

Studi Perbandingan Kelayakan Baja dan Aluminium dalam Desain Komponen Mesin Sederhana

Arya Syahputra ^{*1}
Aidil Akbar Bagaskara ²
Andhika Dwi Putra ³

^{1,2,3} Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan

*e-mail: aryasyahputrasudarmanto@gmail.com, aii4akbar04@gmail.com, dwiputraa185@gmail.com

Abstrak

Industri otomotif memiliki peran krusial dalam perekonomian negara maju, dengan pembentukan pelat logam menjadi proses penting dalam pembuatan mobil. Menanggapi tren terkini, penekanan pada konstruksi ringan telah menjadi prioritas untuk memenuhi permintaan pelanggan dan persyaratan hukum yang ketat. Material dengan kekuatan tinggi, seperti baja dua fasa (DP1000) dan baja plastisitas yang dipicu transformasi (TRIP780), bersama dengan paduan aluminium (misalnya, AA7021, AA7075), menawarkan keuntungan signifikan. Material ini memungkinkan penggunaan lembaran yang lebih tipis, mengurangi berat, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar, yang selaras dengan tujuan perlindungan lingkungan. Namun, hal ini sering kali mengurangi kemampuan formasi material tersebut. Artikel ini menyajikan studi perbandingan antara material baja dan aluminium dalam konteks pembuatan komponen mesin sederhana. Fokusnya adalah pada perkembangan terbaru dalam baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminium, dengan menganalisis penggunaannya dalam industri otomotif, khususnya pada proses pembentukan pelat logam untuk produksi body-in-white. Studi ini mengeksplorasi berbagai aspek kinerja material, termasuk kekuatan, pengurangan berat, dan kemampuan formasi, untuk memberikan wawasan mengenai pilihan optimal bagi komponen mesin yang ringan dan tahan lama.

Kata Kunci : Industri otomotif, baja berkekuatan tinggi, paduan aluminium, pembentukan lembaran logam, body-in-white, komponen mesin sederhana.

Abstract

The automotive industry has a crucial role in the economies of developed countries, with the formation of metal plates being an important process in car manufacturing. In response to recent trends, the emphasis on lightweight construction has become a priority to meet customer demands and stringent legal requirements. High-strength materials, such as two-phase steels (DP1000) and transformation-triggered plasticity steels (TRIP780), along with aluminum alloys (e.g., AA7021, AA7075), offer significant advantages. This material allows for the use of thinner sheets, reduces weight, and improves fuel efficiency, which is aligned with environmental protection goals. However, this often reduces the ability of the material to form. This article presents a comparative study between steel and aluminum materials in the context of manufacturing simple machine components. The focus is on the latest developments in high-strength steels and aluminum alloys, by analyzing their use in the automotive industry, in particular in the process of forming metal plates for body-in-white production. The study explores various aspects of material performance, including strength, weight reduction, and formation capability, to provide insight into the optimal choice for lightweight and durable machine components.

Keywords: Automotive industry, high-strength steel, aluminum alloy, sheet metal forming, body-in-white, simple machine components.

PENDAHULUAN

Produksi dengan biaya rendah dalam industri otomotif menjadi salah satu tujuan utama akibat meningkatnya persaingan global. Menurut Konečný et al. (2021), efisiensi biaya merupakan faktor utama yang mendorong inovasi dalam teknologi manufaktur, karena industri otomotif berupaya untuk tetap kompetitif di pasar global yang semakin ketat. Meskipun produksi dengan teknologi ringan seringkali dikaitkan dengan pengurangan biaya, dalam banyak kasus, teknologi ringan justru dapat meningkatkan biaya produksi karena memerlukan proses dan peralatan baru. Sebagaimana dijelaskan oleh Liu et al. (2019), meskipun teknologi ringan berpotensi mengurangi biaya jangka panjang melalui pengurangan konsumsi energi, investasi

awal dalam teknologi ini sering kali lebih tinggi. Penelitian dalam manufaktur ringan di industri kendaraan menjadi prioritas utama karena adanya pembatasan lingkungan yang sangat ketat dan terus meningkat terkait emisi berbahaya, serta tuntutan untuk memenuhi standar keselamatan yang lebih tinggi. Seperti yang disampaikan oleh Gupta & Rathi (2020), regulasi lingkungan yang semakin ketat mendorong produsen untuk mengadopsi material dan proses yang lebih ramah lingkungan, dengan fokus utama pada pengurangan emisi karbon. Dalam memenuhi persyaratan ini, pengurangan berat kendaraan memegang peran penting, terutama pada bagian bodi mobil, yang menurut Zhang (2021) dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan dampak lingkungan secara signifikan. Pengurangan berat kendaraan tidak hanya mengarah pada efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi pada pencapaian standar keselamatan yang lebih tinggi.

Dalam produksi elemen bodi mobil, yang sering disebut sebagai produksi body-in-white, proses pembentukan lembaran logam dianggap sebagai salah satu proses manufaktur yang paling penting. Seperti yang diungkapkan oleh Smith et al. (2019), proses ini sangat krusial karena berperan dalam menentukan kekuatan dan kokoh struktur bodi mobil. Oleh karena itu, pengembangan proses manufaktur berbiaya rendah yang inovatif menjadi tujuan utama dalam pembentukan lembaran logam, dengan prinsip produksi ringan sebagai fokus utama. Menurut Zhang (2020), prinsip ringan tidak hanya membantu dalam mengurangi konsumsi bahan bakar tetapi juga memberikan keuntungan kompetitif di pasar otomotif yang semakin mengutamakan keberlanjutan. Dua tren utama dalam produksi bagian otomotif yang ringan adalah penggunaan baja berkekuatan tinggi dan bahan ringan, terutama berbagai paduan aluminium berkekuatan tinggi. Seperti yang dikemukakan oleh Wang (2018), penggunaan baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminium berkekuatan tinggi dapat memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan struktural dan pengurangan berat, yang menjadi kunci dalam memenuhi standar keselamatan dan efisiensi bahan bakar yang semakin ketat. Pada bagian selanjutnya, akan dibahas dua tren utama tersebut, yaitu aplikasi berbagai jenis baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminium. (Hoffmann et al., 2007) Kedua material ini menjanjikan potensi besar dalam memenuhi target efisiensi produksi dan persyaratan lingkungan yang semakin ketat, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Penggunaan baja berkekuatan tinggi memungkinkan pengurangan ketebalan material sambil mempertahankan kekuatan struktural, sementara paduan aluminium menawarkan keuntungan dalam hal pengurangan berat kendaraan yang langsung berdampak pada efisiensi bahan bakar dan emisi karbon. Oleh karena itu, perbandingan antara kedua material ini sangat penting untuk menentukan pilihan material yang optimal dalam produksi komponen otomotif. (Bouaziz et al., 2013) Selanjutnya, perbandingan akan dilakukan mengenai penerapan baja dan paduan aluminium di industri otomotif dari berbagai sudut pandang, termasuk kekuatan, formabilitas, biaya produksi, serta dampak lingkungan. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan wawasan lebih mendalam mengenai kelebihan dan kelemahan masing-masing material dalam konteks aplikasi nyata di lini produksi otomotif.

