

PENGARUH PROSES *HEAT TREATMENT ANNEALING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN PADA SAMBUNGAN LAS *THERMITE* BAJA NP-42

*Huda Fathu Rohman¹, Gunawan D.H², Yusuf Umardani², Agus Tri Hardjuno³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

³Staff UPT Lab. Terpadu Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: hudaaaaah@gmail.com

Abstrak

Pengelasan logam dengan menggunakan metode las thermite banyak digunakan, seperti pada *rail crane*, maupun perbaikan instalasi jalur rel kereta api. Beberapa masalah dalam pengelasan adalah terjadinya tegangan sisa dan kekerasan yang berlebih sehingga dapat menurunkan ketangguhan las. Salah satu cara mengurangi permasalahan ini adalah dengan metode *Post Weld Heat Treatment (PWHT) annealing*. *Post Weld Heat Treatment (PWHT) annealing* memiliki beberapa fungsi yaitu mengurangi tegangan sisa, meningkatkan keuletan, menurunkan ketidak homogenan stuktur dan memperbaiki ketangguhan daerah logam las dan HAZ. *PWHT Annealing* dilakukan pada baja NP-42 dengan bervariasi temperatur pemanasan 780°C, 800°C, 820°C, dan 840°C. Dengan waktu penahanan 60 menit dari proses *PWHT Annealing* serta didinginkan dalam *furnace*. Hasil penelitian ini adalah diperoleh struktur *ferrite* dan *pearlit* pada semua spesimen, namun perbedaan yang signifikan adalah perbedaan ukuran *grain size* pada masing-masing temperatur *annealing*. Untuk nilai kekerasan antara 171,7 VHN – 259,1VHN, hal ini didukung dengan foto mikro pada daerah disetiap temperatur.

Kata Kunci: Las thermite, *PWHT annealing*, kekerasan mikro vikers, baja NP-42, dan struktur mikro.

Abstract

Metal welding using thermite welding method is widely used, such as the crane rail, installation and repair railway tracks. Some problems in welding is the residual stress and hardness can reduce the excess so that the weld toughness. One way to reduce this problem is by the method of Post Weld Heat Treatment (PWHT) annealing. Post Weld Heat Treatment (PWHT) annealing has several functions that reduce the residual stress, improve the tenacity, decrease inhomogeneity structure and improve the toughness of the weld metal and HAZ regions. Annealing PWHT process performed on the steel variations NP-42 with warming temperatures 780°C, 800°C, 820°C, and 840°C. With 60 minutes of hold time Annealing PWHT process and cooled in the furnace. The results of this study were obtained ferrite and pearlite structure in all specimens, but the significant difference is the difference in the size of the grain size at each annealing temperature. For VHN hardness values between 171.7 - 259.1 VHN, it is powered by a micro photograph at each temperature region.

Keywords: Las thermite, annealing PWHT, hardness Vickers, steel NP-42, and micro structure.

1. PENDAHULUAN

Penyambungan logam dengan sistem pengelasan semakin banyak digunakan, luasnya pemakaian las ini disebabkan karena adanya keunggulan dibandingkan dengan teknik penyambungan lain yaitu kekuatan las dapat mendekati atau bahkan melebihi kekuatan logam induknya. Konstruksi dengan sambungan las menjadi sederhana dan ringan serta adanya berbagai teknik pengelasan sehingga dengan teknik pengelasan tertentu dapat dipilih pada kondisi yang sesuai[1]. Ruang lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam kontruksi sangat luas meliputi perkapalan, jembatan, rangka baja, bejana tekan, sarana transportasi, rel, pipa saluran dan lain sebagainya[2].

Salah satu penerapan metode pengelasan saat ini adalah pengelasan *thermite* yang merupakan pengembangan dari proses pengelasan yang umum dilakukan. Pengelasan *thermite* adalah reaksi eksotermik antara aluminium dan besi oksida yang menghasilkan baja lebur yang kemudian dituangkan ke dalam suatu cetakan yang akan di-las. Hasil pengelasan dari kedua sisi bahan baja menghasilkan tiga daerah utama yaitu daerah logam dasar (*base metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone - HAZ*), dan daerah logam las (*weld metal*).

Dalam proses pengelasan *thermite*, bagian sambungan yang dilas menerima panas pengelasan setempat dan selama proses berjalan temperturnya terus berubah sehingga distribusi menjadi tidak merata. Karena panas tersebut, maka pada bagian terjadi pengembangan *thermal*, sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk penghalang pengembangan yang menyebabkan terjadinya peregangan. Akibat peregangan ini akan timbul tegangan

tetap yang disebut tegangan sisa[3, 4]. Tegangan sisa tersebut berwujud adanya dislokasi butir struktur Kristal material yang terjadi akibat *cold working* maupun akibat *thermal stress* pada saat pendinginan cepat[5].

