

ANALISA PENGARUH STRESS RELIEF ANNEALING TERHADAP PERUBAHAN SIFAT MEKANIK BAJA TAHAN KARAT TYPE SUS 304

Rahmat Pemilu Harahap, Basuki Rahmat

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Batam, Jl. Kampus Abulyatama No. 5 Batam Center, Batam, 29464, Indonesia

ABSTRAK

Tugas akhir ini dibuat untuk mempelajari sampai sejauh mana pengaruh dari temperatur *Stress Relief Annealing* terhadap perubahan sifat mekanik baja tahan karat terutama material *SUS 304* yang kami gunakan sebagai bahan uji dengan beberapa varian temperatur pemanasan. Pada penelitian ini, kami menggunakan proses pengelasan untuk membangkitkan tegangan sisa (*residual stress*). Dan selanjutnya kami lakukan pemotongan spesimen sesuai dengan standart *ASME E.8* untuk pengujian tarik dan kekerasan. Pada langkah berikutnya, material yang telah kami potong tersebut akan dikenai pemanasan dalam proses *Stress Relief Annealing* yang dibagi dalam 5 temperatur yang berbeda yaitu tanpa perlakuan panas, 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C. Dari hasil penelitian membuktikan bahwa temperatur *stress relief annealing* berpengaruh terhadap perubahan sifat mekanik baja tahan karat SUS304, hal ini ditunjukkan dengan semakin tinggi temperatur *Stress Relief Annealing* semakin menurun kekuatan (*ultimate dan yield stress*) serta kekerasan material tersebut.

Kata Kunci: *Stress Relief Annealing, SUS 304, residual stress, ASME E.8*

1. PENDAHULUAN

Pada dunia industri manufaktur kita semua pasti mengenal proses *casting, machining, forging* dan *welding* (pengelasan). Di mana proses pengelasan sendiri merupakan penyambungan dua logam atau lebih dari paduan-paduan logam dengan cara memanasi baik di atas batas cairnya atau di bawah batas cairnya tersebut disertai dengan tekanan atau tanpa tekanan dan di tambah dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi (*filler metal*).

Pengelasan banyak digunakan untuk memproduksi atau memperbaiki semua produk yang terbuat dari metal. Proses las ini sendiri telah diatur penggunaannya dalam *American Welding Society*. Aplikasi dari proses pengelasan memiliki banyak keunggulan yang dapat diringkas sebagai:

1. Efisiensi dalam penyambungan / penggabungan
2. Kondisi kedap air dan
3. Pengurangan berat tidak ada batas pada ketebalan desain struktur sederhana
4. Kecepatan waktu fabrikasi

Di sisi lain, ketidakmerataan distribusi temperatur dalam pengelasan dapat menimbulkan beberapa masalah dalam memproduksi struktur, yang dapat diringkas sebagai:

1. Kemungkinan Cacat
2. Sensitif terhadap bahan
3. Timbulnya tegangan sisa dan distorsi

Dari ketiga masalah yang ditimbulkan oleh proses pengelasan ini yang patut diwaspadai adalah timbulnya tegangan sisa ataupun *residual stress*. Di mana *residual stress* atau tegangan sisa adalah tegangan yang terdapat pada benda atau material, meskipun benda tersebut tidak dikenai beban (gaya) luar. Karena tegangan sisa ini ditimbulkan oleh *deformasi plastis* tidak seragam maka tegangan-tegangan sisa terbentuk pada setiap proses pengerjaan logam perlu diperhatikan.

Tegangan sisa ini berada di daerah sambungan material yang di las dan secara cepat menyebar ke daerah sekitarnya. Secara umum tegangan ini Akan mencapai tingkat yang mendekati *yield strength* dari material tersebut, kendala eksternal dapat diabaikan selama proses pengelasan ini. Di bawah kondisi multi aksial *loading*, tegangan ini dapat mengakibatkan kerapuhan pada daerah sambungan yang dilas. Tegangan sisa menyebabkan retak dan perubahan komposisi dari material tersebut. Tegangan sisa ini akan menimbulkan *crack* / patah pada daerah sekitar sambungan pada kondisi tertentu.

Tegangan sisa ini juga bisa menimbulkan cacat las. Sisa kontraksi pada saat pendinginan akan

menyebabkan meningkatnya tegangan *tensil* pada daerah sambungan dan akan menyebabkan salah satu yang paling tidak diinginkan yaitu *weld cracking* atau cacat las. Cacat las akan terjadi selama proses pembuatan suatu benda / objek atau pada saat proses pengelasan telah selesai. Cacat ini bisa muncul pada daerah pengelasan khususnya daerah yang terkena pemanasan atau dikedua sisi material tersebut. Cacat ini sendiri ada yang bisa terlihat seperti kotoran hitam yang menempel pada kampuh las yang biasa disebut dengan *macrocracking* atau ada juga yang hanya bisa dilihat melalui mikroskop yang biasa disebut dengan *microcracking / microfissuring*. Secara umum cacat las bisa ditimbulkan oleh berbagai macam penyebab dan bisa saja terdeteksi beberapa waktu kemudian setelah proses pengelasan ini terjadi. *Restraint* dan *residual stress* (tegangan sisa) merupakan alasan utama teradinya cacat las selama proses pembuatan suatu objek pada konstruksi. *Weld restraint* itu sendiri bisa muncul dari beberapa faktor, salah satu faktor utama yang mempengaruhi adalah sifat mekanik dari suatu material atau spesimen tersebut. Faktor lain yang berpengaruh adalah proses pendinginan yang terlalu cepat, sehingga menyebabkan terjadinya penyusutan dan cacat itu akan terbentuk. Alasan lain yang menyebabkan terjadinya cacat adalah susunan kimia dari material tersebut. Material yang memiliki kandungan karbon dan *alloy* yang tinggi akan membuat material tersebut kuat tetapi getas (atau mudah patah). Tegangan sisa sukar dihitung secara teliti dengan metode *analitis* dan oleh karena itu biasanya ditentukan dengan berbagai jenis teknik percobaan, sebagian besar pengukuran tegangan sisa bersifat merusak karena bagian yang mengalami penegangan dibuang untuk mengatur kembali distribusi tegangan pada bagian yang tersisa. Beberapa teknik pengukuran *residual stress* yang semenjak tahun 1950-an telah dikembangkan oleh para ahli antara lain :

1. *Sectioning* teknik / teknik pemotongan
2. *Hole-Drilling* teknik.
3. Metode *X-ray Diffraction*.
4. Metode *Neutron Diffraction*.
5. Metode Ultrasonik.
6. Metode *Barkhausen Noise*.

Untuk mengurangi residual stress dapat dilakukan langkah-langkah antara lain :

1. *Peaning* (dipukul-pukul).
2. *Stress Relieving*.
3. Pengelasan berjalan dimulai dari bagian yang bebas menuju ke bagian fix.
4. Design sedemikian rupa sehingga internal stress-nya minim.
5. Sebaiknya menggunakan *sequence welding*.
6. Daerah yang saling memotong dihindari.
7. Jangan mengisi gap yang terlalu besar dengan las-lasan.

