

A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW OF CARBURIZING PROCESSES IN STEELS: DIFFUSION MECHANISMS, PROCESS PARAMETERS, AND SURFACE PERFORMANCE

Reinaldo Evan Audrey¹, Bernadus Crisanto Putra Mbulu², Antonius Prisma Jalu Permana³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin-Fakultas Teknik-Universitas Widya Karya-Malang-Jawa Timur

Email: reinaldoevan@widyakarya.ac.id, chris_bernardo666@widyakarya.ac.id,

antonius.prisma@widyakarya.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah Diterima:
20 April 2026

Naskah Disetujui:
8 Mei 2026

Naskah Diterbitkan:
30 Juni 2026

ABSTRACT

Carburizing is one of the most widely applied thermochemical surface treatments to enhance the mechanical performance of steels; however, existing studies remain fragmented, with limited integration of diffusion mechanisms, process parameters, and their combined effects on surface performance, which hinders process optimization for advanced applications requiring improved wear and corrosion resistance. This study addresses this gap through a systematic literature review (SLR) of approximately 28 peer-reviewed articles indexed in Scopus and ScienceDirect, using a structured methodology consisting of identification, screening, eligibility assessment, and comparative analysis focusing on key variables such as temperature, holding time, carburizing media, and diffusion behavior. The analysis shows that carbon diffusion kinetics and case characteristics are strongly influenced by process parameters, where temperatures of 850–950°C and longer holding times significantly increase case depth (up to >1 mm) and surface hardness (typically 50–65 HRC or improvements up to ~150 HV). In addition, clear distinctions among carburizing methods were identified: gas and vacuum carburizing offer superior control of carbon potential and microstructural uniformity, while pack and liquid carburizing provide more economical alternatives with lower process precision. Notably, inconsistencies were found in correlating diffusion depth with corrosion resistance, indicating a critical research gap. This review establishes an integrated framework linking diffusion mechanisms, processing parameters, and surface performance, offering insights for optimizing carburizing processes and highlighting the need for future studies that simultaneously evaluate mechanical and corrosion properties.

Keywords: *Carburizing Process, Thermochemical Treatment, Carbon Diffusion, Case Hardening, Wear Resistance*

PENDAHULUAN

Di zaman yang semakin canggih dan maju ini, permintaan akan produk industri semakin beragam. Untuk mendukung pesatnya perkembangan teknologi, diperlukan material yang lebih berkualitas yang memiliki sifat-sifat tergantung pada peruntukannya. Kebutuhan akan perkembangan teknologi tidak dapat dipisahkan dari material, sehingga beberapa material berperan aktif dalam kehidupan manusia dan sangat mendukung teknologi saat ini [1]. Beberapa material merupakan material yang dapat diklasifikasikan secara umum menjadi dua, yaitu material logam dan non-

logam [2]. Dengan perkembangan teknologi saat ini, banyak material logam mulia yang dapat dipakai untuk kebutuhan alat elektronik [3]. Hal itu juga yang mempengaruhi perkembangan ide yang dimaksudkan untuk mengubah sifat-sifat yang terkandung pada suatu material, agar material tersebut memiliki kualitas yang baik. Sejak saat itu lahirlah inovasi yang kreatif dari manusia sebagai agen industri yang dapat meningkatkan kualitas suatu material tersebut.

Ada banyak perlakuan heat treatment yang diberlakukan untuk mengeraskan suatu permukaan material [4] dan [5]. Ada 4 macam proses perlakuan panas untuk mengeraskan

suatu permukaan material, dimulai dari *nitriding*, *carburizing*, *carbonitriding*, dan *nitrocarburizing*. Pembahasan kali ini akan merujuk pada proses *carburizing* yang dianggap sangat ideal untuk kebanyakan material dari pada proses pengerasan permukaan yang lainnya. Adapun mengapa digunakan proses *carburizing* ialah sebagai salah satu proses heat treatment yang dapat digunakan untuk mengeraskan bagian luar permukaan material dan melunakkan bagian dalam agar suatu material tidak memiliki sifat terlalu getas. Salah satu proses yang dapat kita manfaatkan dalam meningkatkan kekerasan permukaan pada suatu material ialah berupa *carburizing*. *Carburizing* adalah perlakuan panas termokimia bahan [6]. Untuk produksi, karbon berdifusi ke permukaan bahan logam dan non-logam pada suhu tertentu dari sifat fisik dan mekanik. Proses *carburizing* biasanya dilakukan dengan media pengerasan agar permukaan logam tahan aus [6] dan [13]. *Carburizing* sangat cocok dilakukan pada penggunaan material yang sering terjadi kecacatan pada material pada permukaan (*micropitting*). Kecacatan yang terjadi dapat diakibatkan oleh penggunaan yang terlalu berlebihan, seperti penggunaan *sliding contact*, roda gigi yang aus akibat tegangan-beban oleh rantai, dan masih banyak lainnya [7]. Sehingga dengan berkembangnya teknologi dan informasi di era sekarang ini, banyak orang yang melakukan penelitian dengan memunculkan ide kreatif berupa proses pengerasan permukaan metode *gas carburizing* untuk memperoleh kualitas dan mencegah kecacatan permukaan material [8].

Dalam penggunaan bahan logam di lingkungan korosif, dapat menyebabkan hilangnya beberapa elemen logam terlepas sehingga sifat kekuatan bahan logam akan turun. Maka ada hasil yang diinginkan penelitian untuk mengatasi masalah ini, dengan mempelajari efek pengepakan *carburizing* tentang laju korosi di mana dalam material karbon unsur ditambahkan ke permukaan yang menciptakan perbedaan mikrostruktur antara permukaan dan interior bahan logam, serta mengarah ke ketahanan korosi yang berbeda. *Pack carburizing* yang tepat diharapkan dapat menghasilkan ketahanan yang baik terhadap bahan logam, cocok untuk lingkungan korosif, meningkatkan masa pakai dan efisiensi umur baja [10]. Tidak hanya berupa *carburizing* bertekanan rendah saja pada proses

pengerasan permukaan, akan tetapi ada pula proses *pack carburizing* yang bertujuan untuk meningkatkan kadar karbon permukaan dengan cara menambahkan karbon padat pada logam dengan kadar karbon yang rendah. Adapun hasil yang ingin dicapai adalah untuk mendapatkan sifat mekanik keras pada permukaan dan lentur pada bagian dalamnya. Sehingga pengertian umum dari *pack carburizing* adalah perawatan pengerasan permukaan yang menambahkan karbon padat ke baja karbon rendah dengan mekanisme difusi. Proses difusi karbon ini disebabkan oleh gradien konsentrasi antara lingkungan yang kaya akan kadar karbon dengan kadar karbon yang terkandung pada logam [11]. Pemrosesan umumnya akan dilakukan terhadap baja atau logam yang memiliki kadar karbon sangat rendah (*dead mild steel*) dan baja karbon rendah (*mild steel*) antara 0,008% C - 0,3% C [12]. Dengan penambahan unsur karbon ini dapat membuat suatu material lebih tahan aus maupun tidak mudah terjadi kecacatan apabila diperlakukan sesuai dengan batas maksimal beban-tegangan yang dapat diterima.