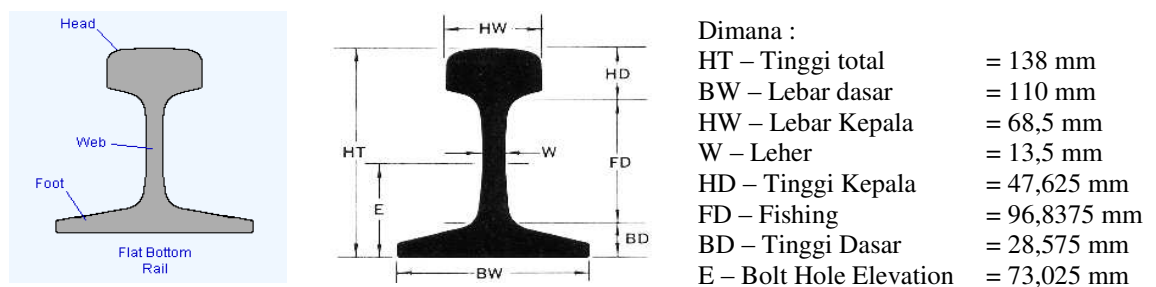
Untuk mengembalikan kepada sifat yang diinginkan maka dilakukan proses *Post weld heat treatment* (PWHT)[6]. *Post weld heat treatment* (PWHT) itu sendiri adalah proses pemanasan dan pendinginan pada logam untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang diperlukan, misalnya kekuatan (*strength*), kelunakkan (*softness*) dan untuk memperhalus ukuran butir[7].

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kekerasan baja NP-42 pada daerah logam dasar (*base metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone - HAZ*), dan daerah logam las (*weld metal*) serta menganalisa struktur mikronya. Pengambilan data pengujian baja NP-42 dilakukan dua kali yaitu sebelum proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) *annealing* dan sesudah *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) *annealing*.

2. BAHAN DAN PERALATAN PENGUJIAN

2.1 Material Pengujian (Baja NP-42)

Material yang digunakan adalah baja NP-42 termasuk dalam *medium carbon steel* yang umum digunakan oleh industri kereta api untuk jalur rel. Setiap baja rel mempunyai tiga bagian yaitu kepala rel (*rail head*), leher (*rail web*), dan kaki (*rail foot*). Untuk lebih jelas dapat dilihat pada **Gambar 1**. Berikut ini:



Gambar 1. Dimensi Baja NP-42[5, 8]

Baja NP-42 termasuk dalam *medium carbon steel* karena mengandung mempunyai kadar karbon antara 0,30%-0,70%[9, 10], bersifat lebih kuat dan lebih keras dibandingkan baja karbon rendah dan dapat dikeraskan. Untuk hasil uji komposisi baja NP-42 diketahui kandungan Fe hingga 97.73%, dengan carbon 0.56%. Oleh sebab itu NP-42 merupakan *medium carbon steel*. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada **Tabel 1**. Komposisi dari baja NP-42 [11].

Tabel 1. Uji komposisi Baja NP-42

| No | Nama Unsur | Pros. berat |
|----|--|-------------|
| 1. | Ferro (Fe) | 97,73269 % |
| 2. | Manganese (Mn) | 1,06678 % |
| 3. | Silicon (Si) | 0,28012 % |
| 4. | Carbon (C) | 0,56141 % |
| 5. | Cupprum (Cu) | 0,1507 % |
| 6. | V, Al, S, Ni, Cr, Ti, P, W, Sn, Zn, Mo, Zr | ≤ 0,01 % |

2.2 Pengelasan Thermite

Pengelasan *thermite* adalah reaksi eksotermik antara aluminium dan besi oksida yang menghasilkan baja lebur yang kemudia dituangkan ke dalam suatu cetakan yang akan dilas[12]. Pertama- tama pada saat pengelasan *thermite*, bubuk *thermite* yang terdiri dari aluminium dan besi oksida dimasukkan ke dalam tempat pembakaran yang berbentuk kerucut terbalik. Kemudia diatas bubuk *thermite* dimasukkan barium peroksida atau bubuk mangan sebagai pembakar atau penyala api untuk proses reaksi *thermite*. Dan untuk menyalakannya bisa menggunakan besi yang dipanaskan sampai memerah atau kayu bakar atau bisa juga menggunakan las gas, seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**. Komponen yang akan di las *thermite* harus dipanaskan terlebih dahulu[14]. Baja yang mulai mencair akan mengalir ke dalam cetakan yang menyambungkan dua buah rel yang diberi celah antara 22 – 25 mm[14]

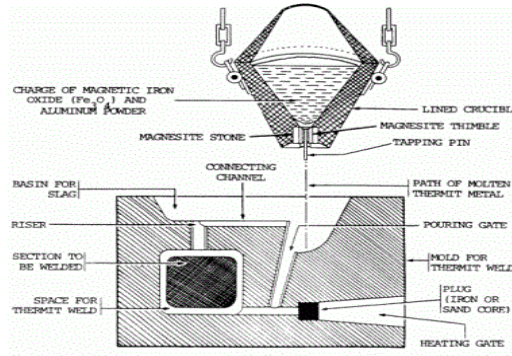
Reaksinya seperti berikut[3] :



Produk yang dihasilkan ini adalah aluminium oksida, membebaskan unsur besi (berupa besi cair), dan membebaskan sejumlah besar panas. Reaktan yang biasa digunakan adalah berupa bubuk dan dicampur dengan bahan

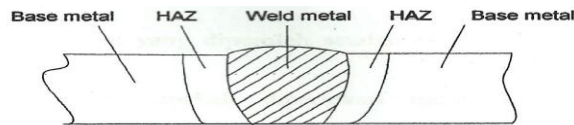
untuk menyimpan bahan yang padatan dan mencegah pemisahan[15]. Proses pengelasan thermit mempunyai banyak keunggulan dibandingkan dengan proses pengelasan yang lain, karena pengelasan thermit dapat digunakan pada:

- Hubungan antara dua profil rel yang berlainan, baik tipe maupun ukurannya.
- Segala jenis kualitas baja rel, termasuk rel dengan pengerasan pada bagian kepalanya dan di atas bantalan maupun diantara dua bantalan[16].



