

## SURFACE HARDENING CHARACTERIZATION OF TRANSMISSION GEARS

**Rifky Ismail<sup>1\*</sup>, Jamari<sup>1</sup>, M. Tauviquirrahman<sup>1</sup>, Sugiyanto<sup>1</sup> and Trias Andromeda<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratory for Engineering Design and Tribology,  
Mechanical Engineering Department, University of Diponegoro  
Jl. Prof Sudharto, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang

<sup>2</sup>Electrical Engineering Department, University of Diponegoro  
Jl. Prof Sudharto, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang  
e-mail: r\_ismail@undip.ac.id

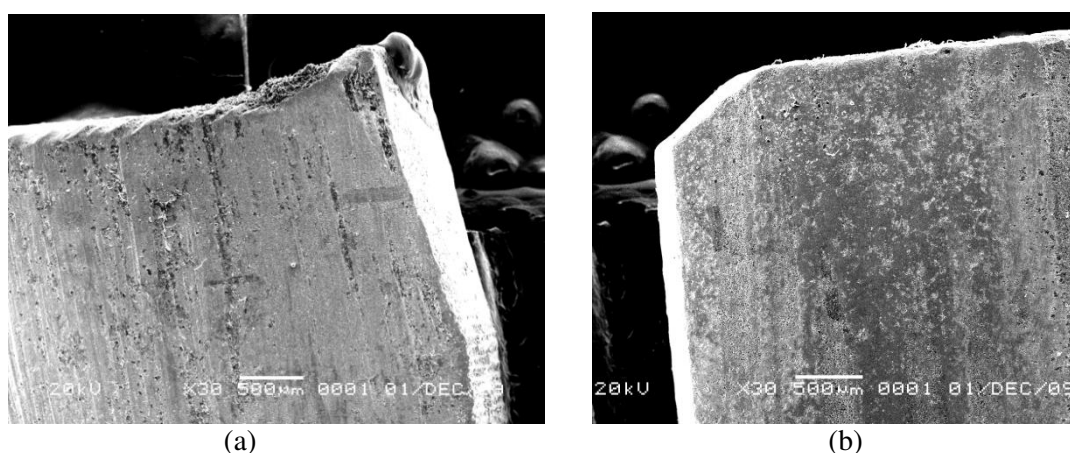
### Abstract

*This paper is presented to compare the transmission gear products from SME (UKM gear) and national scale manufacturer (OEM gear) especially on the surface hardening characterization. Both gears were heat treated with different methods. The gear product of SME was heat treated by pack carburizing and quenching whereas the OEM gear was predicted to be heat treated using induction heating with high frequency. The surface hardening characterization was conducted by investigating the hardening thickness, the hardness number and the microstructure observation on the gear surfaces. The result of the hardening thickness investigation reveals a distinction on the depth of hardening penetration. The heat treatment using long interval pack carburizing of UKM gear produces a deeper penetration and the higher hardness number on the gear surface whereas the OEM gear has a thin hardness penetration and lower hardness number. The microstructure of the both gears depicts the different types of phase. The SME gear shows the present of the carbon infiltration on the martensitic phase structure boundary whereas the OEM gear exhibits lower bainite phase on the gear surface. With this condition the OEM gear is predicted to behave a better contact stress distribution during operation.*

**Keywords:** gear, heat treatment, surface hardening, microstructure

### PENDAHULUAN

Karakterisasi permukaan dari roda gigi transmisi produk UKM (Usaha Kecil dan Menengah) dan roda gigi produk industri berskala nasional ini dilakukan setelah adanya kegagalan yang ditemukan dalam roda gigi produk UKM pada uji *running-in*. Kegagalan berupa deformasi plastis ditemukan pada kepala gigi produk UKM sebagaimana terlihat pada Gambar 1 (a) yang merupakan hasil observasi menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) dari roda gigi UKM. Gambar 1 (b) merupakan hasil SEM dari kepala gigi untuk roda gigi produk industri berskala nasional.



