

PERHITUNGAN DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PENGELASAN SAMBUNGAN-T PADA INSTALASI PIPA

Antonius Wahyu Cahyo Purnomo

Teknik Mesin Industri, Akademi Teknik Mesin Industri (ATMI) Cikarang
Jl. Kampus Hijau No. 3, Jababeka Education Park, Cikarang Baru Bekasi 17520

Email : wcpurnomo@gmail.com

Abstrak

Studi tentang pemodelan dan perhitungan tegangan sisa akibat pengelasan pada sambungan-T pada instalasi perpipaan. Model perhitungan diambil material standard las dengan data koefisien konduksi panas, $k = 13,5 \times 10^6 \text{ W/}^\circ\text{K.m}^2$, dan angka muai termal, $\alpha = 13 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$. Tegangan sisa dihitung berdasarkan iterasi regangan yang timbul akibat distribusi suhu selama pendinginan dari suhu pengelasan menuju temperatur ruang dengan simulasi suhu pada daerah las sebesar 1200°C . Perhitungan berdasarkan metode elemen hingga dengan program ANSYS 5.4. model 3 dimensi. Distribusi tegangan menunjukkan harga tegangan total pada bahan las berkisar antara 300 sampai dengan 400 MPa, sedangkan pada material pipa antara 30 sampai 200 MPa. Konsentrasi tegangan dapat diamati pada sambungan pengelasan yang terjadi pada bagian dalam dan permukaan sambungan dengan tegangan maksimum sekitar 440 MPa. Hasil perhitungan ini disimpulkan bahwa komputasi perhitungan sisa dapat memprediksi harga rata-rata maupun harga maksimum tegangan sisa yang terjadi akibat konsentrasi tegangan.

Kata kunci : elemen hingga, pengelasan pipa, sambungan pengelasan T, tegangan sisa

Abstract

Study on modeling and calculation of the residual stress on welding process was performed in the Tee junction of the piping system. The welding material standard with the specification of heat conductivity of $k = 13,5 \times 10^6 \text{ W/}^\circ\text{K.m}^2$ and thermal expansion of $\alpha = 13 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ was used as a calculation model. The residual stress was calculated by iteration of the strain which was obtained from the temperature distribution during the cooling process on the welding to the room temperature with temperature simulation of 1200°C at the welded area. The calculation was done by the finite element method using the 3 dimension modeling of ANSYS 5.4. program. The stress distribution showed the residual stress on the welded area was 300 to 400 MPa, while at the material of piping was 30 to 170 MPa. The stress concentration could be observed at the welded junction which was occurred in the inner and surface junction, with the maximum stress of 440 MPa. Based on the calculation result, it can be concluded that the computation method can predict the average and the maximum of residual stress from the stress concentration.

Key words: finit elemen, welding pipe, Tee joint, residual stress

PENDAHULUAN

Penyambungan logam dengan menggunakan sambungan las banyak digunakan pada berbagai bidang, termasuk bidang konstruksi,

manufaktur dan industri, termasuk dalam industri pemipaan. Pada instalasi pipa penggunaan pengelasan digunakan untuk menyambung komponen pemipaan seperti komponen siku, sambungan-T, *reducer*, *flange* dan berbagai macam sambungan pipa dengan peralatan. Metoda penyambungan las ini dapat menghasilkan efisiensi

sambungan dan tingkat kerapatan yang tinggi, dengan biaya fabrikasi yang kecil. Walaupun demikian, akibat dari pengelasan akan menimbulkan tegangan sisa yang disebabkan pemanasan lokal dalam proses pengelasan dan pendinginan yang cepat.

Tegangan sisa yang terjadi pada kampuh las ini dapat menyebabkan getas material, kegagalan fatik atau SCC (*Stress Corrosion Crack*) dan dapat mengurangi kekuatan dari struktur dan komponen[1]. Oleh karena itu tegangan sisa dalam pengelasan harus dihilangkan sampai sekecil mungkin untuk mengurangi kegagalan desain suatu komponen.

