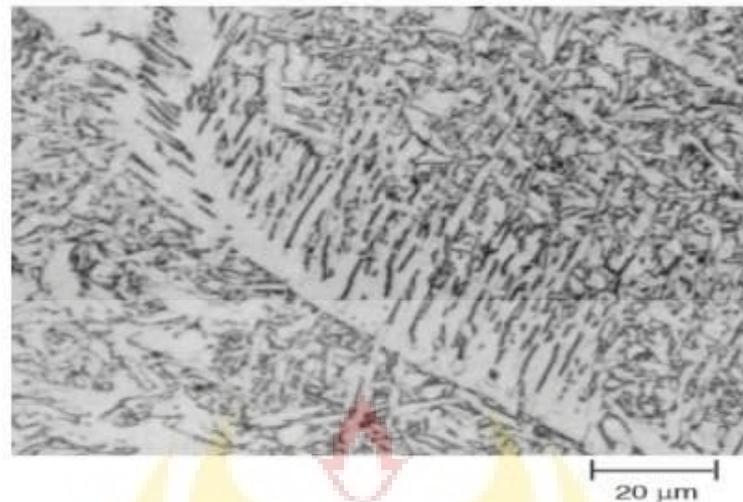
- a. **Karbon**, Unsur ini merupakan atom interstisi yang berukuran sangat kecil yang cenderung menyisip diantara atom-atom besi. Karbon dapat memperkuat baja dan meningkatkan kemampuan untuk dikeraskan melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Unsur ini juga merupakan salah satu penyebab terjadinya retak pada pengelasan baja karbon, terutama bila kadarnya melebihi 0,25%. Karbon juga dapat membentuk senyawa **karbida** bila berikatan dengan unsur logam, misal besi karbida dan krom-karbida.

- b. **Ferit batas butir** (*Grain boundary ferrite*), terbentuk pertama kali transformasi (*austenite*) menjadi (*ferrite*), biasanya terbentuk sepanjang batas *austenite* pada temperatur 1000 °C – 650 °C.
- c. ***Ferrite Acicular***, berbentuk intragranular dengan ukuran yang kecil dan mempunyai orientasi kearah acak. Biasanya *ferrite acicular* terbentuk sekitar temperatur 650 °C dan mempunyai ketangguhan paling tinggi.



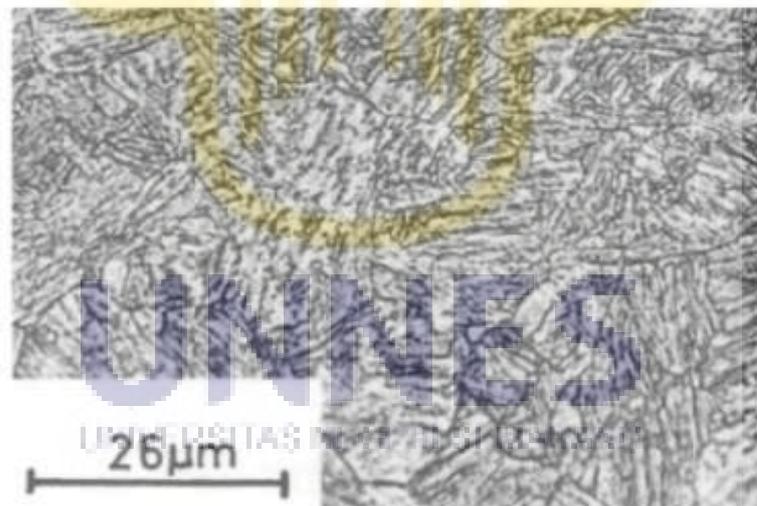
Gambar 2.9 Struktur Mikro *Acicular Ferrite* (AF) dan *Grain boundary Ferrite* (GF) atau ferit batas butir (Sonawan, 2004: 70)

- d. ***Ferrite Widmanstatten***, jika temperaturnya lebih rendah maka Akan terbentuk *Ferrite Widmanstatten*. Struktur mikro ini terbentuk pada temperatur 750 °C. 650 °C di sepanjang batas butir austenit. *Ferrite Widmanstatten* mempunyai ukuran besar dengan orientasi arah yang hampir sama sehingga memudahkan terjadinya perambatan retak.



