



Analisis Cacat Fisik *Ingot* Timah Pada Proses *Casting* Manual Di Unit Metalurgi Muntok PT. Timah, Tbk.

*(Physical Defect Analysis of Tin Ingots in the Manual Casting Process
at the Muntok Metallurgy Unit of PT. Timah, Tbk.)*

Triana Prihatin¹, Gilang Putra Gemaut²

^{1,2} Akademi Komunitas Industri Pertambangan Bukit Asam, Indonesia

¹triana.prihatin@akipba.ac.id, ²gilangputra04@gmail.com

Penulis Korespondensi: Triana Prihatin | **Email:** triana.prihatin@akipba.ac.id

Diterima (*Received*): 15/12/2025 Direvisi (*Revised*): 19/12/2025 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 31/12/2025

ABSTRAK

Proses pengecoran manual masih digunakan secara luas dalam produksi ingot timah di Unit Metalurgi PT Timah Tbk. Meskipun metode ini memiliki fleksibilitas tinggi, variasi operasional yang terjadi pada tahap pencairan, penuangan, dan pembekuan sering mempengaruhi kualitas produk dan memicu timbulnya cacat fisik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis cacat fisik yang muncul pada ingot timah, mengidentifikasi faktor penyebabnya, serta mengevaluasi efektivitas parameter proses yang berlangsung pada *kettle* 7 dan *kettle* 8. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif melalui pengamatan langsung pada proses casting, pencatatan temperatur logam cair pada berbagai putaran penuangan, serta pendataan jumlah cacat fisik dan afkir produk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cacat fisik dipengaruhi oleh ketidakstabilan temperatur *kettle*, getaran akibat proses stiring, variasi kondisi meja cetak, dan faktor manusia. Persentase cacat di lapangan berada pada kisaran 0,96–4,47%, dengan batch 19.B.998 dan 19.B.1017 memiliki cacat tertinggi. Inkonsistensi antara afkir lapangan dan afkir gudang turut mengindikasikan perbedaan standar inspeksi. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian temperatur, stabilitas mekanik, serta peningkatan prosedur kerja operator guna meminimalkan cacat fisik dan menjaga konsistensi mutu ingot timah.

Kata Kunci: *Ingot* timah; cacat fisik; proses pengecoran manual; temperatur *kettle*; kualitas produk.

ABSTRACT

Manual casting remains widely used in tin ingot production at the Metallurgy Unit of PT Timah Tbk. Although this method offers high operational flexibility, variations occurring during the melting, pouring, and solidification stages often affect product quality and trigger the formation of physical defects. This study aims to analyze the types of physical defects that appear in tin ingots, identify their contributing factors, and evaluate the effectiveness of process parameters applied in Kettle 7 and Kettle 8. The research employed a descriptive approach through direct observations of the casting process, measurements of molten metal temperature at several pouring intervals, and documentation of physical defects and rejected products. The results indicate that physical defects are influenced by unstable kettle temperatures, vibrations generated by the stirring process, variations in mold table conditions, and human-related factors. The percentage of defects observed in the field ranged from 0.96% to 4.47%, with batches 19.B.998 and 19.B.1017 showing the highest defect rates. Inconsistencies between field and warehouse rejection data further indicate differences in inspection standards. These findings highlight the importance of temperature control, mechanical stability, and improved operator procedures to minimize physical defects and maintain consistent tin ingot quality.

Keywords: *tin ingot; physical defects; manual casting process; kettle temperature; product quality.*

1. Pendahuluan

Ingot timah merupakan produk logam berbentuk batangan yang dihasilkan melalui tahapan peleburan (*smelting*) dan penuangan logam cair ke dalam cetakan standar hingga mencapai bentuk dan dimensi tertentu. Produk ini berfungsi sebagai bentuk akhir maupun produk antara dalam rantai pemurnian bijih timah sebelum digunakan pada berbagai aplikasi industri hilir. Secara definisi, ingot adalah logam cair yang didinginkan hingga memadat menjadi batangan setelah proses peleburan. Dalam konteks industri, ingot timah umumnya memiliki tingkat kemurnian 99,85–99,99% (Fosu et al., 2024).

PT Timah Tbk Unit Metalurgi Muntok merupakan produsen utama ingot timah di Indonesia yang hingga saat ini masih mengandalkan metode pengecoran manual. Pemilihan metode ini tidak semata-mata disebabkan oleh keterbatasan teknologi, tetapi juga berdasarkan pengalaman operasional yang menunjukkan bahwa penggunaan mesin pengecoran otomatis pernah menimbulkan cacat permukaan pada bagian atas ingot akibat pergerakan meja cetak selama pendinginan, sehingga mengurangi konsistensi bentuk dan mutu produk.

