

Analisis Pengaruh Komposisi Kimia dan Suhu Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Baja Tahan Karat untuk Aplikasi Konstruksi

Ade Usra Berli¹, Desmarita Leni^{2*}, Helga Yermadona³

^{1,3}Teknik sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

²Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

E-mail: desmaritaleni@gmail.com

Abstract

A deep understanding of the mechanical properties of stainless steel is crucial for designing constructions that meet the requirements. However, to comprehensively understand the mechanical properties of stainless steel, sufficient testing is needed to gather data regarding its characteristics. In this research, an analysis was conducted on the Effect of Chemical Composition and Heat Treatment on the Mechanical Properties of Stainless Steel, using data from the Material Algorithm Project (MAP), which is a material database. The data was analyzed using descriptive statistics and Pearson correlation to observe the relationships between these variables. The research results indicate that chemical elements such as Cu and Ni have a positive correlation with elongation, indicating that higher concentrations of these elements lead to higher elongation of stainless steel. Furthermore, it was also found that temperature has a strong negative correlation with yield strength (YS) and ultimate tensile strength (UTS), with correlation values of -0.71 and -0.86, respectively. Further analysis revealed that water quenching resulted in better ultimate tensile strength compared to air quenching. This research demonstrates that experimental material testing datasets not only validate experiments but can also actively be used in the analysis and design of more effective materials.

Keywords: chemical composition, temperature, mechanical properties, stainless steel

Abstrak

Pemahaman yang mendalam tentang sifat mekanik baja tahan karat sangat penting dalam perancangan konstruksi yang sesuai dengan kebutuhan. Namun, untuk memahami sifat mekanik baja tahan karat secara komprehensif, diperlukan pengujian yang cukup untuk mengumpulkan data mengenai sifat-sifatnya. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis mengenai Pengaruh Komposisi Kimia dan Perlakuan Panas terhadap Sifat Mekanik Baja Tahan Karat, dengan menggunakan sumber data dari Material Algorithm Project (MAP), yang merupakan database material. Data ini dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan korelasi Pearson untuk melihat hubungan antara variabel-variabel tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa unsur kimia seperti Cu dan Ni memiliki korelasi positif terhadap elongation, yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi konsentrasi unsur-unsur ini, semakin tinggi elongation baja tahan karat. Selain itu, juga ditemukan bahwa suhu memiliki korelasi negatif yang kuat terhadap yield strength (YS) dan ultimate tensile strength (UTS), dengan nilai korelasi masing-masing sebesar -0.71 dan -0.86. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa water quenched menghasilkan nilai ultimate tensile strength yang lebih baik dibandingkan air quenched. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dataset pengujian material eksperimental tidak hanya memvalidasi eksperimen, tetapi juga dapat digunakan secara aktif dalam analisis dan perancangan material yang lebih efektif.

Kata kunci: komposisi kimia, suhu, sifat mekanik, baja tahan karat

1. Pendahuluan

Jembatan, jalan, dan infrastruktur lainnya yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan manusia [1]. Konstruksi melibatkan penerapan prinsip-prinsip teknik sipil, arsitektur, dan manajemen

proyek untuk menciptakan struktur yang aman serta tahan lama [2]. Pesatnya perkembangan desain konstruksi di era modern tidak hanya menuntut estetika bangunan, namun juga keamanan dan keselamatan pengguna. Salah satu aspek utama konstruksi yang menuntut keamanan

dan ketahanan mendorong pelaku industri baja untuk menyesuaikan sifat mekanik baja dengan konstruksi modern. Salah satu material yang sering digunakan dalam konstruksi bangunan adalah baja tahan karat. Baja ini memiliki sifat mekanik yang kuat dan tahan terhadap korosi, yang secara signifikan mempengaruhi keandalan dan ketahanan struktur konstruksi. Kekuatan tarik dan batas elastis yang tinggi dari baja tahan karat memungkinkan struktur untuk menahan beban yang diterapkan, seperti beban gravitasi, angin, dan gempa. Dengan demikian, baja tahan karat memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi terhadap kegagalan struktural yang dapat membahayakan pengguna [3]. Sifat mekanik baja tahan karat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti unsur kimia paduan, struktur mikro dan suhu perlakuan panas [4],[5]. Menurut Nurhakim [6], sifat mekanik baja tahan karat dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan atau mengurangi unsur kimia tertentu sesuai kebutuhan, seperti penambahan unsur nikel (Ni) untuk meningkatkan kekuatan rekat pengelasan pada baja tahan karat. Hal ini mengindikasikan bahwa, apabila ditambahkan satu unsur kimia pada komposisi baja tahan karat maka nilai kekuatan tarik pada baja tahan karat tersebut akan ikut berubah sehingga perlu dilakukan pengujian ulang. Pengujian sifat mekanik baja tahan karat seperti yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS), elongation (EL), dan reduction area (RA) biasanya masih dilakukan secara manual menggunakan mesin uji tarik. Proses pengujian secara manual membutuhkan biaya yang besar, waktu yang lama, dan keahlian khusus, sehingga perlu dilakukan analisis mendalam untuk memperoleh sifat mekanik baja tahan karat sesuai kebutuhan konstruksi. Proses analisis yang mendalam dan komperhensif dapat didukung dengan memanfaatkan data historis pengujian material yang dapat diperoleh dari database material.