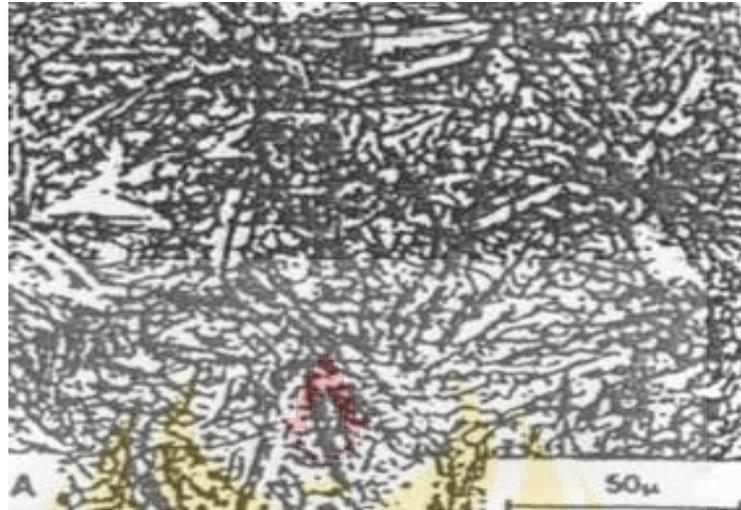
Gambar 2.10 *Ferrite widmanstätten* (ASM 2004)

- e. **Bainit**, merupakan ferit yang tumbuh dari batas butir austenit dan terbentuk pada temperatur 500°C. bainit mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dibanding ferit, tetapi lebih rendah daripada martensit.



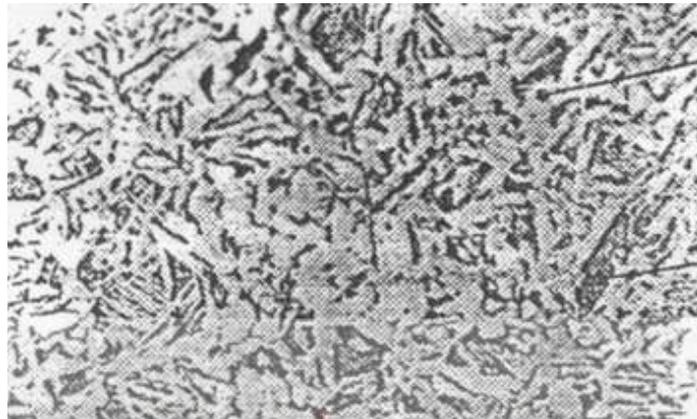
Gambar 2.11 Bainit (ASM 2004)

- f. **Martensit**, terbentuk bila proses pengelasan dengan pendinginan yang sangat. Struktur ini mempunyai sifat sangat keras dan getas sehingga ketangguhannya rendah.



Gambar 2.12 Martensit (ASM 2004)

- g. **Sementit** (Fe_3C), tidak seperti ferit dan Austenit, sementit merupakan senyawa bersifat sangat keras yang mengandung 6,67%C. Sementit sangat keras tetapi bila bercampur dengan ferit yang lunak maka kekerasan keduanya menurun. Campuran ferit dengan sementit disebut Perlit. Laju pendinginan lambat menghasilkan Perlit kasar, sehingga baja-nya mudah dimesin tetapi memiliki ketangguhan rendah. Laju pendinginan cepat menghasilkan Perlit halus, bersifat keras dan lebih tangguh.
- h. **Perlit**, campuran ferit dan sementit berlapis dalam suatu struktur butir disebut dengan Perlit. Jarak antar pelat-pelat sementit dalam Perlit tergantung pada laju pendinginan baja. Laju pendinginan lebih cepat menghasilkan jarak yang cukup rapat, sedangkan laju pendinginan lambat menghasilkan jarak yang semakin jauh/kasar.