Beberapa penyelidikan dan beberapa metode telah dikembangkan untuk mengurangi tegangan sisa dalam proses pengolahan setelah pengelasan (post welding), termasuk pengolahan panas, hammering, pemanasan awal, dan vibration stress relieving. Pada beberapa konstruksi metode dan teknik pengurangan tegangan sisa tersebut kadang-kadang sulit dilakukan sehingga faktor yang perlu diperhatikan untuk mengurangi tegangan sisa dilakukan dengan pemilihan siklus pengelasan. Maka prediksi besarnya tegangan sisa pada sistem pengelasan dalam suatu langkah, tipe dan siklus pengelasan merupakan hal yang penting untuk mendukung peningkatan efisiensi dan kekuatan sambungan las.

Beberapa penelitian berkaitan dengan prediksi besarnya tegangan sisa dalam pengelasan telah dilakukan. Prediksi untuk menentukan tegangan sisa dalam pengelasan merupakan masalah yang sukar dilakukan karena berkaitan dengan sifat mekanik dan termal dari material dengan temperatur lokal yang tinggi dan adanya pergerakan dari sumber panas. Ada beberapa parameter yang harus dijelaskan khususnya berkaitan dengan proses pengelasan. Untuk memperkirakan besarnya tegangan sisa ini dapat dilakukan dengan perhitungan berdasarkan pada metode elemen hingga. Untuk mempermudah perhitungan dapat diambil asumsi terjadi suhu yang seragam pada kampuh las sesaat setelah selesai pengelasan dan mengalami pendinginan menuju temperatur kamar. Berdasarkan asumsi yang sederhana ini diharapkan model perhitungan dapat dikembangkan untuk perhitungan tegangan sisa pada berbagai macam bentuk pengelasan sehingga bisa dilakukan perbaikan dalam pengelasan sistem perpipaan. Dalam makalah ini diuraikan teknik penentuan dan perhitungan tegangan sisa pada pengelasan *butt weld* sambungan-T. Teknik perhitungan dilakukan dengan metode elemen hingga dengan simulasi menggunakan program ANSYS 5.4.

METODE PENELITIAN

Perhitungan tegangan sisa dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan program ANSYS 5.4. Asumsi dalam perhitungan ini memakai beban termal akibat proses pengelasan yang kemudian mengalami pendinginan dengan konveksi bebas dari udara menuju suhu ruang dengan perpindahan panas transien. Metode untuk simulasi perhitungan tegangan dilakukan sebagai berikut :

Metode perhitungan

Distribusi tegangan sisa dalam pengelasan dihitung dengan metode elemen hingga dengan menghitung distribusi suhu dan perhitungan tegangan mengikuti analisis struktur. Analisis perhitungan dilakukan berdasar rumus (1) dan (2) dengan model perhitungan untuk distribusi suhu dan model perhitungan struktur untuk penentuan distribusi tegangan dan beberapa anggapan sebagai berikut^[4,1]

$$\sigma = D\varepsilon = D[\alpha\Delta T - \alpha\Delta T]^T \quad (1)$$

$$D = \frac{E}{(1-n^2)} \begin{vmatrix} 1 & n & 0 \\ n & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-n}{2} \end{vmatrix} \quad (2)$$

dimana:

- E = modulus elastisitas bahan
- α = angka muai bahan
- n = jumlah kolom dan baris matrik yang bergantung jumlah elemen
- D = matrik konstanta bergantung pada bahan
- ΔT = beda suhu
- ε = matrik regangan akibat suhu

Model termal untuk perhitungan distribusi suhu

Perhitungan dengan memasukan temperatur pengelasan 1200°C dimana terjadi pada kampuh setelah selesai pengelasan. Pengaruh kenaikan suhu pada tiap langkah dan tiap siklus pengelasan dianggap terjadi dalam waktu singkat dan tidak diperhitungkan. Penurunan suhu menuju kondisi setimbang pada suhu ruang dihitung dengan perpindahan panas konveksi ke udara luar secara bebas dan konduksi ke pipa. Angka konveksi untuk perhitungan diambil sebesar 15 W/m²°K. Distribusi suhu pada setiap interval waktu akibat penurunan

suhu dihitung dan digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan tegangan sisa.