**Gambar 1.** Perbandingan antara profil kepala gigi pada roda gigi pasca *running test* 3600 menit tanpa henti: (a) produk UKM dan (b) produk industri berskala nasional (Jamari, 2009)

Deformasi plastis yang ditemukan ini terjadi setelah roda gigi mengalami *running test* selama 3600 menit tanpa henti pada engine sepeda motor 4 tak yang telah dimodifikasi (Jamari, dkk., 2009). Deformasi plastis hanya terjadi pada roda gigi produk UKM dan deformasi ini tidak

terjadi pada setiap gigi roda gigi produk UKM melainkan ditemukan pada lokasi roda gigi tertentu dan bersifat acak. Kesimpulan yang dapat diambil dari fenomena ini adalah deformasi plastis yang terjadi pada kepala roda gigi terjadi akibat kurangnya nilai kekerasan dan kekuatan untuk menahan beban siklik pada permukaan. Sedangkan fenomena hanya beberapa gigi dari seluruh roda gigi yang mengalami deformasi disebabkan karena tidak homogennya proses pengerasan permukaan roda gigi produk UKM (Jamari, dkk., 2009).

Peningkatan sifat kekerasan dan kekuatan untuk menahan beban pada permukaan roda gigi dapat dilakukan melalui proses pengerasan permukaan menggunakan metode: *through hardening* menggunakan tungku pemanas, *carburizing-hardening*, *nitriding*, *carbonitriding*, dan *induction hardening* (Rakhit, 2000). Hasil penelusuran menunjukkan bahwa UKM mengenal 3 metode perlakuan panas, yaitu *through hardening* menggunakan dapur peleburan, *through hardening* menggunakan tungku pemanas dan *carburizing-hardening* (Ismail, dkk., 2009a). Pemanasan *through hardening* menggunakan dapur peleburan sebenarnya tidak dianjurkan karena tidak memiliki standar kontrol temperatur dan kontrol waktu yang jelas. Jadi metode ini hanya mengandalkan "operator feeling" sehingga kualitas dan homogenitas dari seluruh roda gigi yang dikeraskan menjadi tidak terjaga. Meski demikian, metode pengerasan ini masih dipakai oleh beberapa UKM yang tidak memiliki teknologi dan peralatan dapur pemanas khusus sehingga mereka menggunakan dapur peleburan untuk perlakuan panas. Kegagalan yang dialami roda gigi pada Gambar 1 (a) diakibatkan karena roda gigi dilaku panas menggunakan metode *through hardening* yang tidak homogen (Jamari, 2009). Kesimpulan yang diambil bahwa kualitas dan homogenitas permukaan roda gigi produk UKM yang dibuat menggunakan metode *through hardening* di dalam tungku peleburan kurang baik.



**Gambar 2.** Perbandingan lapisan dan kedalaman pengerasan permukaan: (a) roda gigi produk UKM dan (b) roda gigi produk industri berskala nasional