Pemahaman yang mendalam tentang komposisi kimia dan struktur mikro baja tahan karat sangat penting dalam aplikasi konstruksi. Dengan memahami hubungan antara komposisi kimia, perlakuan panas, struktur mikro, dan sifat mekanik, insinyur konstruksi dapat memilih baja tahan karat yang tepat untuk memenuhi kebutuhan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi yang diperlukan dalam berbagai aplikasi konstruksi. Pesatnya pertumbuhan data sifat material yang dihasilkan dari pengujian experimental hingga simulasi komputer selama bertahun-tahun, memberikan efek positif bagi peneliti dalam melakukan sebuah analisis sifat mekanik baja tahan karat berbasis data. Hal ini

dapat dilihat dari banyaknya database material seperti *open quantum material database, material project, computational materials repository, harvard clean energy project, anorganic crystal structure database, matmach, matweb, dan aflowlib* [7][8]. Fenomena ini memunculkan paradigma keempat dalam ilmu material dan rekayasa, yang menggabungkan tiga paradigma pertama yaitu eksperimen, teori, dan simulasi menjadi ilmu pengetahuan yang didorong oleh data [6].

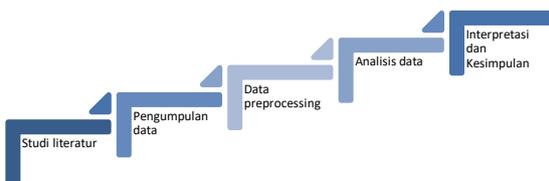
Banyak penelitian terkait sifat mekanik material berbasis data yang sudah dilakukan seperti Porro.dkk [9] menganalisis sifat mekanik berbasis data untuk baja tahan karat 17-4 PH yang dibuat oleh manufaktur aditif. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari hubungan antara mikrostruktur dan sifat mekanik pada komponen logam yang diproduksi dengan metode manufaktur aditif. Hasil analisis sifat mekanik baja tahan karat berbasis data ini menunjukkan tingkat korelasi yang sangat baik antara data prediksi dan data eksperimental. Model prediktif yang dikembangkan mampu memprediksi sifat mekanik dengan tingkat akurasi yang tinggi. Penelitian lain yang dilakukan Gunoglu [10] tentang analisis sifat mekanik baja tahan karat berbasis database material, dimana penelitian ini memanfaatkan database material yang besar untuk menganalisis sifat mekanik baja tahan karat. Database material yang mencakup informasi komposisi kimia, perlakuan panas, dan sifat mekanik digunakan untuk mengidentifikasi pola, hubungan, dan tren dalam sifat mekanik baja tahan karat. Analisis statistik dan teknik data mining digunakan untuk menggali informasi yang berharga dari database material tersebut. Hasil analisis dalam penelitian ini dapat dijadikan sebagai landasan dalam merancang sebuah material yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya dan kesadaran akan pentingnya penggunaan database material sebagai alat bantu dalam merancang material yang sesuai dengan persyaratan konstruksi, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis tentang pengaruh komposisi kimia dan suhu perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja tahan karat dalam konteks aplikasi konstruksi. Dalam penelitian ini, database material tersebut dijadikan sumber data yang relevan dan kredibel untuk memperoleh informasi tentang komposisi kimia serta suhu perlakuan panas yang berpengaruh pada sifat mekanik baja tahan karat. Dengan menggunakan data yang terkumpul dari sumber-sumber tersebut, penelitian ini bertujuan untuk

menganalisis dan menggambarkan hubungan antara variabel-variabel tersebut dengan sifat mekanik yang diukur, seperti yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS), elongation (EL), dan reduction area (RA). Selain itu, hasil analisis dari database material ini dibandingkan dengan hasil pengujian experimental.

