

## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menerapkan metode analisis *Taguchi-Grey Relational Analysis* dan *Response Surface Method*. Analisis *Taguchi* digunakan untuk membentuk model linier dan menelusuri parameter proses *hardening* yang mampu mengoptimalkan 1 (satu) variabel respon, dengan nilai level-faktor yang telah ditetapkan. *Grey Relational Analysis* berperan untuk proses optimalisasi beberapa variabel respon sekaligus dengan memanfaatkan nilai *S/N Ratio* level-faktor pada *Taguchi*. *Response Surface Method* digunakan untuk membentuk model polinomial yang memiliki nilai  $R^2$  yang tinggi agar mampu menjelaskan variabel respon berdasarkan kontribusi variabel independen yang ada. *Response Surface Method* digunakan untuk menelusuri parameter proses *hardening* yang menghasilkan 1 atau beberapa variabel respon yang optimal.

Kesimpulan penelitian ini antara lain:

- a. Parameter proses *hardening* yang memberikan respon biaya, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan optimal untuk ASSAB 705 adalah temperatur *austenite* 862°C; media *quench oil*; dan temperatur temper 200°C. Parameter tersebut menghasilkan respon aktual berupa biaya Rp.65.035,92 (sama dengan biaya proses *hardening* saat ini); nilai kekerasan meningkat 45,09% menjadi 51 HRC (dari semula 28 HRC); dan nilai ketangguhan meningkat 43,96% menjadi 0,9815 J/mm<sup>2</sup> (dari semula 0,55 J/mm<sup>2</sup>).

Parameter proses *hardening* yang memberikan respon biaya, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan optimal untuk ASSAB 709 adalah temperatur *austenite* 898,24°C; media *quench oil*; dan temperatur temper 200°C. Parameter tersebut menghasilkan respon aktual berupa biaya Rp. Rp.69.299,00 (biaya lebih mahal 6,15% dari semula Rp. 65.035,92); nilai kekerasan meningkat 42,85% menjadi 56 HRC (dari semula 32 HRC); dan nilai ketangguhan meningkat 49,50% menjadi 1,0892 J/mm<sup>2</sup> (dari semula 0,55 J/mm<sup>2</sup>).

Parameter proses *hardening* material ASSAB 709 menghasilkan kombinasi biaya, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan paling optimal dibandingkan ASSAB 705.

- b. Material ASSAB 709 mampu mencapai nilai kekerasan maksimal 56 HRC (lebih tinggi 7,27% dibandingkan ASSAB 705), sehingga direkomendasikan untuk digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen yang memerlukan nilai

kekerasan tinggi. Material ini sesuai diaplikasikan pada komponen seperti: *high speed-low load gear, bush, slider* dan *guide rail*, serta komponen lain yang membutuhkan ketahanan gesek tinggi namun beban kerja rendah.

Material ASSAB 705 mampu mencapai nilai ketangguhan  $1,4429 \text{ J/mm}^2$  (lebih tinggi 10,09% dibandingkan ASSAB 709), sehingga direkomendasikan untuk pembuatan komponen yang membutuhkan nilai ketangguhan tinggi. Material ini sesuai diaplikasikan pada komponen seperti: *heavy-duty gear, coupling, shaft, bolt* dan *nut*, serta komponen lain yang memiliki beban kerja tinggi.

Material ASSAB 705 dapat mensubstitusi material ASSAB 709 apabila proses *hardening* bertujuan untuk memperoleh ketangguhan, namun tidak berlaku sebaliknya. Material ASSAB 709 dapat mensubstitusi material ASSAB 705 apabila sifat keras menjadi tujuan proses *hardening*, namun tidak berlaku sebaliknya. Dari segi biaya proses *hardening*, kedua material memiliki biaya proses *hardening* yang sama.

Material ASSAB 709 direkomendasikan untuk memperoleh resiko distorsi *outside diameter* yang minimal (50% lebih kecil dibandingkan ASSAB 705). Material ASSAB 705 direkomendasikan apabila mengharapkan distorsi *inside diameter* dan *gap width* yang paling minimal. Distorsi *inside diameter* ASSAB 705 lebih kecil 52,77%; serta distorsi *gap width* lebih kecil 2,41% dibandingkan ASSAB 709. Untuk distorsi *flatness*, material ASSAB 705 dan ASSAB 709 memiliki resiko besar distorsi yang sama.

Saran untuk penelitian berikutnya ialah menggunakan respon keausan untuk mengetahui pengaruh parameter *hardening* terhadap nilai kekerasan dan ketahanan aus material, sehingga dapat digunakan untuk melakukan prediksi umur pakai komponen. Saran lain ialah menggunakan spesimen baja lain untuk mengetahui apakah hasil penelitian ini dapat diterapkan pula untuk jenis material baja lain.