Banyaknya macam dari proses *carburizing* sangat beragam selaras dengan perkembangan teknologi di era modern ini. Tuntutan akan kebutuhan industri manufaktur dapat mencerminkan, bahwa ide dapat berkembang dengan pesat yang dapat menyebabkan kemajuan ilmu di bidang material. Sehingga banyak sekali perkembangan yang terjadi pada proses *carburizing* yang dapat dilakukan sesuai dengan kegunaan dan fungsi yang akan dicapai [14]. Selain itu, tuntutan di bidang studi juga dapat menjadikan salah satu faktor yang mempengaruhi perkembangan proses *carburizing* yang sudah dilakukan oleh banyak penelitian bahkan ilmuwan. Maka penyusunan karya tulis ini berdasarkan dari studi yang dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya, baik penelitian dalam negeri maupun luar negeri. Hal ini merupakan studi literatur yang mengarah sebagai informasi bagi pembaca maupun penulis untuk dapat mempelajari lebih dalam seputar ide-ide dari penelitian *carburizing* dan juga berbagai macam pengaruh yang akan terjadi melalui beberapa pengujian. Dalam bab berikutnya akan dibahas ± 30 jurnal referensi berupa penelitian yang berkaitan dengan metode pengerasan permukaan yaitu *carburizing*.

TINJAUAN PUSTAKA

Definisi *Carburizing*

Carburizing merupakan salah satu perlakuan panas termokimia yang umum digunakan di industri untuk meningkatkan sifat mekanik material, khususnya kekerasan permukaan [2] dan [3]. Proses ini dilakukan dengan mendifusikan atom karbon ke dalam permukaan baja karbon rendah pada temperatur austenitisasi, umumnya berkisar antara 850–950°C, dimana fasa austenit stabil dan memiliki kelarutan karbon yang tinggi [7].

Setelah proses *carburizing* diikuti dengan pendinginan hingga suhu kamar, akan terbentuk struktur mikro yang berbeda antara permukaan dan inti material, yang secara signifikan mempengaruhi sifat mekanik keseluruhan, seperti kekerasan dan ketahanan aus [2]. Oleh karena itu, *carburizing* dapat didefinisikan sebagai proses termokimia yang menambahkan unsur karbon pada permukaan material untuk meningkatkan kekerasan. Dan dapat juga berdifusi masuk untuk meningkatkan kekerasan hingga kedalaman tertentu.

Tabel 1. Tipe karakter dari perlakuan difusi [7].

| Proses | Sifat kasus | Temperatur suhu [°C] | Kedalaman difusi | kekerasan permukaan [HRC] | Logam yang diproses | Karakteristik proses |
|---------------------------|---------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--|---|
| <i>Pack carburizing</i> | Difusi karbon | 815 s.d. 1090 | 125 μ m - 1.5 mm | 50 - 63 | Baja karbon rendah, baja paduan rendah | Biaya peralatan rendah, sulit untuk mengontrol kedalaman case secara akurat |
| <i>Gas carburizing</i> | Difusi karbon | 815 s.d. 980 | 75 μ m - 1.5 mm | 50 - 63 | Baja karbon rendah, baja paduan rendah | Kontrol kedalaman casing yang baik, cocok untuk operasi terus menerus, kontrol gas yang baik diperlukan, bisa berbahaya |
| <i>Liquid carburizing</i> | Difusi karbon | 815 s.d. 980 | 50 μ m - 1.5 mm | 50 - 65 | Baja karbon rendah, baja paduan rendah | Lebih cepat dari proses pengemasan dan gas, dapat menimbulkan masalah pembuangan garam, rendaman garam memerlukan perawatan yang sering |
| <i>Vacuum carburizing</i> | Difusi karbon | 815 s.d. 1090 | 75 μ m - 1.5 mm | 50 - 63 | Baja karbon rendah, baja paduan rendah | Kontrol proses yang sangat baik, bagian yang cerah, lebih cepat dari <i>gas carburizing</i> , biaya peralatan yang tinggi |

Klasifikasi *Carburizing*

Beberapa referensi yang terkait memiliki Berbagai referensi yang telah dikaji dalam penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan fokus pembahasan yang cukup signifikan, tergantung pada tujuan penelitian, jenis material yang digunakan, serta pendekatan metode yang diterapkan. Secara umum, kajian-kajian tersebut dapat diklasifikasikan berdasarkan dua aspek utama, yaitu metode proses *carburizing* yang digunakan serta perubahan yang terjadi pada material, khususnya terkait sifat mekanik,

karakteristik mikrostruktur, dan performa permukaan [2], [6], dan [8]. Perbedaan pendekatan ini mencerminkan kompleksitas proses *carburizing* sebagai salah satu metode perlakuan panas termokimia yang tidak hanya dipengaruhi oleh parameter proses, tetapi juga oleh interaksi antara media, temperatur, waktu penahanan, dan komposisi material.

Lebih lanjut, beragamnya tujuan penelitian dalam literatur juga menunjukkan bahwa proses *carburizing* dapat dianalisis dari berbagai sudut pandang, seperti peningkatan

kekerasan permukaan, ketahanan aus, hingga ketahanan terhadap korosi. Oleh karena itu, untuk memperoleh pemahaman yang lebih sistematis dan komprehensif, diperlukan pengelompokan kajian berdasarkan fungsi dan tujuan yang ingin dicapai. Dalam bab ini, pembahasan difokuskan pada berbagai jenis metode *carburizing* yang umum digunakan, disertai dengan analisis terhadap mekanisme proses serta pengaruhnya terhadap perubahan sifat material. Adapun beberapa pokok pembahasan utama yang akan dianalisis meliputi klasifikasi metode *carburizing* dan karakteristik hasil yang ditimbulkan dari masing-masing metode tersebut.

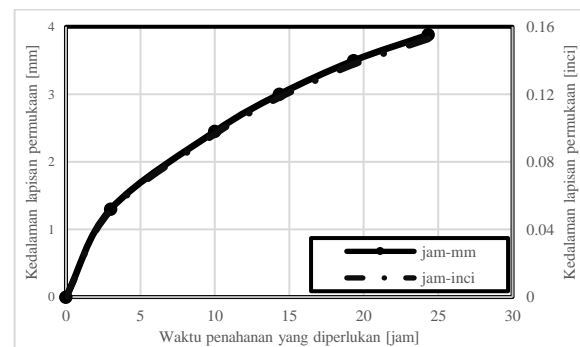
Gas Carburizing

Pada **Error! Reference source not found.** menunjukkan, gas *carburizing* adalah metode di mana media sumber karbon dalam keadaan gas. Gas *carburizing* telah menjadi proses *carburizing* yang sangat populer dalam 20 tahun terakhir **Error! Reference source not found.** Media *carburizing* utama yang digunakan dalam proses ini adalah gas hidrokarbon seperti metana, propana dan LPG. Proses tersebut membutuhkan gas hidrokarbon untuk dicairkan dengan gas pembawa untuk menghindari pembentukan jelaga (*heavy soot*). Gas pembawa yang umum digunakan adalah campuran gas endotermik, karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), nitrogen (N₂) dengan sejumlah kecil karbon dioksida (CO₂), uap air (H₂O), dan metana (CH₄). Gas CO dan CH₄ berperan dalam *carburizing*, sedangkan H₂, H₂O dan CO₂ berperan. Peran *decarburizing*. Gas N₂ inert hanya bertindak sebagai pengencer. Untuk mengatur potensi karbon, karbon yang ada di atmosfer *carburizing*, gas hidrokarbon, digunakan untuk memperkaya gas pembawa dengan mereduksi H₂O **Error! Reference source not found.** Untuk tekanan setiap komposisi yang dibutuhkan pada saat diruang pembakaran atau tungku pembakaran, dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**

Pack Carburizing

Proses di mana karbon monoksida terurai dari senyawa padat pada permukaan logam menjadi karbon [C] dan karbon dioksida [CO₂] yang baru lahir. Karbon yang dihasilkan diserap oleh logam dan karbon dioksida segera bereaksi dengan bahan karbon yang ada dalam senyawa *pack carburizing* untuk menghasilkan karbon monoksida baru. Produksi karbon monoksida

difasilitasi oleh aktivator atau katalis seperti barium karbonat [BaCO₃], kalsium karbonat [CaCO₃], kalium karbonat [K₂CO₃] dan natrium karbonat [Na₂CO₃] dalam senyawa *carburizing*. *Energizer* ini membantu mereduksi karbon dioksida menjadi karbon monoksida dengan karbon [7]. Proses *carburizing* biasa dilakukan dengan memanaskan logam di atas suhu austenit untuk waktu penahanan yang tertentu sesuai dengan keinginan [8].



