

RESPON PELAT TAHAN KOROSI AISI 304 *STAINLESS STEEL* TERHADAP *HIGH-TEMPERATURE FURNACE* DENGAN METODE RUNGE-KUTTA

RESPONSE OF AISI 304 CORROSION-RESISTANT STAINLESS STEEL PLATE TO HIGH-TEMPERATURE FURNACE USING THE RUNGE-KUTTA METHOD

Muhammad Badaruz Zaman^{1§}, Rofila El Maghfiroh²

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Yudharta Pasuruan, Indonesia [mbz@yudharta.ac.id]

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Indonesia [rofilaelmaghfiroh@polinema.ac.id]

[§]Corresponding Author

Received 21th Jan 2025; Accepted 03rd Jun 2025; Published 30th Jun 2025;

Abstrak

AISI 304 *stainless steel* merupakan material yang memiliki ketahanan korosi yang baik, sehingga material tersebut banyak digunakan diberbagai rekayasa teknik, termasuk pada suhu tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan waktu yang diperlukan pelat tahan korosi AISI 304 *stainless steel* untuk mencapai *temperature equilibrium* terhadap *high-temperature furnace* menggunakan Metode Runge-Kutta Orde Empat guna mendukung penggunaan material dalam industri. Penggunaan Metode Runge-Kutta Orde Empat memberikan hasil dengan tingkat akurasi yang tinggi tanpa memerlukan waktu komputasi yang berlebihan. Analisis terhadap pelat AISI 304 *stainless steel* menunjukkan bahwa material ini mencapai *temperature equilibrium* pada waktu $t = 50$ detik, karena penambahan suhu tidak signifikan. Pada saat waktu $t = 67$ detik, suhu pelat AISI 304 *stainless steel* telah mencapai 1599,04 K. Pelat AISI 304 *stainless steel* mencapai *high-temperature furnace* yaitu pada $T_f = 1600$ K saat waktu $t = 89$ detik.

Kata Kunci: AISI 304, high-temperature furnace, metode runge-kutta

Abstract

AISI 304 *stainless steel* is frequently used in a variety of engineering processes, including those that involve high temperatures, due to its good corrosion resistance. In order to facilitate the use of materials in industry, the Fourth Order Runge-Kutta method will be used to determine how long corrosion-resistant AISI 304 *stainless steel* plates will take to reach *temperature equilibrium* in a high-temperature furnace. High accuracy results are obtained by applying the Fourth Order Runge-Kutta method without requiring excessive computing time. Analysis of the AISI 304 *stainless steel* plate shows that this material reaches *equilibrium temperature* at time $t = 50$ seconds, due to the fact that the temperature rise is not significant. At $t = 67$ seconds, the AISI 304 *stainless steel* plate's temperature had risen to 1599.04 K. The high-temperature furnace is reached by the AISI 304 *stainless steel* plate at $T_f = 1600$ K at time $t = 89$ seconds.

Keywords: AISI 304, high-temperature furnace, runge-kutta method

1. Pendahuluan

Korosi merupakan permasalahan yang sering terjadi pada bahan besi dan baja. Lingkungan merupakan faktor utama yang mempengaruhi laju korosi. Lingkungan air laut atau asam dapat mempercepat laju korosi [1]. Dampak negatif dari korosi yaitu dapat menyebabkan penurunan umur pakai dan nilai ekonomis material tersebut [2]. Untuk menghindari kondisi tersebut, dalam bidang rekayasa teknik digunakan bahan tahan korosi.

Pelat AISI 304 *stainless steel* adalah salah satu bahan yang banyak digunakan dalam rekayasa teknik. AISI 304 merupakan baja *austenitic, chromium-nickel stainless steel*. Baja ini tahan terhadap korosi dan pada dasarnya bersifat nonmagnetic [3],[4]. Lembaran baja tahan korosi AISI 304 diaplikasikan dalam pembuatan tangki, kontainer, ruang pendingin, pencucian, pemanggangan dan furnitur logam industri. AISI 304 banyak diaplikasikan dalam desain arsitektur untuk peningkatan visual, seperti pada elevator dan fasad. Selain itu, untuk sistem perpipaan di industri pengelolaan makanan dan farmasi karena bersifat elastis dan mudah dibersihkan. AISI 304 juga digunakan untuk cerobong asap karena bersifat tahan panas. Namun, pada suhu yang sangat tinggi ketahanan korosi AISI 304 dapat menurun.