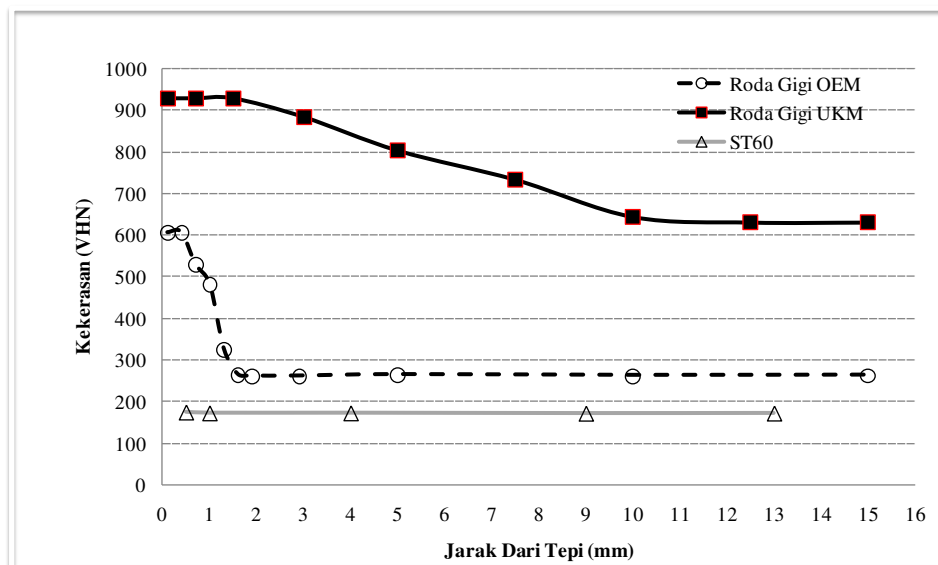
Selain *through hardening* menggunakan dapur peleburan, beberapa UKM telah melakukan pengerasan permukaan menggunakan metode *carburizing-hardening* menggunakan dapur pemanas. Sebelum melakukan *running test* pada roda gigi transmisi UKM yang dikeraskan dengan metode *carburizing-hardening*, diperlukan karakterisasi pengerasan permukaan terhadap roda gigi tersebut dan dibandingkan dengan roda gigi transmisi produk industri berskala nasional. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan karakteristik pengerasan permukaan roda gigi transmisi produk UKM yang dikeraskan dengan metode *carburizing-hardening* dan roda gigi transmisi produk industri berskala nasional. Aspek yang akan diteliti adalah ketebalan lapisan pengerasan, nilai kekerasan permukaan dan struktur mikro permukaan roda gigi setelah perlakuan panas.

## METODOLOGI PENELITIAN

Spesimen roda gigi transmisi, terlihat pada Gambar 2 (a) dan (b), yang akan dibandingkan dalam penelitian ini adalah roda gigi produk UKM yang dikeraskan dengan metode *carburizing-hardening* dan roda gigi produk industri berskala nasional yang proses pengerasan permukaan dan material awalnya tidak diketahui. Untuk memudahkan penyebutan, roda gigi ini

akan disebut sebagai roda gigi UKM dan roda gigi OEM (*original equipment manufacturer*). Material awal roda gigi UKM adalah baja karbon ST 60 yang dilaku panas setelah proses manufaktur roda gigi selesai. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah sebagai berikut: (i) proses *pack carburizing* pada temperatur 925°C dengan lama waktu penahanan selama 60 menit, (ii) roda gigi dicelup cepat (*quenching*) di dalam larutan berbasis air, dan (iii) di-temper pada temperatur 200°C selama 1 jam untuk meningkatkan ketangguhan dan menurunkan nilai kekerasan.

Pengujian kekerasan mikro pada penelitian ini menggunakan alat uji Vickers *micro-hardness* merek Buehler sedangkan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop merek Olympus PME3. Kedua pengujian ini dilakukan pada profil *involute* roda gigi (*pitch circle*) sebagaimana dijelaskan pada Gambar 2. Pengujian kekerasan mikro selain bertujuan untuk mendapatkan nilai kekerasan juga dimaksudkan untuk mengobservasi kedalaman pengerasan pada masing-masing roda gigi.



**Gambar 3.** Perbandingan nilai kekerasan (HVN) pada roda gigi UKM, material dasar roda gigi UKM (ST 60) dan roda gigi OEM sebagai fungsi dari kedalaman

