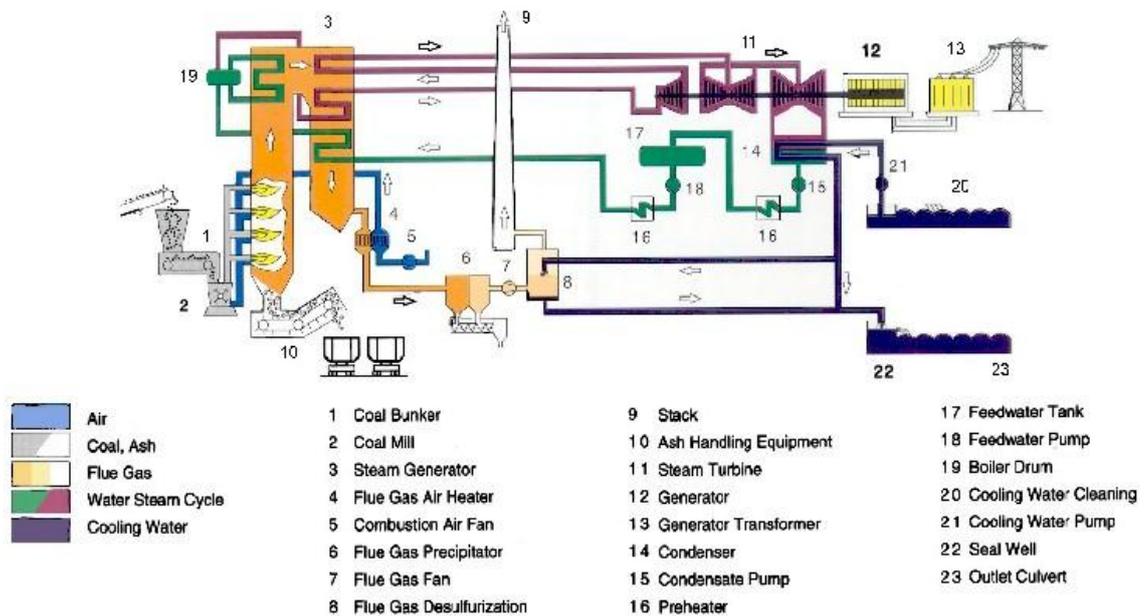


BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar kalor yang merubah fasa gas ke cair (kondensasi). Pada PT. Siemens Indonesia, kondensor digunakan pada sebuah sistem tertutup. Sistem tertutup ini dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem tertutup PT. Siemens Indonesia.

Pada sistem tertutup di Gambar 2.1, kondensor berguna untuk mengkondensasi uap keluaran dari turbin. Hal ini terjadi karena uap bersentuhan langsung dengan pipa-pipa yang di dalamnya dialiri oleh air pendingin. Air pendingin yang digunakan berasal dari air Laut Jawa. Air laut dibersihkan dengan sistem pembersih air dingin (20) dan disirkulasi oleh pompa-pompa air dingin (21) menuju kondensor sebelum kembali lagi ke laut melalui saluran air (23). Uap setelah kondensasi kemudian mengalir melewati beberapa pemanas awal (16) dan dibawa dengan pompa air umpan (18) melewati pemanas awal lebih lanjut menuju generator uap [22].

Kondensor yang digunakan di PT. Siemens Indonesia merupakan jenis kondensor horizontal seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kondensor horizontal.

2.2 Sejarah Pengelasan

Berdasarkan penemuan benda-benda sejarah dapat diketahui bahwa teknik penyambungan logam telah diketahui sejak dari zaman prasejarah, misalnya pembrasingan logam paduan emas-tembaga dan pematrian paduan timbal-timah, menurut keterangan yang didapat telah diketahui dan dipraktikkan dalam rentang waktu antara tahun 4000 sampai 3000 S.M (Sebelum Masehi). Sumber energi yang dipergunakan pada waktu itu diduga dihasilkan dari pembakaran kayu atau arang. Berhubung suhu yang diperoleh dengan pembakaran kayu dan arang sangat rendah maka teknik penyambungan ini pada waktu itu tidak dikembangkan lebih lanjut.

Setelah energi listrik dapat dipergunakan dengan mudah, teknologi pengelasan maju dengan pesat sehingga menjadi suatu teknik penyambungan yang mutakhir. Cara-cara dan teknik-teknik pengelasan yang banyak digunakan pada saat ini seperti las busur, las resistansi listrik, las termit, dan las gas pada umumnya diciptakan pada akhir abad ke 19.

Alat-alat las busur dipakai secara luas setelah alat tersebut digunakan dalam praktek oleh Bernades pada tahun 1885. Dalam penggunaan yang pertama ini Bernades memakai elektroda yang dibuat dari batang karbon atau grafit. Dengan mendekatkan elektroda ke logam induk atau logam yang akan dilas berjarak kira-kira 2 mm, maka terjadi busur listrik yang merupakan sumber panas dalam proses pengelasan. Karena panas yang timbul, maka logam pengisi yang terbuat dari logam yang sama dengan logam induk mencair dan mengisi tempat sambungan. Pada tahun 1889, Zerner mengembangkan cara pengelasan busur yang baru dengan menggunakan busur listrik yang dihasilkan oleh dua batang karbon. Dengan cara ini busur yang dihasilkan ditarik ke logam dasar oleh gaya elektromagnet sehingga terjadi semburan busur yang kuat. Slavianoff pada tahun 1892 adalah orang pertama yang menggunakan kawat logam elektroda yang ikut mencair karena panas yang ditimbulkan oleh busur listrik yang terjadi. Dengan penemuan ini maka elektroda selain berfungsi sebagai penghantar dan pembangkit busur listrik juga berfungsi sebagai logam pengisi. Kemudian Kjellberg menemukan bahwa kualitas sambungan las menjadi lebih baik bila kawat elektroda logam yang digunakan dibungkus dengan terak. Penemuan ini adalah permulaan dari penggunaan las busur dengan elektroda terbungkus yang sangat luas penggunaannya pada saat ini.

Di samping penemuan-penemuan oleh Slavianoff dan Kjellberg mengenai las busur dengan elektroda terbungkus, pada tahun 1886 Thomson menciptakan proses las resistansi listrik, Goldschmitt menemukan las termit pada tahun 1895, dan pada tahun 1901 las oksasi-asetilen mulai digunakan oleh Fouche dan Piccard. Karena banyaknya cara-cara pengelasan yang diciptakan selama dua dekade sekitar tahun 1900, maka rentang waktu tersebut disebut masa keemasan pertama untuk pengelasan logam. Selama 15 tahun sesudah tahun 1910 tidak ada penemuan-penemuan yang berarti dan baru tahun 1926 mulailah masa keemasan yang kedua dengan ditemukannya las hidrogen atom oleh Lungumir, las busur logam dengan pelindung gas mulia oleh Hobart dan Dener, serta las busur rendam oleh Kennedy pada tahun 1935. Penemuan las busur rendam ini membuka jalan ke arah otomatisasi dalam bidang pengelasan yang dapat memperbaiki kualitas las secara signifikan. Kemudian pada tahun 1936 Wasserman menyusul dengan menemukan cara pembrasingan yang mempunyai kekuatan tinggi.

