

TINJAUAN LITERATUR TENTANG OPTIMASI DESAIN SISTEM PENGADUK PADA PROSES PENGOLAHAN MOLTEN ALUMINIUM

Belva Wihita Christianto¹, Nafisa Tarish Nur Rohim², Julianto³, Dimas Nugroho⁴

belvawihita266@gmail.com¹, nafisatarishh@gmail.com², julijulianto042@gmail.com³,
dn8061126@gmail.com⁴

Universitas Pelita Bangsa

ABSTRAK

Di era industri modern, tingginya tingkat persaingan menuntut perusahaan manufaktur untuk Pengadukan mekanis pada aluminium cair merupakan proses penting untuk homogenisasi temperatur dan komposisi alloy serta penghilangan inklusi dan gas terlarut. Namun, sistem pengaduk konvensional menghadapi berbagai kendala seperti distribusi aliran tidak merata, zona mati (dead zone), pembentukan vortex pada permukaan, oksidasi film permukaan, konsumsi energi tinggi, serta kegagalan material shaft dan impeller karena temperatur kerja ekstrem. Tujuan tinjauan literatur ini adalah menganalisis perkembangan desain pengaduk aluminium cair dan menentukan parameter kunci optimasi, dengan pendekatan Systematic Literature Review. Sumber dikumpulkan dari ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis, ASME, dan Google Scholar menggunakan kata kunci seperti “molten aluminum stirring system”, “impeller design optimization”, “CFD simulation molten metal mixing”, dll. Kriteria inklusi mencakup jurnal internasional tahun 2010–2026 berbasis eksperimen, CFD, simulasi numerik, atau desain mekanik. Parameter utama optimasi yang dibahas meliputi geometri impeller (diameter, jumlah dan sudut bilah, bentuk, rasio terhadap tangki), desain bilah (flat, pitched, twisted, rotor-stator), kecepatan putaran (RPM), karakteristik pola aliran (axial, radial, turbulen), pembentukan vortex, konsumsi energi, dan ketahanan material terhadap temperatur tinggi. Hasil kajian menunjukkan bahwa variasi bentuk dan sudut bilah impeller secara signifikan mengubah pola aliran dan efektivitas pencampuran: misalnya, peningkatan sudut bilah berdampak melemahkan aliran terdistribusi (menurut Yamamoto dkk. 2018). Impeller jenis pitched-blade (45°) sering lebih efisien dibanding impeller datar (flat). Agitator rotor-stator baru menunjukkan performa homogenitas pencampuran lebih baik dan stabilitas permukaan cair yang lebih tinggi. Kecepatan putaran yang lebih tinggi meningkatkan turbulensi dan mempersingkat waktu pencampuran, tetapi juga memperkuat vortex permukaan yang dapat meningkatkan oksidasi dan keausan alat. CFD (ANSYS Fluent, OpenFOAM, Flow-3D, dll.) secara luas digunakan untuk memodelkan distribusi kecepatan, kontur tekanan, kinetik turbulen, dan pola temperatur dalam tangki pengaduk, sehingga meminimalkan eksperimen trial-error. Dalam pilihan material, analisis korosi menunjukkan bahwa material besi cor HT300 (dengan grafit serpih) memiliki ketahanan tertinggi terhadap korosi aluminium cair. Secara keseluruhan, parameter desain terpenting meliputi geometri bilah impeller (jumlah dan sudut bilah), rasio $D_{\text{impeller}}/\text{tangki}$, serta kecepatan putaran yang dioptimalkan untuk mencegah vortex berlebih.

Kata Kunci: Pengadukan Aluminium Cair, Desain Impeller, Simulasi CFD, Homogenisasi, Vortex, Efisiensi Energi, Material Tahan Panas.

PENDAHULUAN

Pengembangan teknologi pengecoran dan pengolahan aluminium telah berjalan pesat, baik pada skala primer maupun daur ulang. Pengadukan mekanis (mechanical stirring) pada logam cair, terutama aluminium cair, berperan krusial untuk mendapatkan komposisi kimia dan temperatur yang homogen serta untuk mempercepat penghilangan inklusi dan gas terlarut seperti hidrogen. Dengan agitasi yang baik, gradien suhu dan konsentrasi alloy dapat diminimalisasi sehingga kualitas produk paduan meningkat. Namun demikian, desain agitator untuk aluminium cair menghadapi tantangan unik. Temperatur kerja mendekati titik leburan aluminium (~660°C) menuntut material

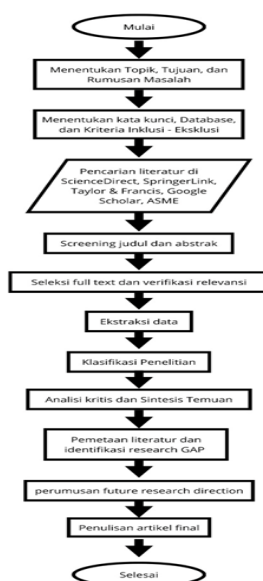
pengaduk berdaya tahan termal tinggi dan kekuatan mekanik besar. Selain itu, interaksi kuat antara logam cair dan permukaan pengaduk cenderung menimbulkan korosi dan pelarutan material impeller.

