

ANALISIS VARIABILITAS SIFAT TARIK PADA MATERIAL BAJA SS400 UNTUK KOMPONEN BODI *ELECTRIC SHUTTLEBUS*

Purbaya Reksapati Satria¹, Yusep Sukrawan², Sriyono³

¹Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri,
Universitas Pendidikan Indonesia

Corresponding e-mail: purbayareksapati@upi.edu; yusepsukrawan@upi.edu;
sriyono@upi.edu

Abstract

This study aims to demonstrate the variability of SS400 steel mechanical sheet properties for vehicle body applications with Tensile test, specifically for electric shuttle buses. Experimental data show extreme mechanical inconsistencies due to imprecise cold rolling processes in the factory; the UTS values range from 360–460 MPa, while the elongation strain fluctuates drastically from 13.74% (very brittle) to 36.24% (very ductile). This microstructural non-uniformity carries a high risk of triggering tearing defects and unpredictable springback effects during the molding process. As a solution, further heat treatment is required in the form of a special annealing process for thin sheets to rearrange the crystal structure, release residual stresses, and stabilize the elongation value within the automotive safe range of 25%–30%. For electric shuttle buses, the application of the process and is also crucial to ensure structural feasibility in protecting the battery compartment, guaranteeing precise panel dimensions to prevent air leakage into the high-voltage electrical system, and optimizing the vehicle's aerodynamic efficiency without risking material failure. Through this metallurgical optimization, SS400 plate can be transformed into a reliable, safe and energy-efficient structural material.

Keywords: SS400 steel, Tensile , Body Vehicle, Structure

A. PENDAHULUAN

Sektor industri otomotif modern saat ini dituntut untuk terus bertransformasi demi mencapai efisiensi konsumsi bahan bakar yang optimal tanpa mengorbankan standar keselamatan berkendara. Upaya ini umumnya diwujudkan melalui rekayasa optimasi struktural kendaraan, di mana pemilihan material yang tepat untuk menopang beban kerja menjadi aspek yang sangat krusial dalam menjaga integritas mekanis dari seluruh system (Ashby et al., 2022.). Sejalan dengan tren global tersebut, institusi akademis di dalam negeri seperti Laboratorium Otomotif Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) turut aktif menginisiasi riset pengembangan kendaraan modern demi mendorong kemandirian teknologi transportasi nasional yaitu dengan merancang *Shuttle bus electric* guna menjadi transportasi di Kawasan kampus. Salah satu inovasi yang kini tengah diproyeksikan untuk menjadi bagian dari komponen struktural penunjang kendaraan ini adalah material jenis pelat tipis yang diberi identifikasi sebagai Baja SS 400. Namun, sebelum komponen ini dapat diintegrasikan dengan aman ke dalam struktur fungsional kendaraan, pemetaan karakteristik fundamental materialnya melalui pengujian empiris di laboratorium wajib dilakukan terlebih dahulu. Secara fungsional, komponen struktural pada kendaraan seperti plat bodi sering kali memanfaatkan material berbasis pelat tipis (*sheet metal*) karena karakteristik manufakturnya yang mudah dibentuk serta memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik (Mikell P. Groover, 2020). Dalam pelaksanaan karakterisasi awal ini, material pelat SS 400 dipersiapkan menjadi spesimen standar berbentuk pelat (*Flat Specimen*) dengan dimensi penampang yang sangat tipis, yakni 6 x 0,8mm. Ukuran tersebut menghasilkan luas penampang awal A_0 sebesar 4,80mm² dengan panjang ukur acuan (*gauge length* / L_0) ditetapkan sepanjang 25mm. Geometri spesimen yang sangat tipis ini menuntut perhatian yang sangat spesifik dalam analisis beban, mengingat material dengan ketebalan mikro memiliki kerentanan yang tinggi terhadap fenomena konsentrasi tegangan serta pengaruh efek ukuran (*size effect*) yang dapat mengubah perilaku mekanisnya secara signifikan dibandingkan material pejal (Zhang et al., 2025).

Kendala utama sekaligus landasan mendasar dari dilaksanakannya kajian ini adalah belum tersedianya data empiris mengenai karakteristik mekanis dari material pelat SS 400 tersebut. Hingga saat ini, parameter penting seperti batas luluh (*yield strength*), kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), maupun kapasitas deformasi plastis atau keuletan (*elongation*) dari spesimen pelat ukuran 6 x 0,8mm ini masih belum diketahui

