

Analisis Perbandingan Perpindahan Panas Jenis Fluida Air dan Udara Pada Proses Pendinginan Baja Secara *Eksternal Forced Convection*

Afif Fachrudin^{1*}, Deri Teguh Santoso², Don Joean Iskandar³

^{1,2,3}Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang

* Penulis Korespondensi, email: 2110631150094@student.unsika.ac.id

Received: 17/05/2025

Revised: 30/05/2025

Accepted: 02/06/2025

Abstract. The cooling process is a crucial stage in materials engineering to determine the microstructure and mechanical properties of steel. This study analyzes the comparative efficiency of heat transfer between water and air as cooling fluids during the external forced convection cooling of steel. The methodology involves calculating thermal parameters such as Reynoldss number, Nusselt number, convection coefficient, and heat transfer rate. The results show that water yields a higher heat transfer rate of 334.1 kW compared to air at 323.5 kW. This difference is primarily due to water's higher thermal conductivity. These findings suggest that water is more effective as a cooling medium in the heat treatment process of steel through external forced convection.

Keywords: Heat transfer, Forced convection, Steel cooling, Water, Air, Nusselt number

Abstrak. Proses pendinginan merupakan tahap penting dalam rekayasa material untuk menentukan struktur mikro dan sifat mekanik baja. Penelitian ini menganalisis perbandingan efisiensi perpindahan panas antara fluida air dan udara dalam proses pendinginan baja secara konveksi paksa eksternal. Metode yang digunakan meliputi perhitungan parameter termal seperti bilangan *Reynoldss*, bilangan *Nusselt*, koefisien konveksi, dan laju perpindahan panas. Hasil analisis menunjukkan bahwa fluida air menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih besar yaitu 334,1 kW dibandingkan udara yang sebesar 323,5 kW. Hal ini disebabkan oleh konduktivitas termal air yang lebih tinggi dibandingkan udara. Temuan ini menunjukkan bahwa air lebih efektif digunakan sebagai media pendingin dalam proses perlakuan panas baja melalui konveksi paksa eksternal.

Kata Kunci: Perpindahan panas, Konveksi paksa, Pendinginan baja, Air, Udara, Bilangan *Nusselt*.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat saat ini menuntut inovasi dalam rekayasa material. Rekayasa material diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanis material [1]. Dalam rekayasa material, pertimbangan tidak hanya pada sifat material itu sendiri, tetapi juga pada proses pembuatan yang ekonomis. Salah satu proses rekayasa material adalah *Thermo Mechanical Control Process* (TMCP). TMCP menggabungkan proses pengecoran, pengerollan, dan perlakuan panas terkendali dalam satu lini produksi sehingga didapatkan material yang diinginkan. Salah satu proses penting dalam pengolahan logam, khususnya baja, adalah proses perlakuan panas yang melibatkan tahap pemanasan dan pendinginan. Proses pendinginan berperan besar dalam

menentukan struktur mikro dan sifat mekanik akhir dari baja, seperti kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan.

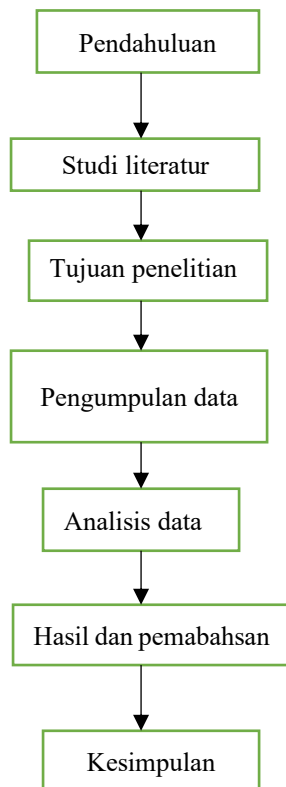
Penelitian T. Sourmail [2], menunjukkan bahwa baja tahan aus dapat dibuat dengan proses austempering pada temperatur rendah dan penambahan unsur paduan utama karbon, mangan, silikon, dan kromium. Untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan, maka diperlukan struktur mikro yang sesuai. Struktur mikro dapat diperoleh melalui proses perlakuan panas dengan cara memanaskan baja hingga temperatur austenit stabil dan ditahan beberapa menit, kemudian didinginkan dengan proses pendinginan tertentu.