2. Methodologi

Penelitian ini menggunakan metode Exploratory Data Analysis (EDA), yang merupakan suatu pendekatan analisis data untuk menggali informasi dari data secara visual dan deskriptif. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi pola, hubungan, dan anomali dalam data serta mendapatkan wawasan yang berharga sebelum melakukan analisis lebih lanjut [11]. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap seperti yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Penelitian

2.1 Studi literatur

Studi literatur merupakan langkah awal dalam penelitian ini. Pada tahap ini, literatur yang relevan telah dicari untuk memahami latar belakang penelitian dan konteksnya. Penelitian ini fokus pada sifat mekanik baja tahan karat untuk aplikasi konstruksi. Informasi yang terkait dengan baja tahan karat, komposisi kimia, suhu perlakuan panas, dan pengaruhnya pada sifat mekanik telah diidentifikasi dari sumber-sumber yang relevan. Hasil penelitian terdahulu juga diperiksa untuk memahami apa yang telah diketahui sebelumnya dalam bidang ini.

2.2 Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari dataset Materials Algorithms Project yang dikelola oleh Cambridge University [12]. Dataset ini berisi informasi tentang komposisi kimia paduan, suhu perlakuan panas dan sifat mekanik baja tahan karat.

2.3 Data preprocessing

Data preprocessing adalah tahap awal dalam analisis data yang bertujuan untuk membersihkan, mempersiapkan, dan mengorganisasi data mentah sehingga dapat digunakan dengan lebih efektif dalam analisis statistik atau pemodelan [3]. Pada tahap ini, dilakukan Identifikasi dan penanganan nilai-nilai yang hilang atau tidak valid dalam dataset, seperti penggantian nilai yang hilang, penghapusan baris atau kolom yang tidak relevan, atau penanganan outlier yang signifikan. Selain itu, juga dilakukan pemilihan variabel untuk menentukan variabel mana yang akan digunakan dalam analisis. Terkadang, dataset dapat mengandung banyak variabel, dan perlu memilih variabel yang paling relevan untuk tujuan analisis Anda.

2.4 Analisis data

Analisis data dilakukan dengan tujuan untuk memahami pola, hubungan, dan karakteristik dari data hasil uji tarik baja tahan karat austenitik. Data yang telah melalui proses preprocessing kemudian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan analisis hubungan antar variabel input dengan target menggunakan pearson correlation yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{(n-1)s_x s_y} \quad (1)$$

Dimana r_{xy} adalah koefisien korelasi Pearson, $\sum xy$ adalah jumlah perkalian x dan y , n adalah ukuran sampel, x adalah variabel independen, y adalah variabel dependen, dan S adalah standar deviasi [13]. Nilai koefisien korelasi berkisar dari -1 hingga 1. Nilai -1 menunjukkan korelasi negatif yang kuat antara kedua variabel, nilai 0 menunjukkan tidak ada korelasi, dan nilai 1 menunjukkan korelasi positif yang kuat [14].

2.5 Interpretasi dan Kesimpulan

Informasi yang ditemukan melalui EDA dan analisis sifat mekanik akan digunakan untuk memahami hubungan antara komposisi kimia paduan, suhu perlakuan panas, dan sifat mekanik baja tahan karat. Kesimpulan dari penelitian ini akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi sifat mekanik material dan dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan material yang lebih optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengumpulan data

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil uji tarik dari beberapa jenis baja tahan karat austenitik (ASS) seperti SUS 304, SUS 316, SUS 321, SUS 347, dan NCF 800H. Dataset ini berjumlah 2180 sampel yang terdiri dari sifat mekanik baja tahan karat austenitik, unsur kimia paduan, suhu perlakuan panas dan metode pendinginan. Data diperoleh dari Creep Data Sheet of Steel (No.4B, 5B, 6B, 14B, 15B, 26B, 27B, 28B, 32A, 42, dan 45) yang merupakan sumber data dari NIMS MatNavi serta BSCC High Temperature Data dari The British Steelmakers Creep Committee [15]. Data tersebut telah dikumpulkan oleh Material Algorithm Project (MAP) [12] yang merupakan proyek yang dilakukan oleh University of Cambridge dan dapat digunakan untuk kepentingan penelitian dan pendidikan.