Gambar 2. Pengelasan Thermit[12]

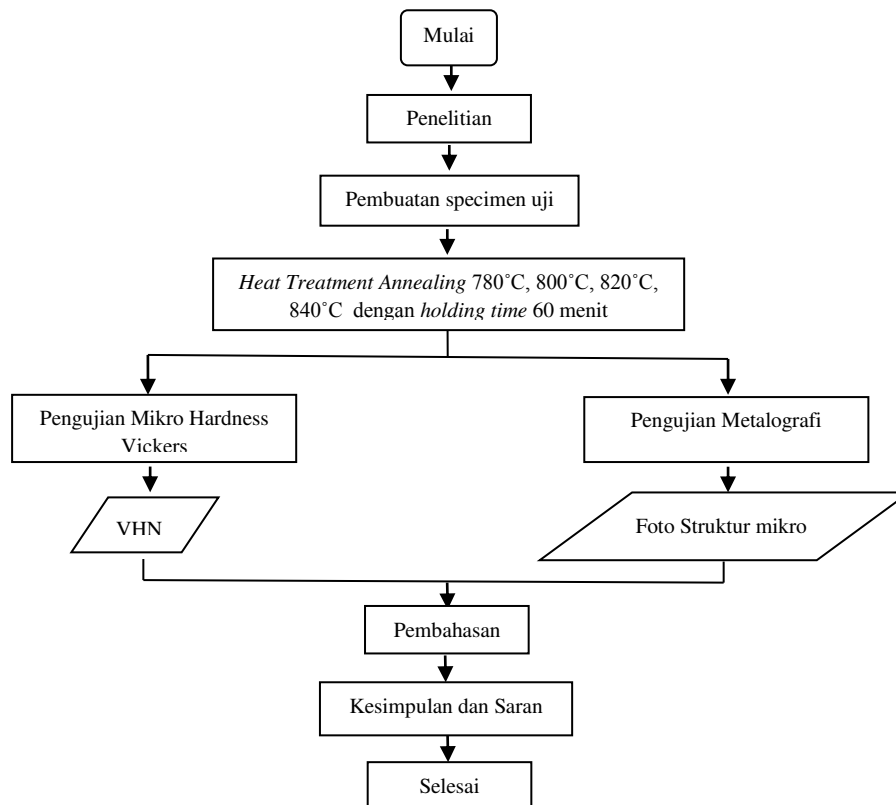
Setelah proses pengelasan thermit, material baja NP-42 akan terbagi menjadi tiga daerah, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. yaitu : daerah logam induk (*base metal*), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan daerah logam las (*weld metal*). Ketiga daerah ini memiliki sifat karakteristik yang berbeda, yang tentunya berpengaruh terhadap performa mekanik dari material tersebut.



Gambar 3. Pembagian Daerah Lasan[17]

2.3 Diagram Alir Penelitian

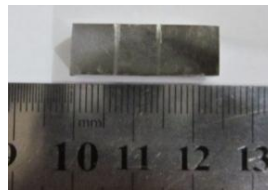
Beberapa tahapan penelitian pada baja NP-42 hasil pengelasan *thermite* dapat dilihat pada Gambar 4. sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian.

2.4 Proses Heat Treatment

Dalam proses *heat treatment* ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik Teknik Mesin Universitas Diponegoro, alat yang digunakan adalah *Furnace Chamber* HOFFMAN TYPE KL. Persiapan yaitu dengan melakukan reparasi pemotongan specimen yang hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Specimen baja NP-42

Adapun langkah – langkah persiapan dalam melakukan proses *heat treatment annealing* adalah sebagai berikut :

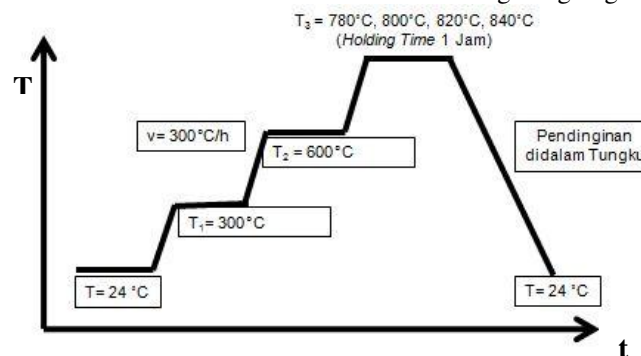
1. Mempersiapkan benda uji.
Meratakan benda uji dengan menggunakan amplas yang dipasangkan pada mesin grinding. Mengeringkan dan membersihkan benda uji yang sudah diratakan agar bebas dari kotoran, lemak dan sentuhan tangan.
2. Memasukkan spesimen ke dalam *Furnace Chamber*.
Mengatur program dan menentukan kenaikan suhu pemanasan hingga pada temperature 780°C. Menentukan waktu penahanan pemanasan (*holding time*) selama 60 menit. Serta melakukan pendinginan dalam tungku.
3. Mengeluarkan Spesimen.
Menggunakan sarung tangan yang telah disediakan kemudian mengambil spesimen dengan penjepit besi.
4. Prosedur untuk temperatur 800°C , 820°C, 840°C adalah sama seperti poin 1,2 dan 3 diatas.