Salah satu metode pendinginan yang umum digunakan adalah konveksi paksa eksternal, di mana fluida seperti air atau udara digunakan untuk

mempercepat laju pelepasan panas dari permukaan baja. Pemilihan fluida pendingin menjadi faktor penting karena setiap fluida memiliki karakteristik termal yang berbeda, seperti konduktivitas termal, viskositas, dan kapasitas panas spesifik, yang memengaruhi efektivitas perpindahan panas.

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui perpindahan panas pada proses pendinginan baja secara eksternal forced convection dengan fluida air dan udara paksa dapat dianalisis, dan mengetahui diantara air dan udara yang lebih besar nilainya dalam memindahkan panas pada proses pendinginan baja.

II. METODOLOGI



Gambar 1. Diagram alir penelitian

A. Pendekatan penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis termodinamika dan perpindahan panas. Pendekatan ini dipilih untuk menganalisis laju perpindahan panas antara dua jenis fluida (air dan udara) dalam proses pendinginan baja secara konveksi paksa eksternal. Fokus utama adalah perhitungan parameter termal yang mempengaruhi laju transfer panas pada kedua fluida.

B. Teknik pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Data sifat-sifat termal fluida, yang diambil dari literatur yang relevan mengenai properti fisik air dan udara pada suhu dan tekanan tertentu.
2. Data eksperimental, yang mencakup temperatur baja, panjang dan lebar plat baja, suhu fluida, dan kecepatan fluida yang digunakan dalam eksperimen.

C. Alat dan instruments yang digunakan

1. Thermocouples untuk pengukuran suhu pada permukaan baja dan fluida pendingin.
2. Anemometer untuk mengukur kecepatan fluida.
3. Peralatan Komputer dan Software untuk perhitungan numerik.

D. Analisis data

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan persamaan-persamaan yang mengacu pada:

1. Bilangan *Reynoldss* untuk menentukan jenis aliran fluida (laminar atau turbulen).
2. Bilangan *Nusselt* untuk mengukur efisiensi perpindahan panas.
3. Koefisien konveksi untuk mengetahui kemampuan fluida dalam mentransfer panas.
4. Laju perpindahan panas ($\dot{Q}$) untuk membandingkan efektivitas air dan udara dalam proses pendinginan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Parameter fluida dan baja

Berikut adalah parameter - parameter yang diketahui sebelum dilakukan analisis perhitungan, di tunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter fluida dan baja

NO	PARAMETER	SIMBOL	NILAI
1	Temperatur baja	T_s	800 °C
2	Panjang baja	L	25 m
3	Lebar baja	w	3,5 m
4	Temperatur air dan udara	T_∞	25 °C
5	Kecepatan air dan udara	V	3 m/s
6	Densitas udara	ρ_{udara}	0,5153 kg/m ³
7	Konduktivitas termal udara	k_{udara}	0,0509 w/m.k
8	<i>Prandtl number</i> udara	Pr_{udara}	0,6953
9	Viskositas kinematik udara	ν_{udara}	6,4135 x 10 ⁻⁵ m ² /s
10	Densitas air	ρ_{air}	0,3209 kg/m ³
11	Konduktivitas termal air	k_{air}	0,0562 w/m.k
12	<i>Prandtl number</i> air	Pr_{air}	0,9224
13	Viskositas kinematik air	ν_{air}	7,8133 x 10 ⁻⁵ m ² /s

B. Perhitungan

Perhitungan dilakukan pada dua jenis fluida yang berbeda yaitu air dan udara. Perhitungan ini dimulai dari menghitung perpindahan panas konveksi oleh fluida udara tekanan 1 atm terlebih dahulu.