Gambar 1. Pengaruh waktu pada kedalaman lapisan permukaan pada suhu $\pm 925^{\circ}\text{C}$ **Error! Reference source not found.**

Gambar 1 Menunjukkan grafik hubungan waktu saat proses *carburizing* dengan kedalaman dari permukaan material, garis menunjukkan semakin meningkat keatas dengan kedalaman dari difusi permukaan. Dan juga semakin lama waktu penahanan yang diberikan, maka semakin besar juga atom karbon yang dapat terdifusi dengan jarak masuk tertentu. Sesuai dengan teori yang ada, apabila suatu material diproses dengan menggunakan suhu tertentu dan penahanan waktu yang lama akan membuat suatu material kaya akan kandungan karbon maupun nitrogen yang dapat memperkeras bagian permukaan hingga ke bagian dalam. Dengan menggunakan suhu $\pm 925^{\circ}\text{C}$ umumnya akan mendapatkan garis yang meningkat seiring dengan lama waktu penahanan saat proses berlangsung.

Vacuum Carburizing

Vacuum carburizing adalah proses *carburizing* difusi yang didorong tanpa keseimbangan, di mana baja diaustenisasi dalam vakum mentah, *carburizing* di bawah tekanan parsial gas hidrokarbon, disebarkan dalam vakum, dan kemudian dipadamkan dalam minyak atau gas. Dibandingkan dengan *carburizing* atmosfer tradisional, *vacuum carburizing* menawarkan keseragaman dan pengulangan yang unggul karena kontrol proses lanjutan yang dimungkinkan dalam tungku vakum, menghasilkan ukuran butir yang lebih

baik. Sifat mekanik ditingkatkan karena tidak ada oksidasi medan. Waktu siklus dapat dikurangi, terutama bila menggunakan suhu proses tinggi yang memungkinkan dalam tungku vakum [4]. *Vacuum carburizing* dilakukan untuk mendapatkan lapisan permukaan dengan sifat yang keras. Pengaruh dari variasi suhu dan lama waktu pada struktur dan tingkat kekerasan, dapat dipelajari menggunakan *Optical Microscope* (OM), *X-Ray Diffraction* (XRD) & *Scanning Electron Microscope* (SEM). Saat suhu meningkat, lapisan permukaan sampel secara sedikit demi sedikit meningkat, dan kedalaman lapisan permukaan *carburizing* meningkat [18].

Hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa model atau dimensi secara kuantitatif dapat menentukan distribusi konsentrasi karbon, fraksi fasa Fe-C dan distribusi kekerasan. Terlihat bahwa kandungan karbon berangsur-angsur menurun dari permukaan menuju ke tengah. Hanya setelah tahap *carburizing*, konsentrasi karbon permukaan relatif tinggi. Waktu difusi yang lebih lama mengurangi konsentrasi karbon permukaan menurun dan kedalaman lapisan *carburizing* meningkat. Konsentrasi karbon permukaan yang disimulasikan dan hasil eksperimen berada dalam kesepakatan yang baik [19].

Tabel 2. Komposisi atmosfer terkendali proses *carburizing* [2] dan [7].

| Tekanan masuk | Analisis tekanan tungku [%] | | | | | |
|--|-----------------------------|----------------|----|-----------------|--------------------|-----------------|
| | N ₂ | H ₂ | CO | CH ₄ | Jejak sisa kotoran | |
| | | | | | H ₂ O | CO ₂ |
| Endotermik + CH ₄ | 37 | 48 | 18 | 5 | 0.05 | 0.1 |
| N ₂ -20% CH ₃ OH + CH ₄ | 37 | 40 | 18 | 5 | 0.05 | 0.1 |
| N ₂ -17% CH ₄ -4% CO ₂ | 70 | 16 | 7 | 7 | 0.005 | 0.05 |
| N ₂ -20% CH ₄ -5% H ₂ O | 55 | 28 | 10 | 7 | 0.01 | 0.05 |

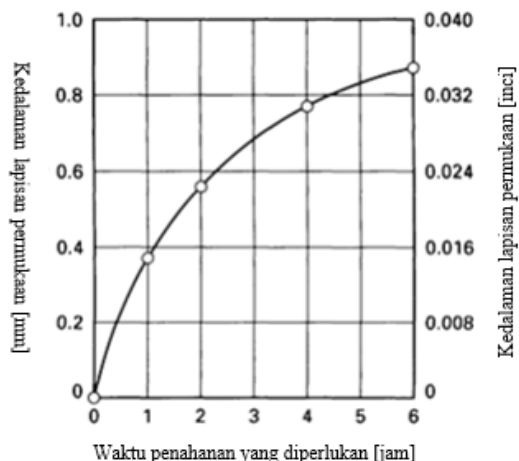
Liquid Carburizing

Liquid carburizing merupakan suatu proses dimana, material akan disimpan dalam garam cair pada suhu di atas Ac1 yang memasukkan atau mendifusikan bahan karbon dan nitrogen, atau hanya karbon, ke dalam logam. Suhu operasi untuk jenis rendaman ini umumnya lebih tinggi dari pada untuk rendaman sianida. Kisaran sekitar 900°C hingga 955°C paling umum digunakan. Suhu di bawah sekitar 870°C tidak disarankan dan bahkan dapat menghilangkan *carburizing* baja **Error! Reference source not found.** *Liquid carburizing* juga dianggap sebagai salah satu teknik perlakuan panas untuk menghasilkan lapisan permukaan yang paling keras dengan korosi dan ketahanan aus yang baik pada permukaan baja **Error! Reference source not found.** Difusi karbon dari permukaan ke bagian dalam biasanya menciptakan wadah yang mengeras dengan cara mendinginkan dari dapur atau tungku dengan kurun waktu sangat cepat (*quenching*). Karbon berdifusi dari wadah ke dalam logam, menciptakan lapisan permukaan yang mirip dengan proses *gas carburizing* yang mengandung amonia. Namun, karena *liquid carburizing* membutuhkan pemanasan yang lebih cepat (karena sifat perpindahan panas yang lebih baik), waktu siklus untuk *liquid*

carburizing lebih pendek daripada untuk *gas carburizing*. **Error! Reference source not found.** menunjukkan perbandingan waktu dan kedalaman permukaan yang dapat dimasuki oleh atom karbon pada *liquid carburizing*. Dan dapat dilihat juga perbandingan waktu yang dibutuhkan antara Gambar 1 dan **Error! Reference source not found.** sangat berbeda signifikan.