Perlakuan panas kembali diperlukan untuk mengurangi atau menekan tegangan sisa dari proses pengelasan dan untuk memberikan perlindungan

terhadap risiko *inisiasi* dan kerapuhan pada material tersebut. Sebagai tambahan, perlakuan ini bisa memperlambat timbulnya korosi dan *deformasi* material selama proses pengelasan berlangsung. Beberapa teknik pemanasan suatu material (*annealing*) untuk mengurangi efek dari tegangan sisa ini adalah :

1. *Recrystallization Annealing*
2. *Stress Relief Annealing*
3. *Isothermal Annealing*
4. *Quenching Annealing*
5. *Homogenizing Annealing*
6. *Hydrogen Annealing*

Efek yang besar dari akibat adanya tegangan sisa ini mendorong penulis untuk mengamati perubahan sifat mekanik yang terjadi pada material logam, terutama material *stainless steel* SUS 304 dengan menggunakan metode *Stress Relief Annealing*. Yang mana proses ini merupakan proses pemanasan kembali suatu material dengan variasi temperatur dan waktu tertentu serta pendinginan yang teratur. *Stress relief Annealing* selalu dilakukan pada *range* temperatur yang kritis tetapi tidak sampai temperatur maksimum suatu logam tersebut sebab dapat menimbulkan peningkatan oksidasi permukaan yang bisa berakibat mengurangi ketahanan *korosif* dari *stainless steel* tersebut. Temperatur dan waktu yang dilakukan tergantung dari jenis material serta komposisi kimia dan *yield strength* dari suatu spesimen atau objek bendanya.

Pada penelitian ini material yang kami gunakan sebagai objek adalah baja tahan karat (*stainless steel*) SUS 304. Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi yang memiliki keistimewaan tahan korosi dan oksida pada temperatur yang tinggi. Sifat ini didapat karena adanya lapisan *oksida chrome* yang stabil pada permukannya, yang akan melindungi baja dari lingkungan yang korosif. Secara garis besar baja tahan karat itu bisa dibedakan berdasarkan pada perbedaan struktur mikro yang terjadi menjadi tiga kelompok besar yaitu :

1. Baja Tahan Karat *Austenite*
2. Baja Tahan Karat *Martencitic*
3. Baja Tahan Karat *Ferritic*

Meskipun baja tahan karat itu telah dikenal karena ketahanannya terhadap korosi, tetapi seiring dengan kemajuan teknologi, maka di kembangkan suatu cara untuk meningkatkan mutu serta daya tahan baja tahan karat terhadap serangan korosi.

Dalam hal ini bisa dilakukan dengan jalan :

1. Penambahan Molibdenum
2. Penambahan Nikel
3. Memperkecil kadar carbon

Dalam penelitian ini tujuan yang ingin dicapai oleh penulis adalah:

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui ada atau tidak adanya pengaruh *Stress Relief Annealing* dengan pemanasan berbeda-beda terhadap uji tarik pada

material *Stainless Steel Type SUS 304*.

2. Untuk mengetahui ada atau tidak adanya pengaruh *Stress Relief Annealing* dengan pemanasan berbeda-beda terhadap uji kekerasan pada material *Stainless Steel Type SUS 304*.

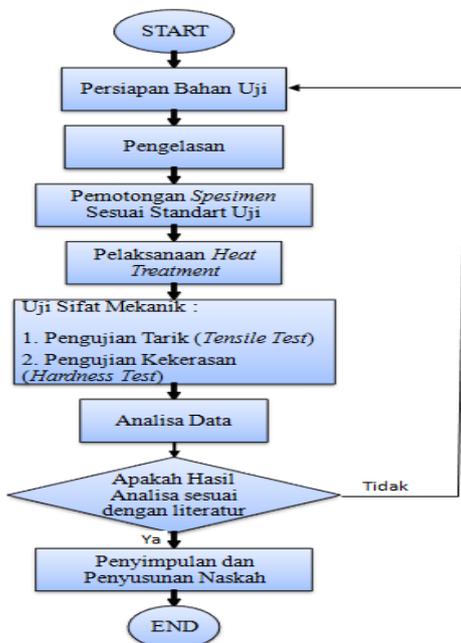
Untuk memfokuskan ruang lingkup dari permasalahan, maka permasalahan yang dihadapi akan dibatasi pada hal – hal berikut:

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah material *SUS 304*.
2. Pengelasan menggunakan *FCAW* dengan elektroda *E308LØ 1.2 mm*.
3. Proses perlakuan panas pasca las atau heat treatment yang dilakukan dalam pengujian ini adalah pada temperatur 500°C , 600°C , 700°C , dan 800°C .
4. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian tarik dan pengujian kekerasan.

Dari tujuan yang kami uraikan di atas, kita bisa menentukan nilai tegangan *ultimate* maupun tegangan *yield* serta nilai kekerasan pada daerah *base metal*, *weld metal* dan *HAZ* dengan catatan nilai temperatur *Stress Relief Annealing* sudah diketahui.

2. METODOLOGI

Berikut ini adalah *flow chat* yang menggambarkan proses *Stress Relief Anealing* pada material lasan *Stainless Steel*.

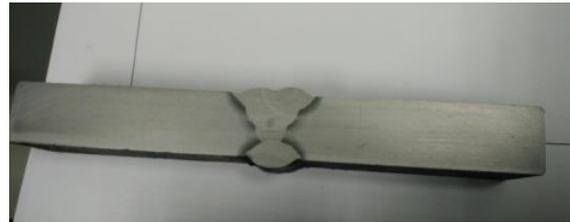


Gambar 1. Flow Chart Stress Relief Annealing

Pada penelitian ini untuk spesimen uji kita menggunakan *ASME E.8* tentang uji tarik dan uji kekerasan sebagai dasar pembuatan. Di mana semua kegiatan pembuatan material uji ini kami lakukan di PT. Profab Indonesia tempat kami bekerja.



Gambar 2. Spesimen Uji tarik



Gambar 3. Spesimen Uji Kekerasan

Untuk menimbulkan tegangan sisa pada material *SUS 304* yang telah kita siapkan, penulis menggunakan metode pengelasan *FCAW (Flux Core Welding)* atau yang sering kita kenal dengan las *MIG* yaitu pengelasan dengan busur inti flux. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan selama proses pengelasan agar dapat diperoleh hasil lasan yang baik yaitu:

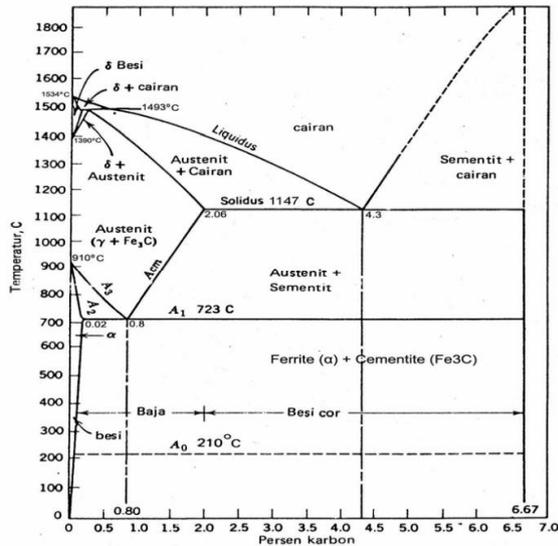
1. Faktor prosedur dan cara kerja
2. Faktor peralatan dan perlengkapan
3. Faktor hasil perhitungan dan ukuran
4. Faktor manusia
5. Faktor lingkungan dan alam
6. Faktor resiko dan akibat

Setelah dilakukan pengelasan *FCAW* material lasan dipotong menjadi 15 bagian dengan perincian sebagai berikut:

Tabel 1. Penandaan Specimen

Temperatur Stress Relief Annealing	Penandaan Spesimen
Tanpa mengalami Stress Relief Annealing	A1 A2 A3
500°C	B1 B2 B3
600°C	C1 C2 C3
700°C	D1 D2 D3
800°C	E1 E2 E3

Daftar di atas adalah penandaan spesimen yang mengalami *Stress Relief Annealing*, disamping itu terdapat 3 spesimen yang tanpa mengalami perlakuan *Stress Relief Annealing*.