secara pasti. Ketiadaan data mekanis yang valid menjadi hambatan besar bagi para perancang struktur kendaraan, karena mereka tidak memiliki basis data teoretis untuk menghitung faktor keamanan (*safety factor*), melakukan simulasi numerik berbasis analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*), ataupun memodelkan perilaku konstitutif deformasi material saat menerima pembebanan (Deng et al., 2026). Mengaplikasikan pelat SS 400 secara langsung ke dalam sistem kendaraan tanpa mengetahui batas ambang kekuatannya sangat berisiko memicu kegagalan katastrofik, seperti terjadinya deformasi bodi secara mendadak saat kendaraan beroperasi di jalan. Analisis ini digunakan untuk menjembatani kesenjangan data (*research gap*) tersebut, pelaksanaan pengujian destruktif laboratorium berupa uji tarik (*tensile test*) menjadi langkah yang mutlak diperlukan. Melalui standarisasi uji tarik, material akan diberikan beban aksial searah secara bertahap hingga mengalami perpatahan, yang kemudian menghasilkan kurva hubungan beban-perpanjangan (*Load-Extension Curve*) sebagai fungsi representasi akurat dari sifat mekanis asli material (William D. Callister, 2021). Pendekatan karakterisasi serupa melalui pengujian tarik pada pelat logam tipis juga menjadi prosedur standar internasional yang krusial dalam mengevaluasi material di sektor manufaktur otomotif (Naumann et al, 2025). Oleh karena itu, pengujian tarik terhadap lima sampel replika pelat SS 400 di Laboratorium Otomotif UPI ini dilaksanakan sebagai urgensi ilmiah untuk mengungkap data kekuatan mekanis material secara presisi. Data yang diperoleh nantinya akan dijadikan sebagai landasan utama dalam menilai kelayakan struktural bodi kendaraan serta standarisasi keselamatan sebelum material pelat ini resmi diimplementasikan kedepan.

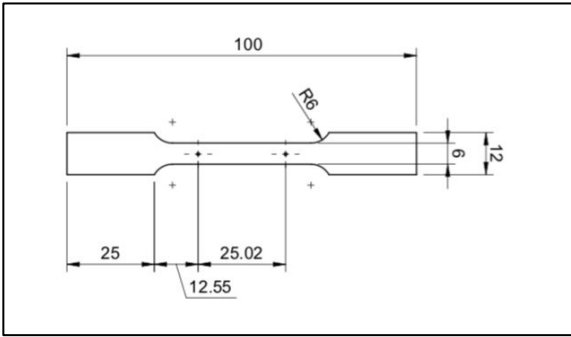
B. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium murni (*true experimental research*) yang berfokus pada evaluasi destruktif secara aksial untuk mengarakterisasi sifat mekanis material. Sasaran utama dari pengujian ini adalah menyusun profil kekuatan tarik dari pelat tipis SS 400 yang diproyeksikan sebagai material penyusun komponen struktural bodi kendaraan. Pelaksanaan eksperimen dalam kondisi pembebanan yang terisolasi dan terkendali merupakan prosedur baku yang esensial guna mengeliminasi interferensi lingkungan luar terhadap perilaku deformasi material, sejalan dengan prinsip pengujian mekanika perpatahan yang diuraikan oleh (Dowling, 2022). Melalui simulasi pembebanan dinamis ini, setiap fase transisi material mulai dari rentang elastis, awal deformasi plastis, hingga titik perpatahan dapat direkam dan dianalisis secara akurat.

Subjek utama dalam eksperimen ini terdiri dari lima spesimen replika pelat tipis SS 400 (dikodekan sebagai Specimen 1 hingga 5). Guna menjamin validitas, presisi, dan komparabilitas data di tingkat global, seluruh proses preparasi dimensi spesimen dipandu sepenuhnya oleh standar ASTM E8 / E8M (metode uji tarik standar untuk material logam lembaran). Spesimen difabrikasi dalam wujud pelat ukur (*Flat Specimen*) dengan spesifikasi lebar area reduksi (W) sebesar 6 mm dan ketebalan (T) 0,8mm. Dimensi tersebut menghasilkan penampang melintang awal (A_0) seluas 4,80 mm² serta panjang ukur referensi (*gauge length* / L_0) sepanjang 25 mm. Tingkat presisi pada tahap persiapan geometri ini bersifat mutlak, penyimpangan dimensi sekecil apa pun dapat mendistorsi kalkulasi tegangan teknik secara signifikan.