Gambar 2.13 Perlit dan ferit (ASM 2004)

7. *Bending Test*

Sifat kemampuan suatu material diperlukan pengujian terhadap sampel yang disiapkan sebagai spesimen dengan ukuran dan bentuk yang ditentukan dalam standar pengujian. Teori pengujian *bending* dipaparkan mengingat teori tersebut berkaitan dengan judul penelitian yang akan diteliti. Pengujian *bending* mengacu pada standar *JIS Z 2248 three point bending* dan menggunakan model *face bending* karena menggunakan spesiman baja karbon rendah.

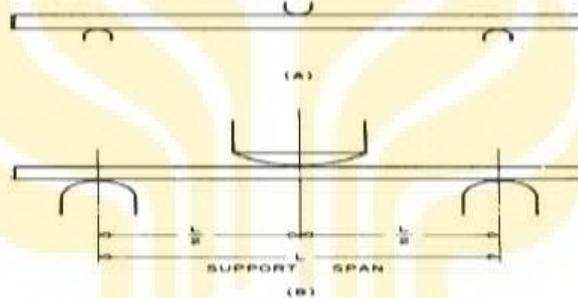
Pengujian lengkung atau (*bending test*) merupakan salah satu pengujian yang merusak atau *destructive test*. Pengujian merusak adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui kekuatan logam pada konstruksi.

Pengujian lengkung (*bending test*) adalah salah satu cara pengujian yang digunakan untuk menentukan mampu bentuk dari pelat atau kekuatan sambungan las (Surdia, T., dan Shinroku Saito, 2000: 21). Pengujian *Bending* digunakan untuk menganalisa adanya *open defect* pada saat material mendapat beban lentur.

Menurut Syahrani *et al.*, (2013: 397) untuk mengetahui kekuatan lentur (*bending*) suatu material dapat dilakukan dengan pengujian lentur terhadap

spesimen tersebut. Kekuatan *bending* atau kekuatan lengkung adalah tegangan *bending* terbesar yang dapat diterima akibat pembebanan luar tanpa mengalami deformasi yang besar atau gagal. Besar kekuatan *bending* tergantung pada jenis spesimen dan pembebanan. Akibat pengujian lengkung, bagian dari spesimen mengalami tekanan, sedangkan bagian bawah mengalami tegangan tarik.

Pengujian ini menggunakan alat uji *bending* sehingga benda uji yang diuji mengalami dua gaya tekan di permukaan atas dan gaya tarik di permukaan bawah yang dibatasi oleh garis netral sebagaimana yang terlihat dalam gambar dibawah:



Gambar 2.14 Skema pengujian *bending*

Agar dapat mengetahui kekuatan hasil las dengan menggunakan pengujian *bending*, maka dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$M = \frac{P}{2} \times \frac{L}{2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Sehingga kekuatan *bending* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_b = \frac{3pl}{2bd^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

- σ_b = Kekuatan *bending* (Mpa)
- P = Beban/ *load*
- L = Panjang *Span* (mm)
- b = lebar/ *width*(mm)
- d = tebal/ *depth*(mm)

Pengujian *bending* juga sering dipergunakan untuk mengetahui aspek-aspek kemampuan bahan uji dalam menerima pembebanan seperti kekuatan atau tegangan lengkung, elastisitas, memeriksa mekanis dari material las dan lain sebagainya.

8. Pengamatan Struktur Mikro

Uji struktur ini dilaksanakan secara mikroskopik dengan perbesaran yang akan diinginkan. Pemeriksaan mikroskopik, permukaan spesimen diperiksa melalui mikroskop metalurgi untuk mengetahui jenis struktur dan rasio komponen-komponennya, untuk menentukan sifat-sifat materialnya (Sunaryo, 2008: 449).