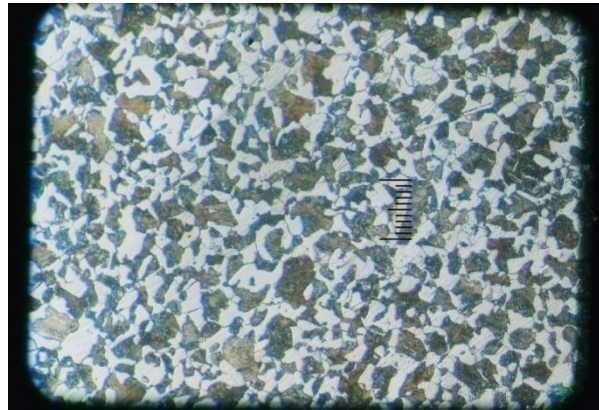
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan antara nilai kekerasan permukaan pada roda gigi transmisi UKM dan roda gigi transmisi OEM terlihat pada Gambar 3. Adanya perlakuan *pack carburizing-hardening* pada roda gigi UKM meningkatkan kekerasan roda gigi cukup drastis bahkan melewati kekerasan roda gigi produk OEM. Peningkatan nilai kekerasan dari material awal ST 60 sebesar 171.5 HVN (*Vickers Hardness Number*) menjadi 927 HVN setelah proses *heat treatment*. Nilai kekerasan permukaan roda gigi mencapai kestabilan pada nilai 630 HVN pada kedalaman sekitar 10 mm. Hal ini disebabkan adanya proses *pack carburizing* dengan waktu yang cukup lama dan diikuti proses *quenching*. Karbon masuk kedalam struktur roda gigi sebagai *hardening agent* dan menyatu dengan struktur awal *ferrite* dan *perlite*. Struktur mikro awal dari material roda gigi UKM yang terdiri dari *ferrite* dan *perlite* terlihat pada Gambar 4. Proses *pack carburizing* diikuti dengan *quenching* ini menjadikan struktur *ferrite* dan *perlite* material ST 60 berubah menjadi *martensite* pada bagian permukaan luar roda gigi.

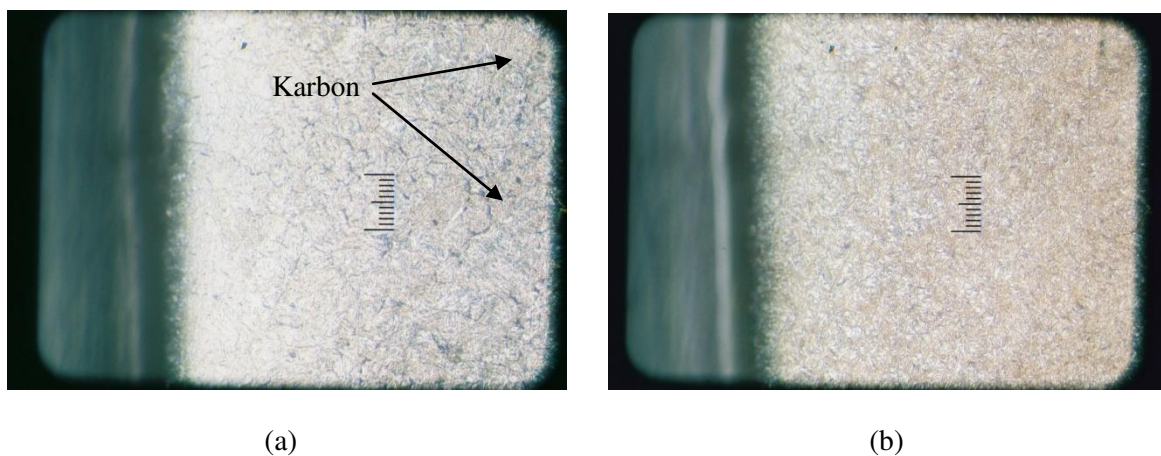
Berdasarkan Gambar 3, pada roda gigi OEM terlihat bahwa degradasi nilai kekerasan terjadi cukup curam. Pada bagian permukaan roda gigi OEM nilai kekerasan mencapai 600 VHN kemudian turun drastis pada kedalaman 1-2 mm dan mencapai kestabilan pada nilai kekerasan pada 260 VHN dengan kedalaman di atas 2 mm. Tipisnya lapisan pengerasan yang dimiliki oleh roda gigi OEM terlihat dengan jelas pada foto makro roda gigi OEM seperti tergambar dalam Gambar 2 (b) dimana secara visual terlihat selimut homogen yang terbentuk pada permukaan roda gigi. Pengerasan roda gigi OEM diperkirakan terbentuk akibat metode pengerasan induksi menggunakan frekuensi tinggi. Pengerasan menggunakan pemanas induksi mampu menghasilkan pemanasan yang terbatas pada permukaan luar roda gigi dimana pengaturan ketebalan pemanasan dapat