Pada suhu tinggi, Pelat AISI 304 dapat mengalami beberapa jenis korosi, diantaranya oksidasi, karbursasi dan sulfidasi. Oksidasi adalah reaksi antara logam dengan oksigen diudara yang membentuk lapisan oksida. Karbursasi ialah penyerapan karbon oleh logam pada suhu tinggi sehingga menyebabkan pengerasan dan penggetasan logam.

Sedangkan sulfidasi yaitu reaksi antara logam dengan sulfur pada suhu tinggi sehingga menyebabkan korosi yang parah [5].

Berdasarkan komposisi material penyusunnya, setiap bahan memiliki *specific heat capacity* bervariasi. *Specific heat capacity* adalah perubahan panas yang dibutuhkan untuk menaikkan satu derajat temperatur per unit massa [6]. Oleh karena itu, respon bahan terhadap panas eksternal untuk mencapai *equilibrium temperature* akan beragam. Salah satu metode untuk menghitung respon bahan terhadap panas yaitu menyelesaikan persamaan diferensial dengan menggunakan Metode Runge-Kutta.

Penelitian ini akan mengkalkulasi waktu pelat tahan korosi AISI 304 *stainless steel* mencapai *equilibrium temperature* terhadap *high-temperature furnace* menggunakan Metode Runge-Kutta Orde Empat. *Equilibrium temperature* diperoleh pada saat terjadi kontak termal antara dua sistem yang berbeda suhu awal hingga mencapai kesetimbangan termal, yaitu saat mencapai suhu yang sama. Selama proses tersebut terjadi transfer energi panas dari sistem yang memiliki suhu lebih tinggi menuju yang lebih rendah. Kondisi ini merupakan Hukum ke-0 Termodinamika [7].

Metode Runge-Kutta Orde Empat merupakan metode numerik yang dapat digunakan untuk mencari solusi dari persamaan diferensial biasa. Keunggulan utama metode Runge-Kutta Orde Empat adalah akurasinya yang tinggi dengan waktu komputasi yang cukup cepat.

Berikut adalah beberapa tahapan dari penelitian ini.

- Membentuk model matematika berupa persamaan diferensial yang menunjukkan hubungan antara perubahan suhu pada pelat AISI 304 *stainless steel* terhadap waktu.
- Mengumpulkan data sekunder tentang nilai *specific heat* pelat AISI 304 *stainless steel*.
- Melakukan prediksi nilai *specific heat* hingga mencapai *high-temperature furnace*.
- Menentukan hubungan antara suhu dari pelat AISI 304 *stainless steel* dan *specific heat* dengan persamaan regresi linier sederhana.
- Mensubstitusikan persamaan regresi linier sederhana yang telah diperoleh ke model matematika yang didapatkan sebelumnya.
- Melakukan simulasi numerik terhadap model matematika perubahan suhu pada pelat AISI 304 *stainless steel* terhadap waktu dengan Metode Runge-Kutta Orde Empat.
- Merepresentasikan hasil simulasi numerik yang telah diperoleh.

2. Landasan Teori

Pada landasan teori terdapat penjelasan singkat tentang AISI 304 *stainless steel*, Metode Runge-Kutta Orde Empat serta total energi panas pada pelat.

2.1 AISI 304 Stainless Steel

Stainless Steel type AISI 304 termasuk dalam golongan baja *austenitic* yang mempunyai sifat *nonmagnetic*. Baja ini memiliki nama lain X5CrNi18-10 dalam *European Standard*. Komposisi AISI 304 terdiri dari carbon 0.04% chromium 18.2% dan nickel 8.7%. Baja *austenitic* menyumbang sekitar 75% produksi baja *stainless steel*, sebagian besar diwakili oleh AISI 304. Baja *ferritic* menyumbang

25% sisa produksi baja tahan karat [3],[4],[8].