Pengujian struktur mikro dalam penelitian ini dilakukan pada material baja karbon rendah setelah dilakukan pengujian *bending* terhadap spesimen tersebut. Kecepatan pembekuan yang cepat akan mengakibatkan terjadinya struktur mikro yang ada terdapat pada spesimen.

B. Penelitian yang Relevan

Sejauh pengetahuan penulis dari literatur yang telah dibaca, terdapat berbagai penelitian mengenai pengelasan *SMAW* terhadap pengujian hasil sambungan las yang relevan dengan penelitian yang dilakukan. Beberapa literatur tersebut akan penulis sampaikan untuk mendukung penelitian yang dilakukan.

Pengaruh hasil pengelasan las *TIG* terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan pada material baja karbon rendah dilakukan oleh Prasetyo, Eko (2014). Dimana dalam penelitian tersebut untuk mengetahui hasil optimal uji tarik

dan ketangguhan pada baja karbon rendah SS 400 dengan variasi arus 80 A, 100 A, dan 120 A. Hasil kekuatan tarik tertinggi diperoleh dari arus 120 A dengan nilai kekuatan tarik sebesar 26.92 kg/mm^2 dan hasil uji ketangguhan dengan menggunakan uji *bending* tertinggi diperoleh dari arus 80 A. Nilai kekuatan *bending* sebesar 81.50 kg/mm^2 . Relevansi dari penelitian sebelumnya terletak pada penggunaan variasi kuat arus dan pengujiannya menggunakan *bending test* untuk mengetahui ketangguhan dari material baja karbon. Sedangkan perbedaan dari penelitian tersebut dengan penelitian yang akan diteliti terletak pada penggunaan las yang digunakan karena peneliti menggunakan las *SMAW* dan ditambah dengan menggunakan variasi sudut kampuh las.

Penelitian tentang variasi sudut kampuh dan kuat arus menurut Aljufri, dkk (2007) pengaruh variasi kampuh sudut V tunggal dan kuat arus pada sambungan logam aluminium-Mg 5083 terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan TIG menyebutkan bahwa hasil pengelasan pada paduan Al-Mg sangat dipengaruhi oleh besar sudut kampuh dan kuat arus, hal tersebut dibuktikan pada hasil pengujian dengan sudut kampuh sebesar 90° dan kuat arus 100 A menghasilkan kekuatan tarik maksimum. Sementara kekuatan tarik terendah terjadi pada hasil pengelasan dengan kuat arus 150 A dan sudut kampuh 70° . Relevansi dari penelitian sebelumnya terletak pada penggunaan variasi sudut kampuh, dan kuat arus. Pada penelitian sebelumnya sama-sama mencari kekuatan dari hasil suatu pengelasan yang membedakannya dalam penelitian ini terletak pada pengujiannya menggunakan pengujian *bending*.

Relevansi dari penelitian sebelumnya dengan penelitian yang akan diteliti sama-sama meneliti hasil pengelasan *SMAW* baik itu struktur mikronya dan sifat mekaniknya. Menurut Boumerzoug, et al (2010) tentang pengaruh pengelasan pada struktur mikro dan sifat mekanik baja karbon rendah penelitian ini bertujuan untuk mempelajari tentang pengelasan pada baja karbon rendah industri menggunakan las *SMAW*. Hasilnya struktur mikro dengan menggunakan *EBSD* (*Electron Back Scattered Diffraction*), dan *X-ray diffraction* dari base metal ke logam las. Struktur mikro pada zona tengah lasan berbeda dari *HAZ*. *HAZ* mengandung banyak *ferrite widmanstatten*, butiran besar *ferrite* dan kelompok *perlite* bahwa nilai kekerasan maksimal ditemukan pada area logam las dan *HAZ* secara spesifik. Perbedaan dari penelitian yang akan adalah menggunakan variasi sudut kampuh, variasi arus, dan metode pengujian yang digunakan dengan menggunakan uji *bending*.