METODE

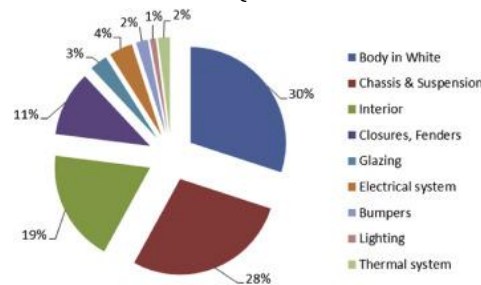
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk membandingkan baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminium dalam pembuatan komponen mesin sederhana. Metode yang digunakan meliputi studi literatur untuk mengumpulkan data sekunder, eksperimen laboratorium untuk mengukur sifat mekanis material, serta wawancara dengan ahli untuk mendapatkan wawasan industri. (Yanagida & Azushima, 2009) Analisis dilakukan dengan menggunakan analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik material dan uji statistik untuk membandingkan perbedaan signifikan antara keduanya. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai keunggulan dan kelemahan kedua material, serta rekomendasi untuk aplikasi yang lebih efisien dalam industri otomotif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan Material dalam Manufaktur Ringan

Seperti yang disebutkan dalam bagian Introduction, terdapat dua kelompok material utama yang banyak diterapkan dalam produksi mobil untuk memenuhi tuntutan yang semakin

meningkatkan: pengembangan dan aplikasi berbagai jenis baja berkekuatan tinggi, serta pengembangan dan aplikasi paduan logam ringan (Karbasian & Tekkaya, 2010). Sebelum masuk ke perbandingan rinci mengenai aplikasi dan tren pengembangan material baja dan aluminium, pengembangan material dalam industri otomotif akan dibahas terlebih dahulu, terutama dari perspektif pengurangan berat. Pengurangan berat kendaraan dianggap sebagai salah satu faktor utama dalam pengembangan material, yang bertujuan untuk memenuhi persyaratan hukum terkait perlindungan lingkungan. Oleh karena itu, penting untuk menganalisis potensi pengurangan berat pada berbagai bagian kendaraan. Gambar 1 menunjukkan rasio berat komponen utama (kecuali powertrain) pada mobil biasa. (Zheng et al., 2018) Dari angka ini, dapat diamati bahwa sekitar 58% dari total berat (tidak

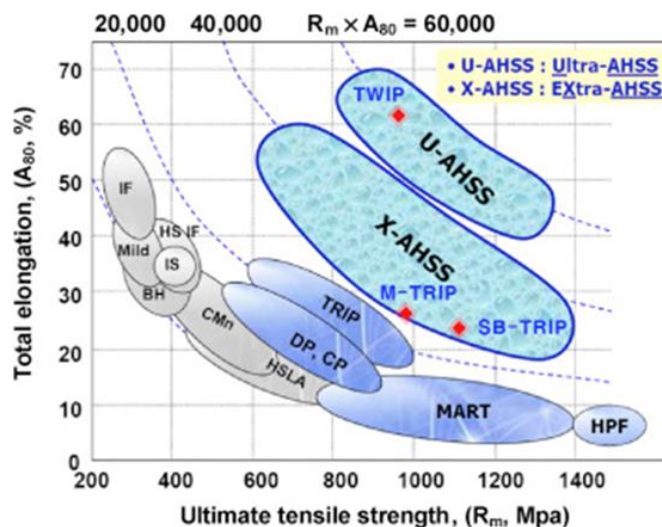


Gambar 1 - Rasio berat berbagai komponen kendaraan

termasuk powertrain) dikaitkan dengan bagian bodi, sasis, dan elemen suspensi. Oleh karena itu, dari perspektif pembentukan lembaran logam, sehubungan dengan potensi pengurangan berat, fokusnya terutama pada elemen-elemen ini. (Bouaziz et al., 2013) Meskipun perkembangan terbaru juga telah melihat penerapan polimer dan bahan komposit, makalah ini terutama akan berfokus pada bahan logam.

Pengembangan dan Penerapan Berbagai Baja Kekuatan Tinggi dalam Manufaktur Body-in-White

Selama beberapa dekade dalam sejarah manufaktur mobil, baja canai dingin konvensional mendominasi produksi bodi mobil. Namun, dalam 20-30 tahun terakhir, telah terjadi perkembangan yang signifikan dan dinamis, sebagian besar didorong oleh kebutuhan untuk memproduksi struktur bodi mobil yang ringan. Perkembangan ini dirangkum pada Gambar 2, di mana apa yang disebut generasi pertama, kedua, dan ketiga dari baja berkekuatan tinggi digambarkan.

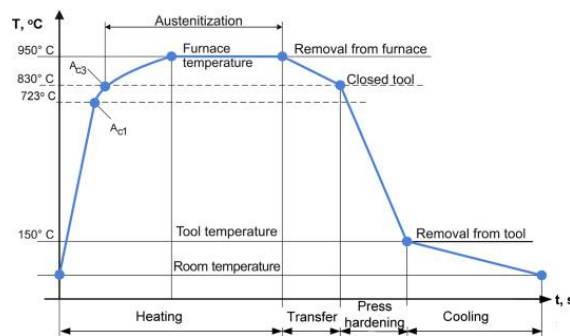


Gambar 2 - Hubungan antara total perpanjangan (A_{80}) dan kekuatan tarik maksimum (R_m) untuk berbagai generasi baja berkekuatan tinggi

Meskipun ada peningkatan signifikan pada kekuatan baja baru, formabilitasnya tetap meningkat meskipun mengikuti aturan umum bahwa peningkatan kekuatan seringkali menurunkan formabilitas. (Gatzen et al., 2016) Gambar ini menggambarkan formabilitas melalui perpanjangan total lembaran (A80) dan kekuatan dengan kekuatan tarik maksimum (Rm). Dalam proyek AutoTech, yang didanai oleh Uni Eropa dan pemerintah Hongaria, dilakukan uji eksperimen untuk menganalisis formabilitas baja baru yang telah banyak digunakan di industri otomotif. Penelitian ini juga mencakup pengembangan (Merklein et al., 2016) Press Hardening Steels (PHS), seperti baja 22MnB5, yang digunakan dalam pembentukan panas untuk elemen bodi struktural. Selain itu, fokus pada logam ringan melibatkan proses pembentukan panas baru untuk paduan aluminium berkekuatan tinggi, yang berkaitan erat dengan pembentukan panas baja PHS.