Gambar 4. Iron – Carbon phase diagram

Gambar iron-carbon di atas, maka temperatur stress relief annealing yang kita gunakan adalah 4 varian, yaitu : 500°C, 600°C, 700°C & 800°C.

Untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material yang kita jadikan bahan materi, disini akan dilakukan 2 macam percobaan yaitu :

1. Pengujian Tarik
2. Pengujian Kekerasan

Pengujian tarik dilakukan terhadap batang uji yang standar. Pada bagian tengah batang uji merupakan bagian yang menerima tegangan yang uniform dan pada bagian ini diukurkan panjang uji (*gauge length*), yaitu bagian yang dianggap menerima pengaruh dari pembebanan. Pada bagian inilah yang selalu diukur panjangnya dalam proses pengujian.

Dasar yang digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik dari suatu material adalah kurva tegangan dan regangan. Donan (1952) menyatakan, *The parameters which are used to describe the stress-strain curve of metals are the tensile strength, yield strength, percent elongation and reduction of area.* Dari pernyataan tersebut dapat diketahui bahwa komponen-komponen utama dari kekuatan tarik adalah kekuatan maksimum (*tensile strength*), tegangan luluh dari material, regangan yang terjadi saat penarikan dan pengurangan luas penampang.

Proses untuk memudahkan dalam mengetahui kekuatan tarik dari suatu bahan, diadakan pengujian tarik pada bahan tersebut. Pengujian tarik dilakukan dengan memberikan suatu gaya tarik pada suatu spesimen yang bentuk dan ukurannya standar. Hasil pengukuran dari pengujian tarik adalah suatu kurva yang memberikan hubungan antara gaya yang dipergunakan dan perpanjangan yang dialami oleh spesimen.

3. TINJAUAN PUSTAKA

Baja Tahan Karat

Baja tahan karat merupakan baja paduan tinggi yang memiliki keistimewaan tahan korosi dan oksida pada temperature yang tinggi. Sifat ini didapat karena adanya lapisan *oksidachrome* yang stabil pada permukannya, yang akan melindungi baja dari lingkungan yang korosif.

Baja tahan karat atau yang sering disebut dengan *Stainless Steel* pertama kali ditemukan oleh seorang ahli metalurgi Inggris bernama *Harry Breally* pada tahun 1913, yang tanpa sengaja menambahkan kromium ke baja dengan kadar karbon rendah yang ternyata memberikan perlawanan pada senyawa tersebut. Percobaan ini ia lakukan pada sebuah proyek untuk meningkatkan efektifitas dan kinerja dari laras senapan. Di zaman sekarang komposisi dari *stainless steel* selain besi, karbon dan kromium, dapat juga berisi unsur-unsur lain seperti nikel, niobium, molybdenum dan titanium. Unsur-unsur tersebut dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi dari material *stainless steel* tersebut. Dengan penambahan minimal 12% kromium ke baja yang akan membuatnya tahan karat, atau noda 'kurang' daripada jenis baja. Kromium di baja bersenyawa dengan oksigen di udara untuk membentuk lapisan tipis, tidak terlihat yang mengandung *chrome oksida*, disebut film pasif. Ukuran atom kromium oksida mereka yang serupa, sehingga mereka dapat membungkus rapi permukaan logam tersebut, sehingga membentuk lapisan stabil hanya beberapa atom tebal. Jika logam terpotong atau tergores dan film pasif terganggu, *oksidasi* dengan cepat akan membentuk dan memulihkan permukaan yang terkena dan melindungi dari korosi *oksidatif*. Film pasif membutuhkan oksigen untuk perbaikan sendiri, jadi baja *stainless* memiliki ketahanan korosi yang miskin di lingkungan oksigen rendah dan miskin sirkulasi. Dalam air laut, klorida dari garam akan menyerang dan menghancurkan film pasif lebih cepat daripada yang dapat diperbaiki dalam lingkungan oksigen rendah.

Karena terlalu banyaknya variasi kadar paduan tersebut, maka dibuatkanlah kodifikasi untuk baja tahan karat dalam ini adalah AISI (*American Iron and Steel Institute*) dengan bilangan tiga digit, seperti:

Table 2. Klasifikasi Baja Tahan Karat Standart AISI

Series	Major Alloying Elements	Characteristic
2xx	Chromium – Ni – Manganese	Non Hardenable Austenite
3xx	Chromium – Ni	Non Hardenable Austenite
4xx	Chromium	1. Non Hardenable Martensite 2. Non Hardenable Ferritic
5xx	Chromium (4% to 6%)	Air Hardenable Martensite

Secara garis besar baja tahan karat itu bisa dibedakan berdasarkan pada perbedaan struktur mikro yang terjadi menjadi tiga kelompok besar yaitu:

1. Baja Tahan Karat Austenite
2. Baja Tahan Karat Martensitic
3. Baja Tahan Karat Ferritic

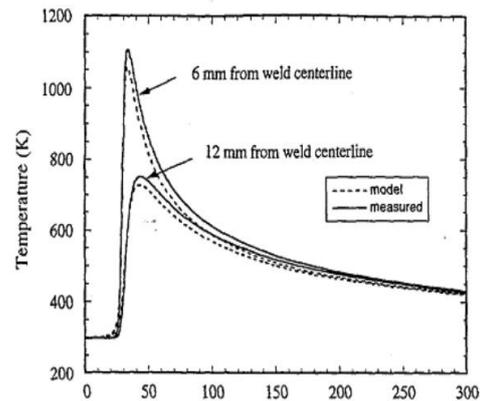
Pengelasan

Proses pengelasan merupakan penyambungan dua logam atau lebih dari paduan-paduan logam dengan cara memanasi baik di atas batas cairnya atau di bawah batas cairnya tersebut disertai dengan tekanan atau tanpa tekanan dan di tambah dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi (*filler metal*).

Dari sumber panas yang digunakan, pemanasan logam induk sampai pada temperature puncak (mencair) mempunyai karakteristik sesuai dengan sifat fisik logam tersebut.

Pemanasan yang lambat menyebabkan penambahan panas ke segala arah, sehingga menambah jumlah pemanasan yang dibutuhkan dan tidak hanya memperlambat pencairan tetapi menambah kemungkinan penyusutan (*shrinkage*) logam tersebut.

Jadi pada saat pengelasan baja dengan menggunakan input panas kecil memungkinkan kesempatan transformasi *ferritic* menjadi *austenite* pada baja. Tetapi karena input panas rendah, mengharuskan kecepatan pengelasan (*welding speed*) yang relative pelan, maka lebih banyak panas yang menyebar ke bagian logam, sehingga lebih banyak daerah yang dipanasi. Dan ini juga menandakan lebih banyak daerah yang berubah struktur mikronya tanpa mencair, dengan perkataan lain HAZ-nya (*Heat Affected Zone*) lebih besar. Dan sebaliknya apabila material dikenakan dengan input panas yang tinggi maka baja akan semakin cepat untuk mencair, sehingga kecepatan pengelasannya lebih besar, berarti lebih sedikit daerah yang terpengaruhi panas, jadi HAZ-nya kecil.