Penelitian mengenai variasi sifat mekanik dari baja karbon rendah menurut Talabi, et al (2014) tentang pengaruh variasi pengelasan pada sifat mekanik dari sambungan las baja karbon rendah. Penelitian tersebut menggunakan las *SMAW* pada baja karbon rendah ketebalan 10 mm dengan parameter kuat arus, voltase, kecepatan las, dan diameter elektroda. Sampel las diuji menggunakan uji lentur, dampak, dan kekerasan. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa pemilihan parameter pengelasan berefek secara signifikan pada sifat mekanik. Peningkatan pada tegangan busur dan arus pengelasan akan meningkatkan kekerasannya sedangkan kekuatan luluhnya akan menurun. Perilaku ini disebabkan fakta dari peningkatan arus dan tegangan busur berarti masukan panas meningkat.

Perbedaan penelitian dengan yang akan diteliti terletak pada bagaimana penggunaan variasi sudut kampuh yang digunakan dan struktur mikro dari memvariasikan sudut kecil, normal dan besar terhadap kekuatan luluh baja karbon rendah yaitu dengan menggunakan uji *bending*.

Penelitian mengenai variasi kuat arus dan bentuk kampuh menurut Huda, dkk (2013) tentang analisa pengaruh variasi kuat arus dan bentuk kampuh pada pengelasan *SMAW* terhadap distorsi sudut dan kekuatan tarik sambungan butt-joint baja aisi 4140 menyebutkan bahwa nilai kekuatan tarik yang tertinggi pada pengelasan baja AISI 4140 ini adalah hasil pengelasan pada kampuh U pada variasi arus 100 A, 35,9 kg/mm². Semakin tinggi kuat arus yang dipilih maka kekuatan tarik sambungan las akan semakin besar, sedangkan besar *heat input* pengelasan berpengaruh pada besar distorsi sudut yang terjadi. Relevansi dengan penelitian penelitian yang akan dilakukan adalah penggunaan variasi kuat arus dan pengelasan menggunakan las *SMAW*. Perbedaan dari penelitian sebelumnya dengan yang akan diteliti adalah mencari kekuatan *bending* menggunakan pengujian *bending*.

Penelitian mengenai variasi arus dan sudut kampuh las menurut Widyanto, dkk (2014) tentang analisa pengaruh variasi arus dan sudut kampuh pengelasan *SMAW* terhadap tegangan sisa pengelasan dan kekuatan mekanis sambungan baja karbon rendah menyebutkan bahwa nilai efisiensi las cenderung meningkat pada setiap variasi arus yang digunakan. Semakin besar arus dan sudut kampuh yang digunakan akan semakin tinggi kekuatan tariknya maka semakin besar tegangan sisa yang didapat. Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan adalah sama-

sama menggunakan variasi arus dan sudut kampuh. Sedangkan yang membedakan dari penelitian sebelumnya dengan penelitian yang akan dilakukan adalah untuk mencari kekuatan hasil lasan dengan menggunakan uji *bending*.

C. Kerangka Berfikir

Pengelasan merupakan suatu proses penyambungan logam, terdapat banyak faktor yang mempengaruhi kualitas dari hasil lasan diantaranya: mesin las yang digunakan, bahan yang digunakan, prosedur pengelasan, cara pengelasan, arus pengelasan, jenis sambungan, dan juru las. Kualitas hasil las dapat diketahui dengan cara memberikan pembebanan pada hasil lasan tersebut. Gaya ataupun pembebanan tersebut berupa pengujian lengkung atau *bending test* pada benda hasil lasan untuk mengetahui besar kekuatannya.