Permasalahan utama dalam desain sistem pengaduk molten aluminium mencakup distribusi aliran yang tidak merata dan timbulnya zona mati, terutama pada kecepatan putaran rendah. Ketika kecepatan agitasi terlalu rendah, energi input tidak cukup untuk menyebarkan momentum ke seluruh volume cairan, sehingga terbentuk “dead zone” yang terisolasi dari pola aliran utama. Di sisi lain, kecepatan terlalu tinggi akan menghasilkan vortex permukaan yang kuat. Vortex ini menarik film oksida dari permukaan cairan masuk ke dalam logam dan meningkatkan oksidasi permukaan serta inklusi gas. Pembentukan vortex tidak hanya merugikan proses pencampuran tetapi juga berpotensi meningkatkan keausan mekanik pada impeller dan shaft akibat gaya geser yang ekstrim. Selain itu, konsumsi energi pada agitator berkecepatan tinggi meningkat secara signifikan, sehingga desain harus mempertimbangkan trade-off antara kecepatan putar dan efisiensi energi.

Permasalahan lain adalah kegagalan material pengaduk akibat suhu tinggi. Studi korosi menunjukkan terbentuknya lapisan intermetalik Fe–Al pada antarmuka material besi-baja dengan aluminium cair. Besi cor grafit (HT300) menunjukkan ketahanan korosi lebih baik karena grafitnya menghambat infiltrasi logam cair. Sebaliknya, baja tahan panas berbahan Cr-Ni membentuk lapisan kompleks menyebabkan kerusakan lebih cepat. Secara keseluruhan, masalah tersebut membatasi pilihan material dan bentuk impeller. Oleh karena itu, penelitian terkini berfokus mengoptimalkan desain impeller dan sistem pengaduk untuk menghasilkan sistem yang efisien, stabil, dan tahan lama. Tujuan tinjauan ini adalah menganalisis perkembangan desain pengaduk aluminium cair serta menentukan parameter optimasi utama yang diperlukan agar sistem agitator memiliki kinerja tinggi dan umur pemakaian optimal.

METODE PENELITIAN

Literature review ini disusun secara sistematis melalui beberapa tahapan terstruktur untuk menjamin validitas dan kualitas akademis analisis yang disajikan. Langkah-langkah metodologi meliputi:



Tahapan di atas dapat dijabarkan dalam naskah ilmiah sebagai berikut:

Tahap 1: Penentuan Topik dan Tujuan Penelitian

Tahap awal dilakukan dengan menentukan fokus penelitian mengenai optimasi sistem pengaduk (stirring system) pada proses molten aluminum. Kajian difokuskan pada pengaruh parameter desain seperti geometri impeller, jumlah dan sudut blade, kecepatan putaran (RPM), pola aliran, pembentukan vortex, konsumsi energi, serta ketahanan material terhadap temperatur tinggi.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis parameter yang berpengaruh terhadap performa pengadukan untuk memperoleh desain agitator yang lebih efisien dan memiliki umur kerja lebih panjang.

Tahap 2 : Pengumpulan Literatur

Pengumpulan artikel dilakukan melalui beberapa database ilmiah, yaitu:

- o ScienceDirect
- o SpringerLink
- o Taylor & Francis
- o Google Scholar
- o ASME Digital Collection

Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi:

- o molten aluminum stirring system
- o mechanical stirring of molten aluminum
- o impeller design optimization
- o CFD simulation molten metal mixing
- o vortex formation in mechanical stirring

Literatur yang digunakan dibatasi pada publikasi tahun 2010–2026 dan berasal dari jurnal internasional yang relevan.

Tahap 3: Seleksi Literatur

Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaian topik dan kualitas penelitian. Literatur yang dipilih adalah penelitian yang membahas:

- o desain impeller dan agitator
- o simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)
- o proses mechanical stirring
- o karakteristik aliran molten meta
- o material tahan temperatur tinggi

Artikel yang tidak berkaitan dengan optimasi sistem pengaduk aluminium cair tidak digunakan dalam kajian.