Liquid carburizing dapat dibedakan dari proses *cyaniding* (yang terjadi dalam wadah dengan proporsi kandungan sianida yang tinggi) dengan sifat dan komposisi wadah yang dihasilkan. Lapisan permukaan yang dihasilkan oleh *carburizing* cair mengandung lebih sedikit nitrogen dan lebih banyak karbon daripada lapisan luar yang dihasilkan oleh proses *cyaniding*. Kasus pada proses *cyaniding* jarang diterapkan pada kedalaman lebih dari 0,25 mm, sedangkan *liquid carburizing* dapat menghasilkan lapisan permukaan sedalam 6,35 mm **Error! Reference source not found.** Lapisan pengerasan dapat dinilai dan ditandai dengan peningkatan ketahanan terhadap deformasi plastik-elastis, yang penting untuk meningkatkan ketahanan kontak dan ketahanan aus baja. Juga telah ditemukan bahwa konsentrasi karbon yang tinggi tidak secara signifikan mengurangi ketahanan korosi dari

baja *carburizing* **Error! Reference source not found.** Sehingga pengertian *carburizing* yang telah dikutip dari buku maupun jurnal yang sudah ada merupakan proses pengerasan permukaan dengan perlakuan panas dan menambahkan unsur karbon agar memiliki sifat keras di bagian luar dan sifat lunak di bagian dalam.



Gambar 2. Pengaruh waktu dengan lapisan permukaan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk secara sistematis mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian terkait proses *carburizing* pada material baja. Prosedur SLR dilakukan melalui tahapan terstruktur yang meliputi identifikasi literatur, proses penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), serta analisis komparatif. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa literatur yang digunakan memiliki relevansi ilmiah tinggi dan mampu memberikan dasar yang kuat dalam menganalisis hubungan antara parameter proses dan performa material hasil perlakuan *carburizing*.

Sumber literatur diperoleh dari basis data ilmiah bereputasi seperti Scopus dan SINTA dengan menggunakan kata kunci *carburizing*, *thermochemical treatment*, *carbon diffusion*, dan *surface hardening*. Kriteria inklusi mencakup artikel jurnal berbahasa Inggris dalam rentang 15 tahun terakhir yang membahas parameter proses, mekanisme difusi, dan sifat mekanik material, sedangkan artikel yang tidak relevan, duplikat, atau tidak memiliki data yang jelas dieliminasi. Data yang terpilih kemudian dianalisis secara komparatif berdasarkan parameter utama seperti temperatur, waktu penahanan, media *carburizing*, kedalaman difusi, dan kekerasan permukaan untuk

mengidentifikasi hubungan antara variabel proses dan kinerja material.

Diagram Alir

Diagram alir pada Gambar 3 menggambarkan tahapan sistematis dalam pelaksanaan *Systematic Literature Review* (SLR) yang diawali dari tahap identifikasi literatur. Pada tahap ini, proses pencarian dilakukan menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish* yang terintegrasi dengan berbagai basis data ilmiah terindeks seperti Scopus, SINTA, dan SpringerLink. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci spesifik, antara lain *carburizing*, *thermochemical treatment*, dan *heat treatment*, untuk memastikan bahwa artikel yang diperoleh relevan dengan topik penelitian. Hasil pencarian awal ini kemudian dikompilasi sebagai kumpulan data literatur mentah yang selanjutnya akan diproses pada tahap berikutnya.

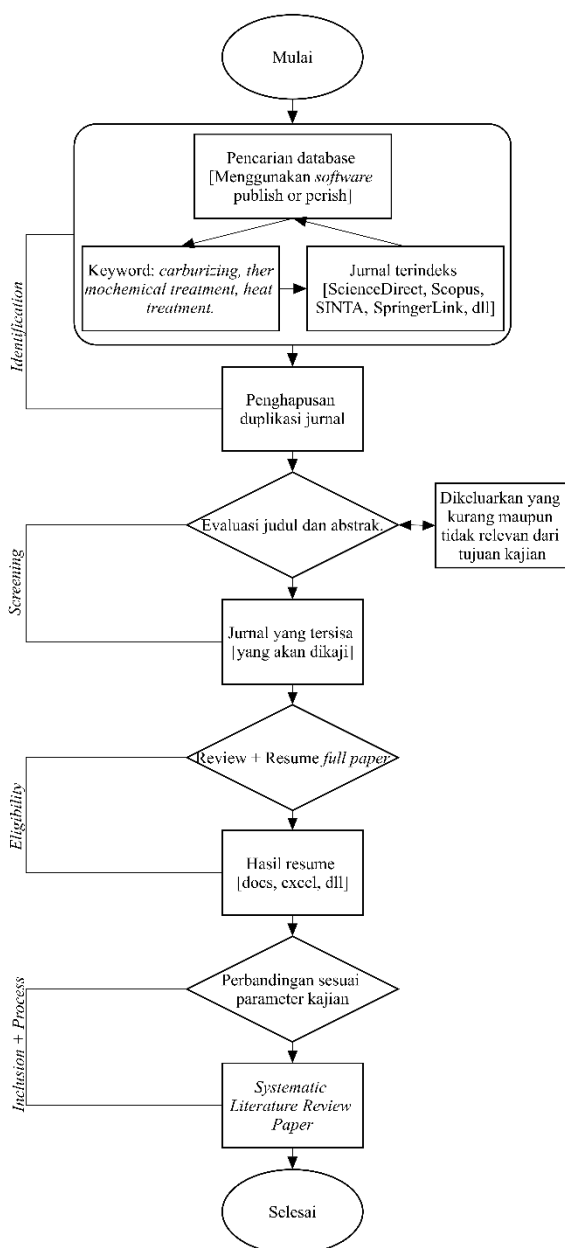
Tahap selanjutnya adalah eliminasi duplikasi, yang bertujuan untuk menghilangkan artikel yang muncul lebih dari satu kali akibat pencarian dari berbagai database. Proses ini penting untuk menjaga keakuratan dan efisiensi analisis data. Setelah itu, dilakukan tahap *screening* melalui evaluasi judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian topik penelitian dengan tujuan kajian. Pada tahap ini, artikel yang tidak relevan, tidak sesuai ruang lingkup, atau tidak memenuhi kriteria inklusi akan dieliminasi secara sistematis. Literatur yang lolos tahap ini kemudian dikategorikan sebagai kandidat utama yang memiliki potensi untuk dianalisis lebih lanjut secara mendalam.

Selanjutnya, dilakukan tahap *full-text review*, di mana seluruh artikel terpilih dibaca secara menyeluruh untuk mengekstraksi informasi yang lebih detail dan spesifik. Pada tahap ini juga dilakukan proses peringkasan (*resume*) untuk mengorganisasi data penting ke dalam format terstruktur, seperti tabel atau lembar kerja (misalnya dalam bentuk dokumen atau spreadsheet). Informasi yang diekstraksi meliputi parameter proses, mekanisme difusi, jenis metode *carburizing*, serta hasil pengujian sifat mekanik dan karakteristik material.

Data yang telah dirangkum kemudian dianalisis menggunakan pendekatan komparatif berdasarkan parameter kajian yang telah ditentukan sebelumnya, seperti temperatur proses, waktu penahanan, media *carburizing*, kedalaman difusi, serta nilai kekerasan permukaan. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola hubungan, tren, serta

perbedaan karakteristik yang muncul dari berbagai metode *carburizing* yang dikaji. Hasil analisis tersebut selanjutnya disintesis menjadi suatu kajian komprehensif yang terstruktur dan berbasis evidensi ilmiah dalam bentuk *Systematic Literature Review*.

