

PENGARUH KONDUKTIVITAS PANAS DAN MEDIA PENDINGIN TERHADAP SUHU MAKSIMAL DAN LAJU PENDINGINAN PADA PROSES *INDUCTION HEATING* BAJA AISI 4140 DAN 4340

Haikal¹, Tota Pirdo Kasih¹, Nugroho Tri Atmoko^{2*}

¹Program Profesi Insinyur, Universitas Binus Nusantara, Jakarta, Indonesia

²Program Studi D3 Teknik Mesin, Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia

*Email: nugrohoatmok2@gmail.com

ABSTRAK

Pemanas induksi merupakan proses pemanasan modern yang bebas kontaminasi, bebas emisi sehingga pemanas induksi sangat dikembangkan dalam teknologi *heat treatment*. Penelitian ini berfokus pada pengaruh konduktivitas material baja AISI terhadap laju pemanasan, suhu maksimal serta laju pendinginan yang terukur ketika material uji dipanasi menggunakan mesin pemanas induksi (*induction heating*). Dua buah material AISI yakni AISI 4140 dan AISI 4340 digunakan dalam penelitian ini. Material AISI 4140 memiliki nilai konduktivitas termal 42,6 W/m.K dan AISI 4340 memiliki nilai konduktivitas termal 44,5 W/m.K. Material tersebut dipanaskan menggunakan pemanas induksi selama 15 menit kemudian didinginkan menggunakan media udara dan air. Pengukuran suhu dilakukan pada material memanfaatkan *thermocouple* yang dikombinasi dengan Arduino sehingga pengukuran suhu dapat direkam secara *real time*. Berdasarkan pengambilan data suhu pada spesimen ketika dipanaskan menggunakan pemanas induksi menunjukkan bahwa suhu maksimal yang terukur pada material uji yakni 747,75°C ketika material AISI 4140 akan tetapi jika menggunakan material AISI 4340 menghasilkan suhu maksimal yang lebih tinggi yakni 754,5°C. Sedangkan jika ditinjau dari laju pendinginan, laju pendinginan Baja AISI 4340 sebesar 0,14°C/s pada media pendingin udara dan 5,27°C/s pada media pendingin air. Sedangkan Baja AISI 4140 menghasilkan laju pendinginan 0,08°C/s pada media pendingin udara dan 4,75°C/s pada media pendingin air. Penurunan suhu rata-rata pada media pendingin udara antara Baja AISI 4140 dengan Baja AISI 4340 memiliki perbedaan sebesar 0,06°C/s dan pada media pendingin air memiliki perbedaan sebesar 0,52°C/s. Baja AISI 4340 lebih cepat membuang panas sedangkan Baja AISI 4140 lebih lama menyimpan panas. Hal tersebut mengindikasikan bahwa semakin besar konduktivitas panas suatu material maka semakin tinggi suhu yang terukur dan laju pendinginan semakin cepat.

Kata kunci: konduktivitas termal; pemanas induksi; suhu maksimal; laju pendinginan; baja AISI.

ABSTRACT

Induction heating is a modern, contamination-free, emission-free process, so induction heating is highly developed in heat treatment technology. This research focuses on the effect of AISI steel material conductivity on the heating rate, maximum temperature, and cooling rate measured when the test material is heated using an induction heating machine. Two AISI materials, namely AISI 4140 and AISI 4340, are used in this study. AISI 4140 has a thermal conductivity value of 42.6 W/m.K, and AISI 4340 has a thermal conductivity value of 44.5 W/m.K. The material is heated using an induction heater for 15 minutes and then cooled using air and water media. Temperature measurements are made on the material utilizing a thermocouple combined with Arduino to record temperature measurements in real time. The temperature data collected on the specimen when heated using an induction heater shows that the maximum temperature measured on the test material is 747.75°C when the material is AISI 4140. Still, using AISI 4340 material produces a higher maximum temperature of 754.5°C. While in terms of cooling rate, the cooling rate of AISI 4340 Steel is 0.14°C/s in air cooling media and 5.27°C/s in water cooling media. AISI 4140 steel produces a cooling rate of 0.08°C/s in air cooling media and 4.75°C/s in water cooling media. The average

temperature drop in air cooling media between AISI 4140 steel and AISI 4340 steel has a difference of 0.06°C/s, and in water cooling media, it has a difference of 0.52°C/s. AISI 4340 steel dissipates heat faster while AISI 4140 steel stores heat longer. This indicates that the greater the heat conductivity of a material, the higher the measured temperature and the faster the cooling rate.