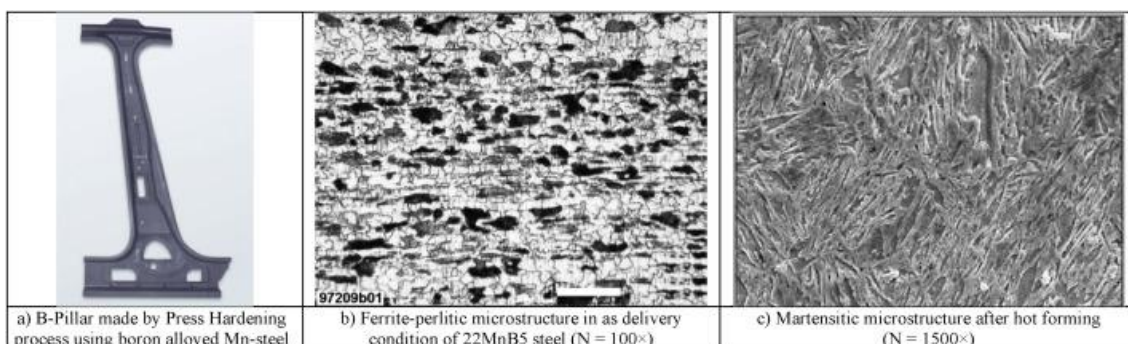
Proses Pembentukan Panas Baja PHS

Pembentukan panas baja melibatkan austenitisasi, pembentukan dalam kondisi austenit, dan pendinginan cepat untuk menghasilkan struktur martensitik berkekuatan tinggi. Terdapat dua varian utama: pembentukan panas langsung, di mana lembaran dipanaskan, dibentuk, dan didinginkan langsung, serta pembentukan panas tidak langsung, di mana lembaran dibentuk dingin sebelum dipanaskan dan didinginkan. (Greenwood & MacGregor, 1965) Selain itu, variasi proses lainnya memungkinkan kontrol struktur mikro dan sifat mekanik dengan menyesuaikan suhu penahanan dan laju pendinginan. Jika suhu penahanan berada dalam rentang interkritis ($\alpha+\gamma$), hanya austenit yang dapat diubah menjadi martensit, menghasilkan struktur mikro yang masih mengandung ferrit, memberikan kekuatan lebih rendah namun ketangguhan lebih baik dibandingkan dengan austenitisasi penuh.



Gambar 3 - Suhu vs. waktu proses untuk pembentukan hot press.

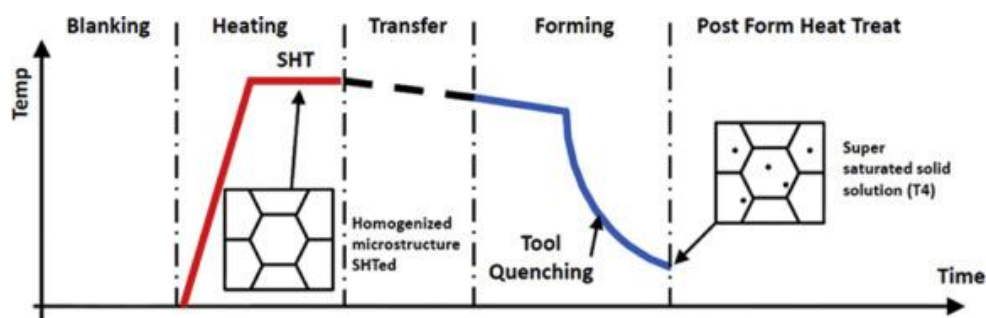
Variasi proses lainnya dapat terjadi dengan mengubah laju pendinginan setelah proses pembentukan. Jika laju pendinginan lebih rendah dari suhu kritis atas, struktur mikro akhir selain martensit juga mengandung bainit. (Steinbeiss et al., 2007) Meskipun ini juga mengarah pada kekuatan yang sedikit lebih rendah tergantung pada jumlah bainit, namun peningkatan ketangguhan bisa menguntungkan, seperti meningkatkan ketahanan tumbukan bagian tersebut karena sifat penyerap energi bainit yang lebih baik. Bagian otomotif yang dibuat dengan proses ini ditunjukkan pada **Gambar 3a**. Struktur mikro dalam kondisi pengiriman dapat dilihat pada **Gambar 3b**. Sangat penting bahwa pembentukan selesai di atas suhu M_s (karakteristik untuk material yang diberikan); pada tahap ini, material tersebut masih memiliki formabilitas yang sesuai. Setelah pembentukan, komponen didinginkan bersama dengan alat: pendinginan ini harus memberikan laju pendinginan kritis untuk mendapatkan struktur mikro martensitik yang memiliki kekuatan tinggi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3c**.



Gambar 4 - Bagian otomotif khas yang dibuat oleh Press Hardening dan struktur mikronya sebagai kondisi pengiriman dan setelah pembentukan panas dan pendinginan

Paduan Aluminium dalam Industri Otomotif

Secara umum, penggunaan aluminium dalam manufaktur mobil, meski dianggap sebagai tren baru, sebenarnya telah dimulai lebih dari seabad lalu. Meskipun baja tetap menjadi pilihan utama bagi banyak produsen mobil, meningkatnya tuntutan konsumen dan regulasi terkait efisiensi bahan bakar serta perlindungan lingkungan mendorong penggunaan material ringan seperti aluminium. (Merklein & Lechler, 2006) Aluminium, dengan densitas yang hanya sepertiga dari baja, menawarkan kekuatan torsi dan kekakuan yang dibutuhkan untuk komponen otomotif, meski biayanya lebih tinggi. Ini menyebabkan aluminium awalnya lebih banyak digunakan di segmen mobil premium. Sementara penggunaan aluminium meningkat pesat, aplikasinya pada body-in-white (BIW) masih terbatas, dengan sebagian besar substitusi terjadi pada komponen mesin melalui pengecoran dan penempaan. (Steinbeiss et al., 2007) Tekanan regulasi untuk efisiensi bahan bakar dan daur ulang mendorong penggantian aluminium terhadap baja, meskipun tantangan tetap ada dalam hal biaya bahan baku dan proses manufaktur yang lebih mahal. (Zheng et al., 2018) Penelitian menunjukkan bahwa penghematan berat pada aplikasi BIW dapat mencapai 50%, yang berdampak pada pengurangan berat kendaraan hingga 30–40%. Paduan seperti AA5754 dan AA6082 mulai banyak digunakan, dengan AA5754 sering diaplikasikan pada mobil sport dan AA6082 pada mobil mewah, menunjukkan potensi aluminium sebagai alternatif baja meski biaya masih menjadi pertimbangan utama. (Greenwood & MacGregor, 1965)



Gambar 5 - Prinsip dasar Hot Forming dan Quenching™ paduan aluminium.