Pada tahun-tahun berikutnya sampai dengan tahun 1950 tidak terjadi penemuan-penemuan baru.

Kemajuan-kemajuan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi yang dicapai sampai tahun 1950, telah mempercepat lagi kemajuan bidang las. Karena itu, tahun 1950 dapat dianggap sebagai permulaan masa keemasan ketiga yang masih terus berlangsung sampai sekarang. Selama masa keemasan yang ketiga ini, telah ditemukan cara-cara las baru antara lain las tekan dingin, las listrik terak, las busur dengan pelindung gas CO₂, las gesek, las ultrasonik, las sinar elektron, las busur plasma, las laser dan masih banyak jenis lainnya. Belum semua cara pengelasan yang ditemukan telah dipergunakan dalam prakteknya pada saat ini karena sebagian masih memerlukan perbaikan yang mungkin dalam waktu dekat akan menjadi lebih bermanfaat dan dapat menjadi sumbangan yang berharga bagi kemajuan teknologi las [1].

2.2 Penggunaan dan Pengembangan Teknologi Las

Pada tahap permulaan dari pengembangan teknologi las, pengelasan biasanya hanya dipergunakan pada sambungan dan reparasi yang kurang penting. Tetapi melalui pengalaman dan praktek yang banyak dan waktu yang lama, sekarang penggunaan pengelasan dan penggunaan konstruksi las merupakan hal yang umum di semua negara dunia.

Sejarah pemakaiannya dapat ditelusuri dengan melihat hal-hal berikut, pada tahun 1921 telah dibuat kapal laut pertama di dunia yang seluruhnya menggunakan sambungan las. Jembatan kereta api dengan konstruksi baja pertama yang seluruhnya dilas dibuat pada tahun 1927 dan dipasang melintasi sungai Turtle Creek di Pennsylvania, Amerika Serikat. Pada tahun yang sama Gedung Sharon yang merupakan gedung besar pertama yang menggunakan rangka baja yang seluruhnya dilas juga didirikan di Amerika Serikat. Suatu hal yang menarik bahwa konstruksi bangunan dengan las seperti yang telah disebutkan, dibangun sekitar tahun 1920 dimana pada saat tersebut juga sedang terjadi laju perkembangan teknologi las yang cepat.

Sekitar tahun 1940-an terjadi patah getas pada beberapa jembatan dan kapal yang dilas. Walaupun secara statistik kecelakaan yang ditimbulkan oleh patah getas ini hanya kecil, tetapi memberikan masalah teknik besar yang perlu segera diatasi. Sehubungan

dengan usaha pemecahan masalah tersebut banyak hal baru dalam teknologi las yang turut terpecahkan antara lain sifat mampu las dari baja.

Salah satu contoh kasus bangunan yang mengalami patah getas adalah Jembatan Rudersdorf di Jerman yang terbuat dari pelat baja yang dilas. Patahnya jembatan ini disebabkan oleh beberapa retak halus pada daerah pengaruh panas dari sambungan las. Penyelidikan yang dilakukan terhadap patahan ini membuktikan bahwa penyebab utamanya adalah menjalarnya patah getas yang disebabkan oleh adanya cacat las seperti retak halus dan tegangan sisa pada bahan yang terjadi selama pengelasan. Penelitian kemudian menunjukkan bahwa sifat-sifat bahan yang digunakan terutama kepekaan terhadap takik dan retak las memegang peranan utama dalam patah getas. Kelanjutan dari penelitian-penelitian ini menentukan standar cara-cara pengujian seperti uji Charpy dengan takik V, uji rambatan retak, dan cara uji kepekaan retak. Dengan cara-cara pengujian ini maka terbentuklah dasar-dasar pemilihan bahan yang sesuai untuk pengelasan.

Terwujudnya standar-standar teknik dalam pengelasan membantu memperluas lingkup pemakaian sambungan las dan memperbesar ukuran bangunan konstruksi yang dapat dilas. Luasnya lingkup pemakaian sambungan las juga mencakupi dunia permesinan yang salah satunya digunakan pada pengelasan pipa pada plat kondensor. Dengan kemajuan yang telah dicapai sampai saat ini, teknologi las memegang peranan penting dalam masyarakat industri modern [1].

2.3 Penelitian-Penelitian Tentang Pengelasan *Stainless Steel*

Banyak literatur tersedia tentang penelitian mengenai *stainless steel*, Scherer mengklaim bahwa daya tahan terjadi retak pada *stainless steel* akan meningkat jika terdapat komposisi ferit 5-35%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa retak dapat dihilangkan jika dapat menahan ferit selama pengelasan. Namun begitu, penelitian ini dianggap kurang sempurna karena pada *austenitic stainless steel*, retak tetap terjadi walaupun terdapat ferit [19].

Untuk mengetahui secara pasti kandungan ferit pada *stainless steel*, DeLong pada tahun 1956, memperkenalkan sebuah diagram yang dapat memprediksi kandungan ferit

sampai dengan 14%. Pada diagram tersebut, sumbu Y mewakili persamaan Ni (Ni_{eq}) dan sumbu X mewakili persamaan Cr (Cr_{eq}) dimana:

$$Ni_{eq} = Ni + 30 C + 30 N + 0,5 Mn \quad (2.1)$$

Dan

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Cb \quad (2.2)$$

Keterangan:

Ni = kandungan Nikel

Mn = kandungan Mangan

C = kandungan Karbon

N = kandungan Nitrogen

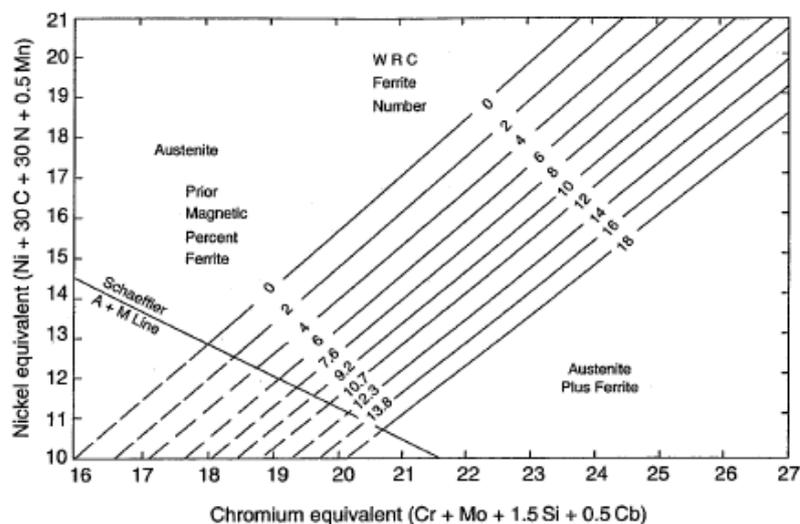
Cr = kandungan Kromium

Mo = kandungan Molybdenum

Si = kandungan Silikon

Cb = kandungan Cobalt

Pada tahun 1973, DeLong menyempurnakan diagramnya dengan menambahkan skala *Ferrite Number* (FN). Nilai FN berdasarkan dari pengukuran magnetik (hal ini memungkinkan karena BCC Ferit merupakan *ferromagnetic* sedangkan FCC austenit tidak). Jumlah FN tidak sama dengan persen jumlah ferit, kecuali untuk FN dibawah nilai 10, FN sama dengan jumlah persen Ferit. FN yang dapat diukur pada diagram 2.3 ini hanya mencapai FN 18 [19].