3.2 Data preprocessing

Dataset baja tahan karat austenitik ini berjumlah 2180 sampel, namun setelah dilakukan preprocessing data terdapat 1194 sampel data yang memiliki informasi yang tidak diperlukan seperti nilai yang hilang dan tidak valid sehingga tidak digunakan dalam penelitian ini. Dalam database asli terdapat beberapa fitur lain seperti jenis peleburan, ukuran butir, dan bentuk produk, namun data-data tersebut tidak lengkap dan memiliki korelasi yang sangat rendah dengan sifat mekanik baja tahan karat sehingga tidak digunakan dalam penelitian ini. Data yang memiliki informasi yang lengkap dan relevan dengan penelitian ini hanya berjumlah 986 sampel yang terdiri dari variabel independen dan variabel dependen. Variabel independen adalah unsur kimia dan suhu perlakuan panas yang berjumlah 20 variabel seperti yang dapat dilihat pada tabel 2, sedangkan variabel dependen adalah sifat mekanik baja tahan karat yang terdiri dari Yield strength (YS), Ultimate tensile strength (UTS) dan Elongation (EL).

Tabel 1.
Variabel Input

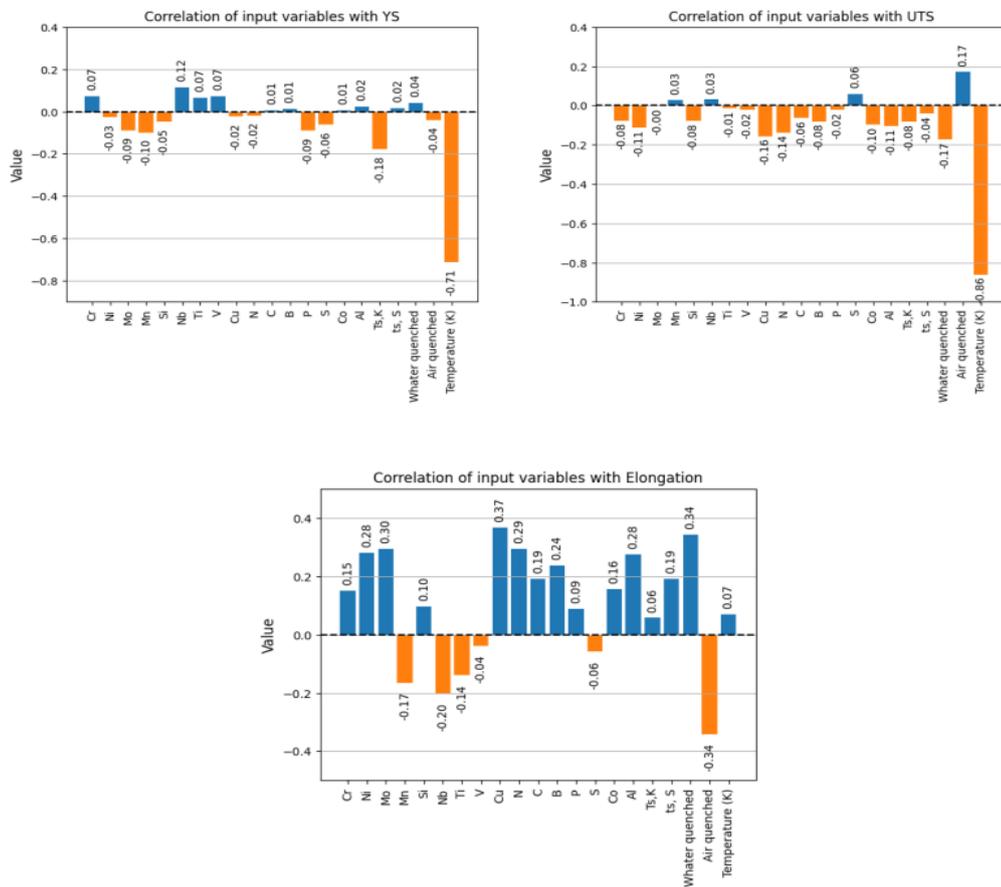
No	Variable Name	Category	Min	Max	Mean
1	Chromium (Cr, wt%)	Input	15,90	21,06	17,90
2	Nickel (Ni, wt%)	Input	8,40	34,45	13,41
3	Molybdenum (Mo, wt%)	Input	0,00	2,72	0,70
4	Manganese (Mn, wt%)	Input	0,79	1,75	1,43
5	Silicon (Si, wt%)	Input	0,29	0,84	0,53
6	Niobium (Nb, wt%)	Input	0,00	0,90	0,08
7	Titanium (Ti, wt%)	Input	0,00	0,56	0,24
8	Vanadium (V, wt%)	Input	0,00	0,06	0,00
9	Copper (Cu, wt%)	Input	0,00	0,35	0,06
10	Nitrogen (N, wt%)	Input	0,00	0,08	0,01
11	Carbon (C, wt%)	Input	0,01	0,10	0,06
12	Boron (B, wt%)	Input	0,00	0,00	0,00
13	Phosphorus (P, wt%)	Input	0,00	0,04	0,02
14	Sulfur (S, wt%)	Input	0,00	0,05	0,01
15	Cobalt (Co, wt%)	Input	0,00	0,54	0,05
16	Aluminum (Al, wt%)	Input	0,00	0,52	0,05
17	Solution treatment temperature (Ts, K)	Input	1293,00	1473,00	1365,31
18	Solution treatment time (ts, s)	Input	0,00	7200,00	1859,27