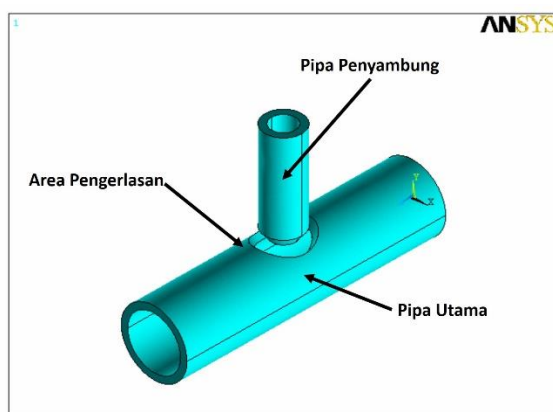
Model struktur untuk perhitungan tegangan sisa

Pada analisis perhitungan tegangan sisa dibuat model struktur mekanik menggunakan tipe elemen SOLID 92. Distribusi suhu pada setiap langkah yang dihitung pada analisis termal digunakan sebagai masukan untuk perhitungan tegangan sisa. Tegangan sisa yang terjadi merupakan akumulasi tegangan sisa dari interval pendinginan setelah proses pengelasan menuju suhu ruang yang dihitung berdasarkan rumus (1) dan (2) dengan model 3 dimensi menggunakan program ANSYS.

Pembuatan geometri model

Perhitungan distribusi tegangan sisa dalam pengelasan sambungan-T dilakukan pemodelan dengan model 3 dimensi. Data teknis dan ukuran sambungan-T yang digunakan diambil dari standard komponen pemipaan standard ASME. Penggambaran model 3 dimensi untuk pengelasan sambungan-T dilakukan dengan menggambar pipa utama dan pipa penyambung, membuat lubang pada pipa utama untuk penyambungan, membuat ujung tirus pipa penyambung, membuat elemen kampuh. Gabungan dari seluruh elemen membentuk sambungan komponen pemipaan-T dengan kampuh las seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

Dimensi Pipa penyambung dengan dia.luar 7mm; dia.dalam 4,5 dan panjang 50. Pipa utama dengan dimensi dia.luar 12,7mm; dia.dalam 10,2; dan panjang 100mm.



Gambar. 1 Geometri komponen pemipaan sambungan-T

Data material

Material yang digunakan dari baja SA 312TP 304L dengan data sifat material yang

diperlukan untuk analisis seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Table 1 Sifat material komponen dan bahan las

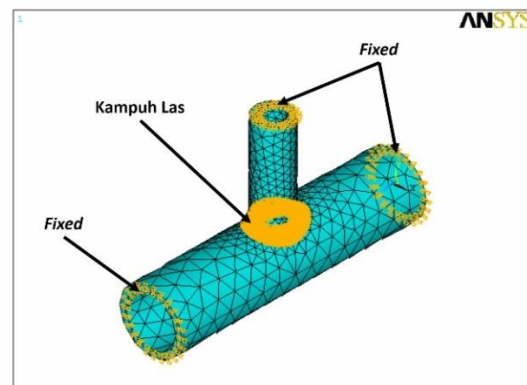
Deskripsi	Sambungan-T	Las
Modulus Young, E (N/mm ²)	190000	170000
rasio Poisson, ν	0,3	0,3
Densitas, ρ (kg/m ³)	7850	7000
Koefisien muai termal, α (1/ ^o K)	13x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶
Konduktivitas panas, k (W/ ^o K)	14,5x10 ⁻⁶	10,5x10 ⁻⁶

Meshing

Meshing dilakukan bergantian untuk sambungan-T dengan material baja SA 304 kemudian untuk kampuh las dengan material las. Perhitungan distribusi suhu meshing menggunakan elemen tipe SOLID 87 (*tetrahedral thermal solid*), perhitungan tegangan digunakan tipe elemen untuk struktur yaitu SOLID 92 (*tetrahedral structural solid*) sebanyak 3861 elemen.

Beban dan syarat batas perhitungan distribusi suhu dan perhitungan tegangan sisa dilakukan berdasarkan asumsi adanya beban termal akibat suhu pengelasan. Suhu las sebesar 1200° C yang dianggap merata pada seluruh kampuh kemudian mengalami penurunan suhu akibat konveksi dengan udara luar dan konduksi pada pipa. Bagian ujung dari komponen-T dipegang dan ditahan sehingga tidak ada pergerakan. Pada percobaan temperatur dibatasi 30°C sampai 1200°C.