Heat Treatment Annealing

Annealing adalah suatu proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan terhadap logam atau paduan. Prinsip *annealing* adalah memanaskan baja sampai diatas temperatur kritis, kemudian dilakukan *holding time*, dan proses pendinginan didalam tungku dilakukan dengan lambat hinga temperatur kamar seperti ditunjukkan **Gambar 6**. Jenis *annealing* itu beraneka ragam, tergantung pada kondisi benda kerja, temperatur pemanasan, lamanya waktu penahanan, laju pendinginan (*cooling rate*), dan lain sebagainya[6].

Tujuan dari *heat treatment annealing* adalah untuk :

- a. Memperbaiki keuletan dan *machineability*.
- b. Memperhalus ukuran butir.
- c. Menurunkan ketidak homogenan stuktur.
- d. Mengurangi tegangan sisa[7].



Gambar 6. Siklus Annealing.

2.4 Pengujian Kekerasan Micro Vikers

Pengujian kekerasan mikro dan distribusi kekerasan menggunakan mikro Vickers dengan standar ASTM E 384. Tujuan pengujian kekerasan mikro Vickers ini adalah untuk menguji struktur mikro dan kekerasan permukaan yang dapat dicapai.

Metode ini mirip dengan metode Brinell, tetapi penetrator yang digunakan berupa intan berbentuk piramida dengan dasar bujur sangkar dan sudut puncak 136°. Kedua diagonal diukur pada kaca pembesar kemudian diukur rata-ratanya. Persamaan yang digunakan adalah:

$$DHP = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2}$$

Dimana :

- DHP* = Angka kekerasan piramida intan (HV)
L = Panjang diagonal rata-rata (mm)
P = Beban yang ditetapkan (gf)

Pengujian kekerasan dilakukan di laboratorium Bahan Teknik Program Diploma Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada, Metode yang digunakan dalam pengujian ini menggunakan metode Mikro Vikers. Seperti ditunjukkan **Gambar 7**.



Gambar 7. Alat uji kekerasan vikers.

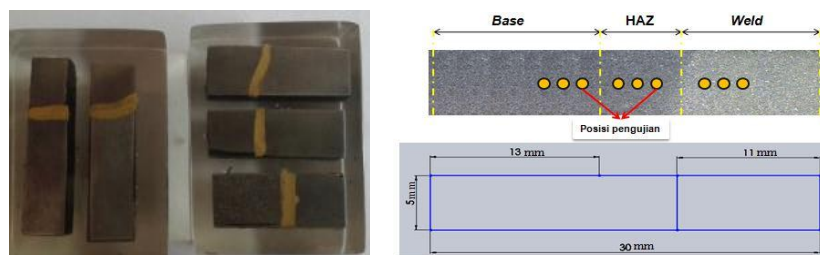
Adapun langkah – langkah persiapan dalam melakukan pengujian kekerasan adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan
 Tujuan pemotongan specimen adalah untuk mendapatkan bidang permukaan logam daerah induk sehingga bisa membedakan nilai kekerasan.
2. Mounting
 Tujuan dari mounting karena kecilnya specimen potongan uji, sehingga butuh bantalan tambahan untuk mendapatkan luas penampang yang lebih lebar. Dengan menggunakan resin dan campuran pengerasnya.
3. Penggerindaan
 Tujuan dari grinding ini untuk menghilangkan kerusakan – kerusakan yang ditimbulkan pada proses pemotongan dan proses heat treatment sebelumnya. Pada tahap ini benda uji yang telah dicetak mounting dihaluskan dengan amplas sampai dapat permukaan yang halus dan rata. Amplas yang digunakan adalah grid 150, 400, 500, 800 dan terakhir dengan ukuran 1500.
4. Pemolesan (*Polishing*)
 Proses ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang bebas dari goresan yang dapat menghalangi pengujian dan untuk mendapatkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
5. Uji kekerasan Mikro Vikers menggunakan standar ASTM E 384, dengan pembebanan 200 gf. Hasil pengujian berupa angka kekerasan vikers (VHN).

2.5 Pengujian Metalografi

Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui fasa-fasa apa saja yang terdapat dalam material. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan *stereo microscope*. Mikroskop optik, atau yang sering disebut juga sebagai "mikroskop cahaya" adalah salah satu jenis mikroskop yang menggunakan cahaya dan sebuah sistem lensa untuk memperbesar gambar spesimen yang kecil. Mikroskop optik dasar sangat sederhana, meskipun ada banyak desain lain yang kompleks yang bertujuan untuk meningkatkan resolusi dan kontras dari specimen. Seperti ditunjukkan **Gambar 9**.

Adapun bentuk specimen yang akan siap di uji struktur mikro. Specimen tersebut ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Specimen Pengujian Baja NP-42 Setelah di *Mounting*.



Gambar 9. *Optical Microscope*

Prosedur Pengujian Metalografi untuk pengamatan struktur mikro dapat dilakukan dengan langkah – langkah pengujian sebagai berikut :