Keywords: thermal conductivity; induction heating; maximum temperature; cooling rate; AISI steel.

1. PENDAHULUAN

Pemanas induksi (*induction heating*) merupakan metode pemanasan non-konvensional yang sudah sejak lama digunakan dalam industri untuk melelehkan logam. Hal ini dikarenakan sistem pemanas ini ramah lingkungan, lebih efisien, lebih aman, berdimensi kecil, dan memiliki waktu kerja yang singkat. Seiring dengan berjalannya waktu, pemanas induksi mulai digunakan dalam industri pembuatan pesawat terbang dan otomotif [1]. Pemanas induksi tidak hanya berfungsi untuk melelehkan logam, namun mulai banyak digunakan oleh perusahaan manufaktur untuk proses pengerasan logam khususnya bagian-bagian mesin seperti katup, poros engkol, poros bubungan, batang penghubung dan *ring starter*, transmisi, suspensi, dan lain sebagainya [2-4]. Sistem pemanas induksi memiliki tingkat keamanan yang tinggi dan rendahnya residu sehingga sangat kondusif dan mulai banyak diaplikasikan dalam dunia medis [5, 6].

Sistem pemanas induk telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yaitu Lucia dkk [7], maupun Sandesh [8] yang bertujuan untuk mengetahui perbandingan efek pemanasan induksi dengan pemanasan LPG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi pemanasan induksi lebih efektif dan ekonomis dibandingkan pemanasan LPG. Pada tahun 2018, Smusz dkk [9] melakukan penelitian tentang pengaruh kondisi pemanasan terhadap distribusi temperatur pelat baja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pemanasan benda kerja sangat dipengaruhi oleh pada frekuensi dan intensitas arus yang diinduksi, panas spesifik material, permeabilitas magnetik material, dan resistensi material terhadap aliran arus. Piroi dkk [10] menganalisis proses pemanasan atau peleburan menggunakan sistem pemanas induksi dengan variasi frekuensi berdasarkan temperatur spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi akan semakin besar bergantung pada temperatur yang disebabkan oleh variasi permeabilitas magnetik (kemampuan magnetik spesimen) dan resistivitas material (kemampuan menghantarkan arus listrik). Luozzo dkk [11] dalam penelitiannya bertujuan untuk melapisi/mengkombinasikan material baja karbon tubular dan material amorf sebagai bahan pelapis dengan ketebalan 20 m. Pemanasan induksi dan argon digunakan untuk proses tersebut. Pengambilan data berupa frekuensi menunjukkan bahwa terdapat dua tahap yang terjadi, yaitu tahap pertama adalah tahap feromagnetik sedangkan tahap kedua adalah paramagnetik dimana kurva frekuensi yang terbentuk cenderung asimtotik. Pada tahun 2022, Amarulloh dkk [12] melakukan penelitian tentang pengaruh daya yang digunakan pemanas induksi dan diameter spesimen uji terhadap temperatur dan frekuensi yang dihasilkan selama proses pemanas induksi pada baja AISI 4140. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar daya pemanas induksi maka semakin cepat suhu maksimal dapat tercapai. Selain itu, dimensi spesimen uji juga berpengaruh terhadap besar frekuensi yang dihasilkan selama proses pemanasan.

Penelitian yang berkaitan dengan pemanasan induksi telah dilakukan oleh banyak peneliti sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya dalam bentuk frekuensi dan arus pada kumparan berpengaruh terhadap laju pemanasan induksi. Selain itu, jenis material yang dipanaskan juga berpengaruh terhadap proses pemanasan induksi. Sifat medan magnet suatu bahan sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia, proses perlakuan panas, ukuran butir, frekuensi, intensitas medan magnet dan temperatur [13]. Peneliti sebelumnya yaitu Kocich [14] juga menguatkan bahwa material yang memiliki sifat *paramagnetic* dan *ferromagnetic* berpengaruh terhadap proses pemanasan induksi.