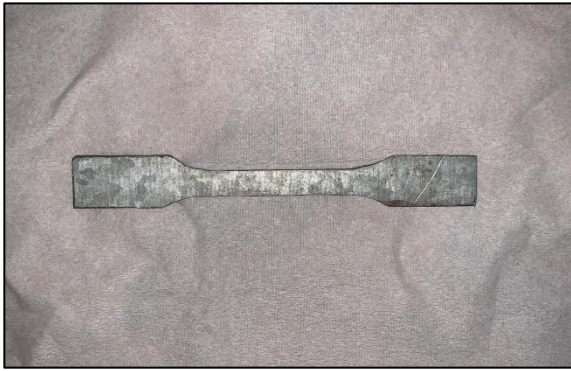
Tabel 1. Spesifikasi Spesimen Uji

L0	A0	Lebar	Tebal
25 mm	4.8 mm ²	6 mm	0.8 mm



Gambar 1

Ukuran Spesimen Uji Tarik Baja SS 400 Standar ASTM E8



Gambar 2

Spesimen Uji Tarik Baja SS 400 Standar ASTM E8 Sebelum dilakukan Uji Tarik

Proses penarikan material dieksekusi menggunakan perangkat utama Mesin *Universal Testing Machine* (UTM) merk Hensgrand, yang telah diintegrasikan dengan modul akuisisi data digital terkalibrasi. Tahap instalasi spesimen pada mesin UTM melibatkan pemosisian titik tengah *gauge length* agar simetris, dilanjutkan dengan penjepitan yang kaku pada *grip* atas maupun bawah. Penjepitan yang tegak lurus dan sejajar sumbu aksial merupakan prasyarat kritis untuk mencegah munculnya gaya lateral atau momen lentur parasitik yang berpotensi memicu kegagalan struktural prematur pada spesimen, sebagaimana ditekankan dalam pedoman pengujian pelat logam lanjutan oleh (Tedesco et al., 2025). Setelah spesimen terkunci sempurna, parameter kecepatan tarikan (*crosshead speed*) pada antarmuka perangkat lunak UTM Hensgrand dikalibrasi pada laju regangan kuasi-statis sesuai dengan ambang batas regulasi ASTM E8.

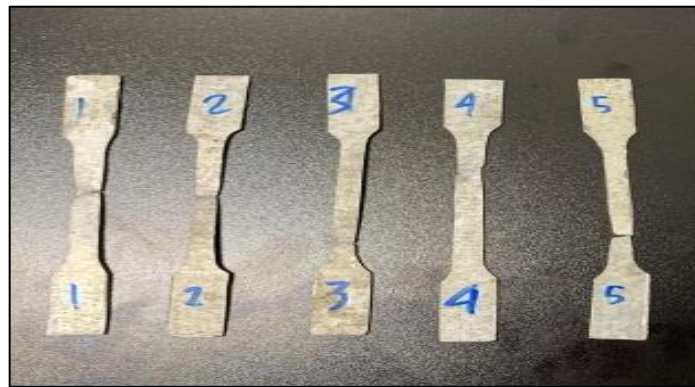


Gambar 3

Spesimen saat dipasang di Universal Testing Machine Hensgard

Pemanfaatan instrumen UTM berbasis komputer untuk evaluasi komprehensif material lokal semacam ini telah terbukti efektif dalam berbagai riset rekayasa terapan (Sutisna, 2021). Selama siklus pengujian berlangsung, sensor regangan dan *load cell* pada UTM Hensgrand secara kontinu merekam fluktuasi gaya tarik (kN) beserta respons perpanjangan (mm) material hingga spesimen tersebut mengalami perpatahan total (*fracture*). Rangkaian data mentah dari mesin kemudian ditransformasikan secara komputasional menjadi kurva tegangan-regangan teknik (*engineering stress-strain curve*). Merujuk pada literatur fundamental mekanika material (Pelleg, 2013), kurva keluaran inilah yang menjadi basis analitis untuk mengekstraksi nilai parameter mekanis kunci, yang meliputi kekuatan tarik

maksimum), tegangan luluh (*Yield Strength*), dan persentase elongasi (*Ae%*). Pola penurunan tegangan pasca-beban puncak (*necking*) hingga putusnya material berpenampang tipis menunjukkan karakteristik mekanis yang spesifik, di mana mekanisme deformasinya memiliki korelasi kuat dengan temuan analisis perpatahan pada pelat struktural mikro oleh (Gebre et al., 2025). Hasil kuantifikasi parameter dari kurva beban-perpanjangan tersebut pada akhirnya disintesis untuk menakar tingkat variabilitas kualitas serta kelayakan dari pelat bodi yang diuji.



Gambar 4

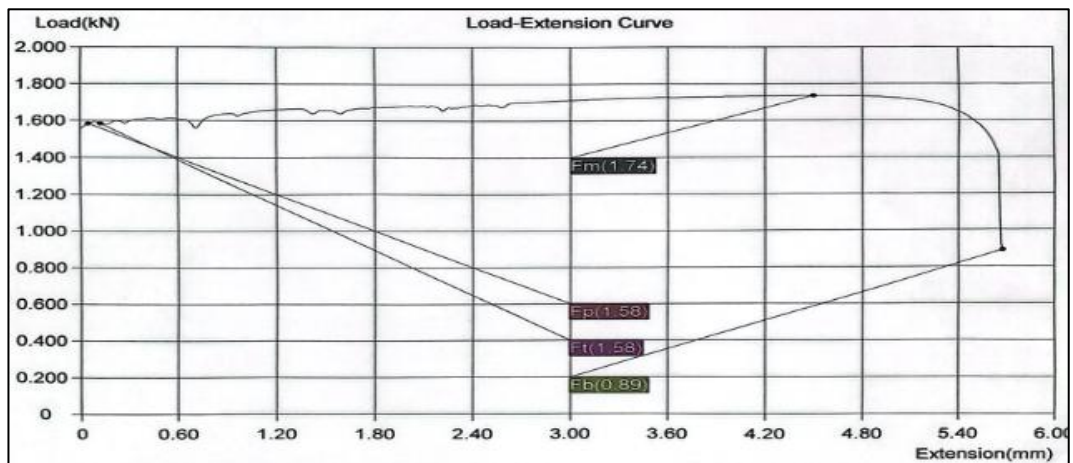
Spesimen Uji Tarik Baja SS 400 Standar ASTM E8 Setelah dilakukan Uji Tarik