dilakukan melalui pengaturan frekuensi gelombang saat pemanasan. Semakin tinggi frekuensi saat pemanasan maka semakin tipis efek pengerasan yang didapatkan pada permukaan roda gigi (Rakhit, 2000).

Pengerasan permukaan menggunakan metode pemanas induksi merupakan salah satu teknik yang sangat populer di dunia. Rudnev dkk. (2003, 2004) menyebutkan bahwa pengerasan induksi ini lebih mudah dikontrol dan menghasilkan keseragaman pengerasan yang lebih baik. Selain itu, komponen tidak akan terkontaminasi karena tidak terjadi kontak langsung dengan pemanas. Roda gigi lurus, helik, cacing, misalnya, dapat dikeraskan dengan metode induksi dan memberikan hasil yang memuaskan (Rudnev, 2008a; 2008b).



**Gambar 4.** Struktur mikro material awal roda gigi UKM sebelum perlakuan panas yang terdiri dari *ferrite* dan *perlite* (perbesaran 100x)



**Gambar 5.** Perbandingan struktur mikro pada bagian luar (tepi permukaan): (a) roda gigi UKM dan (b) roda gigi OEM (perbesaran 100x)

Hasil pengamatan struktur mikro roda gigi UKM dan roda gigi OEM dapat dilihat pada Gambar 5 (a) dan (b). Kedua gambar ini diambil pada bagian tepi profil involut roda gigi (*pitch circle*) yang merupakan daerah yang dominan mengalami pengerasan permukaan. Pada roda gigi UKM terdapat perubahan struktur mikro yang sangat jelas dari struktur *ferrite* (daerah berwarna terang) dan *perlite* (daerah berwarna gelap) pada Gambar 4 menjadi struktur *martensite* pada Gambar 5 (a). Struktur *martensite* ditandai dengan bentuk serpihan-serpihan tajam yang memiliki orientasi dan keteraturan tertentu sebagai reaksi dari pemanasan *pack carburizing* yang diikuti dengan *quenching*. Pendinginan yang cepat menjadikan fase *austenite* yang terbentuk pada temperatur 925 °C berubah menjadi fase *martensite*. Hal ini selaras jika dibandingkan dengan diagram transformasi isothermal baja (Gandy, 2007). Proses pembentukan *upper bainite* dan *lower bainite* dapat terjadi apabila proses pendinginan dari fase *austenite* lebih dari 5 detik sedangkan pada proses *quenching*, waktu pendinginan pada daerah tepi sekitar 2-4 detik sehingga fase yang

terbentuk adalah *martensite*. Meskipun *quenching* ini dilanjutkan dengan proses *tempering*, tetapi pemanasan yang mencapai 200°C belum mampu mengurai seluruh *martensite* menjadi fase lain sehingga struktur serpihan kasar dan berlapis masih terlihat dengan jelas.