Tahap 4: Penyaringan Berdasarkan Kriteria Inklusi & Eksklusi

Data penting dari setiap literatur dikumpulkan dan dianalisis berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu:

- o tipe dan geometri impeller,
- o kecepatan rotasi (RPM),
- o pola aliran fluida,
- o distribusi temperatur,
- o pembentukan vortex,
- o efisiensi energi,
- o material shaft dan impeller.

Literatur kemudian dikelompokkan menjadi beberapa bidang kajian, yaitu optimasi desain impeller, simulasi CFD, mechanical stirring, serta material temperatur tinggi.

Tahap 5: Sintesis, Ekstraksi Data, dan Pemetaan Research Gap

Hasil dari berbagai penelitian dibandingkan untuk mengetahui pengaruh desain

pengaduk terhadap performa pencampuran molten aluminum. Analisis dilakukan untuk menemukan kelebihan, keterbatasan, serta peluang pengembangan dari penelitian sebelumnya.

- Research gap yang ditemukan digunakan sebagai dasar untuk menentukan arah penelitian masa depan seperti optimasi berbasis CFD, integrasi CFD–FEA, serta pengembangan material pengaduk yang lebih tahan terhadap temperatur tinggi dan korosi.

Tahap 6: Penyusunan Pembahasan dan Kesimpulan

Tahap akhir adalah menyusun hasil analisis menjadi artikel ilmiah yang terdiri dari pembahasan perkembangan teknologi pengaduk molten aluminum, literature mapping, research gap, rekomendasi penelitian lanjutan, dan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Prinsip Kerja Sistem Pengaduk Molten Aluminum

Pengadukan mekanis memanfaatkan impeller berputar untuk mentransfer momentum ke logam cair, menciptakan sirkulasi aliran yang mendorong homogenisasi. Impeller memaksimalkan pemindahan momentum pada bilahnya, menghasilkan gaya geser dan pompa yang menyebar partikel dan fluida ke seluruh volume tangki. Perpindahan momentum ini menginduksi pola aliran karakteristik berdasarkan jenis impeller. Impeller aliran aksial (axial-flow) umumnya menghasilkan arus turun/mendorong vertikal yang kuat, sedangkan impeller aliran radial (radial-flow) menghasilkan aliran keluar horizontal ke dinding tangki. Pola perpaduan dari aliran aksial dan radial menyebabkan turbulensi dan pembentukan vorteks trailing di belakang bilah. Sebagaimana dicatat oleh Yamamoto et al., impeller aksial mampu menciptakan deformasi permukaan cair yang curam di sekitar poros. Perbedaan geometris ini mempengaruhi homogenitas; umumnya impeller aksial lebih cocok untuk mencampur paduan solid-liquid dibanding impeller radial. Tingkat turbulensi (dilambangkan Reynolds number) meningkat seiring naiknya kecepatan putaran impeller, yang memperpendek waktu pencampuran namun juga dapat menyebabkan instabilitas fluida. Oleh karena itu, desain impeller dan parameter putaran dipilih untuk mencapai keseimbangan antara aliran yang intens dan penghindaran vortex berlebihan.

Berdasarkan pola aliran, ada aliran aksial (down-pumping/up-pumping), radial, dan kombinasi turbulen intensitas tinggi. Aliran aksial mendorong cairan secara vertikal (biasanya ke bawah untuk agitasi furnace), menciptakan sirkulasi besar yang mendukung distribusi panas dan komposisi. Sebaliknya, aliran radial mendorong cairan keluar dari poros ke dinding tangki, yang dapat meningkatkan pencampuran lateral. Banyak studi menunjukkan impeller aksial lebih efisien dalam homogenisasi partikel dan temperatur pada pencampuran solid-liquid. Tingkat turbulensi yang tinggi akan memecah aliran menjadi eddies sehingga mempercepat pencampuran, namun energi akibat turbulen (turbulent kinetic energy) perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan vortex dangkal. Konsentrasi momentum dari impeller pada formulasi turbulen mengurangi perbedaan densitas lokal dan menghilangkan zona stagnasi. Sebaliknya, putaran yang terlalu lambat menyebabkan aliran laminar atau transisi, dengan dead zone di beberapa area tangki karena fluid tidak mengalir ke sana. Dengan demikian, hubungan antara kecepatan impeller dan homogenitas langsung: peningkatan kecepatan umumnya menurunkan waktu pencampuran, tetapi ada titik kritis di mana pembentukan vortex mengganggu proses.