Langkah pertama untuk menghitung perpindahan panas eksternal pada plat datar yaitu menghitung temperatur film

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{800^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{2} = 412,5^\circ\text{C}$$

Setelah temperatur film ditemukan selanjutnya mencari properties fluida pada temperatur film tersebut (ditunjukkan pada Tabel 1)

1. Perhitungan fluida udara

Perpindahan panas proses pendinginan baja dengan fluida udara. Mencari nilai *Reynoldss* number.

$$Re_L = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

$$= \frac{3 \frac{m}{s} \cdot 25m}{6,4135 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$= 1,1694 \times 10^6$$

Bilangan reynold menunjukkan angka > 5 x 10⁵ maka jenis alirannya adalah turbulen, maka rumus bilangan *Nusselt* yang digunakan adalah

$$Nu = \frac{h \cdot L}{K} = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3)$$

$$= 0,037 \cdot (1,1694 \times 10^6)^{0,8} \cdot 0,6953^{1/3}$$

$$Nu = 2344,3$$

Setelah bilangan *Nusselt* diketahui barulah dapat dicari besar koefisien konveksinya.

$$h = \frac{K}{L} Nu \quad (4)$$

$$= \frac{0,0509 \frac{W}{m} \cdot k}{25m} \cdot 2344,3$$

$$= 4,77 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

Setelah koefisien konveksi diketahui barulah dapat dicari besar perpindahan panas yang terjadi.

$$\dot{Q} = h \cdot A (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$\dot{Q} = 4,77 W/m^2 \cdot K (25 \cdot 3,5) m \cdot (800 - 25)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 323465,6 \text{ Watt} = 323,5 \text{ kW}$$

2. Perhitungan fluida air

Perpindahan panas proses pendinginan baja dengan fluida air, mencari nilai *Reynoldss* number.

$$Re_L = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

$$= \frac{3 \frac{m}{s} \cdot 25m}{7,813 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$= 9,599 \times 10^5$$

Bilangan *Reynolds* menunjukkan angka 5 x 10⁵ maka jenis alirannya adalah turbulen, maka rumus bilangan *Nusselt* yang digunakan adalah

$$Nu = \frac{h \cdot L}{K} = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3)$$

$$= 0,037 \cdot (9,599 \times 10^5)^{0,8} \cdot 0,9224^{1/3}$$

$$Nu = 2198,3$$

Setelah bilangan *Nusselt* diketahui barulah dapat dicari besar koefisien konveksinya.

$$h = \frac{k}{L} Nu \quad (4)$$

$$= \frac{0,0562 \frac{W}{m} \cdot k}{25m} \cdot 2198,3$$

$$= 4,94 \frac{W}{m^2} \cdot K$$

Setelah koefisien konveksi diketahui barulah dapat dicari besar perpindahan panas yang terjadi.

$$\dot{Q} = h \cdot A (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$\dot{Q} = 4,94 W/m^2 \cdot K (25 \cdot 3,5) m \cdot (800 - 25)^\circ C$$

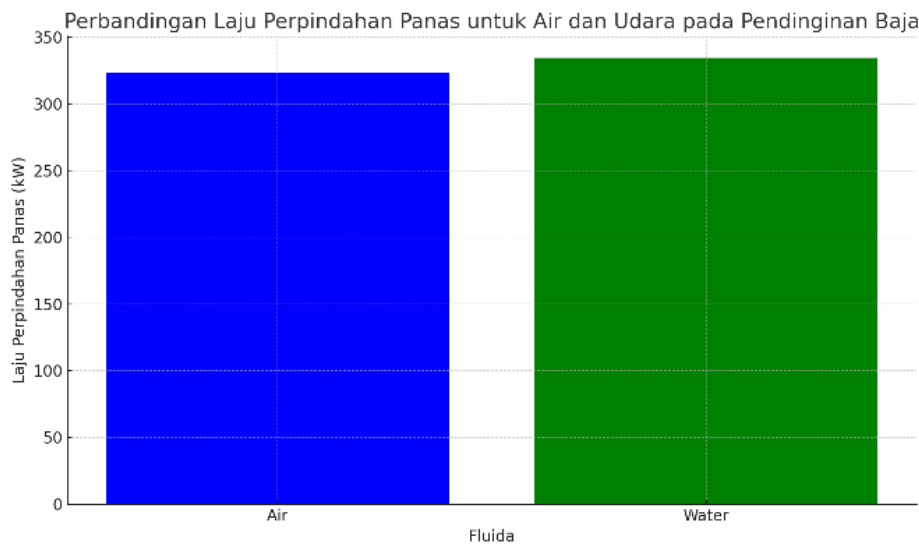
$$\dot{Q} = 334993,75 \text{ Watt} = 334,1 \text{ kW}$$