Gambar 5. Thermal Cycle

Kendala yang dihadapi dalam pengelasan bermacam-macam jenis logam dan paduan tergantung pada *weld ability*-nya. *Weld ability* yang baik meliputi beberapa factor yang saling terkait antara lain:

1. Jenis logam dan komposisi kimianya
2. Proses las yang digunakan
3. Rancangan dan parameter las yang digunakan
4. Dimensi benda kerja.
5. Perlakuan panas sehubungan dengan persyaratan yang dituntut berdasarkan spesifikasi
6. Kondisi lingkungan dan temperature operasi

Faktor-faktor tersebut sangat menentukan *weld ability*, dimana apabila salah satu factor atau beberapa factor diabaikan maka akan terjadi problem yang serius antara lain:

1. Retaklas
2. Distorsi
3. Cacat las atau kegagalanlainnya

Jadi hubungan antara *weld ability* dengan proses las dan jenis logam dapat menentukan apa yang dicapai itu nantinya baik atau tidak. Dengan kata lain ada kegagalan-kegagalan tersebut di atas dapat menyebabkan *residual stress*.

Pengelasan Baja Tahan Karat Austenite

Dalam proses pengelasan, baja tahan karat *austenite* mempunyai sifat lebih mudah dilas dari pada baja tahan karat *ferritic* dan *martensitic*. Sambungan las yang terjadi mempunyai sifat *ductile* (liat). Pengecualian pada baja tahan karat *type 303* dan *303 Se* yang mengandung *sulfur* dan *selenium* untuk meningkatkan sifat mudah di mesin, tetapi pada pengelasan mudah terjadi *hot sort cracking*.

Pendinginan lambat pada baja tahan karataustenite dari temperatur 68°C ke temperatur 480°C akan membentuk karbida chrome yang mengendap di antara butiran. Endapan ini terjadi pada temperatur 650°C yang menyebabkan penurunan sifat mekanik. Sifat mekanik dan sifat tahan karat dari logam las sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dalam bentuk equivalen Ni dan equivalen Cr, serta

struktur mikro yang terjadi karena proses pengelasan dan peretakan, maka harus dijaga agar logam lasan berada ditempat aman.

Residual Stress

Residual stress atau tegangan sisa adalah tegangan yang terdapat pada benda atau material meskipun benda tersebut tidak dikenai beban (gaya) luar. Karena tegangan sisa ditimbulkan oleh *deformasi plastis* tidak seragam maka tegangan-tegangan sisa terbentuk pada setiap proses pengerjaan logam perlu diperhatikan.

Secara umum tanda tegangan sisa yang dihasilkan oleh *deformasi tak homogeny* akan berlawanan dengan tanda regangan plastis yang menghasilkan tegangan sisa tadi. Sistem tegangan sisa yang mempunyai struktur harus dalam keadaan setimbang statis. Jadi gaya total yang bekerja pada setiap bidang yang ada di dalam struktur dan momen gaya yang bekerja dalam sembarang bidang harus sama dengan nol. Tegangan sisa adalah tegangan *elastic*, nilai maksimum yang dapat dicapai oleh tegangan sisa adalah sama dengan tegangan luluh bahan yang bersangkutan. Untuk keperluan analisis tegangan sisa dapat dianggap sama dengan tegangan beban. Jadi tegangan sisa tekan secara efektif akan mengurangi tegangan tarik dan tegangan sisa tarik menambah tegangan tarik tersebut.

Logam-logam yang mengandung tegangan sisa dapat dibebaskan dari tegangan atau penghilangan tegangan dengan pemanasan hingga suhu tertentu, dimana kekuatan luluh bahan sama atau lebih kecil dibandingkan dengan sisa semula. Jadi bahan dapat berubah bentuk dan melepaskan tegangan. *Deformasi* mulur atau *creep* merupakan cara penghilangan tegangan *thermal* yang penting, selain itu perlu diperhatikan bahwa perpanjangan atau penyusutan *thermal* yang tak seragam yang disebabkan oleh pemanasan atau pendinginan yang tak seragam dapat menghasilkan tegangan sisa sama dengan yang terjadi pada *defomasiplastis*. Oleh karena itu pendinginan yang lambat dari suhu/temperature penghilang tegangan merupakan hal yang perlu diperhatikan.

Tegangan sisa sukar dihitung secara teliti dengan metode *analitis* dan oleh karena itu biasanya ditentukan dengan berbagai jenis teknik percobaan, sebagian besar pengukuran tegangan sisa bersifat merusak karena bagian yang mengalami penegangan dibuang untuk mengatur kembali distribusi tegangan pada bagian yang tersisa.

Beberapa teknik pengukuran *residual stress* yang semenjak tahun 1950-an telah dikembangkan oleh para ahli antara lain:

1. *Sectioning* teknik / teknik pemotongan
2. *Hole-Drilling* teknik.
3. *Metode X-ray Diffraction*.
4. *Metode Neutron Diffraction*.
5. *Metode Ultrasonik*.
6. *Metode Barkhausen Noise*

Residual Stress pada Pengelasan

Pada dasarnya ada tiga bentuk perubahan ukuran logam diakibatkan oleh pemanasan dan pendinginan:

1. Perubahan dimensi yang disebut ekspansi panas mengembang yang diakibatkan oleh pemanasan serta penyusutan yang diakibatkan oleh pendinginan.
2. Ekspansi *lattice* yaitu dimana atom-atom kristalnya mengembang dikarenakan pemanasan.
3. *Transformasi* yaitu terjadinya pengembangan atom-atom kristal ke segala arah.

Dari ketiga bentuk ekspansi dan kontraksi logam seperti diterangkan di atas mengakibatkan adanya *internal stress (residual stress)* yang dapat diterangkan sebagai berikut.

Pada saat logam dipanasi (di las dari satu sisi), akan terjadi ekspansi panas terutama pada daerah atau sisi yang terkena pemanasan. Dan apabila proses las tersebut telah selesai maka akan terjadi penyusutan oleh akibat dari pendinginan, proses kontraksi ini menyebabkan logam (dalam hal ini material las-lasan) mengalami *distorsi*.

Internal stress dapat berbentuk *compressive residual stress* (tekan) atau *tensile residual stress* (tarik) tergantung dari besarnya kecepatan pendinginan (*coolingrate*). Sebagai contoh apabila *coolingrate* yang kita lakukan rendah maka akan terjadi yang kita namakan *compressive residual stress*.

Jadi *internal stress* adalah gaya dalam yang terjadi akibat dari adanya kontraksi dimensi, dimana karena sesuatu hal kontraksi ini dapat leluasa terjadi, sehingga menimbulkan gaya lawan. Besar dan arah dari *internal stress* banyak tergantung dari:

1. Jenis proses las yang digunakan.
2. Banyaknya panas yang diterima.
3. Banyaknya tumpukan (*layer*) las.
4. Dan lain-lain.

Sedangkan arah dari *internal stress* sendiri bisa ke segala arah baik ke arah memanjang atau pun melintang terhadap sumbu las. Untuk *internal stress* arah longitudinal akan lebih besar ukurannya apabila dibandingkan dengan arah transversal.