2. Optimasi Geometri Impeller pada Molten Aluminum

Parameter geometri impeller merupakan kunci dalam optimasi pencampuran. Variasi yang umum dipelajari mencakup diameter impeller, jumlah bilah, sudut (pitch) bilah,

bentuk bilah, serta rasio diameter impeller terhadap dimensi furnace. Beberapa tipe impeller sering dibandingkan:

- Impeller Pitched-Blade (PBT): Bilah miring dengan sudut tertentu (misal 45°) menghasilkan kombinasi aliran aksial dan radial. Studi eksperimental menunjukkan PBT empat bilah 45° memberikan efisiensi energi yang tinggi pada pencampuran padat-cair. Selain itu, PBT dengan arah aliran turunnya (downward-pumping) lebih efisien dibanding PBT naik.
- Impeller Flat-Blade (misal Rushton): Bilah datar radial menghasilkan aliran memancar ke dinding. Meskipun sederhana, flat-blade cenderung menghasilkan aliran radial dominan dan vortex ring di belakang bilah. Beberapa kajian menemukan PBT umumnya lebih unggul dibanding flat-blade dalam menyebarkan aliran. Rushton turbine biasa digunakan sebagai referensi.
- Impeller Bilah Berpilin (Twisted): Bilah yang dipilin (twisted) berpotensi mengubah arah keluaran fluida secara signifikan. Yamamoto et al. (2018) menguji impeller dengan sudut pilinan 30° dan 45° pada model air: ditemukan bahwa sudut pilinan yang lebih besar melemahkan kekuatan aliran keluaran dan mengubah struktur vorteks trailing. Artinya, twis baling-baling dapat mengendalikan intensitas sirkulasi dan akumulasi fluida di sekitar poros.
- Sistem Rotor-Stator: Impeller rotor-stator menempatkan rotor berputar dalam stator berpori, menghasilkan gesekan tinggi dan dispersi intensif. Agitator jenis ini banyak dipakai untuk emulsi cair-cair, namun baru sedikit diterapkan dalam pencampuran logam. Dalam studi komposit padat-cair terkini, agitator rotor-stator (misal cross-structure RS dan half-cross RS) menunjukkan homogenitas partikel yang jauh lebih baik daripada agitator aksial konvensional. Agitator CSRS (cross-structure rotor-stator) mencapai deviasi standar konsentrasi partikel 42% lebih rendah daripada impeller konvensional A200, serta kecepatan permukaan cair yang lebih rendah (meningkatkan stabilitas permukaan).

Geometri impeller juga memengaruhi dissipasi energi dan turbulent kinetic energy (TKE) dalam fluida. Impeller berdiameter lebih besar atau jumlah bilah lebih banyak akan meningkatkan zona serap daya, tetapi juga menaikkan konsumsi daya. Sebagai contoh, desain impeller Maxblend yang dipukul (punched-rigid) terbukti menghasilkan homogenitas pencampuran lebih tinggi dengan daya sebanding dibanding impeller standar. Demikian pula, impeller fraktal (berbentuk geometri kompleks) mengurangi pembentukan vorteks trailing sehingga mengurangi konsumsi energi. Variasi radius poros (rasio impeller terhadap tangki) dan peletakan nozzle injeksi gas (pada impeller injeksi) juga kritis dalam meratakan aliran. Sebagai gambaran, Abreu-López et al. (2017) melalui model CFD rotorstator menemukan desain impeller baru mengalirkan gelembung gas merata ke seluruh kolam cairan, meningkatkan efek pompa dan homogenisasi dibanding desain komersial sebelumnya.

Hasil optimasi mencakup pengurangan waktu pencampuran dan stabilitas aliran. Impeller dengan geometri optimal dapat mencapai campuran sempurna lebih cepat, memperkecil gradien temperatur, serta mengontrol intensitas vortex. Secara umum, bilah miring (pitched) dengan sudut yang tepat dan bilah berpilin (twisted) dengan konfigurasi tertentu memaksimalkan homogenitas, sedangkan desain khusus (mis. ber-pori, dibor, fractal) membantu mengendalikan vorteks trailing dan konsumsi daya.