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kuantitatif dari kelima sampel pelat Bodi dengan ketebalan 0,8 mm yang diuji secara komprehensif menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) Hensgrand. Ukuran 0,8 mm tersebut mewakili ketebalan standar yang lazim diaplikasikan pada pelat bodi luar (*outer body panel*) dalam industri otomotif.

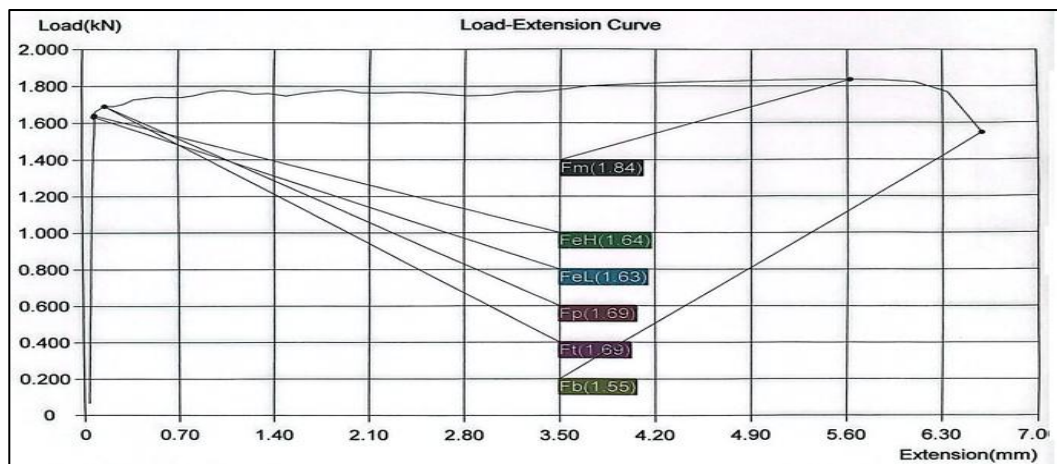
1. Data Hasil Pengujian

Beban-Perpanjangan dari kelima sampel ditampilkan secara *overlay*. Perbandingan visual ini secara efektif menunjukkan kontras plastis yang dialami oleh masing-masing material sesaat sebelum mencapai titik putus. Berdasarkan literatur rekayasa material otomotif terkini, keseimbangan antara batas luluh yang mampu untuk mencegah penyok dan tingkat elongasi yang optimal untuk kelayakan pembentukan (*deep drawing*) adalah kriteria wajib guna menghindari cacat produksi struktural pada panel luar kendaraan (Novák et al., 2026). Berikut merupakan kurva Beban-perpanjangan dari kelima sampel.