19	Water-quenched or Air-quenched	Input	0,00	1,00	0,42
20	Test temperature (Tt, K)	Input	0,00	1,00	0,58

3.3 Analisis Data

Data hasil uji tarik pada baja tahan karat austenitik dianalisis menggunakan korelasi Pearson untuk melihat hubungan antara unsur kimia, suhu perlakuan panas, lama waktu perlakuan panas, dan metode pendinginan terhadap sifat mekanik. Korelasi Pearson memungkinkan pengukuran kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel [13]. Dalam penelitian ini, fokus diamati pada unsur kimia dan suhu perlakuan panas sebagai faktor yang mempengaruhi sifat mekanik baja tahan karat.

Analisis korelasi Pearson bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai faktor-faktor yang berkontribusi terhadap sifat mekanik baja tahan karat austenitik. Gambar 2 menampilkan visualisasi dari ketiga sifat mekanik tersebut, di mana (a) menggambarkan yield strength (YS), (b) menggambarkan ultimate tensile strength (UTS), dan (c) menggambarkan elongation (EL).



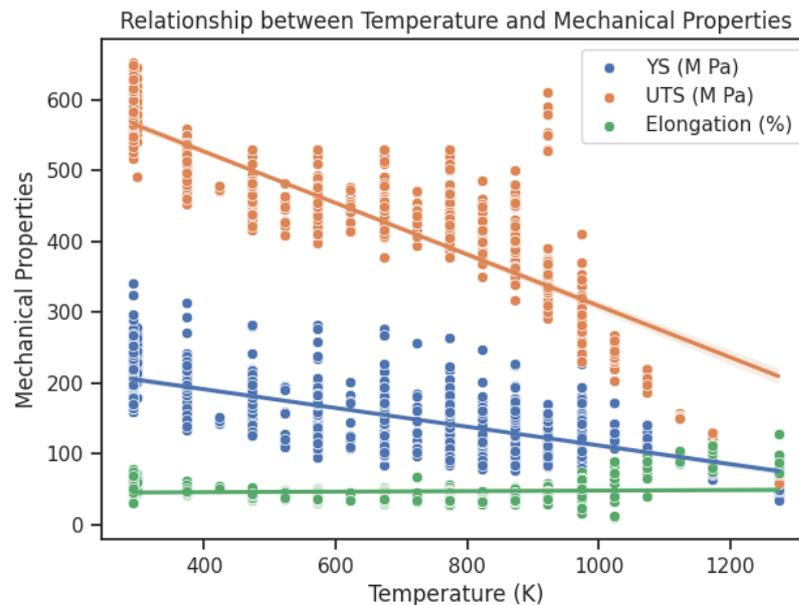
Gambar 2. Hubungan antara unsur kimia dan suhu perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja tahan karat