Banyak proyek substitusi material memandang penggantian baja dengan aluminium hanya dari sudut pandang pengurangan berat dan titik substitusi material. Namun, substitusi material seharusnya juga ditangani dengan pendekatan rekayasa desain dan proses. Salah satu contoh yang baik untuk pendekatan ini dapat ditemukan pada Volvo, (Tisza & Czinege, 2018) yang mengidentifikasi bahwa substitusi material sering kali mengarah pada konsep desain baru yang membutuhkan pengembangan proses signifikan. Dalam produksi panel bodi, salah satu target utamanya adalah mencapai keseimbangan yang baik antara formabilitas dan sifat kekuatan tinggi setelah proses pemanggangan cat, bersama dengan kualitas permukaan yang tinggi setelah proses

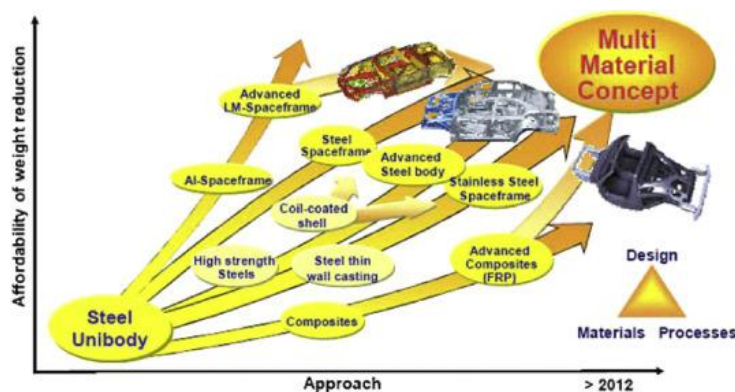
penempaan dan penyelesaian cat. Dari sudut pandang ini, penerapan paduan aluminium berkekuatan ekstra tinggi seri 7xxx – termasuk paduan 7021 dan 7075 – menjadi fokus utama dalam kegiatan penelitian. Secara umum diterima bahwa formabilitas paduan aluminium pada suhu ruangan biasanya lebih rendah dibandingkan dengan formabilitas baja yang banyak digunakan dalam manufaktur bodi. Namun, jika mempertimbangkan formabilitas paduan aluminium berkekuatan tinggi, seperti AA7075, dapat dikatakan bahwa paduan ini bisa menjadi alternatif yang kompetitif dalam kondisi pembentukan panas. Inilah sebabnya, deskripsi lebih rinci tentang *Press Hardening* pada baja diperkenalkan pada Bagian 2.1.1, karena proses ini memiliki banyak kesamaan dengan proses yang baru-baru ini dikembangkan (*Hot Forming and Quenching™*) yang dipatenkan oleh Imperial College dan Impression Technologies. Siklus suhu vs waktu dari proses HFQ ini ditunjukkan pada Gambar 5. (Greenwood & MacGregor, 1965)

Dalam proses HFQ ini, perlakuan panas larutan (SHT) pertama kali dilakukan, di mana semua endapan dilarutkan pada suhu sekitar atau di atas 485 °C, menghasilkan struktur mikro yang dihomogenkan dari larutan α -padat. Durasi proses tergantung pada ketebalan bagian dan biasanya hanya membutuhkan waktu beberapa menit. (Xu et al., 2018) Setelah perlakuan panas larutan, material memasuki keadaan jenuh, dan pendinginan dalam alat menghasilkan parameter kekuatan rendah dan kemampuan bentuk yang baik. Untuk mencapai kekuatan yang cukup tinggi, pengerasan presipitasi harus diterapkan, yang biasanya membutuhkan waktu siklus yang lebih lama. Solusi potensial untuk mengurangi waktu siklus pengerasan presipitasi yang panjang adalah penggunaan proses lain yang tidak dapat dihindari di lini produksi, seperti pemanggangan cat, yang merupakan bagian dari proses penuaan buatan. (Gatzen et al., 2016) Perusahaan AP & T di Swedia telah mengembangkan lini produksi serbaguna untuk pembentukan panas paduan aluminium berkekuatan tinggi, yang dapat dianggap sebagai proses manufaktur volume berbasis industri pertama di dunia untuk komponen otomotif yang terbuat dari paduan aluminium berkekuatan tinggi, melalui kolaborasi global dengan industri dan akademisi.

Pendekatan Multi-Material dalam Konstruksi Ringan Mobil

Meskipun makalah ini lebih fokus pada perbandingan penerapan baja dan aluminium dalam manufaktur mobil, konsep ketiga—yakni pendekatan multi-material—juga perlu disorot sebagai solusi yang menjanjikan untuk manufaktur ringan. (Wadas & Tisza, 2020) Prinsip ini berasal dari proyek Eropa bernama *Super Light Car (SLC)*, yang mengedepankan pengembangan konstruksi ringan melalui pendekatan multi-material. Pendekatan ini digambarkan secara jelas dalam Gambar 6, yang menunjukkan kelayakan pengurangan berat melalui penerapan berbagai konsep multi-material.

Meskipun pendekatan ini memiliki potensi besar dalam pengurangan berat pada manufaktur mobil, pada bagian selanjutnya, makalah ini akan fokus pada analisis komparatif aplikasi baja dan aluminium dalam pembuatan mobil, dengan penekanan pada produksi *body-in-white*.



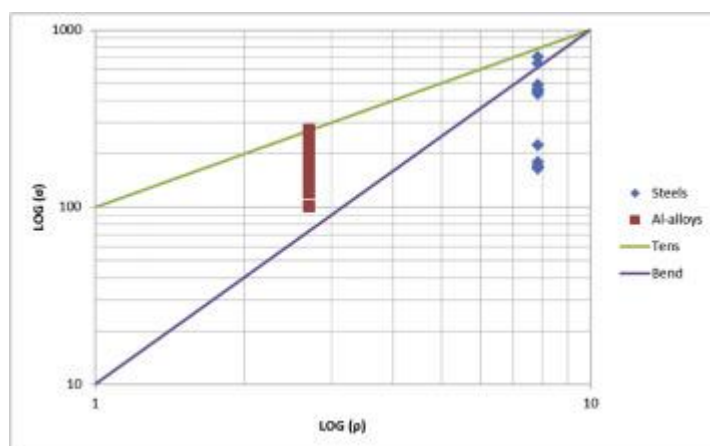
Gambar 6 - Affordability of weight reduction using various multi-material concepts