Model geometris, meshing, pembebanan dan syarat batas untuk perhitungan diberikan pada gambar 2.



Gambar. 2 Geometri, meshing, beban dan syarat batas

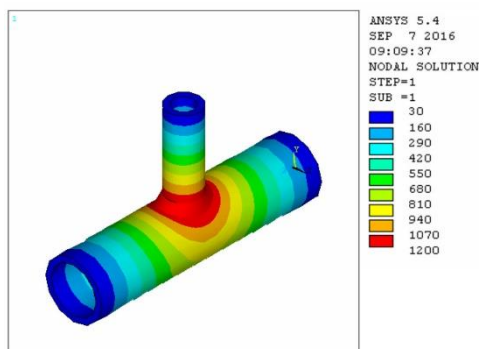
Input File untuk analisis

Element = 3861 element

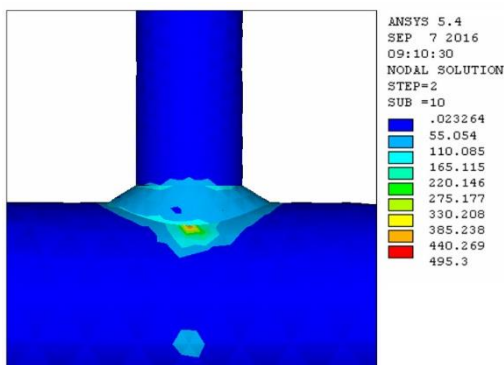
Beban termal dengan pendinginan dari temperatur 1200°C menjadi 30°C

HASIL DAN PEMBAHASAN

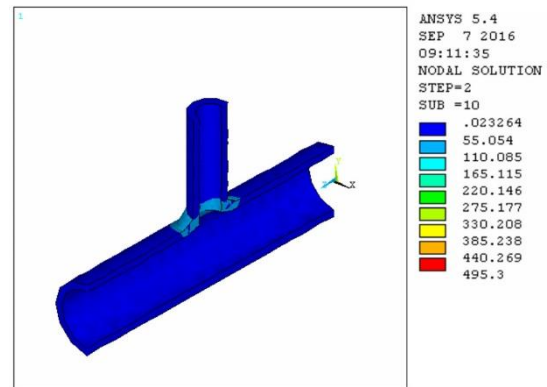
Hasil perhitungan dengan program ANSYS5.4 menunjukkan pola distribusi suhu seperti ditunjukkan pada gambar 3 dan distribusi tegangan total (*von mises*), seperti yang disajikan pada gambar 4, 5 dan 6.



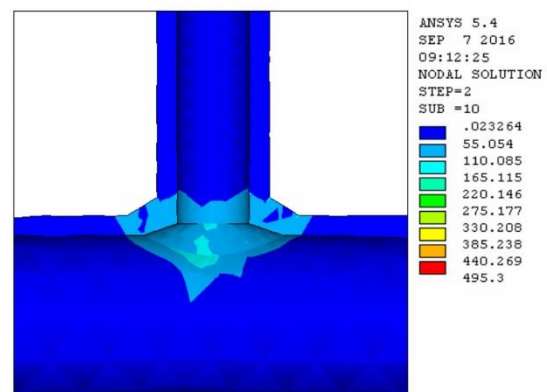
Gambar. 3 Distribusi temperatur 10^{-3} detik setelah pengelasan



Gambar. 4 Distribusi tegangan sisa total, Von Mises



Gambar. 5 Distribusi tegangan sisa total (tampak bagian dalam pipa)



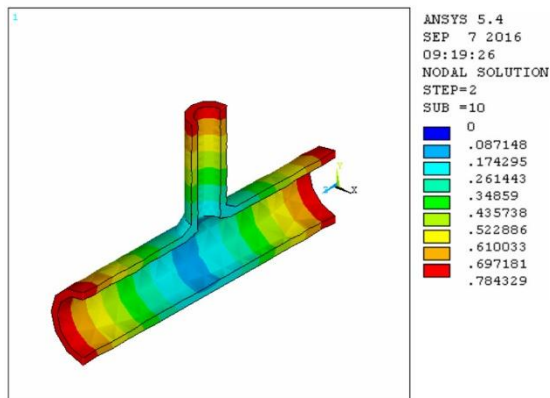
Gambar. 6 Distribusi tegangan sisa (perbesaran, tampak lokasi maksimum stress)

Gambar 3 menunjukkan distribusi suhu pada step 1, 10^{-3} detik setelah pengelasan dengan beda temperatur akibat pendinginan dan perpindahan panas konveksi dan konduksi.