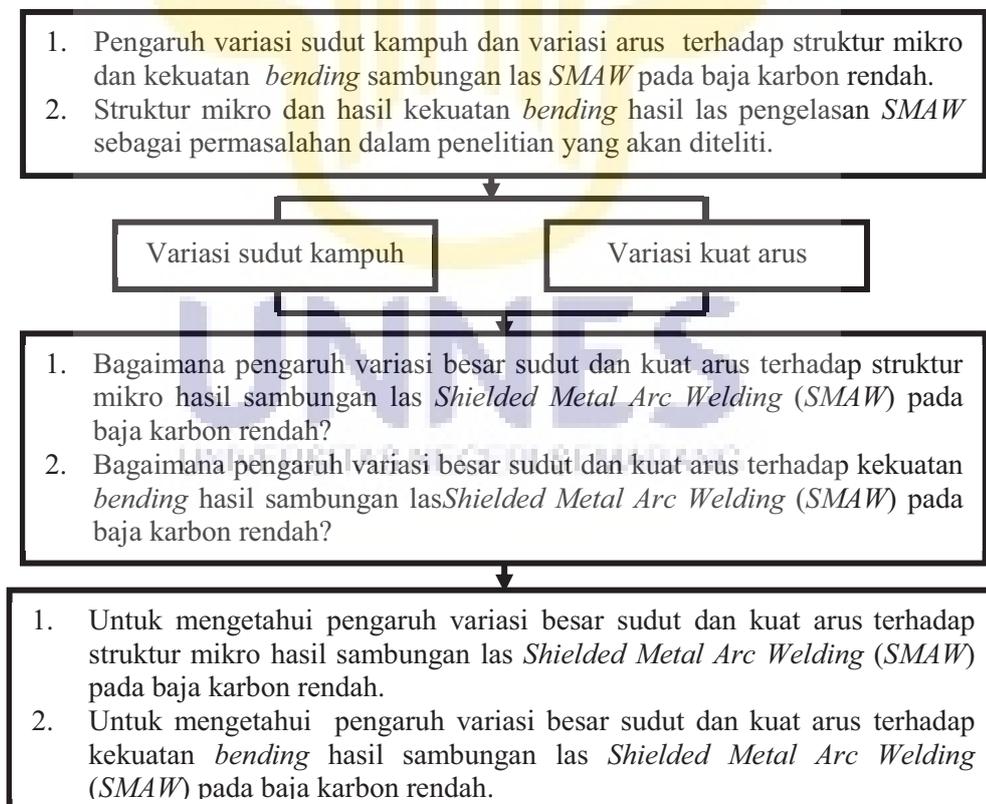
Parameter utama dalam penelitian ini adalah kuat arus dan sudut kampuh las. Pemilihan masukan besar kuat arus yang digunakan dan penggunaan sudut yang tepat akan menghasilkan kekuatan las yang maksimal dalam penerapannya di dunia pengelasan terutama pada pengelasan *SMAW*. Karena kuat arus yang menghasilkan panas akan mempengaruhi struktur mikro dari hasil lasan sedangkan struktur mikro tersebut akan berdampak dengan kekuatan hasil pengelasan tersebut.

Pemilihan besar atau kecilnya kawah kampuh akan menentukan homogenitas dari pencampuran logam las dengan logam material pada daerah *HAZ* yang nantinya akan mempengaruhi dari kekuatan hasil sambungan las tersebut.

Pengujian lengkung atau *bending test* digunakan untuk mengetahui kekuatan dari hasil pengelasan *SMAW* pada baja karbon rendah, maka akan didapat aspek-aspek kemampuan bahan uji dalam menerima pembebanan seperti kekuatan atau tegangan lengkung, elastisitas, memeriksa mekanis dari material las akan diketahui.

Pengujian struktur mikro digunakan untuk mengetahui bentuk dan fasa dari struktur- struktur pada spesimen dari sebelum pengelasan kemudian sesudah pengelasan dengan menggunakan struktur mikro maka akan terlihat perbedaan dari bentuk dan fase struktur tersebut.

Secara sederhana kerangka berpikir dalam penelitian ini akan ditunjukkan seperti pada Gambar 2.16.