Komposisi kimia dan sifat fisik AISI 304 terdapat dalam Tabel 1. Komposisi kimia suatu material berpengaruh terhadap sifat mekaniknya. Karbon (C) merupakan pembentuk struktur *austenitic* yang kuat. Karbon mengurangi ketahanan terhadap korosi. Mangan (Mn) digunakan untuk peningkatan sifat *ductility*. Silicon (Si) berfungsi menaikkan *resistance to oxidation* pada suhu tinggi dan rendah. Krom (Cr) unsur yang sangat penting bagi *stainless steel*. Sifat *corrosion resistance* dipengaruhi oleh besarnya persentase krom. Krom tahan terhadap oksidasi suhu tinggi. Penambahan unsur nickel (Ni) adalah untuk menaikkan *ductility and toughness*. Nickel mampu mereduksi laju korosi sehingga bermanfaat pada lingkungan asam. Penambahan sulphur (S) adalah untuk meningkatkan sifat *machinability* [8].

Tabel 1. Komposisi kimia dan sifat fisik AISI 304

Chemical Composition	
Element	Weight %
C	0,08
Mn	2,00
Si	1,00
Cr	18,0 – 20,0
Ni	8,0 – 10,5
P	0,045
S	0,03
Physical Properties	
<i>Density</i>	8,027 kg/m ³
<i>Modulus of Elasticity in Tension</i>	193,000 MPa
<i>Modulus of Elasticity in Torsion</i>	86,200 MPa
<i>Thermal Conductivity</i>	100 °C 16.3 W/m.K 500 °C 21.5 W/m.K
<i>Melting Range</i>	1399 – 1454 °C
<i>Magnetic Permeability</i>	1.02 H/m

2.2 Metode Runge-Kutta Orde Empat

Metode Runge-Kutta Orde Empat adalah salah satu metode numerik untuk menentukan penyelesaian dari persamaan diferensial. Metode Runge-Kutta merupakan metode yang stabil artinya tidak menyimpang dari solusi eksak, metode ini mempertahankan bentuk yang sama dan tidak berbeda. Selain itu, Metode Runge-Kutta sangat akurat dan dapat digunakan untuk menyelesaikan hampir semua masalah persamaan diferensial biasa bahkan persamaan diferensial nonlinier [9].

Metode Runge-Kutta Orde Empat mempunyai persamaan yaitu

$$t_{i+1} = t_i + u(x_i, t_i)h \quad (1)$$

dengan t_i adalah nilai sebelumnya, t_{i+1} adalah nilai selanjutnya dengan ukuran langkah h . Fungsi $u(x_i, t_i)$ didefinisikan dalam Persamaan (2) berikut.

$$u(x_i, t_i) = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2)$$

dengan nilai k_1, k_2, k_3 , dan k_4 sebagai berikut.

$$k_1 = f(x_i, t_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, t_i + \frac{1}{2}k_1h\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, t_i + \frac{1}{2}k_2h\right)$$

$$k_4 = f(x_i + h, t_i + k_3h)$$

Semua nilai k berhubungan secara rekursi, artinya k_1 muncul dalam persamaan untuk k_2 , yang muncul lagi dalam persamaan k_3 dan seterusnya [10].

2.3 Total Energi Panas Pada Pelat

Energi adalah salah satu konsep penting yang tidak dapat dipisahkan dalam sains. Semua proses

fisik melibatkan energi. Energi suatu sistem adalah ukuran kemampuannya untuk melakukan pekerjaan. Istilah berbeda digunakan untuk menggambarkan energi yang terkait dengan kondisinya.

Energi kinetik adalah energi yang berhubungan dengan gerak. Energi Potensial adalah energi yang berkaitan dengan konfigurasi suatu sistem, dimana terdapat dua benda dengan jarak terpisah yang saling tarik menarik. Sedangkan energi panas terkait dengan gerakan acak atom, molekul, atau ion dalam sebuah sistem dan berhubungan erat dengan suhu sistem. Semakin cepat partikel-partikel ini bergerak, semakin besar energi panas yang terkandung dalam zat tersebut [6].

Tidak semua energi dapat disimpan, energi panas merupakan salah satu energi yang dapat disimpan. Penyimpanan energi panas atau yang juga dikenal sebagai penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage/TES*) adalah proses menyimpan energi dalam bentuk panas digunakan di lain waktu untuk proses pemanasan maupun pendinginan [11]. Teknologi ini memungkinkan energi panas yang berlebihan untuk disimpan dan digunakan kembali beberapa detik, menit, jam, hari, atau bahkan berbulan-bulan kemudian.