Gambar 4 menunjukkan distribusi tegangan pada sambungan-T ditampilkan dalam posisi utuh untuk melihat besarnya tegangan pada bagian luar, Gambar 5 menyajikan distribusi tegangan dalam gambar potong (dibelah) untuk mengamati besarnya tegangan pada bagian dalam sambungan. Gambar 6 menunjukkan tegangan sisa untuk memperjelas lokasi maksimum dari tegangan sisa pada sambungan-T. Selain distribusi tegangan dapat diamati besarnya distribusi perpindahan (*displacement*) dan total seperti disajikan dalam gambar 7.

Berdasarkan pola distribusi tegangan dan perpindahan tersebut dapat diamati posisi titik (node) dan harga tegangan serta perpindahan maksimum yang terjadi pada sambungan-T. Pola distribusi tegangan pada Gambar 4 menunjukkan harga tegangan sisa pada daerah sambungan pipa cabang dan daerah sambungan pipa utama antara 50 – 400

Mpa. Tegangan sisa yang besar sekitar 300 - 400 MPa terjadi pada pertemuan las dan batas material pipa atas maupun samping dan merupakan titik dan daerah kritis dari sambungan-T. Di daerah HAZ tegangan sekitar 200 Mpa dan berangsur berkurang pada material pipa dengan tegangan berkisar 30 MPa. Pada Gambar 5 dapat dilihat besarnya tegangan pada bagian dalam adalah sekitar 300 - 400 MPa.



Gambar. 7 Pergeseran total pada pengelasan sambungan-T

Tegangan maksimum pada gambar 5 kurang-lebih 440 MPa merupakan titik kritis dari desain, dimana berada pada lapisan dalam sambungan bahan las dan material pipa.

Harga tegangan sisa ini akan berpengaruh terhadap kekuatan bahan, khususnya menjadi penyebab kerusakan fatik ataupun retak karena korosi. Pada tuntutan keperluan desain dan jaminan kekuatan dari komponen biasanya diberikan perlakuan panas setelah proses pengelasan, hal ini dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan tegangan sisa. Hasil model perhitungan simulasi ini, selain proses pengelasan dan pengaruh material, bentuk kampuh las akan berpengaruh pada besarnya tegangan sisa yang terjadi dalam proses pengelasan. Titik kritis tegangan terjadi pada sambungan material dan menjadi besar untuk bentuk yang mengakibatkan adanya konsentrasi tegangan. Dengan membuat perubahan bentuk untuk setiap proses pengelasan suatu material tertentu akan diperoleh tipe dan bentuk yang baik dari kampuh las.

Berdasar data dari pola distribusi pergeseran pada Gambar 6, besarnya pergeseran maksimum sekitar 0,7 mm yang terjadi pada daerah sekitar pipa cabang dan daerah tegangan tinggi. Titik dengan tegangan dan regangan tinggi akan merupakan titik kritis untuk kerusakan fatik atau *creep* jika dioperasikan pada suhu tinggi. Memanfaatkan modeling ini, dapat dievaluasi batas

tegangan dan regangan kritis yang dicapai dan dapat didesain ulang jika melebihi persyaratan desain yang ditentukan. Modeling untuk perhitungan regangan dan tegangan akan membantu dan menjadi alat evaluasi yang efektif. Masalah utama yang perlu mendapat perhatian dalam modeling ini adalah ketelitian hasil. Ketelitian hasil akan sangat dipengaruhi oleh langkah dalam mengambil model, asumsi data dan ketelitian modeling. Model perhitungan tegangan sisa ini faktor proses pengelasan belum dimodelkan dengan teliti.