Berdasarkan hasil analisis korelasi Pearson, terlihat bahwa suhu (*Temperature*) memiliki korelasi negatif yang sangat kuat terhadap yield strength (YS) dan ultimate tensile strength (UTS), dengan nilai korelasi masing-masing sebesar -0.71 dan -0.86. Di sisi lain, elongation (EL)

memiliki korelasi positif yang sangat lemah terhadap suhu, dengan nilai korelasi sebesar 0.07. Korelasi negatif yang kuat antara Temperature dengan YS dan UTS menunjukkan bahwa peningkatan suhu perlakuan panas akan menurunkan kekuatan dan keuletan material. Hal

ini sesuai dengan fenomena struktural dan transformasi fasa yang terjadi saat perlakuan panas pada baja tahan karat austenitik [16]. Peningkatan suhu perlakuan panas pada baja tahan karat austenitik dapat menyebabkan pengerasan struktural dengan pembentukan fasa baru yang memiliki sifat mekanik yang berbeda. Dalam hal ini, suhu yang tinggi dapat mengurangi kekuatan material dengan mengurangi kandungan elemen penyusun struktural atau mempengaruhi distribusi atom dalam kristal. Selain itu, suhu perlakuan panas juga dapat mempengaruhi

transformasi fasa seperti pengendapan karbida, yang dapat mengurangi keuletan dan elastisitas material [17]. Korelasi positif yang sangat kecil antara EL dan suhu perlakuan panas menunjukkan bahwa pengaruh suhu terhadap elongation relatif rendah, yang mengindikasikan bahwa perubahan suhu cenderung memiliki sedikit dampak pada tingkat deformasi atau keuletan material tersebut. Hubungan sifat mekanik baja tahan karat austenitik terhadap temperature dapat dilihat dengan jelas pada gambar 3.



Gambar 3. hubungan antara tempratur dengan sifat mekanik

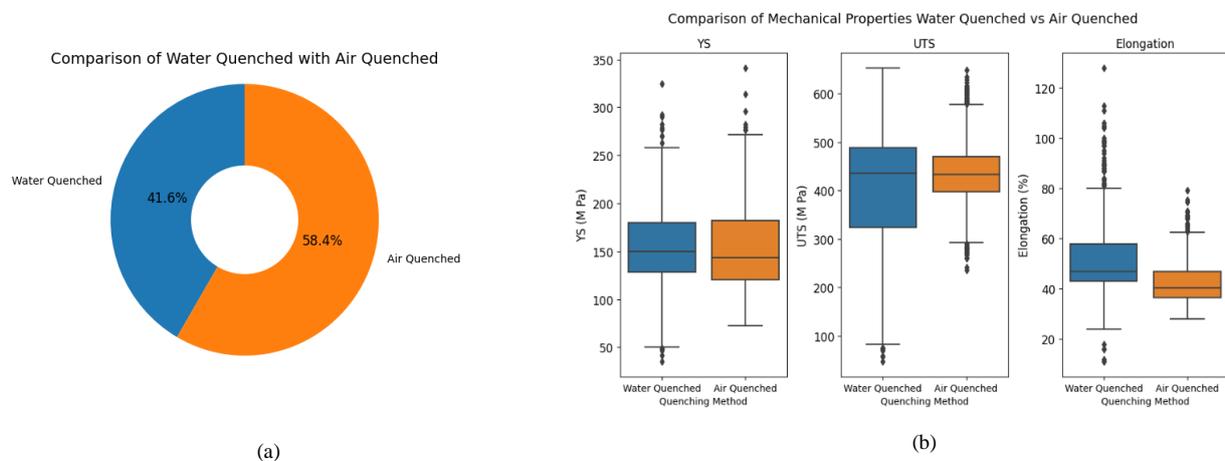
Unsur kimia seperti Copper (Cu) dan Nickel (Ni) memiliki korelasi positif terhadap EL, hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai unsur kimia tersebut maka semakin tinggi pula nilai EL. Berdasarkan hasil penelitian Niu et al. [18] tentang pengaruh tembaga dalam meningkatkan efek plastisitas yang terinduksi oleh transformasi (TRIP) pada baja tahan karat ditemukan bahwa penambahan Cu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap elongation (perpanjangan) dalam baja tahan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa Cu mempercepat kinetika reversion austenit, yaitu transformasi dari austenit kembali menjadi bentuk aslinya. Cu berperan sebagai pengkristal heterogen dan menyediakan kondisi kimia yang diperlukan melalui segregasi antar muka dengan meningkatkan pembentukan austenit. kandungan unsur Ni dalam baja tahan karat dapat mengurangi tingkat martensitik transformasi, yang pada gilirannya dapat meningkatkan *elongation* dan formability [18].