Cara Mengatasi Residual Stress

Untuk mengurangi *residual stress* dapat dilakukan langkah-langkah antara lain:

1. *Peening* (dipukul-pukul).
2. *Stress Relieving*.
3. *Pengelasan berjalan dimulai dari bagian yang bebas menuju ke bagian fix*.
4. *Design sedemikian rupa sehingga internal stress-nya minim*.
5. *Sebaiknya menggunakan squence welding*.
6. *Daerah yang saling memotong dihindari*.
7. *Jangan mengisi gap yang terlalu besar dengan las-lasan*.

Annealing

Annealing merupakan salah satu bentuk dari *heat treatment* yang mana adalah suatu proses pemanasan terhadap suatu material untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang sesuai dengan keinginan kita.

Macam-macam *annealing* itu dapat disebutkan antara lain:

1. *Recrystallization Annealing*
2. *Stress Relief Annealing*
3. *Isothermal Annealing*
4. *Quenching Annealing*
5. *Homogenizing Annealing*
6. *Hydrogen Annealing*

Tiap-tiap macam *annealing* diatas memiliki keistimewaan dan kegunaan sendiri-sendiri.

Stress Relief Annealing

Ketika suatu baja dikerjakan oleh mesin atau terjadi *deformasi plastis* atau terjadi tegangan permukaan yang mana hal ini disebabkan oleh perpanjangan bagian permukaan. Tegangan tersebut akan memberikan peningkatan kekerasan. Dengan tambahan pengerjaan pada material baik itu pengerjaan mesin ataupun yang lain mungkin akan terjadi *distorsi*. Hal ini harus bisa diminimalkan atau dikurangi dengan cara *Stress Relief Annealing*.

Untuk campuran atau paduan baja yang rendah bisa digunakan temperature $550^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$. Sedangkan untuk baja paduan tinggi bisa digunakan temperature $600^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$. Percobaan ini tidak akan menyebabkan terjadinya perubahan pada tingkatan tertentu, tetapi mungkin akan berbentuk *recrystallization*. Dengan maksud agar tegangan-tegangan termal tidak terbentuk pada saat pendinginan, maka perlu dilakukan pendinginan secara lambat pada dapur api dengan temperatur sekitar 500°C , setelah itu baru material bisa didinginkan di udara bebas.

Dikarenakan banyak alat-alat dan komponen-komponen mesin yang menyebabkan terjadinya tegangan sisa ini, maka pada saat pendinginan *Stress Relief Annealing* harus dimulai dengan temperatur yang lebih lambat beberapa $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$. Hal ini dilakukan karena seperti halnya temperatur yang melambat, dimungkinkan terjadinya peningkatan pendinginan secara rata-rata tetapi tidak sampai mencapai temperature 300°C dan jika hal ini terjadi maka material tersebut patut didinginkan secara bebas di udara. Alasan mengapa diperbolehkannya memulai pendinginan rata-rata secara perlahan ketika baja berada pada temperatur tertinggi adalah agar *yield point* dari material tersebut rendah, sebab apabila *yield point* itu melampaui tegangan yang menyebabkannya akan sangat berbahaya. Jika terjadi perbedaan temperatur yang terlalu besar antara permukaan dan bagian tengah material tersebut, maka akan menimbulkan terjadinya tegangan *thermal* yang mana kondisi ini bisa menyebabkan timbulnya tegangan baru pada

saat setelah pendinginan.

Salah satu kemungkinan untuk bisa mengurangi *residual stress* ini adalah dengan *Stress Relief Annealing* yang dilakukan dengan pemanasan sampai temperature mendekati batas temperature maksimum yang diperbolehkan. Hal ini tidak boleh dilakukan sebab dapat menimbulkan peningkatan oksidasi permukaan yang bisa berakibat mengurangi ketahanan *korosif* dari *stainless steel* tersebut.

Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan terhadap batang uji yang standar. Pada bagian tengah batang ujimerupakan bagian yang menerima tegangan yang *uniform*, dan pada bagian ini diukurkan panjang uji (*gauge length*), yaitu bagian yang dianggap menerima pengaruh dari pembebanan. Pada bagian inilah yang selalu di ukur panjangnya dalam proses pengujian.

Dasar yang digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik dari suatu material adalah kurva tegangan dan regangan. Donan (1952) menyatakan, *The parameters which are used to describe the stress-strain curve of metals are the tensile strength, yield strength, percent elongation and reduction of area*. Dari pernyataan tersebut dapat diketahui bahwa komponen-komponen utama dari kekuatan tarik adalah kekuatan maksimum (*tensile strength*), tegangan luluh dari material, regangan yang terjadi saat penarikan dan pengurangan luas penampang.

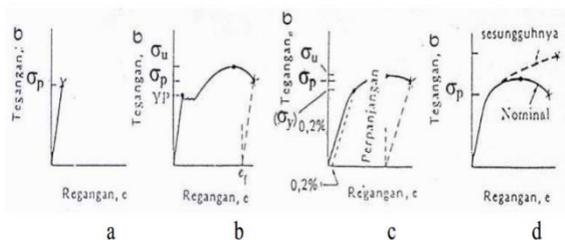
Proses untuk memudahkan dalam mengetahui kekuatan tarik dari suatu bahan, diadakan pengujian tarik pada bahan tersebut. Pengujian tarik dilakukan dengan memberikan suatu gaya Tarik pada suatu spesimen yang bentuk dan ukurannya standar. Pembuatan specimen disesuaikan dengan bentuk awal bahannya. Apabila bahan awal berbentuk silindris maka specimen tariknya pun dikerjakan dengan proses pemresinan sehingga berbentuk silindris pula, demikian juga untuk bahan yang berbentuk plat, maka spesimen tariknya akan berbentuk plat pula dengan dimensi-dimensi yang telah ditetapkan. Hasil pengukuran dari pengujian tarik adalah suatu kurva yang memberikan hubungan antara gaya yang dipergunakan dan perpanjangan yang dialami oleh spesimen.

Sifat mekanik pertama yang dapat diketahui berdasarkan kurva pengujian tarik yang dihasilkan adalah kekuatan tarik maksimum yang diberi simbol *u*. simbol *u* didapat dari kata *ultimate* yang berarti puncak. Jadi besarnya kekuatan tarik ditentukan oleh tegangan maksimum yang diperoleh dari kurva tarik.

Sifat mekanik yang kedua adalah kekuatan luluh yang diberi simbol *y* dimana *y* diambil dari kata *yield* atau luluh. Kekuatan luluh dinyatakan oleh suatu tegangan yang merupakan pembatas dari tegangan yang memberikan regangan elastis saja dengan tegangan yang memberikan tegangan elastis bersama plastis.

Titik luluh adalah suatu titik perubahan pada kurva pada bagian yang berbentuk linier dan tidak linier.

Pada kurvatarik baja karbon rendah atau baja lunak batas ini mudah terlihat, tetapi pada bahan lain batas ini sukar sekali untuk diamati oleh karena daerah linier dan tidak linier bersambung secara berlanjut. Oleh karena itu untuk menentukan titik luluh diambil dengan metoda offset yaitu suatu metoda yang menyatakan bahwa titik luluh adalah suatu titik pada kurva yang menyatakan dicapainya regangan plastis sebesar 0.2%.