Analisis Komparatif Penerapan Baja dan Aluminium dalam Manufaktur Mobil

Seperti yang dapat dilihat pada bagian sebelumnya, aplikasi aluminium dalam pembuatan mobil terus meningkat meskipun ada beberapa tantangan, namun masih jauh dari menjadi pilihan utama bagi sebagian besar produsen mobil OEM. (Wadas & Tisza, 2020) Kebutuhan untuk mengganti komponen baja dengan aluminium sebagian besar dipicu oleh tekanan hukum untuk memenuhi standar perlindungan lingkungan, yaitu dengan mengurangi berat kendaraan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Oleh karena itu, baik industri aluminium maupun otomotif berusaha keras untuk menjadikan aluminium sebagai alternatif baja yang lebih hemat biaya. Pada bagian ini, perbandingan antara lembaran baja dan aluminium akan dilakukan berdasarkan aspek utama dalam pembuatan mobil, khususnya produksi panel bodi. (Niemietz et al., 2020)

Pembobotan Ringan: Analisis Parameter Kekuatan dalam Kondisi Pemuatan yang Berbeda

Karena kepadatan aluminium yang jauh lebih rendah, aluminium seharusnya menjadi pilihan alami untuk prinsip konstruksi ringan. Namun, penggantian bagian demi bagian dari baja dengan aluminium bukanlah solusi yang sederhana dan langsung. (Merklein et al., 2016) Karena sebagian besar mobil masih pada dasarnya terbuat dari baja, oleh karena itu dibutuhkan desain ulang total dari kendaraan agar dapat memanfaatkan aluminium secara optimal. Ini bahkan dapat mempengaruhi konsep desain dasar. Beberapa perusahaan otomotif telah mempromosikan desain rangka aluminium menggunakan komponen aluminium yang dibentuk dan diekstrusi,



Gambar 7 - Perbandingan lembaran baja dan aluminium sebagai fungsi dari kekuatan hasil vs kerapatan

sementara yang lain lebih memilih konsep desain terintegrasi yang umumnya menggunakan bodi aluminium yang dibentuk. Jelas, konsep desain ini sangat dipengaruhi oleh volume produksi dan kategori mobil, seperti yang dijelaskan oleh Liewald. (Lauwers et al., 2014) Perbandingan yang jelas antara lembaran aluminium dan baja dapat dilihat melalui diagram Ashby yang terkenal: pada **Gambar 7**, hubungan antara kepadatan dan kekuatan hasil dapat dilihat pada skala logaritmik. Pada diagram ini, titik-titik untuk lembaran baja bervariasi dari lembaran baja cold rolled konvensional yang memiliki karakteristik formabilitas yang baik hingga baja berkekuatan tinggi jenis DP dan TRIP. (Gatzen et al., 2016) Titik-titik untuk aluminium mencakup seri paduan 5xxx dan 6xxx, yang merupakan paduan aluminium yang paling banyak digunakan dalam produksi mobil saat ini pada manufaktur *body-in-white*. Dua garis lurus pada diagram di atas menunjukkan kualitas material yang digunakan untuk membuat elemen struktural dengan berat yang sama pada kondisi beban tertentu: garis atas berhubungan dengan beban tarik (tensile), sementara garis bawah berhubungan dengan beban tekuk (bending). Kemiringan garis-garis ini dapat dihitung menggunakan rumus Ashby yang terkenal, yang diberikan oleh Persamaan (1) untuk beban tarik dan Persamaan (2) untuk tekuk panel datar :

$$(1) m = \frac{F \times L \times \rho}{\sigma}$$

$$(2) m = \left(\frac{12 \cdot S \cdot C_1 \cdot b}{b \times L \times \rho} \right)^{1/3} \times \frac{1}{3}$$

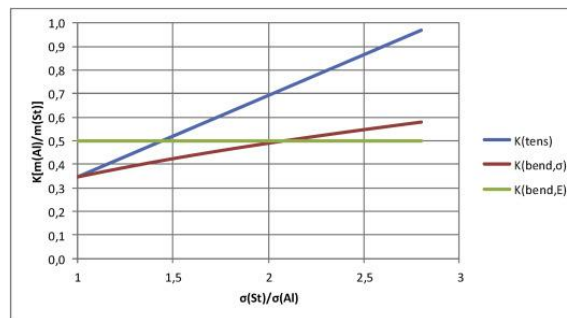
Persamaan (1) menghitung massa optimum untuk bagian tarik, sementara Persamaan (2) menghitung massa optimum untuk panel datar dengan beban tekuk. Dari Gambar 7, dapat dilihat bahwa lembar aluminium dengan kekuatan tinggi setara dengan lembar baja, tetapi jauh lebih menguntungkan dalam hal penggunaan pada tekuk panel datar. Hal ini karena semua paduan aluminium berada di atas garis yang menunjukkan beban tekuk, sehingga dapat dibuat menjadi komponen dengan berat yang lebih kecil dibandingkan baja. Perbandingan massa lembar aluminium dan baja untuk beban yang sama dapat dihitung dari persamaan di atas. Persamaan (3) menghitung rasio massa untuk beban tarik, sementara Persamaan (4) dan (5) digunakan untuk tekuk panel datar:

$$(3) K_{tensile} = \frac{m_{Al}}{m_{St}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{St}} \times \frac{\sigma_{St}}{\sigma_{Al}}$$

$$(4) K_{bending,\sigma} = \frac{m_{Al}}{m_{St}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{St}} \times \left(\frac{\sigma_{St}}{\sigma_{Al}} \right)^{1/2}$$

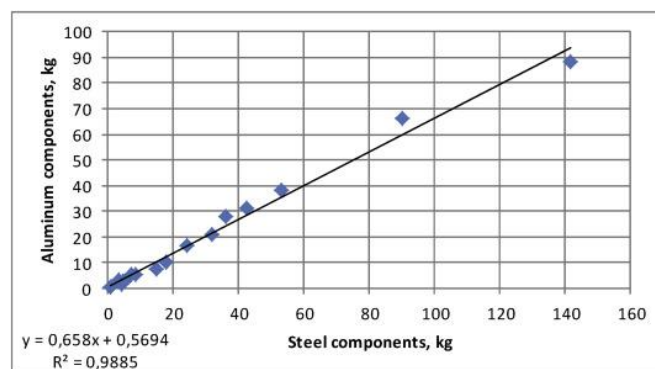
$$(5) K_{bending,E} = \frac{m_{Al}}{m_{St}} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{St}} \times \left(\frac{E_{St}}{E_{Al}} \right)^{1/3}$$

Dalam persamaan-persamaan ini, ρ adalah kerapatan, σ adalah kekuatan hasil, dan E adalah modulus Young. Faktor K ditunjukkan sebagai fungsi dari rasio kekuatan antara baja dan aluminium pada Gambar 8.