Total energi panas yang tersimpan dalam pelat adalah E_s , yang didefinisikan dalam Persamaan (3) berikut.

$$E_s = \rho V c_p T \quad (3)$$

dengan ρ adalah densitas, V adalah volume, T adalah suhu pelat dan c_p adalah *specific heat* yang bergantung pada suhu pelat.

Perubahan total energi panas terhadap waktu diperoleh dari persamaan berikut,

$$\frac{dE_s}{dt} = \rho V \frac{d}{dt} (c_p T) \quad (4)$$

dengan aturan turunan pertama fungsi aljabar, maka Persamaan (4) dapat dituliskan dalam Persamaan (5) berikut.

$$\frac{dE_s}{dt} = \rho V \left(c_p + T \frac{dc_p}{dT} \right) \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

Laju penyerapan energi radiasi oleh pelat sesuai hukum Stefan-Boltzmann tertulis dalam Persamaan (6) berikut.

$$q_{rad} = \sigma A (T_f^4 - T^4) \quad (6)$$

dengan konstanta Stefan-Boltzmann σ sebesar $5,676 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A adalah luas permukaan kedua sisi pelat dan T_f adalah *high-temperature furnace*.

Jika $\frac{dE_s}{dt} = q_{rad}$, maka dapat ditentukan perubahan suhu pelat terhadap waktu yang dinotasikan sebagai $\frac{dT}{dt}$.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sigma A (T_f^4 - T^4)}{\rho V \left(c_p + T \frac{dc_p}{dT} \right)} \quad (7)$$

Luas permukaan satu sisi pelat adalah L , sehingga $A = 2L$ dan $V = Ld$, dengan d adalah ketebalan pelat. Jadi didapatkan suatu kondisi yang secara matematis dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\frac{A}{V} = \frac{2}{d} \quad (8)$$

Berdasarkan Persamaan (8), maka Persamaan (7) dapat dituliskan dalam Persamaan (9) berikut [11].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\sigma}{\rho d} \frac{T_f^4 - T^4}{c_p + T \frac{dc_p}{dT}} \quad (9)$$

3. Hasil Dan Pembahasan

Sebuah pelat AISI 304 *stainless steel* mempunyai ketebalan pelat $d = 0,002 \text{ m}$ dan densitas $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$. Suhu awal pelat adalah $T_0 = 300 \text{ K}$ dan *high-temperature furnace* pelat adalah $T_f = 1600 \text{ K}$. Nilai *specific heat* dari pelat AISI 304 *stainless steel* sesuai tabel berikut [12].

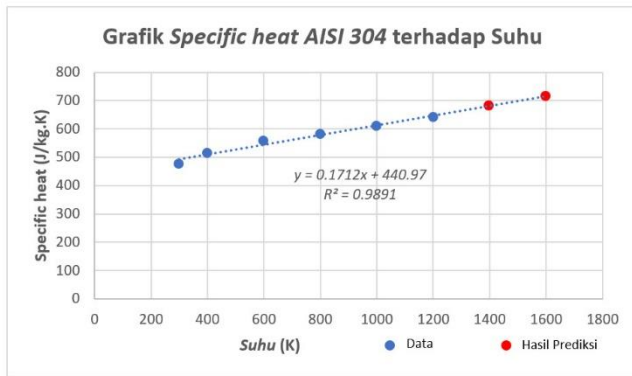
Tabel 2. Nilai *Specific Heat* AISI 304 *Stainless Steel*

Suhu (K)	<i>Specific Heat</i> (J/kg.K)
300	477
400	515
600	557
800	582
1000	611
1200	640

Pada Tabel 2 terdapat nilai *specific heat* pelat AISI 304 *stainless steel* pada suhu 300 K hingga 1200 K, hal tersebut belum mencapai *high-temperature furnace*, karena *high-temperature furnace* akan dicapai saat suhu 1600 K. Sehingga dilakukan prediksi untuk nilai *specific heat* pada suhu 1400 K dan 1600 K dengan metode regresi linier sederhana. Persamaan (10) berikut merupakan persamaan prediksi untuk suhu 1400 K dan 1600 K yang diperoleh dari metode regresi linier sederhana.

$$y = 0,1712x + 440,99 \quad (10)$$

Berikut adalah grafik nilai *specific heat* untuk suhu awal pelat sampai *high-temperature furnace* dengan prediksi sesuai Persamaan 10.