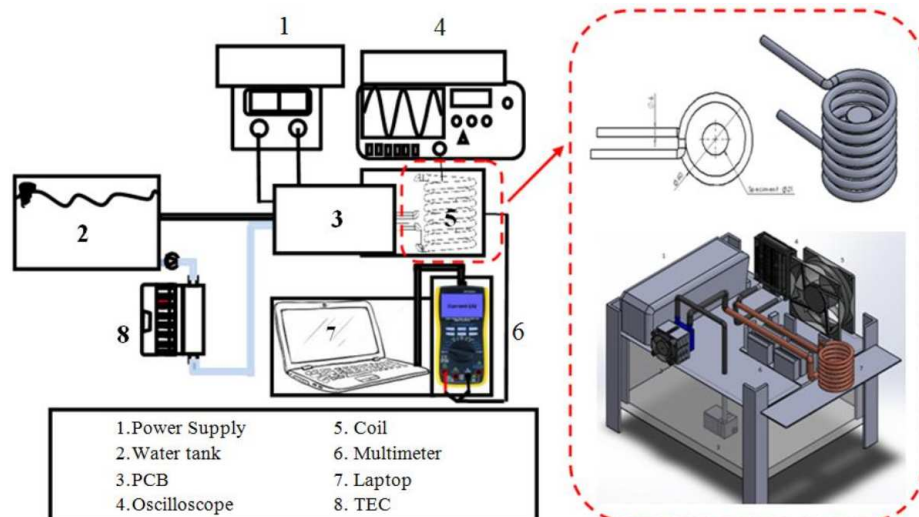
Beberapa peneliti sebelumnya menyatakan bahwa jenis material sangat berpengaruh terhadap proses pemanasan induksi. Namun demikian, pengaruh sifat termal suatu material seperti konduktivitas panas terhadap karakteristik suhu maksimal yang dapat tercapai dan laju pendinginan pada proses pemanasan induksi masih jarang diteliti.

Baja AISI 4140 dan baja AISI 4340 merupakan jenis baja sering digunakan dalam penggunaan bahan utama poros dan roda gigi. Baja jenis ini umumnya mampu menahan korosi karena baja AISI merupakan baja paduan dari kromium (Cr) dan molibdenum (Mo). Baja ini dapat dikeraskan melalui proses perlakuan panas (*heat treatment*) kemudian dilakukan proses pendinginan yang cepat dengan media pendingin tertentu. Semakin cepat laju pendinginan maka berdampak terhadap perubahan sifat fisik dan mekanik seperti struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik dari material tersebut [15]. Oleh karena itu, peneliti mencoba untuk mengkaji lebih dalam sehingga dapat memberikan informasi yang akurat mengenai pengaruh konduktivitas panas dan media pendingin terhadap suhu maksimal dan laju pendinginan pada proses *induction heating* baja AISI 4140 dan baja 4340.

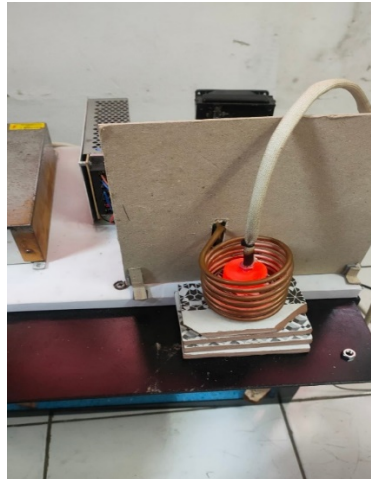
2. METODE

Skema alat pada penelitian pengaruh konduktivitas panas pada proses *induction heating* terhadap laju pemanasan, temperatur maksimal dan laju pendinginan pada baja AISI 4140 dan baja 4340 ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 2 menunjukkan proses pemanasan induksi pada spesimen baja AISI 4140.

Pengujian komposisi kimia pada spesimen baja AISI 4140 dan baja AISI 4340 dilakukan di laboratorium pengujian Politeknik Manufaktur Ceper Klaten berdasarkan standar ASTM E 415-08 menggunakan alat Spektrometer Emisi Hilger. Hasil dari pengujian komposisi kimia pada material baja AISI 4140 dan 4340 dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 2 menunjukkan bahwa baja AISI 4140 memiliki sifat koefisien ekspansi termal (CTE) dan kapasitas panas spesifik sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan baja AISI 4340. Namun demikian, konduktivitas panas pada baja AISI 4340 lebih tinggi dibandingkan baja AISI 4140.