Gambar 2.3 Digaram DeLong.

Terbatasnya prediksi FN pada diagram DeLong hanya pada FN 18, maka Siewert memperkenalkan diagram baru yang dapat memprediksi FN sampai 100. Diagram ini dinamakan Diagram WRC-1988. Sumbu Y mewakili persamaan Ni (Ni_{eq}) dan sumbu X mewakili persamaan Cr (Cr_{eq}) dimana:

$$Ni_{eq} = Ni + 35 C + 20 N \quad (2.3)$$

Dan

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7 Nb \quad (2.4)$$

Keterangan:

Ni = kandungan Nikel

C = kandungan Karbon

N = kandungan Nitrogen

Cr = kandungan Kromium

Mo = kandungan Molybdenum

Nb = kandungan Niobium

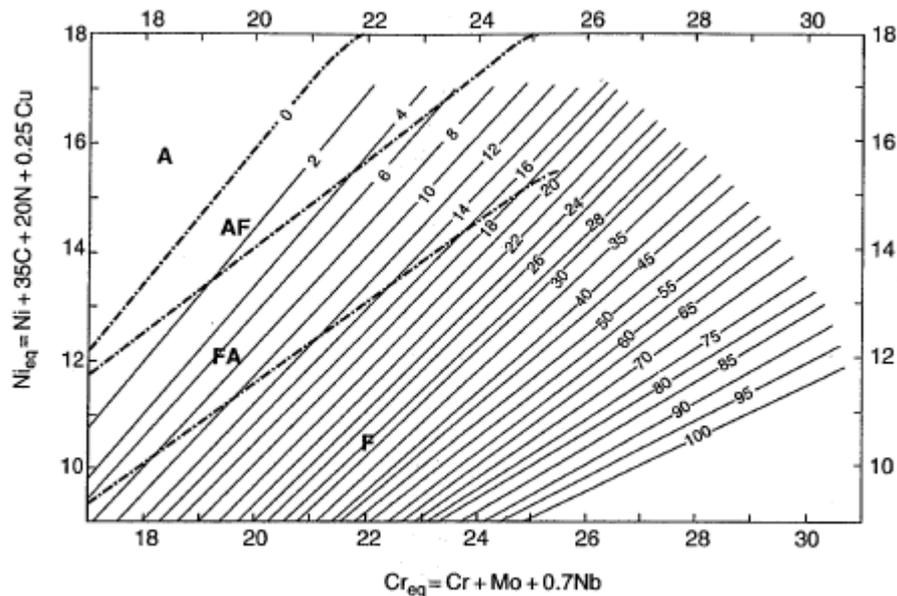
Lake kemudian melakukan penelitian yang menyebutkan bahwa unsur tembaga pada Ni_{eq} dapat menaikkan akurasi dalam menentukan FN. Dengan menggunakan basis data dari Lake, maka Kotecki merubah persamaan Ni_{eq} menjadi:

$$Ni_{eq} = Ni + 35 C + 20 N + 0,25 Cu \quad (2.5)$$

Keterangan:

Cu = kandungan Tembaga

Dengan perubahan diagram ini merubah nama diagram sebelumnya menjadi Diagram WRC-1992.



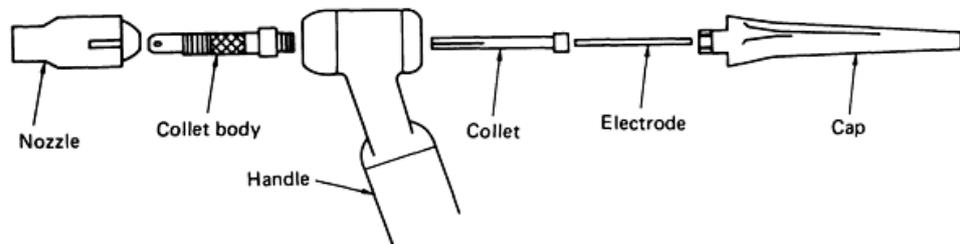
Gambar 2.4 Diagram WRC-1992.

Diagram WRC-1992 juga dapat menentukan tipe pembekuan setelah pengelasan. Terdapat 4 tipe yaitu tipe A (*fully austenite*), tipe AF, tipe FA, dan tipe F. Kotecki melakukan penelitian bahwa tipe pembekuan mempengaruhi kemampuan daya tahan material terhadap retak. Dimana jenis pembekuan tipe FA sangat baik ketahanannya terhadap retak [19]. Untuk memperkuat dugaan tersebut, Kujanpaa melakukan penelitian yang berkesimpulan bahwa butir kasar yang terbentuk di HAZ karena *recrystallisation* dan pertumbuhan butir pada logam *fully austenitic* menambah kerentanan terjadi retak. Sedangkan jika terbentuk ferit dapat mengurangi kerentanannya [20].

2.4 GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

Pada pengelasan dengan proses GTAW, panas dihasilkan dari busur yang terbentuk dalam perlindungan *inert gas* (gas mulia) antara elektroda tidak terumpan dengan benda kerja. GTAW mencairkan daerah benda kerja di bawah busur tanpa elektroda tungsten itu sendiri ikut meleleh. Gambar 2.5 memperlihatkan peralatan untuk proses GTAW. Proses ini bisa dikerjakan secara manual atau otomatis. GTAW disebut juga dengan Heliarc yaitu istilah yang berasal dari merek dagang Linde Company atau

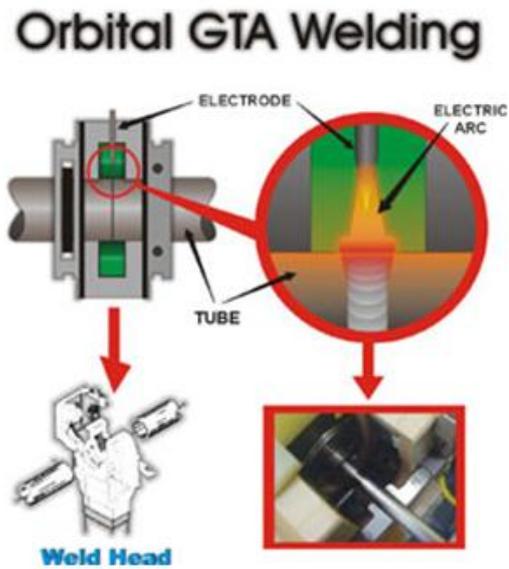
TIG (*Tungsten Inert Gas*). *Filler metal* ditambahkan ke dalam daerah las dengan cara mengumpankan sebatang kawat polos. Teknik pengelasan sama dengan yang dipakai pada *Oxyfuel Gas Welding* atau OAW, tetapi busur dan kawah las GTAW dilindungi dari pengaruh atmosfer oleh selimut *inert gas*, biasanya argon, helium atau campuran keduanya. *Inert gas* disemburkan dari torch dan daerah-daerah disekitar elektroda tungsten. Hasil pengelasan dengan proses GTAW mempunyai permukaan halus, tanpa slag dan kandungan hidrogen rendah.