Gambar 1. Grafik hubungan antara suhu dan *specific heat* pada pelat AISI 304 *stainless steel*

Berdasarkan Gambar 1, didapatkan hubungan antara suhu dan *specific heat* sesuai persamaan regresi linier sederhana pada Persamaan (11) berikut ini.

$$c_p(T) = 0,1712T + 440,97 \quad (11)$$

Dari Persamaan (11), diperoleh perubahan *specific heat* terhadap suhu sebagai berikut.

$$\frac{dc_p}{dT} = 0,1712 \quad (12)$$

Selanjutnya, persamaan (12) disubstitusikan ke persamaan (9) untuk mendapatkan perubahan suhu terhadap waktu, sehingga didapatkan persamaan berikut.

$$\frac{dT}{dt} = 7,185 \times 10^{-9} \left(\frac{T_f^4 - T^4}{440,97 + 0,3424T} \right) \quad (13)$$

Diperhatikan bahwa suhu awal pelat $T_0 = 300$ K dan $T_f = 1600$ K, dengan suhu nondimensional sesuai persamaan berikut.

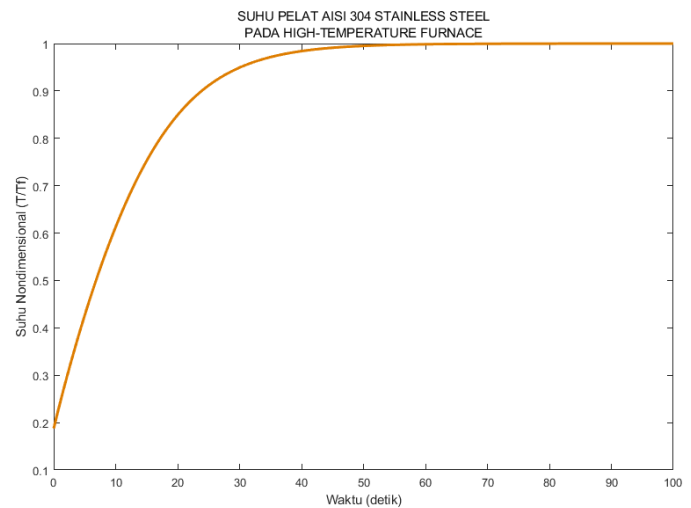
$$\theta = \frac{T}{T_f} \quad (14)$$

Melalui Persamaan 14, maka Persamaan 13 dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\frac{d\theta}{dt} = 29,4298 \left(\frac{1 - \theta^4}{440,97 + 547,84\theta} \right) \quad (15)$$

Metode Runge-Kutta Orde Empat dengan *step*

size h = 0,25 dan waktu $t = 0$ sampai $t = 100$ detik digunakan untuk menyelesaikan Persamaan (15) untuk mendapatkan hasil yang akurat dengan efisiensi waktu komputasi. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan waktu dimana pelat AISI 304 *stainless steel* mencapai *equilibrium temperature* pada *high-temperature furnace*.



Gambar 2. Suhu Pelat AISI 304 *Stainless Steel* Pada *High-Temperature Furnace*

Gambar 2 menunjukkan suhu pelat AISI 304 *stainless steel* pada *high-temperature furnace* dengan suhu nondimensional. Pada awalnya, ketika Pelat AISI 304 mulai dipanaskan, laju penyerapan panas oleh material lebih tinggi dari laju pelepasan panas ke lingkungan. Namun, seiring waktu, suhu material meningkat, sehingga laju pelepasan panas juga meningkat. Pada titik tertentu (sekitar $t=50$ detik), laju penyerapan panas menjadi setara dengan laju pelepasan panas. Ini berarti energi yang masuk ke sistem sama dengan energi yang keluar dari sistem, sehingga tidak ada lagi akumulasi energi bersih yang menyebabkan kenaikan suhu. Detail data dengan suhu nondimensional terdapat pada tabel 3.

Tabel 3. Data Suhu Nondimensional Pelat AISI 304 *Stainless Steel*

Waktu (detik)	Suhu Nondimensional (θ)
10	0,6128
20	0,8493
30	0,9494
40	0,9841
50	0,9951
60	0,9985
70	0,9995
80	0,9999
90	1
100	1

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 3, awalnya terjadi peningkatan suhu pelat AISI 304 *stainless steel* secara signifikan. Namun, setelah 50 detik, peningkatan suhu melambat, sehingga dapat dikatakan pelat AISI 304 *stainless steel* akan mencapai *temperature equilibrium* saat $t = 50$ detik.