Selain itu, pada roda gigi UKM, terdapat endapan karbon pada batas butir yang terbentuk sebagai akibat dari proses *pack carburizing*. Proses *pack carburizing* dilakukan dengan cara merendam roda gigi pada serbuk karbon dalam bejana tertutup dan dipanaskan pada temperatur 925°C selama 1 jam. Karbon yang berbentuk serbuk mampu menembus permukaan roda gigi saat struktur mikro roda gigi bertransformasi dari struktur *ferrite - perlite* menjadi *austenite* pada temperatur sekitar 875-900°C. Penahanan pemanasan (*holding time*) yang cukup lama menjadikan pengendapan karbon mampu masuk semakin dalam. Hal ini terbukti dari meningkatnya nilai pengerasan permukaan hingga kedalaman 10 mm pada Gambar 3.

Sedangkan struktur mikro yang terdapat pada roda gigi OEM sebagaimana terlihat pada Gambar 5 (b) menunjukkan adanya struktur mikro *lower bainite*. Struktur *lower bainite* ini ditandai dengan adanya jarum-jarum yang terdapat pada fase dasar *ferrite* (Gandy, 2007). Struktur *bainite* ini terdiri dari karbida besi dan *ferrite* dan disertai dengan karbon jenuh. Struktur *bainite* memiliki sifat yang baik, yakni keras, kuat dan juga tangguh. Untuk komponen roda gigi sifat struktur *bainite* ini lebih baik dari sifat *martensite* yang memiliki nilai kekerasan dan kekuatan tinggi tetapi memiliki nilai ketangguhan yang rendah. Gandy (2007) menyebutkan bahwa struktur *bainite* memiliki nilai kekerasan sekitar 500-600 HVN dan ini dapat dibuktikan dengan hasil pengujian nilai kekerasan mikro pada Gambar 3. Pada struktur mikro roda gigi OEM tidak terlihat pengendapan karbon pada batas butir sehingga dapat dipastikan bahwa proses pengerasannya tidak melibatkan karbon (*carburizing* atau *carbonitriding*).

Kondisi material awal dan proses pengerasan permukaan untuk roda gigi OEM tidak diketahui secara pasti sehingga dalam penelitian ini pengambilan kesimpulan dilakukan berdasarkan perkiraan dan disesuaikan dengan referensi pustaka yang ada. Roda gigi OEM diperkirakan dilaku panas menggunakan metode pengerasan induksi dengan frekuensi tinggi dan proses pendinginan yang dilakukan tidak terlalu cepat. Hasil pengerasan roda gigi OEM sangat bagus, memiliki nilai kekerasan permukaan yang tidak terlalu tinggi dan memiliki struktur mikro *bainite*. Pengerasan roda gigi OEM juga hanya menjangkau 1-2 mm di bawah permukaan sehingga bagian dalam roda gigi tetap dalam kondisi yang ulet. Adanya lapisan tipis dan keras pada permukaan roda gigi sangat efektif dalam menahan beban kontak.

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) pada kontak permukaan yang memiliki lapisan keras dan tipis pada permukaan datar (Ismail, dkk., 2009b; 2009c) dan pada permukaan roda gigi (Ismail, dkk., 2010). Hasilnya menunjukkan adanya pengurangan tegangan yang cukup besar pada daerah *substrate* (bagian dalam material) akibat adanya lapisan tipis yang keras ini. Kajian ini menunjukkan bahwa lapisan yang dibutuhkan untuk menahan beban sebenarnya tidak perlu terlalu tebal. Lapisan yang tipis yang memiliki nilai kekerasan yang cukup tinggi sudah mampu menahan beban kontak dengan baik. Pengerasan yang terlalu dalam tidak memberikan efek yang baik karena dapat meningkatkan kecepatan perambatan retakan akibat material (Gandy, 2007). Sebagaimana diketahui bahwa roda gigi mentransmisikan beban puntir dan torsi sehingga bagian dalam roda gigi yang terlalu keras dan kurang tangguh tidak diharapkan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan perbandingan karakterisasi permukaan khususnya berkaitan dengan aspek pengerasan pada roda gigi UKM dan roda gigi OEM. Aspek pengerasan permukaan menjadi isu penting karena pada penelitian terdahulu ditemukan fakta bahwa roda gigi UKM gagal menahan beban pada permukaan. Kedua roda gigi dipanaskan menggunakan metode yang berbeda. Roda gigi UKM dilaku panas menggunakan *pack carburizing-hardening*, sedangkan roda gigi OEM diprediksi dilaku panas menggunakan metode pengerasan induksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa roda gigi OEM memiliki kelebihan dengan adanya suatu lapisan tipis (1-2 mm) yang keras pada permukaan diikuti dengan material yang lebih lunak pada bagian dalam. Material yang lebih lunak diharapkan memiliki nilai ketangguhan yang lebih baik sehingga diprediksi mampu menahan beban puntir dengan lebih baik serta mampu menahan adanya