Gambar 6. Diagram Tegangan Regangan

- Bahan tidak ulet, tidak ada *deformasi plastis* misalnya besi cor
- Bahan ulet dengan titik luluh misalnya pada baja karbon rendah
- Bahan ulet tanpa titik luluh yang jelas misalnya aluminium.
- Diperlukan metode off set untuk mengetahui titik luluhnya
- Kurva tegangan regangan sesungguhnya regangan-tegangan nominal

p = kekuatan patah, u = kekuatan tarik maksimum, y = kekuatan luluh, ef = regangan sebelum patah, x = titik patah, YP = titik luluh.

Sifat yang ke tiga adalah *modulus elastisitas*. *Modulus Elastisitas* biasa disebut sebagai *Modulus Young* dan dinyatakan dengan simbol *E*. Sifat ini menyatakan kekakuan dari suatu bahan yang di dalam kurva tarik menyatakan hubungan yang linier dari tegangan dan regangan.

Sifat yang ke empat yang bisa didapatkan dari pengujian tarik adalah keuletan saat patah. Keuletan ini dinyatakan dengan regangan maksimum yang bisa dicapai oleh bahan, yaitu pada saat patah. Semakin besar regangan yang bisa dicapai oleh bahan, semakin ulet bahan tersebut.

Sifat ke lima adalah reduksi penampang atau *reduction of area* pada saat patah. Sebenarnya sifat ini erat kaitannya dengan regangan yang dialami oleh bahan.

Tujuan pengujian tarik untuk mengetahui sifat-sifat mekanik dan perubahan-perubahan dari suatu logam terhadap pembebanan tarik. Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate tensile strength*) adalah beban maksimum dibagi luas penampang lintang awal benda uji (spesimen).

Pengujian Kekerasan

Proses pengujian kekerasan dapat diartikan sebagai kemampuan suatu bahan terhadap pembebanan dalam perubahan yang tetap, artinya ketika gaya tertentu diberikan pada suatu benda uji dan karena pengaruh pembebanan benda uji akan mengalami deformasi. Harga kekerasan bahan tersebut dapat dianalisa dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan.

Pengujian kekerasan logam ini secara garis besar ada tiga metode yaitu penekanan, goresan, dan dinamik (Koswara, 1991:15). Proses pengujian yang mudah dan cepat dalam memperoleh angka kekerasan yaitu dengan metode penekanan. Dikenal ada tiga jenis metode penekanan, yaitu: *Rockwell*, *Brinell*, *Vickers*, yang masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Pengujian kekerasan dengan goresan dibakukan pada skala *Mohs*, ada sepuluh skala yang disusun berurutan dari bahan lunak sampai bahan yang keras. Pengujian kekerasan dengan dinamik adalah pengukuran terhadap ketinggian pantulan sebuah palu dari permukaan benda uji pada mesin uji *Shore Scleroscope*.

Pengujian kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode *Vickers*. Uji kekerasan *Vickers* menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136°. Nilai ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antar diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan *brinell* (dieter, 1987). Angka kekerasan *Vickers* didefinisikan sebagai beban di bagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya luas ini di hitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak.

Karena jejak yang di buat dengan penekanan piramida serupa secara geometris dan tidak terdapat persoalan mengenai ukurannya, maka *VHN* tidak tergantung kepada beban. Pada umumnya hal ini dipenuhi, kecuali pada beban yang sangat ringan. Beban yang biasanya digunakan pada uji *Vickers* berkisar antara 1 hingga 120kg. Tergantung pada kekerasan logam yang akan diuji.

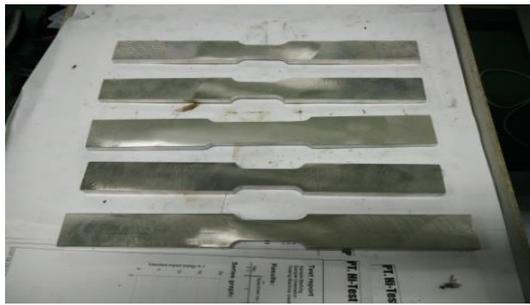
Hal yang menghalangi keuntungan pemakaian metode *vickersa* adalah:

- Uji ini tidak dapat digunakan untuk pengujian rutin karena pengujian ini sangat lambat.
- Memerlukan persiapan permukaan benda uji.
- Terdapat pengaruh kesalahan manusia yang besar pada penentuan panjang diagonalnya.

4. HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian tarik terhadap material lasan

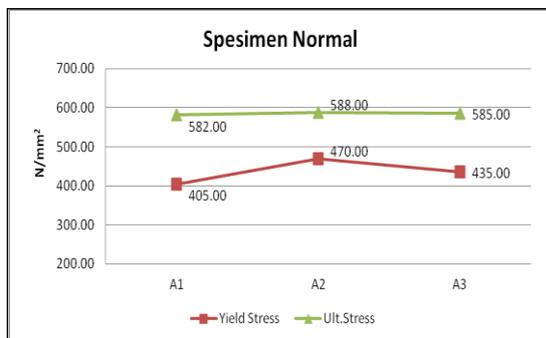
SUS 304 adalah sebagai berikut:



Gambar7. Spesimen A, B, C, D, E

Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik Temperatur Normal

TENSION TEST							
No	Specification Sample			Tensile Test Result			
	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm ²)	Ult. Total Load (KN)	Yield Stress (N/mm ²)	Ult. Stress (N/mm ²)	Elongation (%)
A1	12.7	7.2	91.44	53.24	405	582	0.307
A2	12.75	7.2	91.8	53.98	470	588	0.326
A3	12.45	7.1	88.315	51.73	435	585	0.357

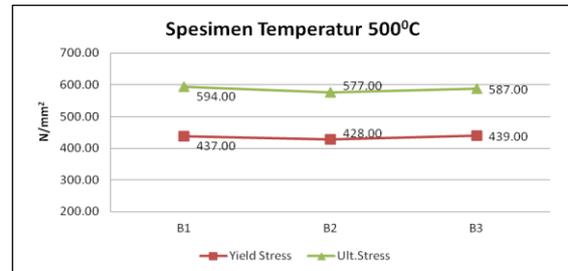


Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur Normal

Pada temperatur normal pada titik A1 nilai *yield stress* sebesar 405.00 N/mm², pada *ult.stress* sebesar 582.00 N/mm². Sedangkan pada titik A2 terjadi perubahan yang tinggi, di mana pada titik A2 nilai *yield stress* sebesar 470.00 N/mm² dan *ult.stress* sebesar 588.00 N/mm². Dan pada titik A3 mengalami penurunan sedikit, di mana nilai *yield stress* menjadi 435.00 N/mm², dan pada *ult.stress* nilainya juga mengalami penurunan sedikit menjadi 585.00 N/mm²

Tabel 4. Hasil Pengujian Tarik Temperatur 500°C

TENSION TEST							
No	Specification Sample			Tensile Test Result			
	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm ²)	Ult. Total Load (KN)	Yield Stress (N/mm ²)	Ult. Stress (N/mm ²)	Elongation (%)
B1	12.7	7.1	90.7	53.52	437	594	0.309
B2	12.6	7.3	91.98	53.09	428	577	0.334
B3	12.85	7.1	91.23	53.52	439	587	0.324

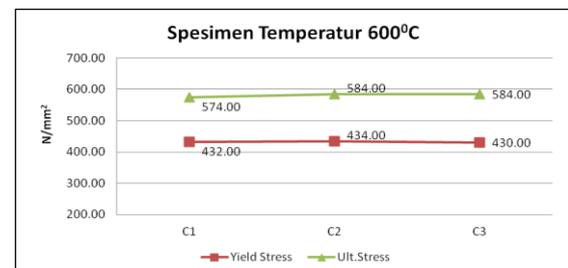


Gambar9. Grafik Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 500°C

Hasil pengujian tarik pada temperatur 500°C pada titik B1 nilai *yield stress* sebesar 437.00 N/mm², pada *ult.stress* sebesar 594.00 N/mm². Sedangkan pada titik B2 terjadi perubahan menurun di mana pada titik B2 nilai *yield stress* sebesar 428.00 N/mm² dan *ult.stress* sebesar 577.00 N/mm². Dan pada titik B3 mengalami kenaikan, di mana nilai *yield stress* menjadi 439.00 N/mm², dan pada *ult.stress* nilainya juga mengalami kenaikan menjadi 587.00 N/mm².