3. Pengaruh Kecepatan Putaran Agitator

Kecepatan putaran agitator (RPM) sangat memengaruhi dinamika aliran. Secara umum, kenaikan RPM meningkatkan bilangan Reynolds dan menciptakan aliran turbulen

lebih kuat, sehingga mempercepat homogenisasi temperatur dan distribusi unsur paduan. Namun, efeknya bersifat nonlinier. Pada RPM rendah (regim laminar/transisional), pengadukan tidak optimal: aliran lambat kurang mampu mengaduk seluruh volume, sehingga terjadi dead zone dan waktu pencampuran lama. Pada RPM menengah, turbulensi meningkat dan menciptakan sirkulasi yang merata. Tetapi jika RPM terlalu tinggi, dibentuk vortex permukaan yang kuat. Vortex ini menarik material lapisan oksida permukaan dan udara ke dalam cairan, meningkatkan oksidasi aluminium dan mempercepat keausan impeller. Yamamoto et al. (2018) mencatat bahwa peningkatan cepat dalam RPM memang meningkatkan efisiensi pengadukan, tetapi juga menghasilkan vortex dangkal yang intens. Secara khusus, kecepatan tinggi menghasilkan tegangan geser di permukaan yang besar, sehingga film oksida tersedot masuk, mengkontaminasi cairan. Akibatnya, meskipun homogenisasi meningkat, kualitas produk dapat menurun.

Dengan kata lain, terdapat rentang operasional optimal RPM. RPM terlalu rendah menyebabkan pencampuran tidak merata dan meningkatnya variasi komposisi. RPM terlalu tinggi menyebabkan kerja impeller lebih berat, kenaikan konsumsi energi, pembentukan vortex berlebih, oksidasi meningkat, dan beban termal/ mekanik pada impeller dan shaft lebih besar. Dalam tinjauan literatur, banyak penelitian menyarankan kecepatan sedang-ke-tinggi untuk hasil terbaik asalkan diimbangi fitur desain yang mencegah vortex (misalnya penggunaan deflector atau baffle). Pemilihan RPM optimal bergantung pada geometri impeller, aspek rasio tangki, dan sifat fluida. Dalam praktek, RPM sering diatur untuk mencapai campuran sempurna tercepat sebelum permukaan terbentuk vortex besar.

4. Analisis Computational Fluid Dynamics (CFD) pada Sistem Pengaduk

CFD telah menjadi alat penting dalam optimasi desain agitator molten aluminium. Perangkat lunak seperti ANSYS Fluent, OpenFOAM, Flow-3D, atau kode komersial lainnya memungkinkan simulasi aliran tiga dimensi di dalam tangki pengaduk untuk memprediksi kecepatan, tekanan, kinetika turbulen, distribusi temperatur, dan waktu pencampuran tanpa perlu eksperimen ekstensif. Sebagai contoh, Abreu-López et al. (2017) menggunakan model Eulerian multikomponen (turbulence RNG $k-\epsilon$) untuk mensimulasikan proses dealkalisasi melalui agitasi berinjeksi gas. Model tersebut dapat memvisualisasikan pola aliran dan pembentukan vortex serta memperkirakan laju pencampuran pada beberapa desain impeller. Hasil simulasi mengungkapkan bahwa satu desain impeller baru menghasilkan distribusi gelembung gas yang lebih merata dan agitasi cairan yang lebih homogen dibanding desain konvensional.

Dalam banyak studi, simulasi CFD dikalibrasi dan diverifikasi dengan model air atau data eksperimen sehingga dapat diandalkan untuk memprediksi kondisi melt. CFD memberikan keluaran berupa kontur kecepatan (velocity vectors), kontur tekanan, medan energi turbulen (TKE), dan kontur temperatur. Parameter performa pencampuran seperti power number, pumping number, atau indikator homogenitas (standar deviasi konsentrasi atau mixing time) dapat diekstrak dari hasil simulasi. Penggunaan CFD mengurangi kebutuhan trial-error dalam perancangan, karena para peneliti dapat secara cepat mengevaluasi banyak varian geometris di komputer.

Dalam literatur, sebagian besar model menggunakan persamaan Navier–Stokes dengan pendekatan RANS (misalnya model turbulensi $k-\epsilon$, $k-\omega$ SST) untuk menangkap efek turbulensi. Model fase ganda (Euler-Euler) sering digunakan untuk melibatkan gelembung gas atau partikel dalam cairan. Sebagaimana dicatat dalam kajian sebelumnya, simulator Fluent adalah salah satu program komersial utama yang digunakan dalam industri (bersama FIDAP, PHOENICS, dll.) untuk proses pengadukan cair. Keunggulan

CFD tercermin pada kemampuan menampilkan distribusi turbulensi dan laju pemompaan (pumping effect) yang dihasilkan impeller, serta membantu mendesain geometri yang menghasilkan tenaga angkat (lift) dan dorongan (flow) optimal. Dengan demikian, CFD memainkan peran kunci dalam mempercepat pengembangan agitator dengan biaya lebih rendah daripada eksperimen fisik penuh.