Gambar 2.5 Peralatan pada pengelasan GTAW [2].

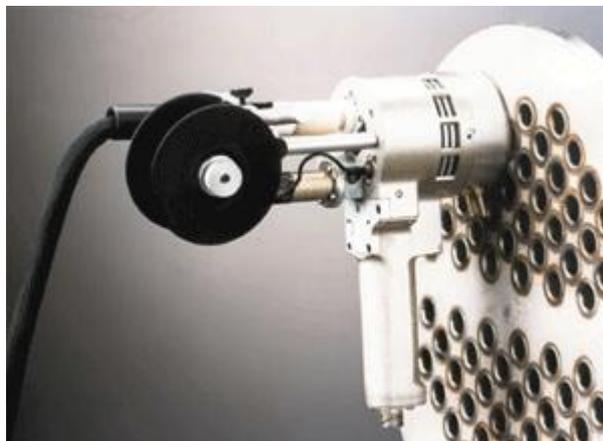
Jenis lain proses GTAW adalah *pulsed* GTAW, dengan menggunakan sumber listrik yang membuat arus pengelasan pulsasi. Hal ini membuat arus rata-rata menjadi lebih tinggi untuk mendapatkan penetrasi dan kontrol kawah las yang lebih baik, terutama untuk pengelasan *root pass*. *Pulsed* GTAW terutama bermanfaat untuk pengelasan pipa posisi-posisi sulit pada *stainless steel* dan *non ferrous material* seperti paduan nikel.

GTAW sudah diaplikasikan juga untuk pengelasan otomatis. Otomatisasi proses ini membutuhkan sumber listrik dan pengontrolan terprogram, sistem pengumpanan kawat dan mesin pemandu gerak. Salah satu jenis pengelasan otomatis ini adalah *Bore Welding* (las orbit) yang digunakan dalam pengelasan di spesimen penelitian tugas akhir ini. Jenis las ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Bore welding* [4].

Proses las orbit juga sudah digunakan untuk membuat las sekat pada *tube-to-tubesheet* bermutu tinggi dan las tumpul pada pipa-pipa *heat exchanger* seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengelasan *tube-to-tubesheet* [5].

Butt weld pada pipa tebal diameter besar pada pembangkit tenaga listrik, merupakan keberhasilan lain dari aplikasi GTAW otomatis. GTAW menggunakan pengumpanan kawat otomatis disebut juga dengan *cold wire* TIG. Jenis lain dari pengelasan GTAW otomatis disebut *hot wire* TIG, yang dikembangkan untuk menyaingi yang lain dengan laju deposit lebih tinggi. Pada *hot wire* TIG, kawat las

mendapat tahanan panas yang berasal dari arus AC tegangan rendah untuk memperbesar laju pengisian [3].

2.4.1 Keuntungan GTAW

Keuntungan dari pengelasan GTAW antara lain:

- a. Dapat mengelas hampir seluruh jenis logam, termasuk mengelas dua jenis logam yang berbeda (*dissimilar*) [2].
- b. Kecepatan pengumpanan logam pengisi dapat diatur terlepas dari besarnya arus listrik sehingga penetrasi ke dalam logam induk dapat diatur semaunya [1].
- c. Menghasilkan kualitas yang baik di daerah las.
- d. Dapat digunakan dengan atau tanpa logam pengisi (*filler*) [2].
Pengelasan GTAW tanpa menggunakan logam pengisi biasanya digunakan untuk mengelas pelat yang sangat tipis [1].
- e. Kecepatan gerak yang lebih rendah dibandingkan dengan SMAW akan memudahkan pengamatan sehingga lebih mudah dalam mengendalikan logam las selama pengisian dan penyatuan [3].

2.4.2 Kelemahan GTAW

Kelemahan proses las GTAW antara lain:

- a. Pengisian logam lebih rendah dibandingkan dengan proses las lain umpamanya SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) [3].
- b. GTAW butuh kontrol kelurusan sambungan yang lebih ketat, untuk menghasilkan pengelasan bermutu tinggi pada pengelasan dari arah satu sisi [3].
- c. GTAW harus dilindungi secara berhati-hati dari kecepatan udara di atas 5 mph untuk mempertahankan perlindungan *inert gas* di atas kawah las [3].
- d. Biaya operasi yang tinggi dibandingkan las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) misalnya pada kasus pengelasan pelat tipis kurang lebih 9,5 mm [2].

2.4.3 Aplikasi GTAW

GTAW mempunyai keunggulan pada pengelasan pipa-pipa tipis dan *tubing stainless steel* diameter kecil, paduan nikel, paduan tembaga dan aluminum. Pada

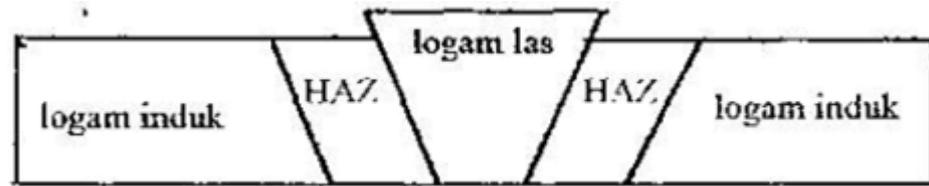
pengelasan pipa dinding tebal, GTAW sering kali dipakai pada *root pass* untuk pengelasan yang membutuhkan kualitas tinggi, seperti pada pipa-pipa tekanan dan temperatur tinggi, dan pipa-pipa belokan pada dapur pemanas. GTAW juga digunakan pada *root pass* apabila membutuhkan permukaan dalam yang licin, seperti pada pipa-pipa dalam *acid service*. Karena ada perlindungan *inert gas* terhadap pengelasan dan mudah dalam mengontrol proses las, membuat GTAW sering kali digunakan pada logam-logam reaktif seperti titanium dan magnesium.

Pada pipa-pipa tipis, 0,125 inci atau kurang, bisa digunakan sambungan berbentuk persegi dan rapat. *Root pass* dikerjakan tanpa menambahkan *filler metal* (disebut dengan *autogenous weld*). Pada pipa-pipa tebal, bagian ujung sambungan mesti dibevel, diluruskan dan diberi celah (disebut dengan bukaan akar), kemudian ditambahkan *filler metal* selama pengelasan *root pass*. Sebagai pengganti *filler metal*, bisa juga disisipkan *consumable insert* (ring penahan) ke dalam sambungan, yang nantinya bersatu dengan *root* (sebagai filler metal tambahan). Pengelasan dengan *consumable insert* membutuhkan kontrol kelurusan sambungan yang teliti [3].

2.5 Metalurgi Las

Metalurgi dalam pengelasan, dalam arti yang sempit dapat dibatasi hanya pada logam las dan daerah yang dipengaruhi panas atau HAZ (*Heat Affected Zone*). Untuk alasan ini secara singkat dan umum, latar belakang prinsip-prinsip metalurgi juga diperlukan sebelum membicarakan sifa-sifat las dan HAZ yang berdekatan. Karena dengan mengetahui metalurgi las, memungkinkan meramalkan sifat-sifat dari logam las. Aspek-aspek yang timbul selama dan sesudah pengelasan harus benar-benar diperhitungkan sebelumnya, karena perencanaan yang kurang tepat dapat mengakibatkan kualitas hasil las yang kurang baik. Dengan demikian pengetahuan metalurgi las dan ditambah dengan keahlian dalam operasi pengelasan dapat ditentukan prosedur pengelasan yang baik untuk menjamin hasil las-lasan yang baik.