Gambar 8 - Perbandingan massa komponen aluminium vs baja

Dari Gambar 8, dapat dilihat bahwa rasio massa untuk pemuatan tarik berubah sekitar dari 0,5 hingga 0,7 dalam kisaran rasio kekuatan 1,5–2. Untuk pembengkokan panel datar, rasio berat berubah dari 0,4 hingga 0,5 jika mempertimbangkan kekuatan, dan 0,5 untuk kekakuan. (Molinari & Ravichandran, 2005) Ini memberikan bukti yang kuat untuk temuan praktis bahwa penggantian baja dengan aluminium menghasilkan pengurangan berat 30–50%, (Hart-Rawung et al., 2020) tergantung pada jenis beban. Temuan ini juga didukung oleh diagram berikut, yang menunjukkan berat komponen aluminium sebagai fungsi dari berat bagian yang sama yang terbuat dari baja. Diagram ini sebagian besar didasarkan pada penelitian penulis dan sebagian lagi pada data dari studi konsep untuk Toyota Venza (lihat Gambar 9).



Gambar 9 - Rasio massa teoritis panel aluminium dan baja untuk kondisi pemuatan yang berbeda.

Biaya Material dan Manufaktur

Biaya menjadi faktor utama dalam pemilihan material baru untuk komponen kendaraan dalam industri otomotif. Penggunaan material pengganti seperti aluminium sering kali memerlukan perubahan signifikan dalam proses manufaktur dan desain, yang mempengaruhi keputusan biaya. (Molinari & Ravichandran, 2005) Meskipun aluminium lebih mahal dari baja, keunggulannya dalam hal manufaktur yang lebih efisien, fungsionalitas tinggi, dan ketahanan korosi sering menjadikannya pilihan yang menarik. (Tong et al., 2005) Faktor-faktor seperti peraturan lingkungan dan efisiensi bahan bakar turut memengaruhi pemilihan material, di mana pengurangan berat aluminium dapat memberikan manfaat jangka panjang dalam hal efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi. Analisis perbandingan biaya antara baja dan aluminium oleh Kelkar dan koleganya menunjukkan bahwa meskipun biaya awal aluminium untuk body-in-white lebih tinggi, potensi penghematan biaya jangka panjang dari efisiensi bahan bakar dapat membuat aluminium menjadi pilihan yang lebih ekonomis. Pengelasan titik untuk aluminium membutuhkan energi lebih tinggi dan peralatan khusus, tetapi manfaat pengurangan massa dari penggunaan aluminium dapat menghasilkan keuntungan bersih dalam biaya siklus hidup kendaraan. Oleh karena itu, dalam konteks regulasi yang semakin ketat dan tuntutan efisiensi, aluminium menjadi alternatif yang semakin menarik meskipun dengan biaya awal yang lebih tinggi. (Tekkaya et al., 2007) Perbandingan biaya yang menarik dilakukan oleh Kelkar dan rekan-rekannya, yang menganalisis ekonomi penggantian baja dengan aluminium dalam produksi body-in-white. Mereka membandingkan desain mobil kecil dan menengah: VW Lupo dengan desain unibody baja konvensional, Lupo hybrid yang dominan baja tetapi memiliki sejumlah komponen ringan, dan Audi A2, yang dirancang sebagai mobil aluminium dengan konsep desain spaceframe. Analisis mereka fokus pada dua biaya utama dalam produksi body-in-white: biaya manufaktur dan perakitan bagian-bagian. (Li et al., 2016) Selain parameter biaya ini, mereka juga mempertimbangkan ketidakpastian dan perubahan harga material yang menguntungkan. Harga material untuk baja dan aluminium dapat berfluktuasi dari waktu ke waktu, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti waktu kontrak dan kondisi pasar. Dimulai dengan harga bahan dasar rata-rata (\$1,50/lb untuk aluminium dan \$0,35/lb untuk baja ringan), mereka memprediksi bahwa peningkatan signifikan dalam penggunaan aluminium untuk panel body akan menurunkan harga bahan lembaran aluminium yang relatif tinggi, sehingga membuat aluminium lebih kompetitif untuk menggantikan baja.

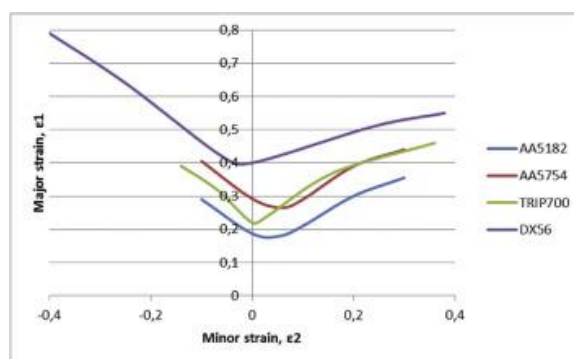
Kemampuan Manufaktur

Dalam hal kemampuan manufaktur, sebuah pabrik otomotif umumnya dibagi menjadi tiga bagian utama: bengkel bodi, bengkel cat, dan bengkel perakitan. (Koistinen & Marburger, 1959) Karena makalah ini fokus utamanya pada pembuatan Body-in-White (BIW), masalah formabilitas dan penyambungan adalah parameter yang paling penting. Baik formabilitas maupun

penyambungan memainkan peran penting dalam produksi bodi mobil, sehingga perbandingannya menjadi aspek yang penting untuk dieksplorasi dalam penelitian ini.

Formabilitas dan Kemampuan Manufaktur Secara Keseluruhan

Telah diketahui dengan baik dan dibahas dalam makalah ini bahwa formabilitas lembaran baja umumnya lebih baik daripada paduan aluminium. Namun, ketika mempertimbangkan formabilitas baja berkekuatan tinggi, situasinya menjadi kurang jelas. Formabilitas lembaran aluminium kurang lebih setara dengan baja berkekuatan tinggi. (Koistinen & Marburger, 1959) Hal ini sebagian didukung oleh *Formability Limit Curves* (FLC) yang ditunjukkan dalam Gambar 10, yang ditentukan pada suhu ruangan. (Somani et al., 2001) Dalam gambar ini, selain baja pembentukan dingin DX56 yang mudah dibentuk, FLC dari TRIP700 ditampilkan bersama dengan dua jenis aluminium (AA5182 dan AA5754) yang umum digunakan dalam produksi otomotif. Berdasarkan gambar ini, dapat disimpulkan bahwa kemampuan deep-drawing (penarikan dalam-dalam) dari paduan aluminium ini sedikit lebih rendah—sekitar 10%—dibandingkan dengan baja. Namun, jika mempertimbangkan formabilitas paduan aluminium berkekuatan tinggi, seperti AA7075 dalam kondisi pembentukan panas, dapat disimpulkan bahwa aluminium dapat menjadi alternatif yang kompetitif dibandingkan baja, terutama dengan adanya proses *Hot Forming and Quenching™* yang baru dikembangkan. Selain formabilitas, ada banyak aspek lain dari proses pembentukan yang perlu dipertimbangkan – misalnya, kecepatan pembentukan, waktu transfer, tekanan penahanan, kebutuhan pelumasan, peralatan, pendinginan, dll., baik untuk aluminium maupun baja. (Kocks, 1976) Dalam produksi elemen bodi-in-white, proses pembentukan dianggap sebagai proses manufaktur utama. Untuk kedua jenis material, baik aluminium maupun baja, umumnya menggunakan proses pencetakan dan stamping lembaran tandem. Tonase tekan yang diperlukan untuk setiap komponen ditentukan berdasarkan material, area, dan ketebalan. Jumlah mesin press yang diperlukan untuk memotong, membentuk, dan memotong setiap bagian juga ditentukan berdasarkan material, desain bagian, dan kompleksitasnya. Daya peralatan dan kebutuhan ruang lantai juga merupakan fungsi dari tonase mesin press.