Metode pendinginan seperti water quenched (pendinginan dengan air) dan air quenched (pendinginan dengan udara) juga memainkan peranan penting dalam sifat mekanik baja tahan karat terutama elongation. Berdasarkan hasil analisis dengan korelasi pearson dapat dilihat bahwa elongation memiliki korelasi positif dengan water quenched sebesar 0.34 dan berkorelasi negatif dengan air quenched sebesar -0.34. Peningkatan elongation yang terjadi akibat water quenching pada baja tahan karat dapat dijelaskan oleh proses pendinginan yang cepat. pendinginan cepat dapat mencegah atau meminimalkan presipitasi fasa yang tidak diinginkan, seperti karbida atau nitrida, yang dapat menghambat pergerakan dislokasi dan mengurangi deformasi plastis pada material. Dengan mencegah terbentuknya fasa-fasa tersebut, water quenching dapat membantu meningkatkan deformasi plastisitas pada baja tahan karat [19]. Selain itu, water quenching juga dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan bebas dari ketidaksempurnaan

struktural. Proses pendinginan yang cepat memungkinkan atom-atom dalam material untuk terkunci dalam posisi yang lebih teratur, mengurangi dislokasi dan cacat struktural. Hal ini dapat menghasilkan material dengan kekuatan yang lebih baik dan deformabilitas yang lebih tinggi, yang berkontribusi pada peningkatan elongation. Sedangkan pendinginan dengan udara mengakibatkan proses pendinginan lebih lambat jika dibandingkan dengan air, hal ini mengakibatkan terjadinya pembentukan struktur mikro yang lebih kompleks dan tidak seragam. Struktur mikro yang terbentuk dapat mencakup fasa-fasa yang tidak diinginkan atau cacat

struktural, seperti karbida atau nitrida yang terbentuk selama pendinginan [20, 21].

Perbandingan jumlah baja tahan karat dengan perlakuan *water quenched* dan *Air quenched* pada dataset dapat dilihat pada gambar 4 (a) dan perbandingan rata-rata sifat mekanik antara kedua perlakuan ini dapat dilihat pada gambar 4 (b). Walaupun air quenched memiliki jumlah data yang lebih banyak yaitu 676 sampel dibandingkan water quenched 410 sampel, namun berdasarkan rata-rata nilai sifat mekanik terutama UTS dapat dilihat bahwa water quenched memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan air quenched.



Gambar 4. Perbandingan *water Quenched* dan *air Quenched*

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis pengaruh komposisi kimia dan suhu perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja tahan karat, dapat disimpulkan bahwa dataset yang diperoleh dari database terbuka seperti *Material Algorithm Project* (MAP) dapat digunakan sebagai alat bantu dalam melakukan sebuah analisis sifat mekanik material. Pada penelitian ini, data yang diperoleh dari database dibersihkan sesuai kebutuhan dan dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan korelasi pearson. Hasil analisis ditemukan bahwa unsur kimia seperti *Copper* (Cu) dan *Nickel* (Ni) memiliki korelasi positif terhadap elongation, hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai unsur kimia tersebut maka semakin tinggi pula nilai elongation baja tahan karat. selain itu, juga ditemukan bahwa *temperature* memiliki korelasi negatif yang sangat kuat terhadap *yield strength* (YS) dan *ultimate tensile strength* (UTS), dengan nilai korelasi masing-masing sebesar -0.71 dan -0.86. Di sisi lain, *elongation* (EL) memiliki korelasi positif yang sangat lemah terhadap suhu,

dengan nilai korelasi sebesar 0.07. analisis lebih lanjut ditemukan bahwa *water quenched* memiliki nilai *ultimate tensile strength* lebih baik dibandingkan dari *air quenched*. Hasil penelitian ini, mengindikasikan bahwa dataset pengujian *experimental* material tidak hanya berperan pasif dalam memvalidasi sebuah eksperimen, tetapi dapat dimanfaatkan secara aktif dalam analisis dan merancang sebuah material dengan lebih efektif.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada LPPM Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat dan Pimpinan Pusat Muhammadiyah dalam Pelaksanaan Hibah Internal Tahun 2023 yang telah mendanai penelitian ini nomor: 09/LPPM.UMSB/K.P-HBI/08/2023. Serta tidak lupa juga kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini bisa berlangsung dan berjalan dengan lancar.