Pada setiap penyambungan dengan las, selalu dijumpai daerah-daerah atau bagian-bagian dari sambungan las seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Daerah las.

Daerah lasan terdiri dari empat bagian yaitu:

- a. Logam lasan (*weld metal*), adalah daerah endapan las (*weld deposit*) dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Endapan las (*weld deposit*) berasal dari logam pengisi (*filler metal*).
- b. Garis gabungan (*fusion line*), adalah garis gabungan antara logam lasan dan HAZ, dapat dilihat dengan mengetsa penampang las. Daerah ini adalah batas bagian cair dan padat dari sambungan las.
- c. HAZ (*Heat Affected Zone*), adalah daerah pengaruh panas atau daerah dimana logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama pengelasan mengalami siklus termal atau pemanasan dan pendinginan dengan cepat. Penyebaran panas pada logam induk dipengaruhi oleh temperatur panas dari logam cair dan kecepatan dari pengelasan. Pada batas HAZ dan logam cair temperatur naik sangat cepat sampai batas pencairan logam dan temperatur turun sangat cepat juga setelah proses pengelasan selesai. Hal ini dapat disebut juga sebagai efek *quenching*. Pada daerah ini biasanya terjadi transformasi struktur mikro. Struktur mikro menjadi austenit ketika temperatur naik (panas) dan menjadi martensit ketika temperatur turun (dingin). Daerah yang terletak dekat garis fusi ukuran butirnya akan cenderung besar yang disebabkan oleh adanya temperatur tinggi, menyebabkan austenit mempunyai kesempatan besar untuk menjadi homogen. Karena dengan keadaan homogen menyebabkan ukuran butir menjadi lebih besar. Sedangkan daerah yang semakin menjauhi garis fusi ukuran butirnya semakin mengecil. Hal ini disebabkan oleh temperatur yang tidak begitu tinggi menyebabkan austenit tidak mempunyai waktu yang banyak untuk menjadi lebih homogen. Transformasi struktur mikro yang terjadi akibat perubahan temperatur menyebabkan daerah HAZ sangat

berpotensi terjadinya retak (*crack*) dan hal ini sangat penting untuk diperhatikan untuk mendapatkan hasil lasan yang baik.

- d. Logam induk (*parent metal*), adalah bagian logam yang tidak terpengaruh oleh pemanasan karena proses pengelasan dan temperatur yang disebabkan selama proses pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat-sifat dari logam induk. Hal ini disebabkan karena temperatur atau suhu yang terjadi di logam induk belum mencapai temperatur kritis (A1) [6].

2.6 Baja

Baja adalah logam paduan, dimana besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai *grade*-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Baja karbon ini dikenal sebagai baja hitam karena berwarna hitam, banyak digunakan untuk peralatan pertanian misalnya sabit dan cangkul.

Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah (*titanium*), krom (*chromium*), *nikel*, *vanadium*, *cobalt* dan tungsten (*wolfram*). Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*).

Baja merupakan bahan dasar vital untuk industri. Semua segmen kehidupan, mulai dari peralatan dapur, transportasi, generator pembangkit listrik, sampai kerangka gedung dan jembatan menggunakan baja. Besi baja menduduki peringkat pertama di antara barang tambang logam dan produknya melingkupi hampir 90% dari barang berbahan logam [8].

2.6.1 Proses Pembuatan Baja

Dewasa ini, besi kasar diproduksi dengan menggunakan dapur bijih besi (*blast furnace*) yang berisi kokas pada lapisan paling bawah, kemudian batu kapur dan bijih besi. Kokas terbakar dan menghasilkan gas CO yang naik ke atas sambil mereduksi oksida besi. Besi yang telah tereduksi melebur dan terkumpul dibawah tanur menjadi besi kasar yang biasanya mengandung Karbon (C), Mangan (Mn), Silicon (Si), Nikel (Ni), Fosfor (P), dan Belerang (S). Kemudian leburan besi dipindahkan ke tungku lain (*converter*) dan diembuskan gas oksigen untuk mengurangi kandungan karbon.

Untuk menghilangkan kembali kandungan oksigen dalam baja cair, ditambahkan Al, Si, Mn. Proses ini disebut dioksidasi. Setelah dioksidasi, baja cair dialirkan dalam mesin cetakan kontinu berupa slab atau dicor dalam cetakan berupa ingot. Slab dan ingot itu diproses dengan penempaan panas, *rolling* panas, penempaan dingin, perlakuan panas, pengerasan permukaan, dan lain-lain untuk dibentuk menjadi sebuah produk atau kerangka dasar dari sebuah produk.

Baja merupakan paduan besi (Fe) dengan karbon (C), dimana kandungan karbon tidak lebih dari 2%.

Baja banyak digunakan karena baja mempunyai sifat mekanis lebih baik dari pada besi, sifat baja pada umumnya antara lain:

- a. Tangguh dan ulet.
- b. Mudah ditempa.
- c. Mudah diproses.
- d. Sifatnya dapat diubah dengan mengubah karbon.
- e. Sifatnya dapat diubah dengan perlakuan panas.
- f. Kadar karbon lebih rendah disbanding besi.
- g. Banyak dipakai untuk berbagai bahan peralatan.

Walaupun baja lebih sering digunakan, namun baja mempunyai kelemahan yaitu ketahanan terhadap korosinya rendah. Baja dapat juga dipadu, baik dua unsur atau lebih sehingga menghasilkan sifat lain. Hasil pemuaduannya antara lain:

- a. Larutan padat atau *solid solution* (dapat memperbaiki sifat fisik atau kimia).
- b. Senyawa (lebih keras dari larutan padat, dapat memperbaiki sifat mekanik) [8].

2.6.2 Klasifikasi Baja

Berdasarkan tinggi rendahnya prosentase karbon di dalam baja, baja dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Baja Karbon Rendah (*low carbon steel*)

Baja jenis ini mempunyai kandungan karbon di bawah 0,25%. Baja karbon rendah tidak merespon pada perlakuan panas (*heat treatment*) yang bertujuan untuk mengubah struktur mikronya menjadi martensit. Penguatan (*strengthening*) dapat dilakukan dengan perlakuan dingin (*cold work*). Struktur mikro baja karbon rendah terdiri dari unsur pokok ferit dan perlit, karena itu baja ini relatif lunak dan lemah tapi sangat bagus pada kelenturannya dan kekerasannya serta baja jenis ini *machinable* dan kemampulasan yang baik [7]. Baja karbon rendah sering digunakan pada:

- a. Baja karbon rendah yang mengandung 0,04% - 0,10% C untuk dijadikan baja-baja plat atau strip.
- b. Baja karbon rendah yang mengandung 0,05% C digunakan untuk keperluan badan-badan kendaraan.
- c. Baja karbon rendah yang mengandung 0,15% - 0,30% C digunakan untuk konstruksi jembatan, bangunan, membuat baut atau dijadikan baja konstruksi.