Gambar 10 - Kurva Batas Kemampuan Bentuk (FLC) untuk berbagai baja dan paduan aluminium

Joining

Setelah proses stamping, elemen bodi mobil harus disatukan menggunakan berbagai metode penyambungan, khususnya untuk paduan aluminium yang menghadapi tantangan seperti karakteristik termofisik dan lapisan oksida. Metode utama untuk baja adalah Resistance Spot Welding (RSW) karena biaya rendah dan kecepatan tinggi. Namun, untuk aluminium, metode seperti Friction Stir Welding (FSW), pengancing mekanis, dan perekat juga digunakan, termasuk teknik hibrida seperti RSW dengan perekat. Tantangan dalam pengelasan aluminium berkekuatan tinggi melibatkan perubahan sifat mekanik selama pemanasan, seperti dalam proses pengecatan, yang dapat mempengaruhi sambungan las. (Hoffmann et al., 2007) Pengelasan material berbeda seperti aluminium dan baja menghadapi tantangan metalurgi, termasuk perbedaan suhu leleh dan kecenderungan aluminium membentuk film oksida yang menghambat lasan. Untuk memastikan

pengelasan yang sukses, jendela proses optimal harus diperhatikan, terutama untuk pengelasan aluminium dan baja yang berbeda. (Hardell & Prakash, 2008) Input panas berpengaruh besar pada sambungan, sehingga dibutuhkan arus tinggi dan siklus pendek bersama tekanan pasca-pemrosesan. Pengelasan mekanis seperti pengancing memiliki produktivitas tinggi dan biaya rendah tanpa efek metalurgi, tetapi kekuatannya lebih rendah dibandingkan dengan RSW. (Niemi et al., 2020) Hemming, biasanya untuk panel bodi luar, juga digunakan pada komponen struktural BIW berkat kemampuan menyambungkan lembaran baja berkekuatan tinggi, menambah fleksibilitas dalam teknik penyambungan komponen otomotif.

Keamanan dan Kelayakan Kecelakaan

Keamanan penumpang sangat ditentukan oleh *crashworthiness*, yang didefinisikan sebagai potensi penyerapan energi. Penyerapan energi dapat dipengaruhi melalui mode kegagalan terkontrol yang memberikan penurunan bertahap dalam profil beban selama kecelakaan. Beberapa aspek harus dipertimbangkan baik dalam desain maupun dalam manufaktur untuk meningkatkan *crashworthiness*: ini mencakup berbagai material, aspek geometris dan dimensi yang mungkin memainkan peran penting pada berbagai tahap kecelakaan. (Bariani et al., 2008) Aspek material dapat melibatkan perilaku deformasi dan kegagalan progresif dalam hal kekakuan dan pengerasan regangan. Deformasi dan regangan pada saat pecah juga sangat penting dalam kapasitas penyerapan energi dari material. Material ringan baru seperti aluminium dan magnesium dapat mengurangi berat kendaraan sambil memenuhi persyaratan keselamatan kecelakaan. Sebagai hasilnya, desain beberapa kendaraan telah sepenuhnya beralih dari baja ke aluminium, sementara banyak kendaraan lainnya memilih untuk menggantikan material yang lebih ringan pada tingkat komponen dan sistem. Sebuah penelitian telah dilakukan pada rel penyerapan energi utama di depan untuk mengubah anggota struktural baja HSLA350 menjadi aluminium 5754NG. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun penggantian aluminium pada ketebalan yang tepat dapat mencapai pengurangan berat dan energi spesifik yang lebih tinggi, parameter desain tambahan seperti target beban desain tetap menjadi tantangan utama. Perbandingan antara baja dan aluminium dalam hal beban kecelakaan rata-rata, manajemen energi kecelakaan, penghematan berat, energi spesifik, dan target beban desain menyoroti beberapa tantangan ini. Hasil dari penelitian eksperimen pada rel aluminium lembaran 5754NG menunjukkan bahwa penggantian rel baja dengan lembaran aluminium 5754NG mengurangi berat setiap rel depan sebesar 3,3 lb dan meningkatkan efisiensi manajemen energi kecelakaan spesifik sebesar 38%.

Pertimbangan Daur Ulang dan Siklus Hidup

Salah satu kekhawatiran yang terus meningkat dalam industri otomotif adalah kesadaran yang semakin tinggi terhadap perlindungan lingkungan. Daur ulang dan pertimbangan siklus hidup kendaraan sudah sangat diatur oleh aturan legislasi yang mewajibkan persentase signifikan kendaraan untuk didaur ulang. Selain itu, banyak negara telah menerapkan aturan *End of Life of Vehicles (ELV)*, yang menentukan jumlah limbah yang dihasilkan oleh kendaraan, dan di antara limbah tersebut, limbah berbahaya harus ditangani sepenuhnya. Untungnya, material logam seperti baja dan aluminium tidak termasuk dalam kelompok limbah berbahaya ini, meskipun bahan polimer dan komposit – yang semakin sering digunakan dalam manufaktur mobil – termasuk dalam kategori tersebut. (Karmiris-Obratański et al., 2020) Seiring dengan diberlakukannya aturan lingkungan baru ini, tidak ada aplikasi material baru yang dapat dipertimbangkan tanpa mempertimbangkan masalah daur ulang. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa komponen baja dan aluminium keduanya dapat didaur ulang, meskipun proses pencairan paduan ini memerlukan input energi yang tinggi. Meskipun produksi aluminium primer menghasilkan lebih banyak CO₂ dibandingkan dengan produksi baja, reprocessing paduan baja menghasilkan hampir empat kali lebih banyak CO₂ dibandingkan dengan aluminium. Material ringan canggih semakin banyak digunakan dalam desain kendaraan baru oleh produsen mobil untuk meningkatkan kinerja dan membantu memenuhi standar ekonomi bahan bakar yang semakin ketat. Untuk menilai dampak energi primer dan karbon dioksida (CO₂) dari desain

kendaraan yang menggunakan material ini, sebuah studi di Amerika Utara memeriksa potensi dampak siklus hidup dari dua desain alternatif kendaraan dengan material ringan, yaitu baja dan aluminium pada kendaraan penumpang tipikal. Studi ini fokus pada *body-in-white* dan penutup kendaraan, karena ini adalah sistem otomotif terbesar berdasarkan berat, yang menyumbang sekitar 40% dari total berat kendaraan penumpang tipikal. Pengurangan massa pada fase penggunaan kendaraan ditemukan menyumbang lebih dari 90% dari total energi siklus hidup kendaraan dan emisi CO₂. Studi ini menunjukkan bahwa desain *Aluminium Intensive Vehicle* (AIV) mencapai pengurangan massa sebesar 25%, yang mengarah pada pengurangan konsumsi energi primer siklus hidup sebesar 20% dan emisi CO₂ sebesar 17%. Secara keseluruhan, desain *Aluminium Intensive Vehicle* menunjukkan titik impas terbaik dari perspektif konsumsi energi primer dan perubahan iklim.