5. Pemilihan Material Shaft dan Impeller Temperatur Tinggi

Material pengaduk molten aluminum harus tahan korosi termal dan mekanik pada temperatur operasi sekitar 700–800 °C. Syarat utamanya meliputi tahan leleh tinggi, tahan kejutan termal, tahan korosi oleh aluminium cair, serta kekuatan mekanik baik pada suhu tinggi. Hasil studi korosi mengungkapkan mekanisme pembentukan lapisan intermetalik Fe–Al pada antarmuka material besi-baja dengan aluminium cair. Besi cor grafit (HT300) terbukti memberikan ketahanan tertinggi terhadap korosi karena grafit serpihnya menghambat infiltrasi cairan Al. Sebaliknya, baja karbon biasa (A3, QT5381, HT300 secara umum) menunjukkan pola korosi yang mirip, sedangkan baja tahan panas (seperti 1.4837) membentuk lapisan reaksi kompleks akibat kandungan Cr dan Ni. Semakin kompleks komposisi alloy (misal adanya Si, Cr), semakin terbentuk intermetalik dan fragmen kompleks pada permukaan.

Untuk mengatasi korosi dan oksidasi, beberapa material alternatif dipertimbangkan. Stainless steel tahan panas (misalnya grade 310, 330) mengandung Cr-Ni untuk stabilitas oksida, tetapi masih rentan terhadap pelarutan Al dan pembentukan AlN jika temperatur mendekati 1000 °C. Tool steel biasanya tidak dipakai karena kandungan karbon tinggi meningkatkan reaktivitas dengan Al. Sebaliknya, material keramik seperti silicon carbide (SiC) dan alumina (Al₂O₃) sangat tahan terhadap aluminium cair: keduanya tahan suhu tinggi, sangat keras, dan tidak bereaksi dengan aluminium. Impeller berbahan komposit SiC-alumina atau impeller keramik pernah dipertimbangkan karena ketahanan kimiawinya yang unggul. Namun, sifat rapuh keramik menjadi tantangan bentuk dan pemasangan. Oleh karena itu, pendekatan umum adalah menggunakan impeller logam (misalnya baja tahan panas atau baja cor khusus) dengan pelapisan permukaan. Coating keramik (misalnya lapisan alumina tahan panas atau cermet berbasis alumina) dapat meningkatkan ketahanan korosi pada permukaan impeller. Alternatif lain adalah thermal barrier coating berbasis oksida (misalnya YSZ atau NiCrAlY) yang mengurangi penghantaran panas ke substrat logam. Secara ringkas, pilihan material ideal adalah yang memiliki titik leleh jauh di atas temperatur kerja, membentuk film pasif stabil, dan mampu menahan siklus pendinginan-pemanasan tanpa retak. Berdasarkan literatur, kombinasi material titanium atau nikel tinggi yang dilapisi keramik tetap menjadi topik riset untuk optimasi masa depan pada pengaduk aluminium cair.

Literature Mapping

Tabel berikut menyajikan ringkasan minimal 15 literatur utama yang dibagi menurut fokus penelitian:

No.	Author (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Tipe Industri
1	Abreu-López et al. (2017)	<i>Effect of the Impeller Design on Degasification Kinetics Using Impeller Injector Technique</i>	Simulasi CFD menggunakan model Euler–Euler dan turbulensi k–ε	Industri pengecoran aluminium

No.	Author (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Tipe Industri
2	Bujalski et al. (2004)	<i>Mixing Studies Related to the Cleaning of Molten Aluminium</i>	Eksperimen model air (<i>water model</i>)	Industri peleburan aluminium
3	Chiti et al. (2004)	<i>A Mechanistic Model to Estimate Power Consumption and Mixing Time in Aluminium Industries</i>	Simulasi CFD dan eksperimen	Industri peleburan aluminium
4	Dispinar et al. (2010)	<i>Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356</i>	Eksperimen dan simulasi numerik	Industri pengecoran aluminium
5	Gómez et al. (2013)	<i>Mathematical Modeling of Fluid Flow in a Water Physical Model of an Aluminum Degassing Ladle Equipped with an Impeller-Injector</i>	Eksperimen PIV, <i>water model</i> , dan CFD	Industri peleburan aluminium
6	Johansen et al. (2004)	<i>Entrainment of inclusions from the dross in stirred reactors for melt treatment</i>	Eksperimen <i>water model</i> dan CFD	Industri pengecoran aluminium
7	Kerdouss et al. (2005)	<i>Mixing Characteristics of an Axial-Flow Rotor: Experimental and Numerical Study</i>	Simulasi CFD dua dimensi	Industri peleburan aluminium
8	Kuglin et al. (2022)	<i>Physical and Numerical Modeling of the Impeller Construction Impact on the Aluminum Degassing Process</i>	Eksperimen model fisik dan CFD Flow-3D	Industri degassing aluminium
9	Mishra & Prakash (2017)	<i>Using computational fluid dynamics to analyze the performance of the Maxblend impeller in solid-liquid mixing operations</i>	Eksperimen dan CFD	Industri pencampuran fluida
10	Saternus (2012)	<i>The physical and mathematical model of aluminium refining process in reactor URO-200</i>	Studi literatur (<i>literature review</i>)	Industri degassing aluminium
11	Yamamoto et al. (2018)	<i>Investigation of Impeller Design and Flow Structures in Mechanical Stirring of Molten Aluminum</i>	Eksperimen PIV dan CFD	Industri peleburan aluminium