Biasanya karbon jenis ini memiliki sifat-sifat mekanik antara lain memiliki kekuatan luluh 275 MPa (40.000 psi), kekuatan maksimum antara 415 dan 550 MPa (60.000 sampai 80.000 psi), dan kelenturan 25% EL (*elongation*) [7].

2. Baja Karbon Sedang (*medium carbon steel*)

Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon antara 0,25 dan 0,60%. Baja jenis ini dapat diberi perlakuan panas *austenizing*, *quenching*, dan *tempering* untuk memperbaiki sifat-sifat mekaniknya. Baja karbon sedang memiliki kemampukerasan yang rendah serta dapat berhasil diberi perlakuan panas hanya di bagian-bagian yang sangat tipis dan dengan rasio *quenching* yang sangat cepat. Penambahan kromium, nikel dan molybdenum dapat memperbaiki kapasitas logam ini untuk diberikan perlakuan panas, untuk menaikkan kekuatan-kelenturannya yang berdampak pada penurunan nilai kekerasannya. Baja karbon sedang ini biasa dipakai untuk roda dan rel kereta api, *gears*, *crankshafts*, dan bagian-bagian mesin lainnya yang membutuhkan kombinasi dari kekuatan tinggi, tahan aus dan keras [7].

3. Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi biasanya memiliki kandungan karbon antara 0,60 dan 1,40%. Baja karbon tinggi adalah adalah baja yang paling keras dan kuat serta paling rendah kelenturannya di antara baja karbon lainnya [7]. Baja ini mempunyai tegangan tarik paling tinggi dan banyak digunakan untuk material tools. Salah satu aplikasi dari baja ini adalah pembuatan kawat baja dan kabel baja. Berdasarkan jumlah karbon yang terkandung di dalam baja maka baja karbon ini banyak digunakan dalam pembuatan pegas, alat perkakas seperti palu, gergaji, atau pahat potong. Selain itu baja jenis ini banyak digunakan untuk keperluan industri lain seperti pembuatan kikir, pisau cukur, mata gergaji dan lain sebagainya [8].

2.7 Pengaruh Unsur Paduan

Unsur-unsur kimia pada paduan dapat mempengaruhi sifat dari suatu paduan, yang dapat memperbaiki sifat mekanik ataupun sifat fisik dari paduan tersebut. Unsur-unsur ini juga memiliki sifat tersendiri. Berikut sifat-sifat dan pengaruhnya terhadap paduan logam:

1. Karbon (C)

Sifat-sifat dan pengaruh unsur karbon (C) pada paduan adalah:

- a. Larut dalam ferit
- b. Pembentukan sementit (dan karbida lainnya), perlit, bainit.
- c. % C dan distribusinya mempengaruhi sifat baja.
- d. Kekuatan dan kekerasan meningkat dengan naiknya % C

Pada baja karbon biasanya kekuatan dan kekerasannya meningkat sebanding dengan kekuatan karbonnya, tetapi kekuatannya menurun dengan naiknya kadar karbon. Persentase kandungan karbon akan memberikan sifat lain pada baja karbon di antaranya:

- a. Kemampuan untuk dibentuk.
- b. Diperkeras.
- c. Diolah mesin (*machinable*).
- d. Kemampuan untuk dilas (*weldable*) [9].

2. Mangan (Mn)

Unsur mangan (Mn) mempunyai sifat dan fungsi:

- a. Bahan oksidiser (mengurangi kadar O dalam baja), menurunkan kerentanan *hot shortness* pada aplikasi pengerjaan panas.
- b. Larut, membentuk *solid solution strength* dan *hardness*.
- c. Dengan S membentuk Mangan Sulfida, meningkatkan sifat pemesinan (*machineability*).
- d. Meningkatkan kekuatan dan kekerasan meski tidak sebaik C.
- e. Menurunkan sifat mampu las (*weldability*) dan keuletannya.
- f. Meningkatkan *hardenability* baja.

Mangan berfungsi untuk memperbaiki kekuatan tariknya dan ketahanan ausnya. Unsur ini memberikan pengerjaan yang lebih mengkilap atau bersih dan menambah kekuatan panas baja karbon [9].

3. Silikon (Si)

Unsur silikon dapat berfungsi:

- a. Bahan deoksidiser.

- b. Meningkatkan kekuatan ferit.
- c. Dalam jumlah besar, meningkatkan ketahanan baja terhadap efek *scaling*, tetapi mengalami kesulitan dalam pemrosesannya (*High-Silicon Steel*)

Silikon ditambahkan untuk memperbaiki homogenitas pada baja. Selain itu dapat menaikkan tegangan tarik dan menurunkan kecepatan pendinginan kritis, sehingga baja karbon lebih elastis dan cocok dijadikan sebagai bahan pembuatan getas [9].

4. Posfor (P)

Posfor dalam baja dibutuhkan dalam persentase kecil, yaitu maksimum 0,04%, yang berfungsi mempertinggi kualitas dan daya tahan material terhadap korosi. Material yang mengandung posfor di atas 0,04% akan mempunyai kecenderungan untuk menjadi getas dan mudah retak. Penambahan posfor dimaksudkan pula untuk memperoleh serpihan kecil-kecil pada saat proses permesinan [9].

5. Belerang (S)

Belerang dimaksudkan untuk memperbaiki sifat-sifat mampu mesin, keuntungan sulfur pada temperatur biasa, dapat memberikan ketahanan aus pada gesekan tinggi [9].

6. *Chromium* (Cr)

Unsur *chromium* (Cr) dapat berfungsi:

- a. Meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi.
- b. Meningkatkan kemampukerasan.
- c. Meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi.
- d. Meningkatkan ketahanan terhadap pengaruh abrasi.
- e. Unsur pembentukan karbida (elemen pengeras).

Chromium dengan karbon membentuk karbida dapat menambah dan menaikkan daya tahan korosi dan daya tahan terhadap oksidasi yang tinggi dan berdampak keuletan paduannya berkurang [9].

7. Nikel (Ni)

Unsur nikel (Ni) dapat berfungsi:

- a. Tidak membentuk karbida
- b. Berada dalam ferit, sebagai penguat (efek ketangguhan ferit).
- c. Dengan Cr menghasilkan baja paduan dengan kemampukerasan tinggi, ketahanan *impact* dan *fatigue* yang tinggi.

Sebagai unsur paduan dalam baja konstruksi dan mesin. Nikel memperbaiki antara lain kekuatan tarik, sifat tahan korosi, sifat tahan panas dan sifat magnetnya [9].

8. Molibdenum (Mo)

Unsur molybdenum (Mo) dapat berfungsi:

- a. Meningkatkan kemampukerasan baja.
- b. Menurunkan kerentanan terhadap temper embrittlement ($400 - 500^{\circ}\text{C}$)
- c. Meningkatkan kekuatan tarik pada temperatur tinggi dan kekuatan creep.

Molibdenum mengurangi kerapuhan pada baja karbon tinggi, menstabilkan karbida serta memperbaiki kekuatan baja [9].