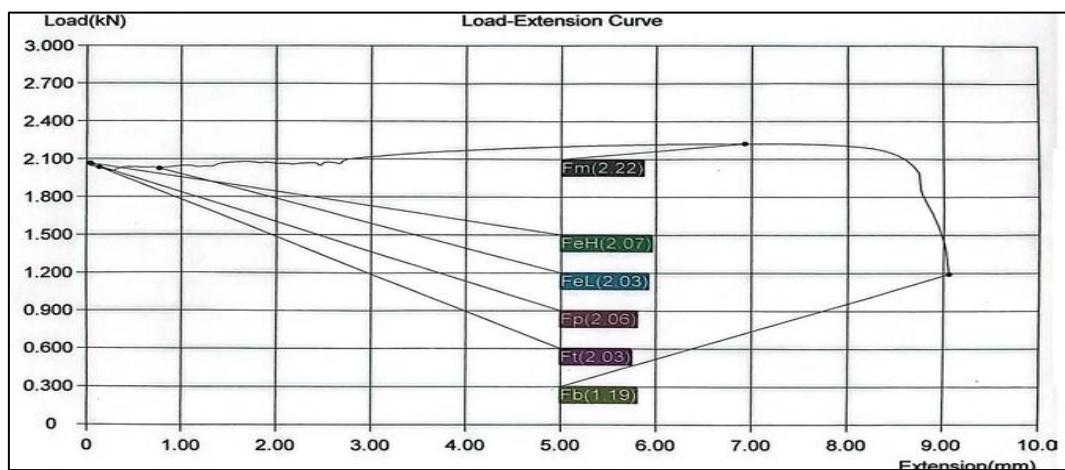
Gambar 5

Kurva beban-perpanjangan sampel 1



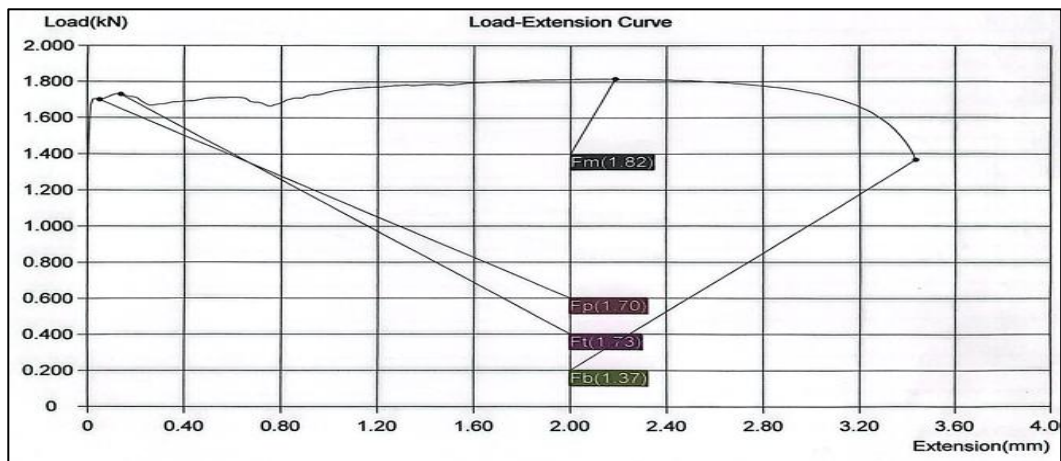
Gambar 6

Kurva beban-perpanjangan sampel 2



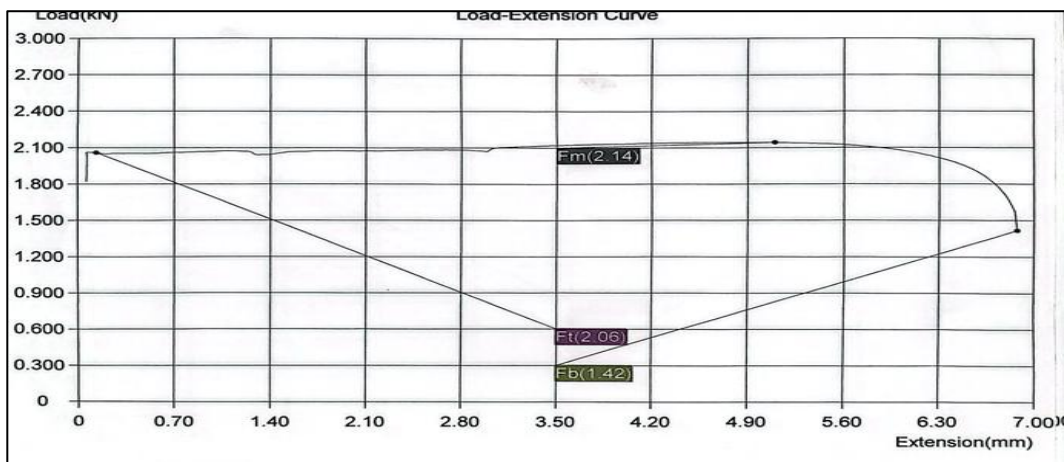
Gambar 7

Kurva beban-perpanjangan sampel 3



Gambar 8

Kurva beban-perpanjangan sampel 4



Gambar 9

Kurva beban-perpanjangan sampel 5

Melalui kurva Beban-perpanjangan, dipaparkan parameter-parameter esensial yang sangat dibutuhkan untuk analisis pembentukan lembaran logam (*sheet metal forming*). Parameter utama tersebut meliputi Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength / UTS* atau *Rm*), Batas Luluh Atas (*Upper Yield Strength / UYS*) yang bertindak sebagai indikator krusial dalam menyediakan ketahanan penyok (*dent resistance*), serta Persentase Elongasi (*Ae%*) yang secara mutlak menentukan batas kelayakan *formability* yakni kemampuan lembaran logam untuk ditebuk atau dibentuk menjadi lekukan bodi kendaraan tanpa mengalami robek. Berikut merupakan parameter parameter yang didapatkan berdasarkan hasil pengujian tarik tersebut.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Tarik

No. Sampel	Beban Maks (Fm) [kN]	Tegangan Tarik (Rm) [MPa]	Perpanjangan (Ae) [%]	Yield Strenght (Mpa)
1	1.74	360	22.716	329.17
2	1.84	380	26.372	340.00
3	2.22	460	36.240	430.00
4	1.82	380	13.740	360.42
5	2.14	450	27.512	429.17