No.	Author (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Tipe Industri
12	Yamamoto et al. (2018)	<i>Investigation of Melt Stirring in Aluminum Melting Furnace Through Water Model</i>	Eksperimen <i>water model</i> dan CFD	Industri peleburan aluminium
13	Yamamoto et al. (2019)	<i>Surface Vortex Formation in Al Melt Stirred by an Axial-Flow Impeller</i>	Eksperimen dan simulasi numerik	Industri peleburan aluminium
14	Yin et al. (2022)	<i>Turbulent CFD Simulation of Two Rotor-Stator Agitators for High Homogeneity and Liquid Level Stability in Stirred Tank</i>	Simulasi CFD (Euler–Euler dan RNG $k-\epsilon$)	Industri proses kimia
15	Yuan et al. (2021)	<i>Investigation on Corrosion Mechanism of Stirring Paddles of Different Iron-Based Materials in Al Melt</i>	Eksperimen SEM/EDS dan analisis material	Industri metalurgi aluminium

Research Gap

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan, terdapat beberapa kesenjangan yang masih perlu diatasi. Aspek desain impeller belum optimal dalam beberapa hal: misalnya, perpaduan desain hibrid bilah lurus, berpilin, dan perforasi (kombinasi flat/pitched/twisted) masih jarang dikaji untuk suhu tinggi aluminium. Metode eksperimen terbatas oleh kondisi melarutkan aluminium (temperatur tinggi, polutan) sehingga validasi data eksperimen sering sulit. Sementara itu, studi CFD sering tidak sepenuhnya memodelkan interaksi fase bebas (permutasi permukaan) atau efek dinding-tank (seperti munculnya gerakan gelombang kompleks) secara simultan. Validasi hasil CFD dengan data lapangan aluminium cair juga terbatas. Dari sisi material, tantangan pemilihan material suhu tinggi masih besar: belum banyak studi yang menguji material canggih (mis. keramik keramik baru atau logam komposit nikel-se-metal) dalam kondisi korosi aluminium cair jangka panjang. Selain itu, minim studi mengenai perlindungan permukaan (coating) yang cocok pada agitator. Keseluruhan, peluang pengembangan mencakup desain sistem terpadu yang menggabungkan optimasi hidrodinamika (pola aliran dan turbulensi) dengan analisis kekuatan termal, serta eksplorasi material komposit atau lapisan pelindung baru. Kontrol multi-objective (homogenitas vs energi vs umur) melalui algoritma optimasi (bisa berbasis CFD dan AI) juga merupakan arah yang belum banyak diteliti.

Future Research Direction

Rekomendasi penelitian selanjutnya antara lain: (1) Optimasi geometri impeller berbasis CFD: menggunakan metode optimasi numerik (misalnya algoritma genetika) untuk memvariasikan geometri bilah (sudut, kurva, perforasi) dan menilai performa mixing; (2) Integrasi CFD–FEA: melakukan simulasi gabungan CFD (aliran) dan FEA (struktur termal/mekanik) untuk mendesain shaft dan bilah yang tahan beban tinggi; (3) Analisis kekuatan shaft: studi torsi dan tegangan termal pada shaft agitator terhadap siklus pendinginan/pemanasan; (4) Material hibrid suhu tinggi: mengkaji material baru (misalnya keramik metal matrix composite, paduan Ni-base, atau lapisan keramik nano) untuk impeller; (5) Efisiensi energi: merancang sistem agitasi dengan sumber energi

terbarukan atau teknologi regeneratif (misal rekuperasi panas pelepasan) guna menurunkan konsumsi energi total. Selain itu, penggunaan sensor suhu dan turbulensi realtime dapat mengarahkan sistem pengaduk ke kontrol adaptif kecepatan. Fokus pada optimasi multi-fisika (aliran fluida + elektrokimia oksidasi) juga dapat meningkatkan keandalan desain di masa depan.