9. Titanium (Ti)

Unsur titanium (Ti) dapat berfungsi:

- a. Sebagai deoksidiser.
- b. Pengontrolan dalam pertumbuhan butir.

Titanium adalah logam yang lunak, tapi bila dipadukan dengan nikel dan karbon akan lebih kuat, tahan aus, tahan temperatur, dan tahan korosi [9].

10. Wolfram/Tungsten

Unsur wolfram dapat berfungsi:

- a. Memberikan peningkatan kekerasan.
- b. Menghasilkan struktur yang halus.
- c. Menjaga pengaruh pelunakan selama proses penemperan.

Unsur ini dapat membentuk karbida yang stabil dan yang keras, menahan suhu pelumasan dan mengembalikan perubahan bentuk atau struktur secara perlahan-lahan [9].

11. Vanadium (V)

Unsur vanadium (V) dapat berfungsi:

- a. Mengontrol pertumbuhan butir (meningkatkan kekuatan dan ketangguhan).
- b. Meningkatkan kemampukerasan baja.
- c. Dalam jumlah berlebih, menurunkan nilai *hardenability* (pembentukan karbida berlebih) [10].

12. Tembaga (Cu)

Unsur tembaga (Cu) dapat berfungsi:

- a. Membentuk segregasi, problem proses pengerjaan panas.
- b. Meningkatkan ketahanan baja terhadap atmosfer (*weathering steel* 0,2% Cu) [10].

13. Aluminium (Al)

Unsur aluminium (Al) dapat berfungsi:

- a. Sebagai deoksidiser.
- b. Mengontrol pertumbuhan butir [10].

2.8 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat atau *stainless steel* adalah paduan baja dengan kandungan cromium minimal 10,5% Cr. Beberapa baja tahan karat mengandung lebih dari 30% Cr atau kurang dari 50% Fe. Kemampuan tahan karat diperoleh dari terbentuknya lapisan film oksida kromium, dimana lapisan oksida ini menghalangi lapisan oksida besi (Ferum). Unsur-unsur lain ditambahkan untuk memperbaiki sifat-sifatnya antara lain ditambahkan nikel, tembaga, titanium, aluminium, silikon, niobium, nitrogen, sulfur dan selenium. Karbon biasanya diberikan dengan besar antara kurang dari 0,03% sampai lebih 1,0% pada tahap martensit.

Baja tahan karat biasanya dibagi lima jenis, yaitu: baja tahan karat martensit, baja tahan karat feritik, baja tahan karat austenitic, baja tahan karat duplex, dan baja tahan karat pengerasan presipitasi.

1. Baja Tahan Karat Martensit (*Martensitic Stainless Steels*)

Baja tahan karat martensit adalah paduan dari kromium dan karbon yang memiliki penyimpangan struktur kristal *body-centered cubic (bcc)* atau martensit ketika kondisi dikeraskan. Baja tahan karat ini *ferromagnetic* dan dapat dikeraskan melalui perlakuan-perlakuan panas serta biasanya tahan korosi hanya pada kondisi lingkungan yang sejuk. Biasanya baja tahan karat jenis ini mengandung kromium antara 10,5% sampai 18% dan karbon lebih dari 1,2%. Kandungan kromium dan karbon sebanding agar memastikan strukturnya menjadi martensit setelah dikeraskan. Kelebihan karbida berguna untuk menambahkan ketahanan aus atau menjaga kekuatan potong, contohnya pada kasus mata pisau. Unsur-unsur seperti niobium, silikon, tungsten, dan vanadium bisa ditambahkan untuk memodifikasi respon tempering setelah dikeraskan. Sedikit nikel bisa ditambahkan untuk memperbaiki ketahanan korosi di beberapa media dan meningkatkan kekerasan. Sulfur atau selenium ditambahkan untuk meningkatkan *machinability*.

2. Baja Tahan Karat Feritik

Baja tahan karat feritik adalah paduan yang mengandung kromium sebagai unsur utamanya dengan struktur kristal *bcc*. Kandungan kromiumnya biasanya antara 10,5% - 30 %. Pada beberapa jenis, baja tahan karat jenis ini dapat mengandung molybdenum, silikon, aluminium, titanium, dan niobium untuk memperbaiki sifat-sifatnya. Sulfur atau selenium bisa ditambahkan, contohnya pada jenis *austenite*, untuk meningkatkan *machinability*. Paduan feritik merupakan *ferromagnetic*. Baja tahan karat jenis ini mempunyai kelenturan dan kemampuan dibentuk yang sangat baik, tapi kekuatan pada temperatur tinggi relatif buruk dibandingkan dengan jenis *austenite*. Kekerasan dapat terbatas pada temperatur rendah dan di bagian yang berat.

3. Baja Tahan Karat Austenitik

Baja tahan karat austenitik memiliki struktur *face-centered cubic* (fcc). Struktur ini dapat menggunakan secara bebas unsur-unsur penyebab austenit seperti nikel, mangan, dan nitrogen. Baja ini *nonmagnetic* di kondisi anil dan dapat dikeraskan hanya dengan pengerjaan dingin (*cold working*). Biasanya memiliki sifat-sifat cryogenic dan kekuatan di temperatur tinggi yang baik. Kandungan kromium biasanya bervariasi antara 16% sampai 26%; nikel, bisa mencapai 35%; dan mangan, bisa sampai 15%. Molybdenum, tembaga, silikon, aluminium, titanium, dan niobium dapat ditambahkan untuk mendapatkan sifat-sifat yang dibutuhkan seperti tahan akan oksidasi. Sulfur atau selenium dapat ditambahkan untuk meningkatkan *machinability*.

4. Baja Tahan Karat Duplex

Baja tahan karat duplex memiliki perpaduan antara bcc *ferrite* dan fcc *austenite*. Unsur utama pada baja tahan karat jenis ini adalah kromium dan nikel, tapi nitrogen, molybdenum, tembaga, silikon, dan tungsten dapat ditambahkan untuk mengontrol agar strukturnya seimbang dan menguatkan ketahanan korosinya.

Ketahanan korosi dari baja tahan karat duplex adalah seperti baja tahan karat austenitik dengan kandungan paduan yang sama. Meskipun begitu, baja tahan karat duplex memiliki kelenturan dan kekuatan luluh yang tinggi serta lebih baik ketahanannya akan retak (*crack*) yang disebabkan tegangan-korosi dibandingkan jenis austenitik. Nilai kekerasan dari baja tahan karat ini di antara baja tahan karat austenitik dan feritik.

5. Baja Tahan Karat Pengerasan Presipitasi

Baja tahan karat pengerasan presipitasi adalah paduan kromium-nikel yang mengandung unsur-unsur pengerasan presipitasi seperti tembaga, aluminium, atau titanium. Baja tahan karat jenis ini dapat berubah menjadi austenitik atau martensitik pada kondisi anil. Ketika menjadi austenitik di kondisi anil, sering bertransformasi menjadi martensit ketika diberi perlakuan panas. Pada kebanyakan kasus, baja tahan karat jenis ini dapat mencapai kekuatan yang tinggi dengan cara struktur martensitnya diberikan pengerasan presipitasi [11].