## Daftar Pustaka

- Andrade, M. C., Filho, R. C. P., Espozel, A. M., Maia, L. O. A., Qassim, R. Y. 1999. Activity-based costing for production learning. *International Journal of Production Economics*, 62, 175-180.
- ASTM International. 2002. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, ed. E23-02. pp. 2, 11, 13-14, 16. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- Azizi, M. J., Jatimurti, W., Rochiem, R. 2019. Analisis pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan tempering terhadap kekerasan baja ASSAB 705 yang di-*hardening* untuk aplikasi poros pompa multistage. *Jurnal Teknik ITS*, 8, 1, ISSN: 2337-3539.
- Bakshi, S., Mirak, A. 2022. The effect of low temperature transformation time on microstructural & textural evolution, mechanical properties and fracture behavior of a low alloy, medium carbon, super strength AISI 4340 steel. *Materials Science and Engineering*. 831, 142247.
- Bilal, M. M., Yaqoob, K., Zahid, M. H., Haq, E. U., Tanveer, W. H., Wadood, A., Ahmed, B. 2019. Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 *Steels*. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 5194-5200.
- Bryson, W. E. 2009. *Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels*, ed. 2. pp 1, 2, 3, 22, 31-34, 41-44, 84-86. Hanser Publisher, Munich.
- Canale, L. C., Mesquita, R. A., Totten, G. E. 2008. Failure Analysis of Heat Treated Steel Components. pp 259, 270. ASM International, Ohio.
- Clark, A., Bowers, R. J., Northwood, D.O. 2014. *Heat Treatment Effects on Distortion, Residual Stress, and Retained Austenite in Carburized 4320 Steel*. *Materials Science Forum*, 783-786.
- Cubberly, W. H., Scott, Jr. W. W., DeHaemer, M. J. 1998. *ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures*, ed 8. ASM International, Ohio.
- Das, A. R., Panda, A., Dhupal, D. 2018. Hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide insert: Surface roughness, tool wear, chip morphology, and cost estimation. *Materials Today: Proceedings*, 5, 6560-6569.
- Devi, Winarni, S., Handoko, B. 2016. Penerapan Metode Grey Relational Analysis dan PCA pada optimasi Multirespon Desain *Taguchi*. *Seminar Pendidikan Matematika SPs UPI*, 1, 111-120.
- Gurumurthy, B. M., Sharma, S. S., Kini, A. 2018a. Ferrite-bainite dual phase structure and mechanical a characterization of AISI 4340 steel. *Materials Today: Proceedings*, 5, 24907-24914.
- Gurumurthy, B. M., Sharma, S., Kini, U. A., Hedge, A., Patil, A. 2018b. Mechanical characteristics evaluation of dual phase and related *hardening* techniques

on AISI 4340 steel. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, volume 12, 4, 4018-4029.

- Gurumurthy, B. M., Kini, A. U., Sharma, S., Hiremath, P., Gowrishankar, M. C. 2021. Effect of intercritical processing temperature on mechanical properties, microstructure and microhardness of ferrite-bainite medium carbon dual phase *Steels*. *Cogent Engineering*, 8, 1999062.
- Han, X., Hou, J., Zhang, Z., Barber, G. C., Qiu, F., Chang, F., Kou, S.Q. 2021. Bainite kinetic energy, activation energy, and tribological behavior of austempered AISI 4340 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1473-1481.
- Hundal, M. S. 1997. Product Costing: A comparison of Conventional and Activity Based Cost System. *Journal of Engineering Design*, 8, 1, 91-103.
- Jami, M., Gil, E., Ushiña, E., Cabrera, V. H. 2021. Determine hardness and torsional resistance of AISI/SAE 4340 steel, treated by *quenching* at 860°C and tempering at 300°C, 350°C and 400°C. *Materials Today: Proceedings*, 49, 35-42.
- Kuhn, H., Medlin, D. 2000. *ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation*, ed 1. ASM International, Ohio.
- Kaiser, D., Damon, J., Mühl, F., Graaff, B. d., Kiefer, D., Dietrich, S., Schulze, V. 2020. Experimental investigation and finite-element modeling of the short-time induction *quench-and-temper* process of AISI 4140. *Journal of Materials Processing Tech*, 279, 116485.
- Kumar, A., Jayakumar, P., Sharma, V. K. 2019. Microstructure and properties of thermomechanically treated and bake hardened AISI 4340 steel. *Materials Today: Proceedings*, 18, 848-860.
- Lesiuk, G., Duda, M. M., Correia, J., Jesus, A. M. P. d., Calcada, R. 2018. Fatigue crack growth of 42CrMo4 and 41Cr4 *Steels* under different *Heat Treatment* conditions. *International Journal of Structural Integrity*, 9, 3, 326-336.
- Meysami, A. H., Ghasemzadeh, R., Seyedin, S. H., Aboutalebi, M. R. 2010. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-*quenched* and tempered AISI 4140 steel. *Materials and Design*, 31, 1570-1575.
- Mukhopadhyay, A., De, S., Kumar, R. R., Suman, V. K., Kumar, B., Das, M. 2020. Tribological studies of aqueous poly *quenched* medium carbon steel. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1610-1616.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. 2016. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, ed 3. pp. 1-2, 11, 413-416, 872-876. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

- Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S., Seneviratne, L. 2006. Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128, 563-575.
- Namdev, A., Telang, A., Purohit, R., Kumar, A. 2021. The effect of inter critical *Heat Treatment* on mechanical and wear properties of AISI 1015 steel. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 1-11.
- Nan, C., Northwood, D. O., Bowers, R. J., Sun, X., Bauerle, P. 2009. The use of *Navy C-ring* specimens to study distortion in ferritic nitrocarburized 1010 steel. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 62, 1743-3533.
- Northwood, D. O., He, L., Boyle, E., Bowers, R. 2007. Retained *Austenite* – Residual Stress – Distortion Relationships in Carburized SAE 8620 Steel. *Materials Science Forum*, 539-543, 4464-4469.
- Nunes, M. M., Silva, E. M. d., Renzetti, R. A., Brito, T. G. 2019. Analysis of *quenching* parameters in AISI 4340 steel by using *Design of Experiments*. *Materials Research*, 22, 1.
- Pervez, H., Mozumder, M., Mourad, A. H. 2016. Optimization of Injection Molding Parameters for HDPE/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites Fabrication with Multiple Performance Characteristics Using the *Taguchi* Method and Grey Relational Analysis. *MDPI: Materials*, 9, 8, 710.
- Qazi, M. I., Akhtar, R., Abas, M., Khalid, Q. S., Babar, A. R., Pruncu, C. I. 2020. An Integrated Approach of GRA Coupled with Principal Component Analysis for Multi-Optimization of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Process. *MDPI: Materials*, 13, 16, 3457.
- Rajan, T. V., Sharma, C. P., Sharma, A. 2011. *Heat Treatment: Principles and Techniques*, ed 2. pp. 3, 33, 94, 96, 97, 99-102, 202, 194-195, 201-204, 211-212, 332. PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- Ray, B. C., Prusty, R. K., Nayak, D. 2020. Phase Transformations and *Heat Treatments* of *Steels*, ed. 1. pp 83, 85, 87, 141, 143, 145-148, 198. CRC Press, Taylor & Francis Group, London.
- Roy, R. K. 2010. A Primer on the *Taguchi* Method, ed 2. pp 1, 5-6, 10-13. Society of Manufacturing Engineers, Michigan.
- Sakthivel, M., Kumar, A. G. G., Raja, P., Muthuvel, M. 2013. Evaluation of EN8 Steel in Different *Quenching* Medium. *International Journal of Engineering Sciences Research-IJESR*, 04, 09297, 2230-8504.
- Samantaraya, D., Lakade, S., Keche, A. 2018. An Alternate Machining Method for Hardened Automotive Gears. *Procedia Manufacturing*, 20, 517-522.
- Sanij, M. H. K., Banadkouki, S. S. G., Mashregi, A. R., Moshrefifar, M. 2012. The effect of single and double *quenching* and tempering *Heat Treatments* on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel. *Materials and Design*, 42, 339–346.



- Silva, A. D. d., Pedrosa, T. A., Gonzalez-Mendez, J. L., Jiang, X., Cetlin, P. R., Altan, T. 2012. Distortion in *quenching* an AISI 4140 C-ring – Predictions and experiments. *Materials and Design*, 42, 55-61.
- Sonar, T., Lomte, S., Gogte, C., Balasubramanian, V. 2018. Minimization of Distortion in Heat Treated AISI D2 Tool Steel: Mechanism and Distortion Analysis. *Procedia Manufacturing*, 20, 113-118.
- Sun, C., Fu, P. X., Liu, H. W., Liu, H. H., Du, N. Y. 2018. Effect of tempering temperature on the low temperature impact toughness of 42CrMo4-V steel. *Metals Open Access Metallurgy Journal*, 8, 232.
- Sylajakumari, P. A., Ramakrishnasamy, R., Palaniappan, G. 2018. *Taguchi* Grey Relational Analysis for Multi-Response Optimization of Wear in Co-Continuous Composite. *MDPI: Materials*, 11, 9, 1743.
- Szala, M., Winiarski, G., Wojcik, L., Bulzak, T. 2020. Effect of annealing time and temperature parameters on the microstructure, hardness, and strain-hardening coecients of 42CrMo4 steel. *Materials*, 13, 9.
- Totten, G., Howes, M., Inoue, T. 2002. *ASM Handbook of residual stress and deformation of steel*, ed 1. pp 175-176. ASM International, Ohio.
- Walther, L. M., Skousen, C. J. 2010. *Process and Activity-Based Costing: Managerial and Cost Accounting*, ed 1. pp 23. eBook at bookboon.com.
- Wang, C., Li, X., Chang, Y., Han, S., Dong, H. 2016. Comparison of three-body impact abrasive wear behaviors for *quenching*–partitioning–tempering and *quenching*–tempering 20Si2Ni3 Steels. *Wear*, 362-363, 121-128.
- Zdero, R., Guenther L. E., Gascoyne T. C. 2017. Pin-on-Disk Wear Testing of Biomaterials Used for Total Joint Replacements. *Experimental Methods in Orthopaedic Biomechanics*, 19, 299-311.