2. Pembahasan Sampel Spesimen

Pada Sampel 1, material menunjukkan kekuatan tarik maksimum (UTS) sebesar 360 MPa dengan persentase elongasi 22,716%. Kombinasi sifat mekanis ini menjadikan material tersebut memenuhi standar kekuatan dan keuletan untuk aplikasi panel bodi yang landai atau cenderung datar seperti panel atap atau pintu samping yang proses pembuatannya tidak memerlukan penarikan dalam (*deep drawing*). Sementara itu, Sampel 2 menunjukkan kemampuan bentuk pada fase transisi dengan peningkatan kekuatan tarik hingga 380 MPa dan batas luluh (UYS) di angka 340 MPa. Peningkatan UYS ini menunjukkan ketahanan terhadap penyok (*dent resistance*) yang sangat baik, terutama terhadap benturan kerikil atau benda luar lainnya. Hal ini didukung oleh tingkat keuletan (elongasi 26,372%) yang tergolong aman untuk proses penekukan bersudut sedang.

Karakteristik *stamping* paling unggul secara keseluruhan ditunjukkan oleh Sampel 3. Spesimen ini mencatatkan kekuatan maksimum 460 MPa dan UYS 430 MPa, dipadukan dengan tingkat perpanjangan yang luar biasa mencapai 36,240%. Mengacu pada standar industri, material dengan elongasi di atas 30% sangat ideal untuk proses pembentukan bodi kompleks dan berlengkungan tajam (*deep drawing*), seperti *fender* roda atau lekukan kap mesin, karena tidak akan mudah robek saat ditekan oleh cetakan (*dies*). Kendati demikian, tingginya nilai UYS pada sampel ini menuntut gaya tekan mesin pres yang lebih besar dan berpotensi meningkatkan risiko efek balik (*springback*) pasca-pencetakan. Berbanding terbalik

dengan spesimen unggulan, Sampel 4 teridentifikasi memiliki cacat manufaktur karena sifatnya yang sangat getas. Meskipun kekuatan tariknya berada di angka 380 MPa, tingkat perpanjangannya danjlok drastis ke angka 13,740%. Ini merupakan kualitas terburuk untuk aplikasi tubuh kendaraan; pelat otomotif dengan elongasi di bawah 15% hampir dipastikan akan mengalami retak, robek, atau pecah (*cracking/tearing*) saat mengalami proses *stamping*.

Terakhir, Sampel 5 merepresentasikan karakteristik panel bodi berkekuatan tinggi. Dengan UTS 450 MPa dan elongasi 27,512%, spesimen ini sangat cocok diaplikasikan pada bagian bodi yang menuntut perlindungan struktural tinggi, seperti pilar-A atau pilar-B pelindung kabin. Material ini tidak hanya kuat menopang struktur, namun juga masih menyediakan ruang mulur sekitar 27% yang berfungsi sangat krusial dalam menyerap energi kinetik secara efektif pada saat terjadi tabrakan (*crashworthiness*).

3. Evaluasi Tingkat Variabilitas

Data eksperimen menunjukkan adanya inkonsistensi sifat mekanis yang cukup mencolok pada pelat "marlip". Kita bisa melihat selisih kekuatan tarik yang cukup lebar hingga mencapai 100 MPa, yang membentang dari 360 MPa sampai 460 MPa. Selain itu, sebaran data elongasinya juga terlampau jauh. Di satu sisi, terdapat spesimen yang sangat getas (Sampel 4) dengan regangan hanya 13,74%, tetapi di sisi lain ada yang sangat ulet hingga 36,24% (Sampel 3). Jomplangnya angka-angka ini menunjukkan bahwa struktur mikro di dalam pelat tersebut belum seragam. Dari sudut pandang metalurgi, ketidakhomogenan ini kemungkinan besar dihilangkan dari proses *cold rolling* (pengerolan dingin) di pabrik yang kurang presisi. Kondisi ini sejalan dengan temuan (Effendi, 2016), yang menjelaskan bahwa distribusi regangan plastis yang tidak merata saat pengerolan memicu menumpuknya dislokasi yang asimetris. Ujung-ujungnya, ukuran butir menjadi belang-belang dan menyebabkan gesekan pada keuletan maupun kekuatan tarik materialnya. Fluktuasi spesifikasi semacam ini jelas menjadi masalah besar jika pelat langsung disorongkan ke lini *stamping* karoseri otomotif. Pabrik perakitan mobil skala masal umumnya menerapkan *pengaturan* mesin *press* yang konstan, baik dari sisi tekanan maupun kecepatan. Kalau material yang disuplai punya tingkat kekerasan dan keliatan yang berubah-ubah, *tingkat penolakan* atau angka