2.9 Jenis-jenis Cacat dalam Pengelasan

Jenis-jenis cacat yang biasanya dijumpai didalam hasil pengelasan adalah sebagai berikut:

1. Kurangnya Fusi atau Penetrasi

Kurangnya fusi, merupakan cacat akibat “discontinuity” yaitu ada bagian yang tidak menyatu antara logam induk dengan logam pengisi. Disamping itu cacat jenis ini dapat pula terjadi pada pengelasan berlapis (*multipass welding*) yaitu terjad antara lapisan las satu dengan yang lainnya.

Kurangnya penetrasi, cacat ini terjadi karena logam las tidak menembus sampai ke dasar sambungan. Penetrasi kampuh yang tidak memadai ialah keadaan dimana kedalaman las kurang dari tinggi alur yang ditetapkan. Cacat ini disebabkan karena perencanaan alur yang tidak sesuai dengan proses pengelasan yang dipilih, elektroda yang terlalu besar, arus listrik yang tidak memadai, atau laju pengelasan yang terlalu cepat.

2. Retak (*Cracking*)

Jenis cacat ini dapat terjadi baik pada logam las (*weld metal*) daerah pengaruh panas (HAZ) atau pada daerah logam dasar (*parent metal*). Retak adalah pecah-pecah pada logam las, baik searah maupun transversal terhadap garis las, yang ditimbulkan oleh tegangan internal. Retak pada logam las dapat mencapai logam dasar, atau retak seluruhnya terjadi pada logam dasar disekitar las. Retak merupakan cacat las yang berbahaya jika memiliki daerah yang luas, namun jika retak halus yang disebut retak mikro umumnya tidak berbahaya.

Retak kadang terbentuk ketika las mulai memadat dan umumnya diakibatkan oleh unsur-unsur yang getas (baik besi ataupun elemen paduan) yang terbentuk sepanjang serat perbatasan. Pemanasan yang lebih merata dan pendinginan yang lebih lambat akan mencegah timbulnya retak “panas”. Cacat retak dibagi menjadi dua, yaitu:

- a. Retak panas: umumnya terjadi pada suhu tinggi ketika proses pembekuan berlangsung.
- b. Retak dingin: umumnya terjadi dibawah suhu 200 C.

Pada gambar 2.9 berikut merupakan contoh kasus terjadinya cacat retak yang terjadi pada sebuah *bottle scrubber*.



Gambar 2.9 Cacat retak pada bottle scrubber

3. Cacat Inklusi

Cacat inklusi ini disebabkan oleh pengotor (inklusi) baik berupa produk karena reaksi gas atau berupa unsur-unsur dari luar seperti: terak, oksida, logam wolfram, atau lainnya. Cacat ini biasanya terjadi pada daerah bagian logam las (*weld metal*)

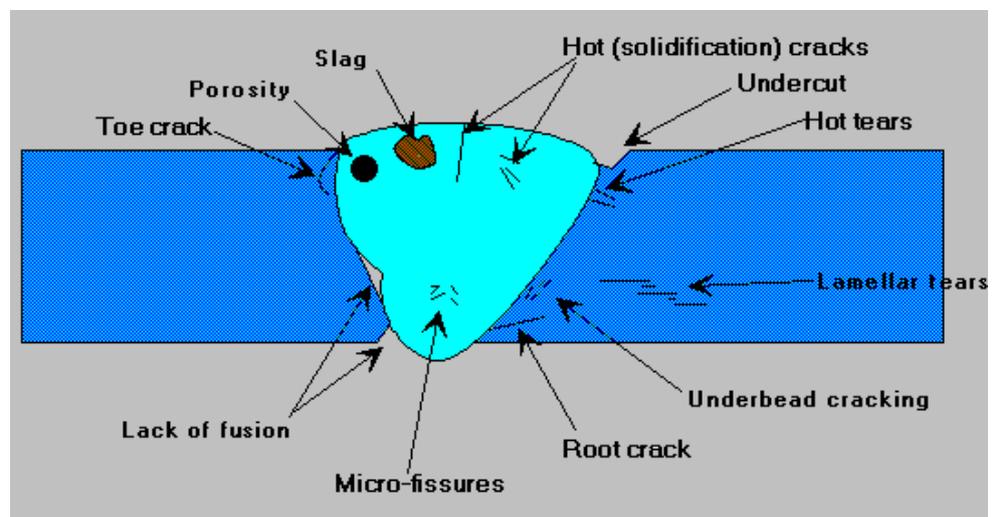
4. Bentuk yang tidak Sempurna

Peleburan yang tidak sempurna terjadi karena logam dasar dan logam las yang berdekatan tidak melebur bersama secara menyeluruh. Ini dapat terjadi jika permukaan yang akan disambung tidak akan tidak dibersihkan dengan baik, dan dilapisi kotoran, terak, oksida, atau bahan lainnya. Penyebablain dari cacat ini adalah pemakaian peralatan las yang arus listriknya tidak memadai, sehingga logam dasar tidak mencapai titik lebur. Laju pengelasan yang terlalu cepat juga dapat menimbulkan pengaruh yang

sama. Jenis cacat ini memberikan geometri sambungan las yang tidak baik (tidak sempurna).

5. *Voids* (Porositas)

Porositas merupakan cacat las berupa lubang-lubang halus atau pori-pori yang biasanya terbentuk didalam logam las akibat terperangkapnya gas/oksigen yang terjadi ketika proses pengelasan. Disamping itu, porositas dapat pula terbentuk akibat kekurangan logam cair karena penyusutan ketika logam membeku. Porositas seperti ini disebut shrinkage porosity. Cacat las ini ditimbulkan oleh arus listrik yang terlalu tinggi atau busur nyala yang terlalu panjang. Porositas dapat terjadi secara merata tersebar dalam las, atau dapat merupakan rongga yang besar terpusat didasar las sudut atau dasar dekat las pelindung pad alas tumpul. Yang terakhir diakibatkan oleh prosedur pengelasan yang buruk dan pemakaian plat pelindung yang ceroboh. Berikut adalah gambar 2.10 yang merupakan contoh ilustrasi cacat porositas dalam hasil las.



Gambar 2.10 contoh ilustrasi cacat porositas pada hasil las.

6. Peleburan yang Berlebihan

Arti peleburan berlebihan (*undercutting*) adalah terjadinya alur pada bahan dasar didekat ujung kaki las yang tidak terisi dengan logam las. Arus listrik dan panjang busur

nyala yang berlebihan dapat membakar atau menimbulkan alur pada logam dasar. Cacat ini mudah terlihat dan dapat diperbaiki dengan memberi las tambahan.

7. Pembentukan Terak

Terak terbentuk selama proses pengelasan akibat reaksi kimia lapisan elektroda yang mencair, serta terdiri dari oksida logam dari senyawa lain. Karena kerapatan terak lebih kecil dari logam las yang mencair. Terak biasanya berada pada permukaan dan dapat dihilangkan dengan mudah setelah dingin. Namun, pendinginan sambungan yang terlalu cepat dapat menjerat terak sebelum naik ke permukaan. Bila beberapa lintasan las dibutuhkan untuk memperoleh ukuran las yang dikehendaki, pembuat las harus membersihkan terak yang ada sebelum memulai lintasan yang baru. Kelalaian terhadap hal ini merupakan penyebab utama masuknya terak.