Tabel 5. Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 600°C

TENSION TEST							
No	Specification Sample			Tensile Test Result			
	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm ²)	Ult. Total Load (KN)	Yield Stress (N/mm ²)	Ult. Stress (N/mm ²)	Elongation (%)
C1	12.8	7.2	92.15	52.89	432	574	0.329
C2	12.7	7.2	91.44	53.38	434	584	0.338
C3	12.65	6.8	86.02	50.21	430	584	0.312



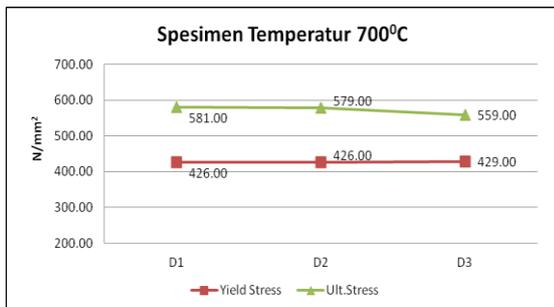
Gambar 10. Grafik Hasil Pengujian Tarik Temperatur 600°C

Pada temperatur 600°C titik C1 nilai *yield stress*

sebesar 432.00 N/mm², pada *ult.stress* sebesar 574.00 N/mm². Sedangkan pada titik C2 terjadi perubahan sedikit yang tidak terlalu tinggi, di mana pada titik C2 nilai *yield stress* sebesar 434.00 N/mm² dan *ult.stress* sebesar 584.00 N/mm². Dan pada titik C3 mengalami penurunan sedikit, di mana nilai *yield stress* menjadi 430.00 N/mm², dan pada *ult.stress* nilainya juga tidak mengalami turun atau naik tetapi tetap sebesar 584.00 N/mm².

Tabel 6. Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 700°C

TENSION TEST							
No	Specification Sample			Tensile Test Result			
	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm)	Ult. Total Load (KN)	Yield Stress (N/mm ²)	Ult. Stress (N/mm ²)	Elongation (%)
D1	12.45	6.9	85.90	49.92	426	581	0.307
D2	12.7	6.9	87.63	50.78	426	579	0.299
D3	12.8	7.3	93.44	52.28	429	559	0.372

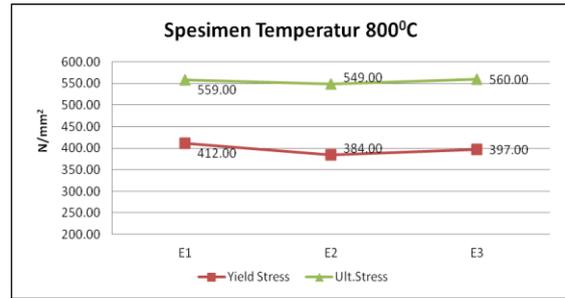


Gambar 11. Grafik Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 700°C

Pada temperatur 700°C titik D1 nilai *yield stress* sebesar 426.00 N/mm², pada *ult.stress* sebesar 581.00 N/mm². Sedangkan pada titik D2 terjadi perubahan sedikit yang tidak terlalu tinggi, di mana pada titik D2 nilai *yield stress* sebesar 426.00 N/mm² dan *ult.stress* sebesar 579.00 N/mm². Dan pada titik D3 mengalami kenaikan sedikit, di mana nilai *yield stress* menjadi 429.00 N/mm², dan pada *ult.stress* nilainya mengalami penurunan menjadi sebesar 559.00 N/mm².

Tabel 7. Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 800°C

TENSION TEST							
No	Specification Sample			Tensile Test Result			
	Width (mm)	Thickness (mm)	Area (mm)	Ult. Total Load (KN)	Yield Stress (N/mm ²)	Ult. Stress (N/mm ²)	Elongation (%)
E1	12.6	7.3	91.98	51.41	412	559	0.321
E2	12.5	7.4	92.5	50.76	394	549	0.310
E3	12.9	7.5	96.75	54.22	397	560	0.384



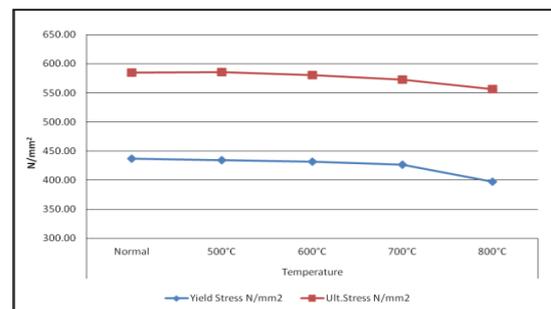
Gambar 12. Grafik Hasil Pengujian Tarik pada Temperatur 800°C

Pada temperatur 800°C titik E1 nilai *yield stress* sebesar 412.00 N/mm², pada *ult.stress* sebesar 559.00 N/mm². Sedangkan pada titik E2 terjadi perubahan menurun di mana pada titik E2 nilai *yield stress* sebesar 384.00 N/mm² dan *ult.stress* sebesar 549.00 N/mm². Dan pada titik E3 mengalami kenaikan, di mana nilai *yield stress* menjadi 397.00 N/mm², dan pada *ult.stress* nilainya juga mengalami kenaikan menjadi 560.00 N/mm².

Dari data pengujian tarik dapat diambil nilai rata-rata sebagai berikut:

Tabel 8. Rata – rata hasil pengujian Tarik

Rata-rata	Temperature				
	Normal	500°C	600°C	700°C	800°C
Yield Stress N/mm ²	436.67	434.67	432.00	427.00	397.67
Ult. Stress N/mm ²	585.00	586.00	580.67	573.00	556.00



Gambar 13. Grafik Rata-Rata Perubahan Temperatur Terhadap Nilai Yield Stress dan Ultimate Stress Material SUS 304

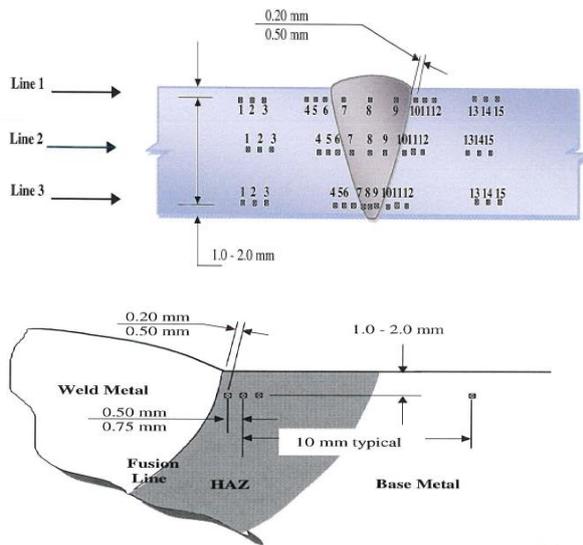
Pada pengujian tersebut dapat diketahui bahwa nilai *yield stress* mengalami perubahan disetiap temperatur yang berbeda-beda, semakin tinggi temperaturnya nilai *yield stress* semakin menurun. Dan begitu juga pada nilai *ult.stress* di mana semakin tinggi temperature maka akan semakin menurun nilai *ult.stress*. Walaupun penurunan nilai tidak terlalu signifikan.