KESIMPULAN

Dalam makalah ini, dilakukan studi komparatif mengenai penerapan baja berkekuatan tinggi dan paduan aluminium dalam industri otomotif. Tren utama dalam produksi mobil saat ini yang menerapkan prinsip konstruksi ringan dianalisis, dengan fokus pada perkembangan material terkini, seperti baja DP, TRIP, dan TWIP, serta paduan aluminium ringan. Konsep pengembangan multi-material dan pengaruhnya terhadap pengurangan berat juga dibahas. Pengembangan proses pembentukan panas, termasuk pada baja Press Hardening dan paduan aluminium berkekuatan tinggi, dibandingkan dengan menyoroti perbedaan dan kesamaan antara kedua proses tersebut serta manfaatnya dalam produksi mobil ringan. Sebagian besar makalah ini juga menganalisis penerapan baja dan paduan aluminium berdasarkan sifat kekuatan, kondisi pembebanan, formabilitas, penyambungan, serta pertimbangan daur ulang dan siklus hidup. Dari perbandingan ini, disimpulkan bahwa meskipun biaya *body-in-white* aluminium lebih tinggi dibandingkan baja dalam hal biaya material, perbedaan biaya keseluruhan produksi kendaraan tidak signifikan. Selain itu, dengan mempertimbangkan penghematan bahan bakar akibat pengurangan massa, biaya penggunaan jangka panjang aluminium bisa mendekati kesetaraan biaya atau bahkan memberikan manfaat bersih dibandingkan dengan konstruksi kendaraan konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghiotti, A., & Turetta, A. (2008). Testing formability in the hot stamping of HSS. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 265–268. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.049>
- Bouaziz, O., Zurob, H., & Huang, M. (2013). Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications. *Steel Research International*, 84(10), 937–947. <https://doi.org/10.1002/SRIN.201200288>
- Gatzen, M., Radel, T., Thomy, C., & Vollertsen, F. (2016). Wetting and solidification characteristics of aluminium on zinc coated steel in laser welding and brazing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.026>
- Greenwood, C. T., & MacGregor, A. W. (1965). THE ISOLATION OF α -AMYLASE FROM BARLEY AND MALTED BARLEY, AND A STUDY OF THE PROPERTIES AND ACTION-PATTERNS OF THE ENZYMES. *Journal of the Institute of Brewing*, 71(5), 405–417. <https://doi.org/10.1002/J.2050-0416.1965.TB06366.X>
- Hardell, J., & Prakash, B. (2008). High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al-Si-coated high-strength steel. *Tribology International*, 41(7), 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.07.013>
- Hart-Rawung, T., Buhl, J., & Bambach, M. (2020). A fast approach for optimization of hot stamping based on machine learning of phase transformation kinetics. *Procedia Manufacturing*, 47, 707–712. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.04.218>

- Hoffmann, H., So, H., & Steinbeiss, H. (2007). Design of hot stamping tools with cooling system. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 269–272. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.062>
- Karbasian, H., & Tekkaya, A. E. (2010). A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2103–2118. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019>
- Karmiris-Obratański, P., Zagórski, K., Cieślik, J., Papazoglou, E. L., & Markopoulos, A. (2020). Surface topography of Ti 6Al 4V ELI after high power EDM. *Procedia Manufacturing*, 47, 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.242>
- Kocks, U. F. (1976). Laws for work-hardening and low-temperature creep. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 98(1), 76–85. <https://doi.org/10.1115/1.3443340>
- Koistinen, D. P., & Marburger, R. E. (1959). A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metallurgica*, 7(1), 59–60. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(59\)90170-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(59)90170-1)
- Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R., & McIntosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(2), 561–583. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>
- Li, N., Sun, C., Guo, N., Mohamed, M., Lin, J., Matsumoto, T., & Liu, C. (2016). Experimental investigation of boron steel at hot stamping conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 228, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.043>
- Merklein, M., & Lechler, J. (2006). Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1–3), 452–455. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.233>
- Merklein, M., Wieland, M., Lechner, M., Bruschi, S., & Ghiotti, A. (2016). Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 228, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.023>
- Molinari, A., & Ravichandran, G. (2005). Constitutive modeling of high-strain-rate deformation in metals based on the evolution of an effective microstructural length. *Mechanics of Materials*, 37(7), 737–752. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.07.005>
- Niemietz, P., Pennekamp, J., Kunze, I., Trauth, D., Wehrle, K., & Bergs, T. (2020). Stamping process modelling in an internet of production. *Procedia Manufacturing*, 49, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.06.012>
- Somani, M. C., Karjalainen, L. P., Eriksson, M., & Oldenburg, M. (2001). Dimensional changes and microstructural evolution in a B-bearing steel in the simulated forming and quenching process. *ISIJ International*, 41(4), 361–367. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.41.361>
- Steinbeiss, H., So, H., Michelitsch, T., & Hoffmann, H. (2007). Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools. *Production Engineering*, 1(2), 149–155. <https://doi.org/10.1007/S11740-007-0010-3>
- Tekkaya, A. E., Karbasian, H., Homberg, W., & Kleiner, M. (2007). Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design. *Production Engineering*, 1(1), 85–89. <https://doi.org/10.1007/S11740-007-0025-9>
- Tisza, M., & Czinege, I. (2018). Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(4), 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.09.001>
- Tong, L., Stahel, S., & Hora, P. (2005). Modeling for the FE-simulation of warm metal forming processes. *AIP Conference Proceedings*, 778 A, 625–629. <https://doi.org/10.1063/1.2011292>
- Wadas, T., & Tisza, M. (2020). Lightweight Manufacturing of Automotive Parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 903(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012036>

- Xu, F., Zhang, X., & Zhang, H. (2018). A review on functionally graded structures and materials for energy absorption. *Engineering Structures*, 171, 309–325. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.094>
- Yanagida, A., & Azushima, A. (2009). Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 247–250. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.091>
- Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex—shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006>