Seluruh rangkaian proses ini diakhiri dengan tahap penyusunan kesimpulan yang merangkum temuan utama penelitian secara sistematis dan ilmiah, serta memberikan interpretasi terhadap hubungan antara parameter proses dan performa material. Selain itu, kesimpulan juga diarahkan untuk memberikan rekomendasi bagi penelitian selanjutnya serta kontribusi terhadap pengembangan teknologi *carburizing* di bidang rekayasa material.



Gambar 3. Diagram alir *Systematic Literature Review (SLR) paper*

KAJIAN DAN PEMBAHASAN

Kajian Referensi

Perkembangan teknologi ini, menuntut beberapa persyaratan seperti material yang tahan terhadap suhu tinggi, kecepatan tinggi, serta berbagai macam sifat mekanik dengan ketahanan aus yang baik. Pada Tabel 1. penulis telah mengklasifikasikan referensi yang ada menjadi beberapa proses *carburizing* sesuai dengan teori. Banyak sekali penelitian yang dilakukan berdasarkan macam dari proses *carburizing* dengan beberapa macam material logam. Dapat diamati pada tahun penelitian, memperlihatkan pada dua tahun terakhir ini proses *carburizing* yang banyak dilakukan ialah proses gas *carburizing*. Dan material yang paling banyak digunakan pada penelitian tersebut merupakan baja dan *Stainless steel*.

Kajian Gas Carburizing

Penelitian yang dilakukan oleh Achmady pada tahun 2021, memiliki tujuan berupa untuk mengetahui kedalaman curing, ketebalan lapisan dan komposisi yang masuk dalam lapisan yang terbentuk selama proses peningkatan suhu *carburizing*. Peningkatan yang dilakukan diantara suhu 700, 800, dan 900°C dan diberi waktu penahanan 3 jam. Sehingga penelitian ini terpacu pada perbandingan antara spesimen tanpa perlakuan dengan spesimen yang telah melalui proses *carburizing*. Penelitian ini dilakukan menggunakan fluidised bed furnace dengan mendifusikan gas LPG dan nitrogen sebagai pereaktif dengan perbandingan tekanan 1:3 [6]. Dari penelitian ini didapatkan peningkatan kekerasan pada permukaan material ±100-200 HV dan adanya penambahan lapisan berupa lapisan karbida. Sesuai dengan teori yang ada bahwa semakin bertambahnya suhu yang diikuti dengan proses quenching serta penahanan waktu yang lebih lama maka kekerasan suatu material akan semakin meningkat. Hal itu dapat terjadi diakibatkan oleh difusi atom karbon yang dapat masuk sempurna seiring peningkatan waktu penahanan dan suhu yang digunakan saat pemrosesan [6], [7], dan [8].

Hampir sama dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan proses *carburizing* dengan tekanan gas yang tinggi sekitar ± 300 mbar dan dilakukan waktu penahanan sekitar 2 jam. Proses ini menggunakan suhu 1100°C dan menggunakan dapur pemanasan kanthal tube furnace. Penelitian yang dilakukan oleh Funch, et al. ini menghasilkan lapisan berupa karbida dan nitrida

dikarenakan mereka menggunakan 2 proses *carburizing* dan *nitriding*. Dengan adanya perbedaan temperatur maka nilai kekerasan akan sangat berubah signifikan hal ini ditunjukkan dalam penelitian tersebut nilai kekerasan yang berbeda, ada yang meningkat dan ada juga yang menurun. Dan mereka juga mengatakan “Itu tidak mungkin untuk menentukan identitas karbida ini karena hanya satu puncak difraksi yang terdeteksi. Namun, kemungkinan terkait dengan pembentukan Hagg carbide (M₅C₂) atau dekomposisinya menjadi karbida M₇C₃” [8].

Sebagai salah satu contoh berupa roda gigi pesawat, dengan beberapa kekurangan berupa keausan dan kelelahan terhadap beban tertentu. Maka dari itu, pelapisan oleh 16Cr-3Ni-W-Mo-V-Nb-E dapat memiliki ketahanan panas mencapai temperatur $\pm 350^{\circ}\text{C}$. Kualitas permukaan dan gradien lapisan *carburizing* dari baja *carburizing* 16Cr-3Ni-W-Mo-V-Nb-E menentukan kelelahan dan keausan permukaan roda gigi, yang secara langsung mempengaruhi masa pakai roda gigi mesin pesawat. Saat ini, dalam proses *carburizing*, oksidasi permukaan merupakan masalah serius, dan keseragaman lapisan karbida buruk, terutama di alur [9]. Adapun cara yang digunakan untuk mengatasi masalah tersebut dapat berupa *carburizing* bertekanan rendah, yang merupakan teknik baru yang memungkinkan untuk mengontrol presisi atas morfologi karbida, ukuran atau dimensi, distribusi, kandungan karbon permukaan, dan kedalaman lapisan [10]. Ini juga memberikan penghematan energi dan perlindungan lingkungan dan berlaku untuk berbagai baja roda gigi. Namun, komposisi kimia baja 16Cr-3Ni-W-Mo-V-Nb-E rumit, dan hanya ada sedikit laporan yang membahas proses *carburizing* menggunakan metode nilai saturasi untuk mengoptimalkan parameter ini untuk material roda gigi pesawat. Untuk tujuan tersebut, pada penelitian Wang, et al. ini struktur mikro dan sifat baja 16Cr-3Ni-W-Mo-V-Nb-E diselidiki setelah berbagai proses *carburizing* menggunakan mikroskop optik, pemindaian mikroskop elektron, mikroskop elektron transmisi dan analisis mikro elektron probe. Mempertimbangkan konsentrasi karbon dalam austenit jenuh, kami mengusulkan model aliran karbon dan faktor paduan untuk *carburizing* tekanan rendah untuk mengurangi konsentrasi karbon dalam austenit dan menghindari jaringan karbida permukaan. Selama tahap awal *carburizing* (~30 detik), gradien konsentrasi pada antarmuka udara-padat tinggi. Meskipun metode rata-rata tidak ideal untuk aplikasi

praktis, fluks karbon terukur dengan metode rata-rata tersegmentasi adalah 2,5 kali lebih tinggi daripada metode rata-rata global, sehingga ideal untuk aplikasi praktis. Waktu *carburizing* yang sesuai berkurang 60%.

Pada penelitian Valente, et al. struktur mikro yang diperoleh setelah perlakuan termokimia diselidiki dengan XRD, OM, TEM dan lekukan kekerasan *micro-vickers*. *carburizing* yang dilakukan pada 1000-1050°C menghasilkan zona difusi karbon larutan padat dan lapisan senyawa permukaan yang terdiri dari TiC (dan Ti₂C pada 1000°C). Oksidasi karbon dalam atmosfer CO pada 1000–1050°C menghasilkan zona difusi yang dalam dan lapisan senyawa yang tebal. Kedua kekerasan permukaan dan kedalaman lapisan telah ditemukan meningkat dengan suhu dan waktu curing. Pengoksidasi karbon yang dikendalikan secara kimia menggunakan sistem redoks gas CO-CO₂ dan beroperasi pada suhu berkisar antara 850 hingga 1050°C menghasilkan pembentukan karbon oksida dan oksida dengan peningkatan Ti-O (fase rutil dan Magneli) dengan meningkatnya suhu. Jumlah keausan berkurang hingga 450 kali dibandingkan dengan sampel referensi anil. Oksidasi karbon dalam karbon dioksida pada 1000°C memberikan ketahanan aus terbaik dan menghasilkan koefisien gesekan yang berkurang =0,45 untuk sampel referensi anil dibandingkan dengan rata-rata =0,22 [11], [12], [13], dan [14].