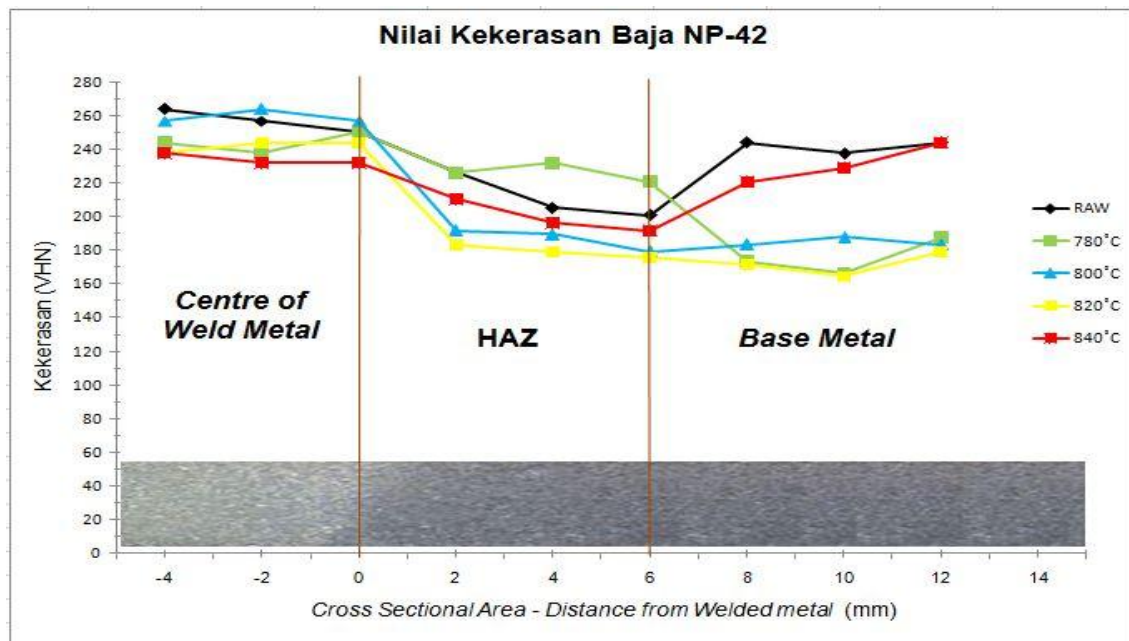
1. Spesimen yang telah dipotong kemudia di beri *mounting* sehingga diperoleh benda uji, benda uji diberi kode untuk mempermudah proses pengamatan.
2. Permukaan specimen yang akan diamati harus bersih, kering, dan telah mengalami proses pemolesan (*polishing*) dengan menggunakan amplas sampai tahapan amplas 2000, kemudian autosol untuk mendapatkan specimen yang rata, bebas dari kotoran, tidak berminyak dan mengkilap sehingga dapat meningkatkan kualitas hasil pemotretan yang baik.
3. Melakukan etsa dengan menggunakan natal pada permukaan benda uji untuk membersihkan sisa – sisa *polisher* pada saat pemolesan. Selain itu juga untuk memunculkan batas butiran permukaan benda uji yang akan diamati, setelah dilakukan etsa, permukaan benda uji dibersihkan dengan aquades, kemudian mengeringkannya dengan *hairdryer*.
4. Melakukan pengamatan terhadap permukaan nugget yang telah direparasi dengan menggunakan mikroskop.
5. Pemotretan dilakukan dengan menggunakan perbesaran yang 200x
6. Hasil pemotretan berupa foto mikrografi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Kekerasan Mikro Vickers Baja NP-42

Pengujian Vickers (VHN) merupakan cara yang paling cocok untuk pengujian bahan yang keras. Cara Vickers juga banyak digunakan karena dengan teliti mampu mengetahui kekerasannya. Pada pengujian ini, identasi dilakukan pada 3 titik dengan beban 200 gr dan menggunakan standar ASTM E 384. Pengujian dilakukan di tiga bagian yaitu bagian *base*, *HAZ*, dan *weld*.

Perbandingan kekerasan pada non-perlakuan dan sesudah mengalami perlakuan panas (*annealing*) pada temperatur 780°C, 800°C, 820°C, 840°C dengan waktu penahanan pada masing – masing temperatur selama 60 menit. Hasil uji kekerasan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 10.** berikut ini:



Gambar 10. Perbandingan Grafik Tingkat Kekerasan Baja NP-42 Tanpa Perlakuan (*Raw*) dan Perlakuan *Heat Treatment Annealing*.