Hasil pengujian *Vicker* terhadap material lasan SUS

304 adalah sebagai berikut:



Gambar 14. Spesimen Uji Vickers

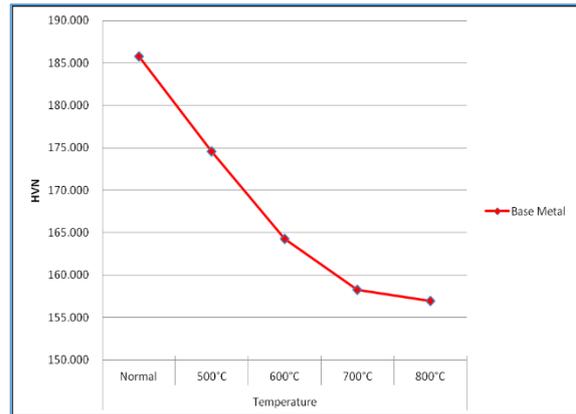


Gambar 15. Penentuan Lokasi Uji Hardness

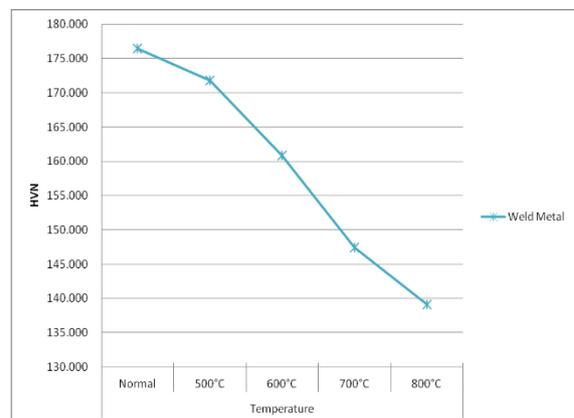
Dari diameter indentasi di atas akan diperoleh nilai kekerasan *Vickers* (HVN) sebagai berikut :

Tabel 9. Hasil dan Rata-rata Pengujian *Hardness*

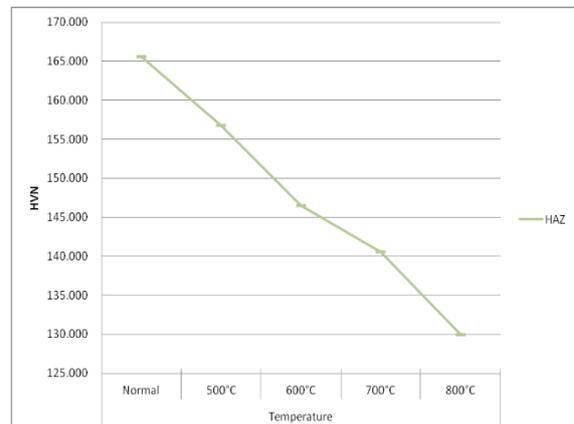
	Temperature				
	Normal	500°C	600°C	700°C	800°C
Base Metal	184.240	159.522	156.096	178.325	125.759
	187.247	191.492	167.046	154.642	167.744
	185.744	172.657	169.618	141.809	177.340
Rata-rata	185.744	174.557	164.253	158.259	156.948
Weld Metal	180.266	174.237	166.223	166.010	115.750
	172.561	169.295	155.499	128.818	150.457
	176.413	171.766	160.861	147.414	151.224
Rata-rata	176.413	171.766	160.861	147.414	139.144
HAZ	160.340	154.570	138.093	165.286	84.983
	170.824	159.028	146.994	115.767	154.446
	165.582	156.799	154.336	140.526	150.496
Rata-rata	165.582	156.799	146.474	140.526	129.975



Gambar 16. Grafik Hasil Pengujian kekerasan di daerah BM



Gambar 17. Grafik Hasil Pengujian kekerasan di daerah WM



Gambar 18. Grafik Hasil Pengujian kekerasan di daerah HAZ

Dari analisa data seperti tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa *Stress Relief Annealing* sangat perlu dilakukan guna menghindari terjadinya resiko dini berupa *Stress Corrossion Cracking (SCC)*. Dengan dilakukannya *Stress Relief Annealing* ini dapat menyebabkan perubahan sifat mekanik dari *Stainless Steel Type SUS 304* ini. Perubahan sifat mekanik dari *Stainless Steel type SUS 304* ini

cenderung menurun dikarenakan material jenis ini tidak mengalami perubahan fase dan mempunyai sifat tidak bisa dikeraskan melalui proses *heat treatment* melainkan dengan pengerjaan dingin.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada penelitian yang telah kami lakukan, maka bisa diambil suatu kesimpulan:

1. Bahwa sifat mekanik dari baja tahan karat *Stainless Steel type SUS 304* sangat berpengaruh terhadap temperature *Stress Relief Annealing*
2. Semakin tinggi temperatur *Stress Relief Annealing*, semakin menurun pula nilai tegangan baik *ultimate* maupun *yield stress* serta nilai kekerasannya.

Untuk lebih mempertajam (akurasi) hasil penelitian yang lebih baik, maka penulis mencoba untuk memberi saran :

1. Dimensi dan bentuk dari spesimen harus presisi dan seragam.
2. Diperlukan peralatan pengujian yang lebih baik agar diperoleh hasil pengujian yang teliti.
3. Perlunya dilakukan pengujian struktur mikro agar lebih mengetahui perubahan struktur mikro-nya pada tiap-tiap variasi suhu.

DAFTAR PUSTAKA

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Iron and Steel Product, Steel Plate, Sheet, Strip, Wire, Section 01, Vol 01.03

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Iron and Steel Product, Metals-Mechanical Testing, Elevated and Low-Temperature test, Section 03, Vol. 03.01

George E. Dieter [1987] "*Metalurgi Mekanik*", PT. Airlangga, Bandung

Gourd L. M [1995], "*Principle of Welding Technology*", Third edition, The Welding Institute, Edward Arnold, London, United Kingdom

Karl E. Thelning, "*Steel and Its Heat Treatment*"

Samuel, Hoyt L. [1954], "*ASME Hand Book METALS PROPERTIES*", First edition, McGRAW-HILL Book Company, INC, New York

Trethewey, Chamberlain [1991], "*Korosi*" untuk Mahasiswa dan Rekayasawan, PT. Gramedia, Jakarta

Ir.Wahid Suherman. [2003] Diktat kuliah "*Ilmu logam*" jurusan Teknik Mesin Institut Sepuluh November Surabaya.

Wirjosumarto, H. Prof. Dr. Ir dan Toshie Okumura Prof. Dr [2004], "*Teknologi Pengelasan Logam*", Cetakan sembilan, PT. Pradnya Paramita, Jakarta