Kajian Pack Carburizing

Untuk menghindari dampak buruk dari korosi, maka dilakukan perawatan anti korosi, salah satunya adalah pack *carburizing* atau pack *carburizing*. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 1045. Untuk mengetahui pengaruh proses pack *carburizing* terhadap laju korosi baja dilakukan dengan memvariasikan suhu *packing carburization* dan suhu media korosif (750°C, 850°C, dan 950°C), dan media korosif yang digunakan adalah udara, air tawar, dan air laut. Telah dipelajari sesuai dengan aplikasi menggunakan bahan AISI 1045. Proses korosi dengan media pengkorosi dilakukan selama 720 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *carburizing steel-fill* pada temperatur 950°C memiliki laju korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan *steel-fill carburizing* pada temperatur 750°C. Demikian pula, udara media korosif memastikan tingkat korosi yang rendah dibandingkan dengan korosi air laut [11]. Dapat juga dilakukan dengan mengganti media pack *carburizing*

menggunakan bahan atau material yang memiliki kadar karbon yang cukup tinggi. Sehingga dapat mencegah dari keausan yang dapat mengakibatkan cacat pada suatu material dan dapat menjadikan material tersebut sebagai material gagal. Selain itu cara pencegahan dapat juga memvariasikan lama waktu yang digunakan saat proses dan juga suhu sebagai reaksi termokimia pada bahan tersebut.

Penelitian oleh Noor, et al bertujuan untuk mengetahui efektifitas penggunaan serbuk arang tempurung kelapa sebagai karburator dan serbuk tulang sapi sebagai aktivator dalam proses pack *carburizing*. 75-70% dicampur dengan 80% bubuk arang tempurung kelapa sebagai bahan baku utama, dengan 30%, 25%, 20% bubuk tulang sapi sebagai katalis. Proses dilakukan dalam tanur listrik dengan waktu penahanan 30 menit dalam kotak set di atas suhu austenitik 900°C, dilanjutkan dengan pendinginan di udara. Ketersediaan karbon dari pengamatan kekerasan permukaan dan struktur mikro menggunakan perangkat *Desktop Metals Analyzer (DMA)* dan *Optical Microscope (OM)* digital pada perbesaran 200x. Pengujian kekerasan permukaan dilakukan pada *microhardness tester* dengan beban 25gram selama 10 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk campuran 1 kg bahan *carburizing* kemasan dengan kandungan *energizer* 30%, 25% dan 20% berturut-turut, kekerasan rata-rata sampel meningkat di atas nilai kekerasan awal. Yaitu, 893,05 HV, 813,62 HV, dan 788,57 HV dari kekerasan awal 150,68 HV, material tersebut memiliki struktur akhir ferit, perlit dan martensit [12].

Selanjutnya merupakan *carburizing* suhu rendah penelitian dari Werner, et al. yang secara keseluruhan meningkatkan ketahanan aus yang rendah dari baja tahan karat austenitik melalui pembentukan austenit yang diperluas, larutan padat jenuh karbon. Karbursi suhu rendah biasanya dilakukan dibawah temperatur 823 K untuk meminimalisir pembentukan kromium karbida [14]. Dapat berakibat adanya tegangan sisa tekan beberapa GPa dihasilkan di wilayah austenitik yang diperluas pada baja tahan karat austenitik. Pembentukan austenit yang diperluas oleh *carburizing* suhu rendah telah dipelajari secara ekstensif. Namun, pengaruh komposisi kimia baja tahan karat pada reaksi *carburizing* belum mendapat perhatian yang ekstensif. Pada alinea ini akan meninjau penelitian sebelumnya, berupa pengaruh komposisi kimia pada *carburizing* suhu rendah dalam hal kelarutan karbon, dekomposisi austenit yang diperluas

setelah melebihi batas kelarutan, dan penyerapan elastoplastik dari regangan kisi yang diinduksi karbon. Adapun hasil yang menunjukkan bahwa kelarutan karbon meningkat dengan meningkatnya ekuivalen Cr, dan ekuivalen Cr dan Ni yang lebih tinggi mendorong pembentukan M7C3 berbasis Cr di atas karbida berbasis Fe(M5C2) [10] dan [16].

Kajian *Liquid Carburizing*

Liquid carburizing dianggap sebagai salah satu teknik perlakuan panas untuk menghasilkan lapisan permukaan yang paling keras dengan korosi dan ketahanan aus yang baik pada permukaan baja. Dalam penelitian tersebut Hasan, et al. penggunaan karbonat dalam medium cair pada baja karbon sedang AISI 1018 diselidiki untuk mengetahui kekerasan permukaan dan sifat mekanik permukaan baja karbon sedang AISI 1018. Sampel dibentuk menjadi bentuk silinder dengan tinggi 20 mm dan diameter 15 mm menggunakan laminator dan digerus. Struktur mikro sampel diuji untuk mengetahui tahapan transformasi yang terjadi selama proses *carburizing*. Baja karbonat bekas (AISI 1018 Gr 1018) ditempatkan dalam penangas garam yang terdiri dari 75% natrium karbonat (Na_2CO_3) dan 15% natrium klorida dan 10% silikon karbida. Tempatkan campuran dalam tungku perlakuan panas permukaan. Elektroda kemudian dipanaskan hingga suhu berkisar antara 850°C hingga 900°C. Suhu garam mandi kemudian distabilkan pada suhu ini. Untuk mendapatkan sampel karbonat, sampel ditempatkan dalam keranjang baja dan direndam dalam larutan garam dalam oven suhu konstan selama 1, 2, dan 3 jam. Setelah sampel dipanaskan, sampel diangkat dan didinginkan secara bertahap dalam tungku. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penggunaan *liquid carburizing* pada baja tersebut meningkatkan nilai kekerasan permukaan sampel. Ditemukan bahwa ketebalan lapisan *carburizing* meningkat dengan cepat karena sampel tetap lebih lama di penangas garam. Ini mengarah pada peningkatan yang efektif dan lapisan *carburizing* dalam secara keseluruhan terbentuk di permukaan. Jelas bahwa perubahan mikrostruktur dalam sampel terjadi secara bertahap dari lapisan terluar atau permukaan hingga ke inti dari baja karbon rendah AISI 1018 [21].

Penelitian Savrai, et al. bertujuan untuk melakukan analisis rinci tentang transformasi fasa struktural dan pengaruhnya terhadap sifat-sifat baja austenitik AISI 321 yang terpapar

cairan *carburizing* pada 780°C. Mikroskop elektron optik dan pemindaian, profilometri optik, analisis difraksi sinar-X, analisis mikro dispersif energi, analisis difraksi hamburan balik elektron, instrumen lekukan mikro dan pengukuran kekerasan mikro digunakan sebagai metode investigasi. Kromium karbida Cr₂₃C₆, Fe₃C sementit, dan martensit telah ditemukan terbentuk di lapisan permukaan baja AISI 321 *carburizing* bersama dengan austenit karbon tinggi (hingga 0,46 wt%). Deformasi plastis terjadi lagi selama pendinginan setelah *carburizing*, yang merupakan relaksasi dari mekanisme tegangan termal tinggi. *Carburizing* baja AISI 321 menggandakan kekerasan mikro permukaan baja dari 200 ± 7 HV menjadi 890 ± 110 HV [0,025] dengan total kedalaman kotak sekitar 500 m. Lapisan pengerasan dinilai dan ditandai dengan peningkatan ketahanan terhadap deformasi plastik-elastis, yang penting untuk meningkatkan ketahanan kontak dan ketahanan aus baja. Juga telah ditemukan bahwa konsentrasi karbon yang tinggi tidak secara signifikan mengurangi ketahanan korosi dari baja *carburizing* [22].