Gambar 2.15 Kerangka Pikir

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan pada pengaruh variasi sudut kampuh dan variasi kuat arus terhadap struktur mikro dan kekuatan bending pada hasil las *SMAW* baja karbon rendah, dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi besar sudut kampuh dan kuat arus yang digunakan pada hasil las *SMAW* baja karbon rendah memberikan pengaruh terhadap perubahan bentuk butiran ferit dan perlit terutama pada daerah *HAZ* dan logam las. Logam induk tidak terjadi perubahan struktur mikro ferit dan perlit karena pada daerah logam induk tidak terkena panas atau termal yang disebabkan oleh proses pengelasan. Namun variasi arus memberikan pengaruh yang besar terhadap struktur mikro pada daerah *HAZ* dan logam las. Foto struktur mikro pada pengelasan dengan menggunakan sudut 50° pada penggunaan arus kuat arus 140 A tampak banya terdapat porositas di daerah *HAZ* (*Heat Affacted Zone*). Porositas terjadi karena adanya gas yang terperangkap karena hasil pengelasan, atau dapat terjadi karena kekurangan logam cair karena penyusutan ketika logam membeku. Semakin tinggi kuat arus yang digunakan porositas yang terjadi karena gas yang terjebak pada saat proses pengelasan akan terlihat namun semakin besar sudut kampuh yang digunakan porositas tersebut akan menjadi sedikit. Foto mikro pada pengelasan dengan menggunakan sudut 60°

dengan menggunakan kuat arus 120 A, 140 A, dan 160 A tidak tampak adanya porositas sehingga dapat dikatakan hasil lasan tersebut baik. Foto mikro pada pengelasan dengan sudut 70° pada arus 160 A juga terlihat hanya sedikit porositas. Foto mikro pada pengelasan dengan menggunakan sudut 80° dan 90° dengan menggunakan kuat arus 120 A, 140 A, dan 160 A tampak porositas hanya sedikit sehingga dapat dikatakan hasil lasan tersebut juga baik. Pengelasan dengan arus 160 A jumlah struktur ferit *acicular* terlihat lebih banyak dibanding arus 120 A dan 140 A, hal ini disebabkan oleh meningkatnya masukan panas maka laju pendinginan setelah pengelasan akan menjadi lambat, sehingga struktur ferit *acicular* yang terbentuk akan lebih banyak. yang tampak seperti pada pengelasan dengan sudut 90° menggunakan arus 160 A sehingga mendapatkan kekuatan *bending* yang tinggi.

2. Variasi penggunaan sudut kampuh dan variasi kuat arus yang digunakan memberikan pengaruh yang besar terhadap nilai kekuatan bending pada sambungan las karena menentukan mutu atau kualitas hasil las tersebut dengan kekuatan bending tertinggi sebesar $1402,31 \text{ N/mm}^2$ dengan menggunakan sudut 90° pada penggunaan arus 160 A, sedangkan kekuatan bending terendah sudut kampuh 50° dengan kuat arus 140 A sebesar $1147,75 \text{ N/mm}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa menggunakan sudut akan menentukan masukan dari logam las tersebut dan menghasilkan kekuatan bending yang tinggi dan penggunaan arus yang semakin tinggi akan menyebabkan kekuatan sambungan las yang tinggi pula.