Lapis pengelasan, waktu pengelasan yang merupakan sumber *fluks* panas yang bergerak selama proses perlu dimodelkan untuk mendapat hasil yang lebih teliti. Verifikasi hasil perhitungan dalam modeling ini belum dilakukan dengan teliti baik dibandingkan dengan hasil perhitungan program ataupun hasil eksperimen. Hasil perhitungan dengan program ANSYS ini mendekati hasil perhitungan menggunakan program ABACUS dan hasil pengukuran tegangan sisa yang dilakukan oleh Tso-Liang Teng dari Chiang Chang Institute of Technology Taiwan^[7]. Perbandingan hasil perhitungan dengan modeling untuk perhitungan *butt weld* memberikan hasil yang mendekati dengan orde tegangan sisa sekitar 40 MPa di HAZ (*Heat Affected Zone*) dan tegangan maksimum 200 MPa. HAZ (*Heat Affected Zone*) merupakan daerah yang dipengaruhi panas dan juga logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat, sehingga terjadi perubahan struktur akibat pemanasan tersebut disebabkan daerah yang mengalami pemanasan yang cukup tinggi.

Pengembangan perhitungan dapat dilakukan untuk berbagai model dan ukuran pengelasan untuk memperoleh hasil perhitungan yang teliti.

Mengubah data dan input file akan dengan mudah diketahui hasil tegangan maksimum dan daerah kritis yang terjadi. Penggambaran geometri menggunakan program AUTOCAD atau SOLID WORK untuk mempermudah pembuatan gambar sebagai masukan program perlu dilakukan untuk pengembangan komputasi.

KESIMPULAN

Distribusi tegangan sisa dalam pengelasan sambungan-T dapat dihitung menggunakan metoda elemen hingga. Bagian kritis dengan tegangan maksimum sebesar 440 MPa terjadi pada sambungan antara material pipa dan material las dengan pergeseran maksimum 0,7 mm. Metode elemen hingga menggunakan program ANSYS

dapat memberikan simulasi untuk analisis dan desain pengelasan komponen dengan baik dengan mengubah data berupa *input file*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Frank Stasa. 2003. Carbon Partitioning into Austenite after Martensite Transformation. *Acta Material*, 51, 2611-2622.
- [2] ANONIM. Manual User ANSYS 5.4. ANSYS Incorporated, Pittsburgh, 1998.
- [3] Speer, J. 2005. The "Quenching & Partitioning" Process: background & Precent Progress. *Material Reseach Vol.8. 4* . 417-423.
- [4] Santofimia, M.J., & Zhao, L. 2008. Characterization of the Microstruktire Obtained by the Quenching & Partitioning Process in Low-Carbon Steels. *Material Characterization* 59. 1758-1764.
- [5] Santofimia, M.J., & Zhao, L. 2008. Microstructural Evolution of Low carbon Steel During Aplication oq Quenching Partitioning Heat Treatment after Austenization. *The minerals, Metal, & Material Society & ASM Internatuonal*.
- [6] Li Wang. & Speer, J. 2013. Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment. *Metal and Microstructur* 2. 268-281.
- [7] Yang Zheng Zeng, Kaiming Wu, & Feng Hu. 2012. Effect of Partitioning of Quenching Partitioning Tempering Process on Microstructure and Hardness in High Carbon Steel. *Advanced Materials Research*. vols. 538-541. 1053-1056.
- [8] Speer, J., Matlock, D. K., Cooman, B. D., & Schroth, J. 2003. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Material* 51(9), 2611-2622.
- [9] Pastore, E., & De Negri, S. 2012. Experimental investigation on low-carbon quenched and partitioned steel. *La Metallurgia Italiana* - n. 9.
- [10] Thelning, Karl . E. 1984. *Steel and Its Heat Treatment*. Bofors Handbook. Butterworths, Boston.
- [11] Leslie & William. 1981. *The Physical Metallurgy of Steels*, Mc graw Hill, Tokyo.
- [12] ASM Handbook. 2004. *Metallography and Microstructure*. Volume 9, ASM International.
- [13] ASM Handbook. 2004. *Alloy Phase Diagram*. Volume 3, ASM International.
- [14] ASM Handbook. 2004. *Heat Treating*. Volume 4, ASM International.
- [15] Qamar, S.Z. August 2007. Heat treatment of a hot-work die steel. *International Scientific Journal*, Volume 28.
- [16] Attaullah, Arain. 1999. *Heat Treatment and Toughness Behavior of Tool Steel (D2 and H13) for Cutting Blade*, University of Toronto.