Bauer, et al. mengatakan bahwa *Stainless steel* biasanya digunakan untuk komponen presisi yang sering terkena media korosif. Namun, perilaku tribologis yang buruk membatasi penggunaan bahan-bahan ini dalam banyak aplikasi teknis. Pengerasan permukaan termokimia merupakan salah satu cara untuk mengatasi kelemahan tersebut. Larutan *nitriding* dan *carburizing* dalam kisaran austenitik di atas 1000°C terutama digunakan untuk pengerasan baja tahan karat martensit dan feritik. Namun, efek pengerasan baja tahan karat austenitik dan dupleks terbatas. Selain itu, suhu proses yang tinggi dikombinasikan dengan pendinginan cepat yang diperlukan dapat menyebabkan perubahan dimensi yang tidak diinginkan. Di sini, perlakuan pengerasan permukaan suhu rendah di bawah 500°C menawarkan alternatif yang menarik untuk meningkatkan sifat keausan sambil mempertahankan ketahanan terhadap korosi. Dan penelitian tersebut akan membahas seputar pengaruh suhu proses tinggi dan rendah untuk pengerasan permukaan termokimia pada toleransi dimensi yang ketat terhadap presisi, bagian simetris rotasi yang dibuat dari AISI 304 yang dapat dibentuk dingin. Berdasarkan hasil ini, kami membahas aplikasi industri saat ini dan yang sedang berkembang yang mendapat manfaat dari permukaan curing suhu rendah [26].

Kajian *Vacuum Carburizing*

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Li, et al. *vacuum carburizing* paduan tungsten dilakukan untuk mendapatkan lapisan *carburizing* dan meningkatkan sifat keras pada permukaan. Dalam penelitian ini, bertujuan untuk menyelidiki struktur mikro lapisan *carburizing*, proporsi relatif lapisan permukaan, kedalaman lapisan, dan kekerasan mikro sampel *carburizing*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur mikro menunjukkan tiga lapisan dari permukaan di sebagian besar sampel setelah *carburizing*. Lapisan luar terdiri dari lapisan *carburizing* W-C hingga kedalaman 40-60 m. Kekerasan lapisan permukaan 396 HV secara signifikan lebih tinggi dari pada substrat 282 HV. Dengan meningkatnya suhu dan waktu *carburizing*, kandungan W-C dan W di lapisan permukaan sampel secara bertahap meningkat dan kedalaman lapisan luar *carburizing* meningkat [18]. Kombinasi pendekatan simulasi dan eksperimental untuk mengoptimalkan proses *vacuum carburizing* harus menggantikan metode percobaan dan kesalahan eksperimental yang intensif waktu dan sumber daya [20].

Penelitian yang dilakukan oleh Guo, et al. bertujuan untuk memprediksi secara akurat evolusi mikrostruktur dan sifat mekanik dari proses *vacuum carburizing*, model multiskala komposit multilevel dibangun yang menggambarkan interaksi suhu, difusi, transformasi fase, dan tegangan. Sementara itu, model yang ditingkatkan dikombinasikan dengan perangkat lunak perlakuan panas COSMAP untuk memberikan simulasi proses *vacuum carburizing* tekanan rendah. Proses *vacuum carburizing* tekanan rendah dari baja roda gigi 20CrMo disimulasikan dengan COSMAP dan dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk memvalidasi model. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model secara kuantitatif dapat menentukan distribusi konsentrasi karbon, fraksi fasa Fe-C dan distribusi kekerasan. Terlihat bahwa kandungan karbon berangsur-angsur menurun dari permukaan menuju pusat. Hanya setelah tahap *carburizing*, konsentrasi karbon permukaan relatif tinggi. Dengan bertambahnya waktu difusi, konsentrasi karbon permukaan menurun dan kedalaman lapisan *carburizing* meningkat. Hasil simulasi dan eksperimen konsentrasi karbon permukaan sesuai. Namun, ada kesalahan antara perhitungan dan pengamatan untuk kedalaman lapisan *carburizing*. Kesalahan yang terjadi antara simulasi dan eksperimen pada kedalaman *carburizing* kurang dari 6%.

Kekerasan permukaan yang disimulasikan adalah 34 HV lebih rendah dari kekerasan permukaan eksperimental. Kesalahan kekerasan permukaan kurang dari 5%, menunjukkan bahwa hasil simulasi dapat diandalkan. Selain itu, proses *vacuum carburizing* dengan waktu difusi yang berbeda disimulasikan untuk mencapai target *carburizing* dalam kondisi tertentu. Hasilnya, parameter proses yang optimal ditemukan adalah waktu *carburizing* 42 menit dan waktu difusi 105 menit. Memberikan referensi dan panduan untuk mengembangkan dan mengoptimalkan proses *vacuum carburizing* [20].

Menurut Li, et al. untuk lebih memahami perilaku baja M50NiL, telah melakukan penelitian *carburizing* dan *nitriding* (2 proses pada 1 material), suhu *carburizing* yang berbeda (berkisar dari 890°C hingga 980°C) digunakan untuk pretreatment *carburizing*. Mikrostruktur permukaan dicirikan oleh XRD, EDX, pengujian kekerasan mikro, SEM dan *Transmission Electron Microscope* (TEM). *Vacuum carburizing* dilakukan menggunakan tungku *vacuum carburizing* tekanan rendah dengan dua horizontal ruang (WZST-20). Spesimen diperlakukan pada 890, 920, 950 dan 980°C selama 1,5 jam (periode *carburizing*) dan kemudian selama 3 jam (difusi titik). Pada periode *carburizing*, ruang panas pertama kali diisi dengan campuran asetilena dan nitrogen, dan laju aliran gas keduanya gas adalah 4 liter/menit. Setelah tekanan mencapai 1500 Pa, dipertahankan pada 1500 Pa selama 20 detik; ruang panas kemudian dievakuasi ke 80 Pa oleh pompa mekanis. Semua tahapan ini diulang secara berurutan selama 1,5 jam. Tingkat pengulangan adalah 46 siklus/jam. Hasilnya menunjukkan bahwa proporsi presipitat submikron besar meningkat dengan meningkatnya suhu *carburizing*, sesuai dengan peningkatan yang signifikan pada karbida primer. Peningkatan yang signifikan dalam jumlah/ukuran karbida primer memfasilitasi difusi nitrogen. Perubahan yang dihasilkan dalam endapan nanometrik setelah *nitriding* menyebabkan kandungan larutan padat nitrogen yang berbeda (maksimum dicapai pada 920°C sebelum perlakuan *carburizing*). Mekanisme pertumbuhan untuk endapan sub-mikro telah diusulkan. Efek dari presipitat yang berbeda dan perilaku difusi atom C dan kristal campuran N pada perilaku pengerasan dibahas [26].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *systematic literature review* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa proses *carburizing* merupakan metode perlakuan panas termokimia yang efektif dalam meningkatkan kekerasan permukaan, ketahanan aus, serta performa tribologi pada baja karbon rendah ($\leq 0,3\%$ C). Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh parameter utama, yaitu temperatur, waktu penahanan, serta jenis media *carburizing*. Analisis menunjukkan bahwa metode *gas* dan *vacuum carburizing* memiliki keunggulan dalam hal kontrol proses dan keseragaman difusi karbon, dengan kedalaman lapisan (*case depth*) berkisar antara ± 75 –500 μm untuk aplikasi presisi tinggi. Sementara itu, *liquid carburizing* lebih optimal untuk produksi massal karena memiliki waktu proses yang lebih cepat dengan kedalaman lapisan sekitar 50–60 μm .