cacat produk sudah pasti akan meroket tajam. Risiko Sobek (*Robek*): Pelat area yang sifatnya mirip Sampel 4 tidak akan sanggup melar mengikuti bentuk cetakan (*dies*). Akibatnya, panel bodi akan mudah sobek atau retak saat ditekan. Risiko Melenting (*Springback*): Sebaliknya, area yang sifatnya menyerupai Sampel 3 mungkin aman dari robekan dan mulus saat dicetak, tetapi rawan melenceng dari ukuran aslinya akibat tingginya gaya pegas balik. (Fann et al., 2025) konfirmasi bahwa ketegangan pada kekuatan luluh dan elongasi merupakan biang kerok utama sulitnya memprediksi efek *springback*, yang pada akhirnya membuat komponen bodi sulit dirakit Pelat dengan elongasi di bawah batas toleransi otomotif akan langsung mengalami robekan ketika dipaksa mengikuti profil cetakan yang tajam.

Secara garis besar, profil mekanis material SS400 sebenarnya memiliki potensi yang cukup mumpuni untuk diaplikasikan pada panel luar (*panel luar*) atau bahkan struktur pilar kendaraan. Syaratnya, kinerjanya harus konsisten seperti yang ditampilkan oleh Sampel 3 atau Sampel 5. Sebagai jalan keluarnya, material ini mutlak memerlukan perlakuan panas lanjutan sebelum masuk ke lini perakitan. Opsi yang paling direkomendasikan adalah proses anil (*annealing*) khusus pelat tipis. Langkah ini sangat penting untuk menata ulang struktur kristal yang rusak/terdistorsi, melepaskan tegangan sisa (*sisa stress*) bawaan dari pabrik, mengembalikan keuletan material secara merata di seluruh permukaan pelat. Melalui proses *annealing* ini, kita bisa menargetkan agar nilai elongasi pelat lebih stabil pada rentang ideal dan aman untuk otomotif, yaitu sekitar 25% hingga 30%. Rekomendasi ini sangat didukung oleh literatur dari (Ogawa et al., 2026). yang menyimpulkan bahwa *annealing* pada lembaran *cold-rolled* ampuh untuk menghomogenkan struktur mikro. Hasilnya, proses pembentukan (*deep drawing*) bisa berjalan jauh lebih mulus tanpa perlu khawatir pelat akan robek atau meleleh di luar kendali. Penerapan proses *annealing* pada material SS400 sangat krusial bagi *shuttle bus* listrik karena perlakuan panas ini mampu menata ulang struktur kristal agar lebih homogen, sehingga memastikan kemampuan membungkus plastis yang konsisten pada jarak elongasi 25%–30% untuk menyerap energi tabrakan secara efektif guna melindungi sistem baterai yang sensitif. Selain meningkatkan *crashworthiness*, proses ini krusial untuk menstabilkan *kekuatan luluh* material guna meminimalisir risiko efek *springback* yang sering menyebabkan

ketidakpresisian panel bodi, sehingga menjamin kerapatan sambungan yang mutlak diperlukan untuk menjaga sistem kelistrikan bertegangan tinggi dari infiltrasi udara. Lebih jauh lagi, dengan menghilangkan tegangan sisa (*residual stress*) bawaan pabrik, *annealing* memungkinkan pembentukan komponen tubuh dengan lekukan aerodinamis kompleks tanpa risiko robek (*robek*), yang secara langsung meningkatkan efisiensi energi kendaraan serta memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap kelelahan logam (*fatigue*) akibat getaran motor listrik selama operasional intensif. Dengan demikian, proses *annealing* tidak hanya menstandarisasi kualitas material, tetapi juga menjadi fondasi teknis utama dalam menciptakan unit *shuttle bus* listrik yang aman, kedap udara, dan memiliki efisiensi aerodinamis yang optimal.

D. PENUTUP

Simpulan

Secara keseluruhan, Pelat SS400 memiliki karakteristik mekanis yang mumpuni untuk diaplikasikan pada industri otomotif, baik sebagai panel luar yang landai, komponen kompleks (*deep drawing*), maupun struktur pilar berkekuatan tinggi penyerap energi tabrakan. Namun saat ini terkendala oleh tingginya variabilitas sifat mekanis akibat proses *cold rolling* yang kurang presisi. Ketidakhomogenan ekstrem ini memunculkan area material yang sangat getas sekaligus sangat ulet, yang berisiko memicu cacat produksi massal seperti robekan (*tearing*) atau pelentingan bentuk (*springback*) pada saat proses *stamping*. Oleh karena itu, sebagai solusi mutlak sebelum masuk ke lini perakitan, pelat ini wajib melalui perlakuan panas lanjutan berupa proses *annealing* guna menyeragamkan struktur mikro, melepaskan tegangan sisa, dan menstabilkan keuletan (elongasi) pada jarak ideal 25% hingga 30% agar aman dan konsisten untuk dicetak.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, untuk mengoptimalkan pemanfaatan pelat SS400, khususnya pada produksi *shuttle bus* listrik, pihak industri karoseri wajib menerapkan proses *annealing* pra-produksi sebagai langkah krusial untuk mencegah cacat *stamping* dan efek *springback* yang berisiko memicu kebocoran kebocoran pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi. Dengan material yang sudah distabilkan, pabrikan dapat