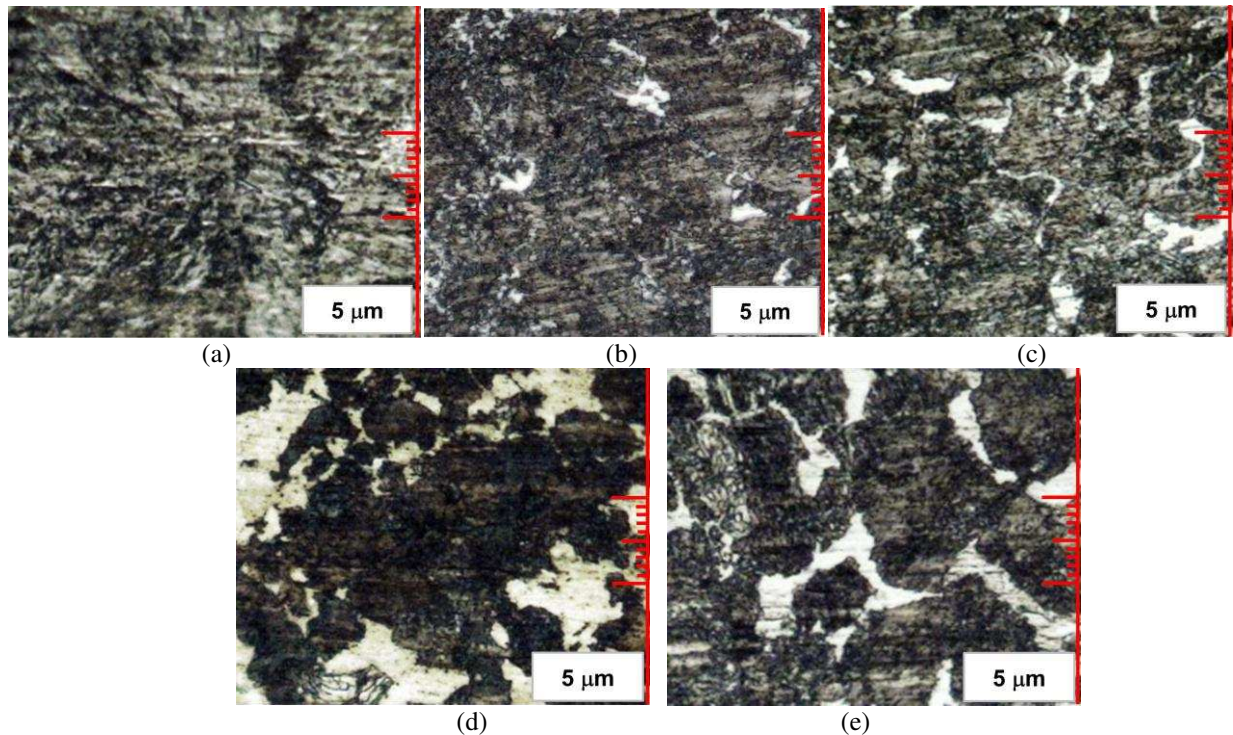
Dari **Gambar 10.** diatas menunjukkan nilai – nilai kekerasan pada tiap daerah *base*, *HAZ*, dan *weld*. Untuk material tanpa perlakuan menunjukkan baja NP-42 yang belum mengalami proses *Annealing*. Terjadi perbedaan nilai kekerasan setelah mendapat perlakuan *Annealing*. Nilai kekerasan tersebut dapat dibuktikan dengan adanya perubahan fasa struktur mikro yang terjadi. Dengan membandingkan antara nilai kekerasan dengan perubahan struktur mikro maka akan diperoleh penjelasan mengenai peranan masing-masing struktur mikro terhadap tingkat kekerasan material tersebut.

Untuk angka kekerasan tertinggi untuk daerah *base metal* terdapat pada temperatur 840°C dengan nilai 231,1 VHN, untuk daerah *HAZ* pada temperatur 780°C dengan nilai 226,2 VHN, dan untuk daerah *weld metal* pada temperatur 800°C dengan nilai 259,1 VHN. Tingkat kekerasan tertinggi biasanya terdiri dari struktur martensit dengan kandungan karbon tinggi. Sedangkan untuk material yang memiliki kekerasan cenderung lebih rendah biasanya

tersusun oleh fasa ferrit – pearlit dimana tingkat keuletannya lebih tinggi dibandingkan dengan material yang lebih keras tapi cenderung getas.

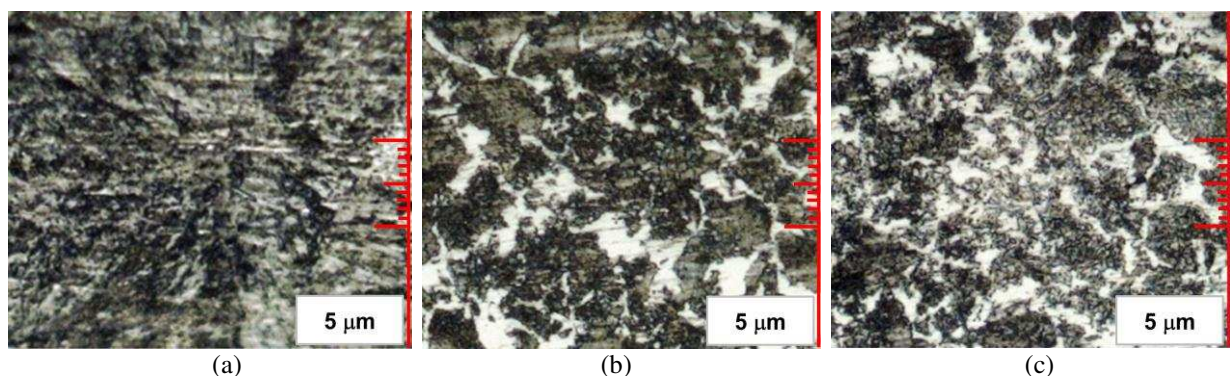
3.2 Uji Metalografi Baja NP-42

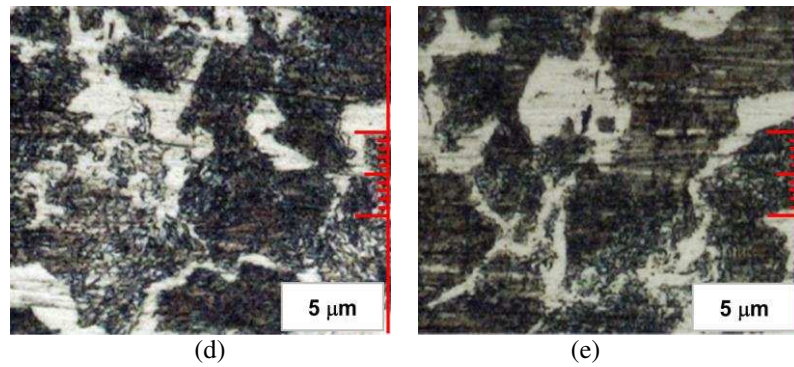
Pengujian metalografi digunakan untuk mencocokkan antara nilai kekerasan yang diperoleh dengan fasa struktur mikro yang terbentuk. Oleh sebab itu, foto struktur mikro dapat digunakan sebagai acuan pembandingan hasil dari pengujian kekerasan. Hasil dari pengujian foto struktur mikro dapat dilihat pada **Gambar 11.** untuk daerah *base*, **Gambar 12.** untuk daerah HAZ, dan **Gambar 13.** untuk daerah *weld* berikut ini:



Gambar 11. Struktur Mikro Baja NP-42 Perbesaran 200x pada Bagian *Base* (a) Tanpa perlakuan, (b) *Annealing* 780°C, (c) *Annealing* 800°C, (d) *Annealing* 820°C, (e) *Annealing* 840°C.