Gambar 1. Skema alat penelitian [12]



Gambar 2. Proses pemanasan induksi pada spesimen baja AISI 4140

Tabel 1. Hasil uji komposisi kimia baja AISI 4140 dan baja AISI 4340

Unsur	Komposisi (%Weight)	
	Baja AISI 4140	Baja AISI 4340
C	0,38	0,37
Cr	0,80	0,70
Fe	96,78	95,19
Mn	0,75	0,60
Mo	0,15	0,20
Si	0,15	0,15
Ni	-	1,65
P	0,035	0,035

Tabel 2. Spesifikasi termal baja AISI 4140 dan baja AISI 4340

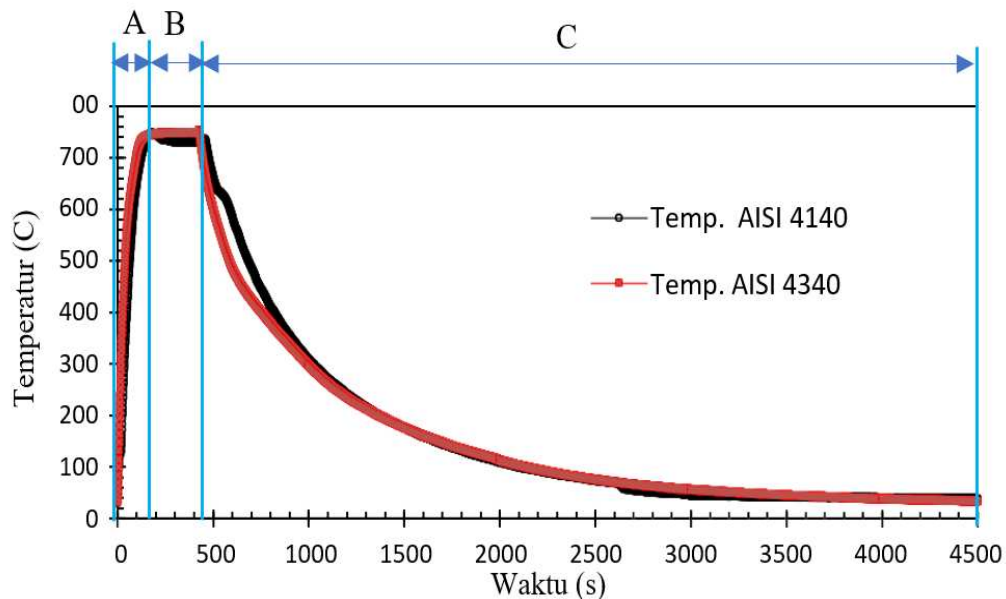
Jenis Termal	AISI 4140	AISI 4340
<i>CTE</i>	14,6 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	14,5 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$
<i>Specific heat capacity</i>	0,561 J/g $^{\circ}\text{C}$	0,475 J/g $^{\circ}\text{C}$
<i>Thermal conductivity</i>	42,6 W/m.K	44,5 W/m.K