KESIMPULAN

Dari tinjauan literatur ini dapat disimpulkan bahwa geometri impeller merupakan faktor desain paling berpengaruh terhadap kinerja pengadukan molten aluminum. Jumlah bilah, sudut kemiringan, dan bentuk bilah (flat/pitched/twisted) sangat menentukan pola aliran dan distribusi kecepatan, sehingga memengaruhi homogenitas dan waktu pencampuran. Paduan bilah miring (pitched-blade) dengan sudut optimasi umumnya memberikan efisiensi pencampuran lebih baik. Bentuk bilah pilin (twisted) memodulasi vorteks trailing. Kecepatan putaran (RPM) berperan penting terhadap kestabilan aliran: RPM rendah menyebabkan dead zone, sedangkan RPM tinggi meningkatkan turbulensi namun juga memperkuat vortex permukaan serta konsumsi energi. Oleh karena itu, RPM optimal ditentukan berdasarkan kompromi antara homogenisasi dan oksidasi. Pemodelan CFD telah menjadi alat kunci dalam optimasi, mampu memprediksi distribusi kecepatan, tekanan, TKE, dan temperatur secara akurat dengan biaya yang lebih rendah dibanding eksperimen. Studi CFD memungkinkan analisis sensitivitas parameter desain secara sistematis. Dari sisi material, desain yang tahan korosi penting; kajian menunjukkan cast iron grafit (HT300) unggul dibanding baja karbon biasa. Ke depannya, pengembangan teknologi agitator aluminium cair akan terfokus pada integrasi optimasi CFD-FEA, penggunaan material dan lapisan baru yang tahan suhu tinggi, serta perancangan impeller inovatif untuk efisiensi energi yang lebih tinggi..

DAFTAR PUSTAKA

- Abreu-López, D., Trápaga, G., & Ramírez-Argáez, M. A. (2017). Effect of the impeller design on degasification kinetics using impeller injector technique. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48, 322–336.
- Bujalski, W., Yang, W., Nikolov, J., & Schwarz, M. P. (2004). Mixing studies related to the cleaning of molten aluminium. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(9), 1160–1168.
- Chiti, F., Bakker, A., & Smith, J. M. (2004). A mechanistic model to estimate power consumption and mixing time in aluminium industries. *Chemical Engineering Science*, 59(8–9), 1845–1856.
- Dispinar, D., & Campbell, J. (2010). Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356. *Materials Science and Engineering A*, 527(16–17), 3719–3725.
- Gómez, E., Zenit, R., & Ramírez-Argáez, M. A. (2013). Mathematical modeling of fluid flow in a water physical model of an aluminum degassing ladle equipped with an impeller-injector. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44, 974–983.
- Johansen, S. T., Graadahl, S., & Tetlie, P. (2004). Entrainment of inclusions from the dross in stirred reactors for melt treatment. *Light Metals 2004*, 679–684.
- Kerdouss, F., Bannari, A., & Proulx, P. (2005). Mixing characteristics of an axial-flow rotor: Experimental and numerical study. *Chemical Engineering Science*, 60(14), 4013–4029.
- Kuglin, K., Saternus, M., & Fornalczyk, A. (2022). Physical and numerical modeling of the impeller construction impact on the aluminum degassing process. *Materials*, 15(5), 1780.
- Mishra, P., & Prakash, J. (2017). Using computational fluid dynamics to analyze the performance of the Maxblend impeller in solid–liquid mixing operations. *Chemical Engineering Research and Design*, 123, 160–176.

- Saternus, M. (2012). The physical and mathematical model of aluminium refining process in reactor URO-200. *Archives of Metallurgy and Materials*, 57(1), 175–182.
- Yamamoto, T., Iguchi, M., & Taniguchi, S. (2018). Investigation of melt stirring in aluminum melting furnace through water model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49, 2401–2412.
- Yamamoto, T., Taniguchi, S., & Iguchi, M. (2018). Investigation of impeller design and flow structures in mechanical stirring of molten aluminum. *ISIJ International*, 58(6), 1085–1094.
- Yamamoto, T., Taniguchi, S., & Iguchi, M. (2019). Surface vortex formation in Al melt stirred by an axial-flow impeller. *Metals*, 9(7), 756.
- Yin, X., Li, X., Zhang, Y., & Wang, J. (2022). Turbulent CFD simulation of two rotor-stator agitators for high homogeneity and liquid level stability in stirred tank. *Processes*, 10(4), 721.
- Yuan, J., Wang, X., Li, Y., & Zhang, H. (2021). Investigation on corrosion mechanism of stirring paddles of different iron-based materials in Al melt. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2520–2532.