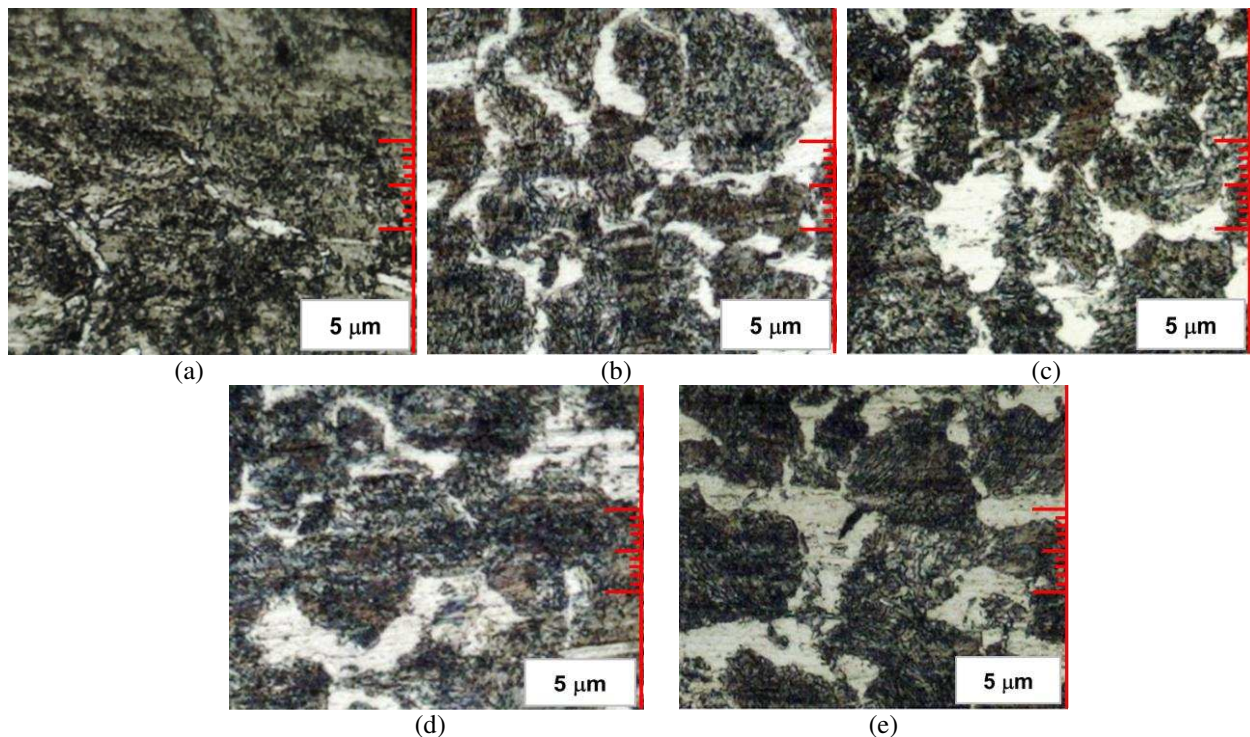
Pada **Gambar 11.** diatas, terlihat terlihat bahwa sebelum proses *heat treatment*, struktur yang terlihat berupa ferrit-pearlit dengan batas butir yang terlihat jelas. Pada material tanpa perlakuan tersebut terlihat struktur pearlit sangat mendominasi dan ukurannya yang besar. Semakin besar ukuran butir maka akan menurunkan *yield strength* dan *tensile strength* suatu material. Proses perlakuan PWHT *annealing* juga menyebabkan ukuran butir menjadi lebih seragam dari pada baja tanpa perlakuan panas. Dengan semakin bertambah besarnya ukuran butir, maka akan menyebabkan *density* dari baja meningkat bila dibandingkan dengan baja tanpa perlakuan. Variasi temperatur yang terlalu tinggi, seperti variasi temperatur 840°C akan menyebabkan butiran kristal austenit terlalu kasar, bila didinginkan sangat lambat akan menghasilkan ferrit dan perlit yang juga kasar pula. Butiran yang terlalu kasar akan membuat baja menjadi lebih getas.





Gambar 12. Struktur Mikro Baja NP-42 Perbesaran 200x pada Bagian HAZ (a) Tanpa perlakuan, (b) *Annealing* 780°C, (c) *Annealing* 800°C, (d) *Annealing* 820°C, (e) *Annealing* 840°C.