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

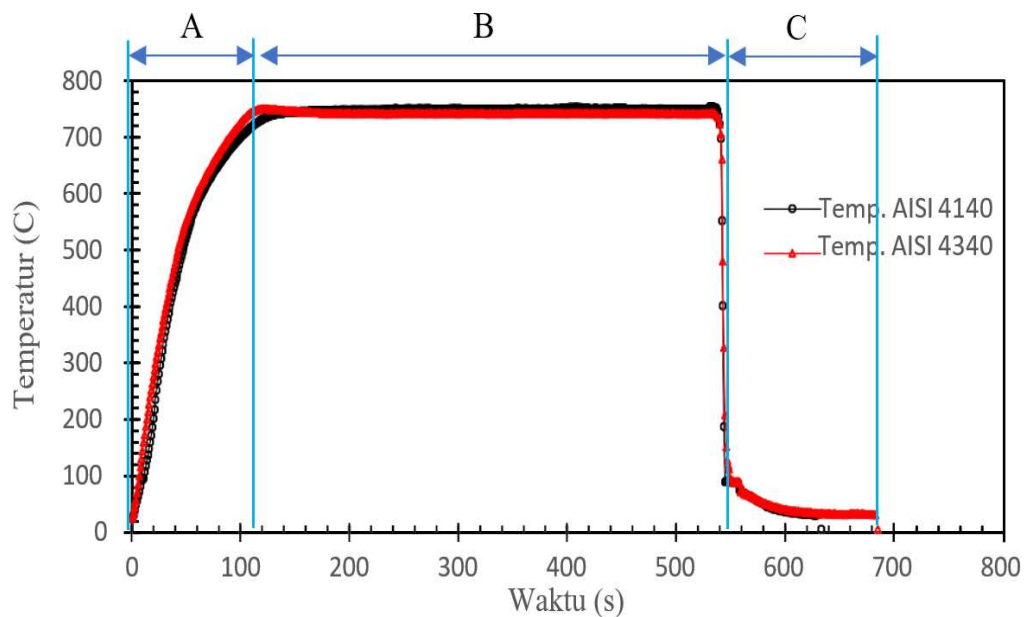
3.1. Profil Temperatur

Pengambilan data temperatur pada spesimen uji dilakukan bertujuan untuk mengetahui laju pemanasan dan pendinginan material ketika dipanaskan menggunakan pemanas induksi. Pengukuran dilakukan pada pusat spesimen baja memanfaatkan *thermocouple* yang dirangkai dengan *Arduino Data Logger* dan terhubung ke komputer, penggunaan *Arduino Data Logger* tersebut agar pengukuran temperatur dapat diambil secara *real time*. Pengambilan data suhu dilakukan selama proses eksperimen berlangsung yakni untuk pendinginan udara 4500 detik sedangkan untuk pendinginan air

selama 700 detik dengan interval per 1 detik. Hasil dari pengukuran tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Hasil pengambilan data temperatur spesimen ketika proses pendinginan udara



Gambar 4. Hasil pengambilan data temperatur spesimen ketika proses pendinginan air

Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan hasil pengambilan suhu pada spesimen uji ketika proses eksperimen berlangsung. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa dalam proses pemanasan hingga pendinginan terbagi menjadi tiga area. Area A merupakan area pemanasan (*transient area*), area B merupakan stabil (*steady state area*) dan area C merupakan pendinginan (*cooling area*).

Area pemanasan terjadi peningkatan suhu secara cepat pada baja AISI 4140 dan AISI 4340. Terukur bahwa suhu maksimal yang diperoleh baja AISI 4140 berbeda dengan baja AISI 4340 yaitu sebesar 747,75°C dan 754,5°C. Adanya perbedaan suhu

maksimal yang terukur tersebut dimungkinkan karena adanya perbedaan nilai konduktivitas panas yang berbeda antara material baja AISI 4140 dengan AISI 4340 yaitu sebesar 42,6 W/m.K dan 44,5 W/m.K. Konduktivitas panas berpengaruh terhadap kemampuan material untuk menghantarkan panas dari suatu titik temperatur yang tinggi menuju temperatur yang rendah. Hal ini dikarenakan semakin tinggi konduktivitas panas material maka semakin material tersebut mendistribusikan panas atau semakin cepat laju pemanasannya [16]. Walaupun perbedaan konduktivitas panas antara baja AISI 4140 dengan AISI 4340 sebesar 1,9 W/m.K, tetapi mampu memberikan dampak terhadap suhu maksimal yang terukur dengan selisih suhu sebesar 6,75°C.

Area stabil atau *steady state area* merupakan area dimana suatu material telah mencapai suhu maksimal. Fase ini material mengalami kehilangan sifat magnetik permanennya sehingga tidak memungkinkan terjadinya kenaikan suhu.

Area pendinginan merupakan proses pendinginan yang terjadi dari suatu material setelah proses pemanasan induksi dihentikan. Media pendingin sangat berpengaruh terhadap laju penurunan suhu dari suatu material.