Daftar Pustaka

- [1] Dak, G., & Pandey, C. (2020). A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 377-406.
- [2] Vishwakarma, V. (2020). Impact of environmental biofilms: Industrial components and its remediation. *Journal of basic microbiology*, 60(3), 198-206.
- [3] Leni, D., Earnestly, F., Sumiati, R., Adriansyah, A., & Kusuma, Y. P. (2023). Evaluasi sifat mekanik baja paduan rendah berdasarkan komposisi kimia dan suhu perlakuan panas menggunakan teknik exploratory data analysis (EDA). *Dinamika Teknik Mesin*, 13(1), 74-83.
- [4] Plaut, R. L., Herrera, C., Escriba, D. M., Rios, P. R., & Padilha, A. F. (2007). A short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance. *Materials Research*, 10, 453-460.
- [5] Isfahany, A. N., Saghafian, H., & Borhani, G. (2011). The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel. *Journal of alloys and compounds*, 509(9), 3931-3936.
- [6] Nurhakim, B., Nikitasari, A., Sunardi, S., & Mabruri, E. (2017). Pengaruh Suhu dan Waktu Pemanasan terhadap Karakteristik Lapisan Elektrodes Ni-p pada Baja Tahan Karat Martensitik Ss 420. *Indonesian Journal of Materials Science*, 18(4), 223376.
- [7] Leni, D., & Sumiati, R. (2022). Perbandingan Algoritma Machine Learning Untuk Prediksi Sifat Mekanik Pada Baja Paduan Rendah. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 5(2), 167-174.
- [8] Martinez, W. L., Martinez, A. R., & Solka, J. (2017). *Exploratory data analysis with MATLAB*. Crc Press.
- [9] Porro, M., Zhang, B., Parmar, A., & Shin, Y. C. (2022). Data-driven modeling of mechanical properties for 17-4 PH stainless steel built by additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 11(2), 241-255.
- [10] Gunoglu, K., Özkavak, H. V., & Akkurt, İ. (2021). Evaluation of gamma ray attenuation properties of boron carbide (B₄C) doped AISI 316 stainless steel: Experimental, XCOM and Phy-X/PSD database software. *Materials Today Communications*, 29, 102793.
- [11] Leni, D. (2023). Pemilihan Algoritma Machine Learning Yang Optimal Untuk Prediksi Sifat Mekanik Aluminium. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 7(1), 35-44.
- [12] Materials Algorithms Project. Available online: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/map> (accessed on 11 April 2022).
- [13] Adler, J., & Parmryd, I. (2010). Quantifying colocalization by correlation: the Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, 77(8), 733-742.
- [14] Leni, D. (2023). Analisis Heatmap Korelasi dan Scatterplot untuk Mengidentifikasi Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pelabelan AC efisiensi Energi. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 6(1).
- [15] The British Steelmakers Creep Committee: BSCC High Temperature Data; The Iron and Steel Institute: London, UK, 1973.
- [16] Zhang, S., Jiang, Z., Li, H., Zhang, B., Fan, S., Li, Z., ... & Zhu, H. (2018). Precipitation behavior and phase transformation mechanism of super austenitic stainless steel S32654 during isothermal aging. *Materials characterization*, 137, 244-255.
- [17] Moniruzzaman, F. M., Shakil, S. I., Shaha, S. K., Kacher, J., Nasiri, A., Haghshenas, M., & Hadadzadeh, A. (2023). Study of direct aging heat treatment of additively manufactured PH13–8Mo stainless steel: role of the manufacturing process, phase transformation kinetics, and microstructure evolution. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3772-3787.
- [18] Niu, M. C., Yang, K., Luan, J. H., Wang, W., & Jiao, Z. B. (2022). Cu-assisted austenite reversion and enhanced TRIP effect in maraging stainless steels. *Journal of Materials Science & Technology*, 104, 52-58.
- [19] Bleck, W., Guo, X., & Ma, Y. (2017). The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*, 88(10), 1700218.
- [20] Cronemberger, M. E. R., Mariano, N. A., Coelho, M. F., Pereira, J. N., Ramos, É. C., de Mendonça, R., ... & Maestrelli, S. C. (2014, December). Study of cooling rate influence on SAF 2205 duplex stainless steel

solution annealed. [21] In Materials Science Forum (Vol. 802, pp. 398-403). Trans Tech Publications Ltd.

- [21] Ding, C., Cao, X. J., & Næss, P. (2018). Applying gradient boosting decision trees to examine non-linear effects of the built environment on driving distance in Oslo. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 110, 107-117.