C. Perbandingan hasil perhitungan

Air terbukti memberikan perpindahan panas lebih tinggi dibandingkan udara, yang disebabkan oleh konduktivitas termal air yang lebih besar

dibandingkan udara. menunjukkan bahwa media pendingin air jauh lebih cepat terjadi penurunan suhu dibandingkan dengan udara [8]. Pendinginan menggunakan air menghasilkan struktur martensit yang lebih dominan, yang disebabkan oleh pendinginan cepat, dan menghasilkan kekerasan lebih tinggi dibandingkan pendinginan udara. Pendinginan menggunakan udara menghasilkan transformasi fasa yang lebih lambat, menghasilkan struktur ferit dan perlit, yang memiliki kekuatan lebih rendah [1]. Nilai kekerasan yang paling tinggi terdapat pada pendinginan (*quenching*) media air [9]. Media pendingin air juga memberikan kekuatan tarik dibanding media pendingin udara [10].

Berikut adalah gambar 2. grafik perbandingan hasil perhitungan laju perpindahan panas untuk air dan udara:



Gambar 2. Grafik perbandingan laju perpindahan panas antara air dan udara

Grafik ini menunjukkan perbandingan laju perpindahan panas (dalam satuan kW) antara dua jenis fluida, yaitu air dan udara, pada proses pendinginan baja menggunakan metode konveksi paksa eksternal. Dari grafik ini, terlihat bahwa fluida air memiliki laju perpindahan panas yang lebih tinggi (334,1 kW) dibandingkan dengan udara (323,5 kW). Perbedaan ini disebabkan oleh konduktivitas termal air yang lebih tinggi, yang memungkinkan transfer panas yang lebih efisien.

D. Perbandingan dengan penelitian terdahulu dan teori dasar yang relevan

1. Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Penelitian ini sejalan dengan temuan-temuan dari Rasyidy et al. (2017) yang menunjukkan bahwa media pendingin dengan konduktivitas termal tinggi, seperti air, lebih efisien dalam proses pendinginan dibandingkan dengan udara. Temuan serupa juga ditemukan oleh Basori (2018) yang menunjukkan bahwa air menghasilkan laju

perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan udara dalam proses *quenching* pada baja.

2. Efektivitas air sebagai media pendingin

Air memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi (0,0562 W/m.K) dibandingkan dengan udara (0,0509 W/m.K). Konduktivitas termal yang lebih tinggi membuat air lebih efektif dalam mentransfer panas dari permukaan baja ke fluida sekitarnya. Hal ini menyebabkan suhu baja lebih cepat turun, yang sangat penting dalam proses pendinginan untuk memperoleh struktur mikro yang diinginkan (seperti martensit) dengan kekerasan yang lebih tinggi.

3. Pentingnya kecepatan fluida dalam proses pendinginan

Selain konduktivitas termal, kecepatan fluida juga memengaruhi laju perpindahan panas. Penelitian ini mengukur kecepatan fluida sebesar 3 m/s untuk kedua fluida, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi perpindahan panas. Peningkatan kecepatan fluida akan mempercepat aliran fluida dan meningkatkan konveksi, yang berkontribusi pada laju transfer panas yang lebih tinggi.

4. Pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik baja

Seperti yang dijelaskan oleh Sourmail (2013), struktur mikro yang diperoleh setelah proses pendinginan memengaruhi sifat mekanik baja, seperti kekuatan dan ketangguhan. Pada proses pendinginan menggunakan air, terjadi pembentukan struktur martensit yang lebih dominan karena pendinginan yang cepat, yang menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi pada baja. Sebaliknya, pendinginan menggunakan udara menghasilkan struktur ferit dan perlit, yang cenderung memiliki kekuatan yang lebih rendah.