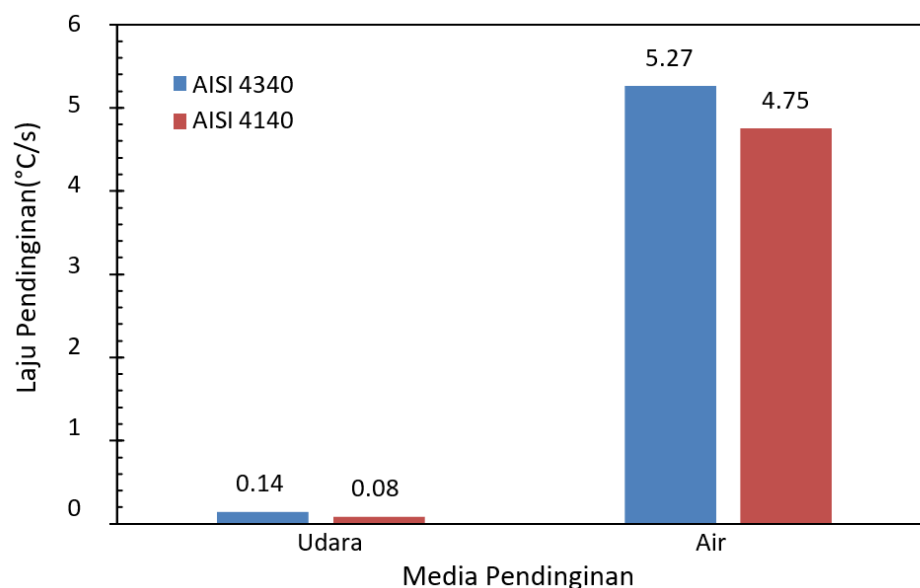
3.2. Laju Pendinginan Rata-Rata (*Cooling Rate*)

Tabel 3 merupakan hasil perhitungan penurunan suhu rata-rata yang terjadi pada spesimen uji ketika tahap pendinginan berlangsung. Terdapat 2 metode pendinginan yang digunakan yaitu pendinginan udara dan pendinginan air.

Tabel 3. Hasil pendinginan suhu rata-rata spesimen

Material	Media Pendingin	
	Udara (°C/s)	Air (°C/s)
AISI 4140	0,08	4,75
AISI 4340	0,14	5,27

Pembacaan laju penurunan suhu rata pada spesimen yang ditunjukkan pada Tabel 3 tersebut dibuat grafik agar memudahkan perbandingan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Laju pendinginan rata-rata spesimen uji

Gambar 4 menunjukkan bahwa media pendingin menggunakan air jauh lebih cepat terjadi penurunan suhu dibandingkan dengan udara. Pendinginan menggunakan udara menghasilkan laju penurunan suhu pada baja AISI 4140 sebesar $0,08^{\circ}\text{C/s}$ dan sebesar $4,75^{\circ}\text{C/s}$ menggunakan air. Baja AISI 4340 dimana laju penurunan suhu sebesar $0,14^{\circ}\text{C/s}$ menggunakan udara dan sebesar $5,27^{\circ}\text{C/s}$ menggunakan air. Hal ini dikarenakan Selain itu, sebuah fenomena terjadi di area pendinginan dimana laju penurunan suhu rata-rata yang terjadi antara baja AISI 4140 dengan baja AISI 4340 berbeda. Penurunan suhu rata-rata pada media pendingin udara antara baja AISI 4140 dengan baja AISI 4340 memiliki perbedaan sebesar $0,06^{\circ}\text{C/s}$. Sedangkan pada media pendingin air memiliki perbedaan sebesar $0,52^{\circ}\text{C/s}$. Laju pendinginan baja AISI 4340 jauh lebih cepat dibandingkan dengan baja AISI 4140 pada media pendinginan udara ataupun air. Hal ini dikarenakan semakin tinggi konduktivitas panas material maka semakin material tersebut mendistribusikan panas atau semakin cepat laju pendinginannya [16]. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat diketahui bahwa penggunaan sistem pemanas induksi dengan koil dapat menghasilkan temperatur maksimum pada baja AISI 4140 dan baja 4340 berdiameter 26 mm hanya dalam kurun waktu kurang dari 200 detik. Dengan demikian, pemanas induksi memiliki efisiensi yang sangat tinggi dibandingkan proses pemanas konvensional dan sangat menguntungkan bagi industri manufaktur otomotif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Perbedaan konduktivitas panas pada baja AISI 4140 dan baja AISI 4340 berpengaruh terhadap pencapaian suhu maksimal yang terukur ketika material dipanaskan menggunakan proses *Induction Heating*. Hal ini terbukti suhu maksimal yang terukur untuk masing-masing spesimen uji berbeda, ketika menggunakan baja AISI 4140 suhu maksimal yang tercapai adalah $747,75^{\circ}\text{C}$ dan suhu maksimal yang terukur adalah $754,5^{\circ}\text{C}$ ketika spesimen menggunakan baja AISI 4340. Walaupun perbedaan konduktivitas panas antara baja AISI 4140 dengan AISI 4340 sebesar $1,9 \text{ W/m.K}$, tetapi mampu memberikan dampak terhadap suhu maksimal yang terukur dengan selisih suhu sebesar $6,75^{\circ}\text{C}$.
2. Perbedaan konduktivitas panas pada baja AISI 4140 dan baja AISI 4340 berpengaruh terhadap laju pendinginan rerata ketika material dipanaskan menggunakan proses *Induction Heating* lalu didinginkan dengan media pendingin yang berbeda. Laju pendinginan baja AISI 4340 sebesar $0,14^{\circ}\text{C/s}$ pada media pendingin udara dan $5,27^{\circ}\text{C/s}$ pada media pendingin air. Sedangkan baja AISI 4140 menghasilkan laju pendinginan $0,08^{\circ}\text{C/s}$ pada media pendingin udara dan $4,75^{\circ}\text{C/s}$ pada media pendingin air. Penurunan suhu rata-rata pada media pendingin udara antara baja AISI 4140 dengan baja AISI 4340 memiliki perbedaan sebesar $0,06^{\circ}\text{C/s}$ dan pada media pendingin air memiliki perbedaan sebesar $0,52^{\circ}\text{C/s}$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Vishnuram, G. Ramachandiran, T. Sudhakar Babu, and B. Nastasi, "*Induction heating in domestic cooking and industrial melting applications: A systematic review on modelling, converter topologies and control schemes*," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6634, 2021.
- [2] M. C. Song and Y. H. Moon, "*Coupled electromagnetic and thermal analysis of induction heating for the forging of marine crankshafts*," *Applied Thermal Engineering*, vol. 98, pp. 98-109, 2016.