mengalokasikan spesifikasi pelat secara tepat guna menggunakan area berelongasi tinggi untuk komponen bodi aerodinamis yang kompleks, material terbatas luhur tinggi untuk panel mendatar agar tahan penyok, dan area berspesifikasi *crashworthiness* tinggi untuk struktur rangka pelindung kompartemen baterai, sekaligus menyortir ketat material getas agar terhindar dari risiko kelelahan logam (*fatigue*). Terakhir, guna mendukung standarisasi terpadu ini, penelitian lanjutan sangat direkomendasikan untuk memvalidasi tingkat efektivitas *annealing* tersebut melalui simulasi *stamping* berbasis perangkat lunak serta observasi analisis struktur mikro secara mendalam menggunakan mikroskop elektron.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Prodi Pendidikan Teknik Otomotif Universitas Pendidikan Indonesia yang telah menyediakan dan memfasilitasi eksperimen pengujian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada PT. Marlip yang telah membantu dalam proses pengumpulan data dan pemberian sampel spesimen yang diperlukan selama penelitian berlangsung. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing serta semua pihak yang telah memberikan arahan, dukungan, dan masukan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashby, M. F., Boston, A., London, H., Oxford, Y., San, P., San, D., Singapore, F., & Tokyo, S. (2022). *Materials Selection in Mechanical Design*. <http://books.elsevier.com>
- Deng, S., He, T., Du, X., & Zhu, J. (2026). Tensile Deformation Behavior and Constitutive Modeling of Solid-Solution-Treated 6061 Aluminum Alloy. *Materiali in Tehnologije*, 60(2), 161–170. <https://doi.org/10.17222/mit.2025.1572>
- Effendi, M. (2016). *Simulasi Cup Drawing untuk Menghindari Cacat Wringkling dan Thinning Dengan Menggunakan Software AUTOFORM R2*.
- Fann, K.-J., Chen, L.-P., Yang, C.-Y., Lee, C.-Y., Tsai, C.-Y., & Wang, J. (2025). An Artificial Intelligence Application for In-Process Springback Control of Sheet Metal Bending. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 147(6). <https://doi.org/10.1115/1.4067740>
- Gebre, N. M., De Biasi, R., Rita, D. A., Santus, C., Romanelli, L., Neri, P., Perini, M., Berto, F., & Benedetti, M. (2025). Towards standardization of tensile testing for strut-

- based lattices using compensated beam modeling and strain-energy-based optimization. *Materials and Design*, 258(July), 114696. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114696>
- William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch *Materials Science and Engineering An Introduction* (2021). Methods, E. (n.d.). *Chanical behavior*.
- Mikell P. Groover. (2020). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems Seventh Edition. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- Naumann, D., & Merklein, M. (2025). Tensile testing of sheet metals at elevated temperatures with optical strain rate control. *MATEC Web of Conferences*, 408, 01002. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202540801002>
- Novák, V., Tatiček, F., Stejskal, O., Trzepieciński, T., & Žaba, K. (2026). Effect of Strain Rate on the Formability Prediction of Cold-Rolled DX56D+Z100-M-C-O Steel Sheets. *Materials*, 19(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma19010099>
- Ogawa, T., Hayashi, H., & Dannoshita, H. (2026). Effects of Two-Way Cold Rolling and Subsequent Annealing on the Microstructure and Tensile Properties of Low-Carbon Steel with Different Initial Microstructures. *Materials*, 19(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma19030466>
- Pelleg, J. (2013). Mechanical properties of materials. In *Solid Mechanics and its Applications* (Vol. 190). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4342-7>
- Sutisna, N. A. (2021). Rancang Bangun Mesin Uji Universal Untuk Pengujian Tarik dan Tekuk Bertenaga Hidrolik. *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 6(1), 32. <https://doi.org/10.33021/jmem.v6i1.1481>
- Tedesco, M. M., Licignano, P., Mara, A., Plano, S., Gabellone, D., Basso, M., & Baricco, M. (2025). Mechanical and Metallurgical Characterization of Advance High Strength Steel Q&P1180 Produced by Two Different Suppliers. *Metals*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/met15030301>
- Zhang, P., Zhang, H., Yu, G., & Jiang, Z. (2025). Size Effect on Tensile Properties and Fracture Mechanism of Micro-Rolled Ultra-Thin Cu/Al Composite Sheet. *Metals*, 15(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/met15080907>