B. Saran

1. Pengelasan dengan menggunakan las busur listrik atau *SMAW* pada baja karbon rendah terutama baja *ASTM A36* untuk mendapatkan kekuatan *bending* yang maksimal maka dapat digunakan arus sebesar 160 A dan menggunakan sudut 90^0 .
2. Pengelasan *SMAW* pada baja karbon rendah perlu dilakukan pemanasan awal atau akhir atau kombinasinya untuk meminimalisir terjadinya retak pada pengelasan.
3. Saran penelitian selanjutnya yaitu perlu dilakukan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada pengujian struktur mikro untuk lebih jelas melihat struktur dari baja karbon rendah *ASTM A36* dan perlunya penambahan pengujian yang bersifat mekanis seperti uji kekerasan, uji tarik atau uji *fatigue* untuk mengetahui ketangguhan pada sambungan las baja karbon rendah *ASTM A36*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aljufri, *et al.* 2007. Pengaruh Variasi Sudut Kampuh V Tunggal dan Kuat Arus Pada Sambungan Logam Aluminium-Mg 5083 Terhadap Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan TIG. *Jurnal Saintek*. Volume 5, No. 2: 12-19.
- ASM: 2004
- Boumerzoug, Z. *et al.* 2010. Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Scientific Research*. No. 2: 502-506.
- Daryanto. 1982. *Ketrampilan Praktis Teknik Mengelas dan Mematri Logam*. Semarang: Aneka Ilmu.
- Duniawan, A. 2015. Pengaruh gerak elektroda dan Posisi Pengelasan Terhadap Uji Kekerasan dari Hasil Las Baja SSC 41. *Jurnal Teknologi*. Volume 8 No 2.
- Huda, S. *et al.* 2013. Analisa Pengaruh Variasi Arus dan Bentuk Kampuh Pada Pengelasan SMAW Terhadap Distorsi Sudut dan Kekuatan Tarik Sambungan BUTT-JOIN Baja AISI 4140. *Jurnal Teknologi*. Volume 6, No. 2: 193-200.
- JIS Z 2248: 2006
- Machmoed, B. R. 2012. *Analisis Pengaruh Variasi Sudut Kampuh V (one side welding) Sambungan Las MIG Terhadap Distorsi dan Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah*. Laporan Pengembangan IPTEK Dana PNPB Tahun Anggaran 2012.
- Mizhar, S. dan Pandiangan, I. H. 2014. Pengaruh Masukan Panas terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketangguhan pada Pengelasan Shield Metal Arc Welding (SMAW) dari Pipa Baja Diameter 2,5inci. *Jurnal Dinamis 2* (14): 16-22.
- Prasetyo, E. Dan Suwiro, J. 2014. Pengaruh Hasil Pengelasan Las TIG Terhadap Kekuatan Tarik Dan Ketangguhan Pada Material Baja Karbon Rendah. *JTM Volume 02*, No.3:21-28.
- Prawira, M. Z. *et al.* 2015. Pengaruh Perbedaan Suhu Terhadap Kekuatan Impact Alumunium 5083 Hasil Pengelasan Tungsten Inert Gas. *Jurnal Teknik Perkapalan*. Volume 3, No. 3: 362-370
- Surdia, T. dan Saito, S. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik* (Cetakan ke-4). Jakarta: Pradnya Paramita.

- Soetardjo. 1997. *Petunjuk Praktek Las Asetilin dan Las Listrik* (Moedjiarto, ed.). Surabaya: SIC Surabaya.
- Sonawan, H. & Suratman, R. 2004. *Pengantar Untuk Memahami Pengelasan Logam*. Bandung: Alfabeta.
- Sonawan, H. & Suratman, R. 2006. *Pengantar Untuk Memahami Pengelasan Logam* (Cetakan ke-2). Bandung: Alfabeta.
- Sugiyono. 2014. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif Dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Suharto. 1991. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Sunaryo, H. 2008. *Teknik Pengelasan Kapal Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Syahrani, A. 2013. Variasi Arus terhadap Kekuatan Tarik dan *Bending* pada Hasil Pengelasan SM940. *Jurnal Mekanikal*, Vol.4, No.2, Juli 2013: 393-402.
- Talabi, S. I. *et al.* 2014. Effect of Welding Variables on Mechanicak Properties of Low Carbon Steel Welded Joint. *Advance in Production Engineering & Management*. Vol.9, No.4, December 2014:181-186.
- Widharto, S. 2013. *Welding Inspection*. Jakarta: Mitra Wacana Media.
- Widyanto, N. 2014. Analisa Pengaruh variasi arus dan Kampuh Pengelasan SMAW Terhadap Tegangan Sisa Pengelasan dan Kekuatan Mekanis Sambungan Baja Karbon Rendah. *E-jurnal Teknik Mesin*. Vol. 1, No.2.
- Wirjosumarto, H., Okumura, T. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Erlangga.