---

perambatan retak yang mengakibatkan kegagalan. Struktur *bainite* juga dipandang memiliki sifat yang dibutuhkan roda gigi yaitu keras, kuat tetapi tetap tangguh.

Roda gigi UKM memiliki nilai pengerasan dan ketebalan lapisan pengerasan yang tinggi pada bagian permukaan. Pada bagian dalam, roda gigi masih memiliki nilai kekerasan yang tinggi. Struktur mikro yang terbentuk pada permukaan adalah *martensite*. Terdapat pengendapan karbon akibat proses *pack carburizing* pada permukaan roda gigi. Karakteristik ini dipandang bukan merupakan kombinasi yang baik bagi roda gigi. Nilai kekerasan terlalu tinggi pada permukaan dan bagian dalam dapat memacu perambatan retak yang lebih cepat dan dapat menghasilkan kegagalan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DIKTI), Kementerian Pendidikan Nasional yang telah mendanai penelitian ini melalui Hibah Bersaing Tahun 2011. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro (Dian Indra, Fadly dan Anang) dan mahasiswa Teknik Elektro (Pandu) Universitas Diponegoro yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. D. Gandy, 2007, *Carbon Steel Handbook*. Electric Power Research Institute, Inc., California, USA.
2. Ismail, R., dkk., 2009a, Penyuluhan Peningkatan Daya Saing Produk Industri Kecil dan Menengah (IKM) di Sentra Industri Kecamatan Juwana, Kabupaten Pati, Jawa Tengah, *Laporan Pengabdian kepada Masyarakat*, Jurusan Teknik Mesin UNDIP.
3. Ismail, R., Tauviquirrahman, M., Jamari and Schipper, D.J., 2009b, Finite Element Analysis of Sliding Contact of a Hard Cylinder on a Layered Elastic-Plastic Solid, *Proceedings of International Conference on Advances Mechanical Engineering (ICAME)*, Malaysia.
4. Ismail, R., Tauviquirrahman, M., Jamari and Schipper, D.J., 2009c, The Finite Element Study of Static Contact on Multilayered Solids, *Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Analysis in Engineering*, Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia.
5. Ismail, R., Tauviquirrahman, M., Jamari, dan Schipper, D. J., 2010, Investigation of the Effect of a Layer on Gear Contact using Finite Element Simulation, *Second International Graduate Students Conference*, Yogyakarta, Indonesia.
6. Jamari, Ismail, R., dan Tauviquirrahman, M., 2009, *Laporan Penelitian Hibah Publikasi dan Kerja Sama Internasional DIKTI*, Universitas Diponegoro.
7. Rakhit, A.K., 2000, *Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers*, ASM International, Ohio, USA.
8. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., dan Black, M., 2003, Induction Hardening of Gears: a Review Part 1, *Heat Treatment of Metals*, pp. 97-103.
9. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., and Black, M., 2004, Induction Hardening of Gears: a Review Part 2, *Heat Treatment of Metals*, pp. 11-15.
10. Rudnev, V., 2008a, Induction Hardening of Gears and Critical Components, *Gear Technology*, pp. 58-63.
11. Rudnev, V., 2008b, Induction Hardening of Gears and Critical Components Part II, *Gear Technology*, pp. 47-53.