Dari **Gambar 12.** struktur mikro penyusun daerah HAZ hampir sama dengan daerah *Base Metal* yaitu terdiri dari struktur ferrite dan pearlite. Yang membedakan adalah daerah ferrite yang terbentuk lebih sedikit dan untuk daerah pearlite jumlahnya lebih banyak sehingga untuk foto daerah HAZ Nampak lebih gelap jika dibandingkan dengan daerah *Base Metal*. Kekuatan atau kekerasan dalam daerah HAZ semakin mendekati batas las akan semakin rendah, sedangkan semakin jauh batas las maka nilai kekerasan daerah HAZ nya akan bertambah. Ukuran butir daerah HAZ semakin mendekati batas las akan semakin besar, sedangkan jika semakin menjauhi batas las maka ukuran butirannya semakin kecil. Ukuran butir yang besar akan membuat sifat keuletan baja menjadi semakin baik bila dibandingkan dengan baja yang mempunyai ukuran butir kecil, tetapi ukuran butir yang besar tidak selalu menjadi acuan bahwa baja tersebut mempunyai keuletan yang tinggi. Selain ukuran butir, kekasaran dan kehalusan dari butir yang terbentuk akan mempengaruhi sifat mekanik baja.



Gambar 13. Struktur Mikro Baja NP-42 Perbesaran 200x pada Bagian *Weld* (a) Tanpa perlakuan, (b) *Annealing* 780°C, (c) *Annealing* 800°C, (d) *Annealing* 820°C, (e) *Annealing* 840°C.

Pada **Gambar 13.** struktur mikronya juga hampir sama dengan daerah-daerah yang lain namun pada bagian ini terlihat lebih banyak daerah yang terang. Ukuran butir ferrit lebih besar dibanding dengan tanpa perlakuan *heat treatment annealing*. Semakin tinggi pemanasan akan menyebabkan ferrit tumbuh lebih banyak dari pada pearlite, dikarenakan pada fasa pearlit menjadi austenit ketika pemanasan melebihi temperatur kritis bawah dan pada pendinginan yang sangat lambat akan menyebabkan karbon pada fasa perlit akan berkurang. Sehingga menyebabkan fasa yang sebelumnya perlit menjadi ferit.

4. KESIMPULAN

- 1) Setelah mengalami proses *heat treatment annealing*, baja NP-42 tidak terlihat adanya perbedaan struktur butir yang mencolok, hal ini disebabkan terjadinya penyeragaman struktur butir mikro.
- 2) Pada pengujian kekerasan menunjukkan nilai kekerasan tertinggi pada daerah *base metal* pada temperatur 840°C dengan nilai 231,1 VHN, untuk daerah HAZ pada temperatur 780°C dengan nilai 226, 2 VHN, dan untuk daerah *weld metal* pada temperatur 800°C dengan nilai 259,1 VHN.
- 3) Dari Stuktur foto mikro baja NP-42 terlihat beberapa daerah terang yaitu ferrite, dan gelap yaitu pearlite. Sehingga menunjukkan perubahan struktur material setelah mengalami proses *heat treatment annealing*.

5. REFERENSI

- [1] Wiryosumarto, H. dan Okumura, T. *Teknologi Pengelasan Logam*. PT. Pradnya Paramita, Jakarta: 2000.
- [2] Subardi, Suprijanto Djoko, Mahendra Roza Lyndu R. *Effect of Post Heat Temperature to Hardness and Macrostructure in Welded Steel ST 37*. 2006.
- [3] ASM, Metal Handbook. *Welding, Brazing, and Soldering Volume 6*. Ohio:1993.
- [4] Kang Hao, Wu Di, and Zhao Xian-ming. *Surface Temperature Change of U75V 60 kg/m Heavy Rail During Heat Treatment*. China: 2013.
- [5] Suci, ST. *Pengaruh Normalizing Sambungan Las Rel 42 dengan Las Thermit pada Mutu Sambungan*. Semarang: 2010.
- [6] ASM, Metal Hand Book. *Heat Treating Volume 4*. Ohio: 1991.
- [7] Rajan, T.V., C.P. Sharma and Ashok Sharma. *Heat Treatment Principles and Technique*. New Delhi: 1997.
- [8] P. Rosidi, Sri Atmaja. *Prasarana Transportasi Komponen dan Desain Rail*. Yogyakarta: 2005.
- [9] Haryadi, Gunawan Dwi. *ROTASI – Volume 8 Nomor 2. Pengaruh Suhu Tempering Terhadap Kekerasan Struktur Mikro dan Kekuatan Tarik pada Baja K-460*. Staff Pengajar Jurusan Teknik Mesin UNDIP, Semarang: April 2005.
- [10] Djaprie, Sriatie. *Teknologi Mekanik*. Erlangga, Jakarta: 1990.
- [11] Firmansyah, Iman. ST. *Analisa Kekerasan dan Kepekaan Retak Rel R-54 dan R-42 Ditinjau dari Struktur Mikro dan Komposisinya*. Semarang: 2008.
- [12] Lonsdale, C.P. *Metallurgical Engineer, Conrail Technical Service Laboratory*.
- [13] Steele, R. K. *Field Welding Of Rails, Association Of American Railroads*. Chicago: 1985.
- [14] Purwanto, Dwi. *Kekuatan Sambungan Las Thermit Rel R 54 Untuk Jalur Lintas Angkutan Batubara. Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur – BPP Teknologi PUSPIPTEK*. Tangerang Selatan: 2011.
- [15] O'Brien, R. L, Ed. *Welding Handbook-volume2, Eighth Edition*, American Welding Society. Miami: 1991.
- [16] Nugroho Adi. *Mengenal Thermit Welding Secara Garis Besar*. 1992.
- [17] Carry, Howard B. *Modern Welding Technology*. New Jersey: Prentice Hall 1989.