Dari Persamaan 14, diperoleh suhu pelat AISI 304 *stainless steel* sesuai Persamaan (16) berikut.

$$T = \theta T_f \quad (16)$$

dengan T sesuai hasil simulasi numerik menggunakan Metode Runge-Kutta Orde Empat dan $T_f = 1600$ K. Tabel 4 menunjukkan detail kenaikan suhu pelat (T) setelah mencapai *temperature equilibrium*.

Tabel 4. Data Suhu Pelat AISI 304 *Stainless Steel* Pada *High-Temperature Furnace*

Waktu (detik)	Suhu Pelat
50	1592,16
60	1597,6
63	1598,4
67	1599,04

Waktu (detik)	Suhu Pelat
69	1599,2
71	1599,36
73	1599,52
76	1599,68
80	1599,84
89	1600

Berdasarkan Tabel 4, mulai $t = 50$ detik terjadi penambahan suhu yang tidak signifikan. Pada saat $t = 67$ detik suhu pelat AISI 304 *stainless steel* telah mencapai 1599,04 K dan saat $t = 89$ detik suhu pelat telah mencapai *high-temperatur furnace* yaitu 1600 K. Hal ini menunjukkan pelat AISI 304 *stainless steel* mencapai kesetimbangan termal dengan lingkungannya.

4. Kesimpulan Dan Saran

Pelat AISI 304 *stainless steel* menunjukkan respons peningkatan suhu yang cepat di awal proses pemanasan dan mencapai *temperature equilibrium* dalam waktu 50 detik, dimana terjadi penambahan suhu yang tidak signifikan. Meskipun demikian, untuk mencapai *high-temperatur furnace* yaitu 1600 K, dibutuhkan waktu yang lebih lama, yaitu 89 detik. Variasi pelat lain dapat digunakan sebagai pembandingan untuk penelitian selanjutnya.

5. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Yudharta Pasuruan dan Politeknik Negeri Malang yang telah memfasilitasi penelitian pada artikel ini, serta terima kasih kepada Universitas Islam Negeri Imam Bonjol yang bersedia memberikan ruang publikasi.

Daftar Pustaka

- [1] R. K. Rofila El Maghfiroh, Mutia Lina Dewi, "MODEL MATEMATIKA LAJU KOROSI LOGAM DENGAN FAKTOR," vol. 3, no. X, pp. 1–7, 2024.
- [2] I. Rahmadtulloh, "Studi Pengamatan Pitting Korosi 304 Stainless Steel," vol. 003, no. 002, pp. 3–6, 2021.
- [3] H. M. Cobb, "Stainless Steels," *Iron and Steel Society, Warrendale*, pp. 23–203, 1999.
- [4] H. J. Cross, J. Beach, L. S. Levy, S. Sadhra, T. Sorahan, and C. McRoy, *Manufacture, processing and use of stainless steel: a review of the health effects*. Eurofer, 1999.
- [5] M. I. Hussain *et al.*, "Corrosion resistance of nanostructured metals and alloys," in *Corrosion Protection at the Nanoscale*, Elsevier, 2020, pp. 63–87.
- [6] P. A. Tipler and G. Mosca, *Physics for scientists and engineers*. Macmillan, 2007.
- [7] N. I. Kobasko, "Thermal equilibrium and universal correlation for its heating–Cooling time evaluation," *Theoretical Physics Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 205–219, 2021.
- [8] M. Fawaid, R. Ismail, and S. Nugroho, "Karakteristik AISI 304 Sebagai Material Friction Welding," *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, 2012.
- [9] A. G. Shaikh, U. Keerio, W. Shaikh, and A. H. Sheikh, "Numerical higher-order Runge-Kutta methods in transient and damping analysis," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, 2022.
- [10] Y. B. Enkekes and L. Mardianto, "Metode Runge-Kutta Orde 4 Dalam Penyelesaian Persamaan Gelombang 1D Syarat Batas Dirichlet," *Indonesian Journal of Applied Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2022.
- [11] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 191, 2018.
- [12] B. Bradie, *A friendly introduction to numerical analysis*. Pearson Education India, 2006.