Selain itu, parameter proses seperti waktu penahanan dan temperatur terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap kedalaman difusi karbon dan kekerasan permukaan. Peningkatan waktu proses sekitar 1 jam dapat meningkatkan kedalaman lapisan hingga ± 30 –40%, terutama pada temperatur optimal 850–950°C dalam kondisi fasa austenit. Hasil kajian juga menunjukkan terbentuknya lapisan karbida pada permukaan material yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan hingga ± 150 HV dibandingkan material awal, tanpa mengurangi ketangguhan inti material secara signifikan. Dengan demikian, pemilihan metode dan parameter proses yang tepat menjadi faktor kunci dalam menentukan kualitas hasil *carburizing*.

SARAN PENGEMBANGAN

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil kajian ini adalah:

1. Penggunaan metode *hybrid carburizing* (kombinasi *vacuum* dan *liquid* atau *gas*) direkomendasikan untuk aplikasi komponen presisi tinggi karena mampu meningkatkan kontrol difusi karbon dan efisiensi proses;
2. Optimasi parameter proses, khususnya temperatur sekitar 925°C dan waktu penahanan, perlu dilakukan secara spesifik sesuai jenis material, seperti pada baja AISI 1018;

3. Integrasi simulasi numerik (*multiscale modeling*) disarankan untuk mengurangi pendekatan *trial and error* dalam penentuan parameter proses hingga sekitar 30%;
4. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada material yang masih terbatas kajiannya, seperti *duplex stainless steel*, serta pengembangan aplikasi *carburizing* pada industri spesifik seperti *aerospace*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Yoga Cahyo Utomo, S. Kom., M. Kom. atas segala kontribusi, waktu, dan pemikiran yang telah diberikan dalam proses penyusunan penelitian ini. Bantuan beliau, khususnya dalam memberikan masukan yang konstruktif serta dukungan dalam proses *screening* dan seleksi literatur, sangat berperan penting dalam meningkatkan kualitas dan ketepatan analisis pada *paper* ini. Oleh karena itu, penulis sangat menghargai dedikasi dan kolaborasi yang telah diberikan, yang secara signifikan berkontribusi terhadap tersusunnya penelitian ini secara lebih sistematis dan komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Fegade, R. G. Tated, and R. S. Nehete, "Critical review on pull-in of aluminium in continuous casting," *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 8, no. 11, pp. 1948–1957, 2019.
- [2] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. John wiley & sons.
- [3] X. Gong, B. Wei, J. Teng, Z. Wang, and Y. Li, "Regulating the oxidation resistance of Cu-5Ag alloy by heat treatment," *Corrosion Science*, vol. 190, p. 109686, 2021.
- [4] Y. Bai et al., "Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 288, p. 116906, 2021.
- [5] I. I. Gurten Inal and Z. Aktas, "Enhancing the performance of activated carbon-based scalable supercapacitors by heat treatment," *Applied Surface Science*, vol. 514, p. 145895, 2020.
- [6] I. F. Achmady, "Analisa pengaruh peningkatan temperatur *carburizing* terhadap peningkatan karbon dan kedalaman pengerasan pada baja paduan rendah AISI 4140 dengan media pendingin asam cuka," *JMMME*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2021.
- [7] T. Arai et al., *ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment*. ASM International, 1991.
- [8] C. V. Funch, K. Somlo, T. L. Christiansen, and M. A. J. Somers, "Thermochemical post-processing of additively manufactured austenitic *Stainless steel*," *Surface and Coatings Technology*, vol. 441, p. 128495, 2022.
- [9] H. Wang et al., "Optimizing the low-pressure *carburizing* process of 16Cr3NiWMoVNbE gear steel," *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 7, pp. 1218–1227, 2019.
- [10] R. E. Audrey et al., "Experimental study of mechanical properties and corrosion rate of low carbon steel AISI 1020 resulting from low pressure gas *carburizing*," *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 220–235, 2025.
- [11] I. K. Suarsana, I. M. Astika, and I. G. P. A. Suryawan, "Efek perlakuan pack *carburizing* dan media korosif pada baja AISI 1045 terhadap laju korosi," *Jurnal Energi dan Manufaktur*, vol. 14, no. 2, p. 37, 2022.
- [12] A. Noor et al., "Pengaruh proses pack *carburizing* terhadap kekerasan baja," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, vol. 2, pp. 73–78, 2019.
- [13] H. Ferkous et al., "Corrosion inhibition of mild steel by 2-(2-methoxybenzylidene) hydrazine-1-carbothioamide," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 307, p. 112957, 2020.
- [14] K. V. Werner et al., "Low temperature *carburizing* of *Stainless steels* and the development of carbon expanded austenite," *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, vol. 77, no. 1, pp. 3–15, 2022.
- [15] E. H. Valente et al., "Gaseous surface hardening of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting," *Surface and*

- Coatings Technology*, vol. 383, p. 125278, 2020.
- [16] H. Setiawan, “Pengaruh *carburizing* terhadap karakteristik pelat rantai motor berbasis baja SAE 1025 dengan media quench lelehan garam,” Universitas Indonesia, 2011.
- [17] Nitha, Indika, and Andrianto, *Pengaruh Proses Pack Carburizing Arang Tulang Kerbau terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon*. Zahira Media, 2021.
- [18] H. Farivar et al., “Influence of post-*carburizing* heat treatment on core microstructural evolution,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 744, pp. 778–789, 2019.
- [19] W. Li et al., “Effect of vacuum *carburizing* on surface properties and microstructure of a tungsten heavy alloy,” *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, 2020.
- [20] J. Guo et al., “Modeling and simulation of vacuum low pressure *carburizing* process in gear steel,” *Coatings*, vol. 11, no. 8, 2021.
- [21] M. Z. Hasan et al., “Improvement of AISI 1018 carbon steel mechanical properties by liquid *carburizing*,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 20, pp. 512–516, 2020.
- [22] R. A. Savrai and P. A. Skorynina, “Structural-phase transformations induced by liquid *carburizing*,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 443, p. 128613, 2022.
- [23] B. Venkatesh and C. A. K. Reddy, “Experimental study on heat treatment and mechanical behaviour of M50 NiL steel,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 795–798, 2021.
- [24] Z. Liu et al., “Fatigue behavior of low-temperature gaseous carburized 316L *Stainless steel*,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 793, p. 139651, 2020.
- [25] Y. Jiang et al., “Suppression of hydrogen absorption into 304L *Stainless steel*,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 43, pp. 24054–24064, 2019.
- [26] G. M. Li et al., “Study of M50NiL steel under *carburizing* and nitriding duplex treatment,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 375, pp. 132–142, 2019.
- [27] A. Bauer and K. Schreiner, “Dimensional stability of low temperature surface hardened *Stainless steel*,” *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, vol. 77, no. 1, pp. 16–28, 2022.
- [28] S. Gençoğlu and A. Yazıcı, “Surface characteristics and distortion analysis of case-hardened helical gears,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, no. 1, pp. 119–126, 2020.