5. Implikasi praktis dalam industri

Berdasarkan hasil ini, untuk proses pendinginan baja yang memerlukan waktu yang singkat dan efisiensi tinggi, disarankan untuk menggunakan air sebagai media pendingin utama. Namun, penggunaan air dalam proses pendinginan yang

terlalu cepat bisa meningkatkan risiko deformasi atau retak pada baja. Oleh karena itu, kontrol terhadap parameter seperti laju aliran dan suhu fluida sangat penting untuk menghindari kerusakan material.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada perhitungan yang sudah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa fluida air ternyata memiliki nilai perpindahan panas yang lebih besar yaitu 334,1 kW dibandingkan dengan fluida udara yaitu 323,5kW penyebab utamanya adalah nilai konduktivitas termal fluida air lebih besar yaitu 0,0562 w/m.k dibandingkan dengan udara yaitu 0,0509 w/m.k.

Untuk proses pendinginan baja yang membutuhkan efisiensi tinggi dan waktu pendinginan yang singkat, disarankan menggunakan air sebagai media pendingin utama dalam sistem konveksi paksa eksternal. Namun, perlu juga diperhatikan risiko deformasi atau retak akibat pendinginan yang terlalu cepat. Oleh karena itu, pengendalian parameter pendinginan seperti laju aliran dan suhu fluida sangat penting. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi penggunaan fluida alternatif seperti nanofluida atau campuran air dan zat aditif yang dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas tanpa meningkatkan risiko kerusakan material.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas dukungan, arahan, maupun bantuan yang telah diberikan oleh dosen pembimbing Bapak Deri Teguh Santoso, S.T.,M.T. dan ucapan terima kasih pada teman-teman yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Rasyidy, Kharisma Y., and Suwarno Suwarno. "Pengaruh Temperatur Austenisasi dan Proses Pendinginan terhadap Strukturmikro dan Proses Pendinginan Baja Paduan 05CCrMnSi." Jurnal Teknik ITS, vol. 6, no. 2, 2017,
- [2] Sourmail, T., et al. "Novel nanostructured bainitic steel grades to answer the need for high-performance steel components (Nanobain)."

Research Fund for Coal and Steel Publications,
European Commission, 2013.

- [3] Umurani, Khairul, Arya R. Nasution, and D. Irwansyah. "Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Pada Saluran Segiempat Dengan Rusuk V 90 Derajat." *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol.4, no.1, pp. 37-46, Maret 2021
- [4] Cengel, Y., et al., *Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications*, Fifth Edition, New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [5] Effendi, Yafid, Reksi Pradana, and Bambang Setiawan. "Analisis Laju Perpindahan Panas Konveksi Pada Kondensor AC Konvensional ½ PK." *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 7, no.1, pp. 23-29, Januari-Juni 2023
- [6] Wijati, Linda, and Budi Utomo Kukuh Widodo. "Studi eksperimen perpindahan panas konveksi paksa pada berkas pin fin berpenampang circular dengan susunan aligned." *Jurnal Teknik ITS* vol. 8, No.1, 2019
- [7] Sari, Handini Novita, et al. "Analisa Proses Perpindahan Panas Konveksi Pada Mesin Pengereng Rempah-Rempah Otomatis." *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi* vo.9, no.1 pp. 176-183, April 2023
- [8] H. Haikal, T. P. . Kasih, and N. T. . Atmoko, "The Effect Of Thermal Conductivity And Cooling Media On Maximum Temperature And Cooling Rate In The Induction Heating Process Of AISI 4140 And 4340 Steel", *JTe*, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, April 2025.
- [9] Basori, Basori. "Pengaruh Media *Quenching* terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Paska Hardfacing." *Jurnal Kajian Teknik Mesin* vol. 3, no. 2, Agustus 2018
- [10] U. Pandapotan and M. Mulyadi, "Pengaruh Media Pendingin terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik menggunakan Pengelasan SMAW DCSP pada Material Pipa Baja Karbon SCH40 ", *Innovative*, vol. 3, no. 3, pp. 8, Feb 2024.