- [3] R. K. Janutienė and D. Mažeika, "Modelling of induction heating of steel work piece for forging of crankshaft," *Materials Science*, vol. 24, no. 3, pp. 345-350, 2018.
- [4] S. M. Park, E. Jang, D. Joo, and B. K. Lee, "Power curve-fitting control method with temperature compensation and fast-response for all-metal domestic induction heating systems," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2915, 2019.
- [5] S. C. Huang, Y. Y. Chang, Y. J. Chao, Y. S. Shan, X. Z. Lin, and G. B. Lee, "Dual-row needle arrays under an electromagnetic thermotherapy system for bloodless liver resection surgery," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 59, no. 3, pp. 824-831, 2011.
- [6] L. Tonthat, Y. Yamamoto, F. Aki, H. Saito, and K. Mitobe, "Thermosensitive ferromagnetic implant for hyperthermia using a mixture of magnetic micro-/nanoparticles," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 7, pp. 1-6, 2018.
- [7] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, 2013.
- [8] K. Sandesh, R. Shishir, and C. V. Rao, "Optimization and comparison of induction heating and LPG assisted acid pretreatment of cocoa pod for ABE fermentation," *Fuel*, vol. 262, p. 116499, 2020.
- [9] R. Smusz, T. Trzepieciński, T. Malinowski, and T. Pieja, "Experimental investigations of induction heating in warm forming of stainless steel sheets," *Tehnički vjesnik*, vol. 25, no. Supplement 2, pp. 312-318, 2018.
- [10] I. Piroi, E. Spunei, C.-P. Chioncel, E. Răduca, and F. Piroi, "Controlling the variable frequency induction heating," in *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2016, pp. 469-473.
- [11] N. Di Luozzo, M. Fontana, and B. Arcondo, "Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 536, pp. S564-S568, 2012.
- [12] A. Amarullo et al., "Effect of power and diameter on temperature and frequency in induction heating process of AISI 4140 steel," *Mechanical Engineering for Society and Industry*, vol. 2, no. 1, pp. 26-34, 2022.
- [13] K. Lee, S. Park, M. Huh, J.-S. Kim, and O. Engler, "Effect of texture and grain size on magnetic flux density and core loss in non-oriented electrical steel containing 3.15% Si," *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 354, pp. 324-332, 2014.
- [14] R. Kocich, "Design and optimization of induction heating for tungsten heavy alloy prior to rotary swaging," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 93, p. 105353, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105353>.
- [15] M. Andreansyah, R. D. Anjan, and V. Naubnome, "Pengaruh Proses Heat Treatment (Quenching dan Tempering) Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Baja Karbon Menengah," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 7864-7872, 2024.
- [16] K. S. Kumar, "Analytical modeling of temperature distribution, peak temperature, cooling rate and thermal cycles in a solid work piece welded by laser welding process," *Procedia materials science*, vol. 6, pp. 821-834, 2014.