Sejumlah studi menunjukkan bahwa tahapan *smelting* berperan signifikan terhadap mutu ingot yang dihasilkan. Fosu et al. (2024) menegaskan bahwa komposisi kimia logam cair sebelum dicetak sangat menentukan potensi cacat seperti porositas, *shrinkage*, dan kekasaran permukaan, yang dipengaruhi oleh ukuran partikel bijih, komposisi flux, suhu reduksi, dan keberadaan mineral gangue. Kemurnian dan kestabilan logam cair berperan penting dalam meminimalkan cacat internal seperti gas porosity, yang umumnya disebabkan oleh oksida dan gas terlarut.

Selain itu, Dańczak et al. (2021) menemukan bahwa variasi komposisi slag, khususnya kandungan MgO dan Al₂O₃, mempengaruhi kelarutan Sn sehingga memicu terbentuknya inclusion dan cacat permukaan. Distribusi timah yang tidak homogen akibat ketidakseimbangan slag berpotensi mengganggu proses solidifikasi dan meningkatkan peluang terjadinya cacat. Temuan Taskinen et al. (2021) juga menegaskan bahwa ketidakterkendalian potensial oksigen dan komposisi slag dapat menyebabkan *oxide entrapment* dan segregasi selama pembekuan, yang berkontribusi pada munculnya cacat pitting, flaking, dan permukaan kasar. Temuan ini menegaskan bahwa cacat pada ingot dapat berasal bukan hanya dari proses pencetakan, tetapi juga dari kondisi kimia sistem sebelum penuangan logam.

Wang et al. (2022) menambahkan bahwa ketika logam timah diperoleh dari material sekunder, pemurnian tambahan diperlukan untuk mengurangi impuritas yang dapat memengaruhi sifat aliran dan profil solidifikasi. Kandungan impuritas yang tinggi berpotensi menghasilkan porositas, *bubble entrapment*, dan berbagai cacat permukaan lainnya pada ingot. Walaupun penelitian

tersebut berfokus pada *recovery* timah, implikasinya relevan bagi industri yang menggunakan bahan baku campuran atau daur ulang. Park et al. (2022) menegaskan bahwa komposisi slag mempengaruhi viskositas dan kemampuan slag dalam memisahkan impuritas dari logam cair. Slag yang terlalu kental atau terlalu cair dapat menghambat proses pemisahan, sehingga meningkatkan potensi cacat inklusi pada ingot. Cacat tersebut sering dihasilkan dari ketidaksempurnaan pembersihan slag selama proses tapping atau penuangan logam cair ke dalam cetakan.

Selain aspek metalurgi hulu, parameter pengecoran juga berperan penting dalam pembentukan cacat pada ingot timah. Studi Faisalhariyanto dan Irfai (2018) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur tuang cenderung memperbesar tingkat porositas, sedangkan Sembiring et al. (2024) menemukan bahwa penggunaan media cetakan yang kurang sesuai dapat menurunkan kualitas coran melalui munculnya cacat seperti porositas, kekasaran permukaan, dan penyusutan. Di PT Timah Tbk, meskipun metode manual terbukti lebih stabil dibandingkan sistem otomatis, cacat fisik tetap ditemukan, terutama berat ingot yang tidak sesuai spesifikasi dan ujung ingot yang melengkung. Kondisi tersebut berdampak pada efisiensi produksi, nilai ekonomi produk, serta proses inspeksi. Upaya pengendalian mutu dilakukan melalui pendekatan Six Sigma (Rahmasuci et al., 2023), yang meliputi standardisasi prosedur kerja, pemeliharaan peralatan, serta inspeksi proses secara berkala. Produk juga wajib memenuhi standar internasional seperti ASTM B339 (ASTM, 2024).

Rahmasuci et al. (2023) menemukan bahwa tingkat kecacatan ingot merek Bangka (BA) mencapai 2,01%, jauh melebihi batas toleransi 0,25%. Melalui tahapan DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), dua cacat dominan, yaitu berat ingot di luar spesifikasi dan ujung melengkung, diidentifikasi dengan akar penyebab utama berupa ketidakstabilan mesin dan rendahnya penguasaan operator. Rekomendasi perbaikan berupa pelatihan operator, penyempurnaan instruksi kerja, dan optimasi mesin casting terbukti meningkatkan level sigma dan menurunkan jumlah cacat. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas produksi tidak hanya ditentukan oleh tingkat otomatisasi, tetapi juga oleh kemampuan mempertahankan mutu secara konsisten melalui pengendalian proses yang ketat.

Berdasarkan literatur yang ada, penelitian terkait cacat fisik ingot timah di sektor industri masih terbatas meskipun aspek *smelting*, komposisi slag, dan pemurnian telah banyak dikaji. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada dua tujuan utama, yaitu mengidentifikasi jenis cacat fisik yang muncul pada ingot timah hasil pengecoran manual di Unit Metalurgi PT Timah Tbk, dan menganalisis faktor teknis maupun prosedural yang menjadi penyebab cacat. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan

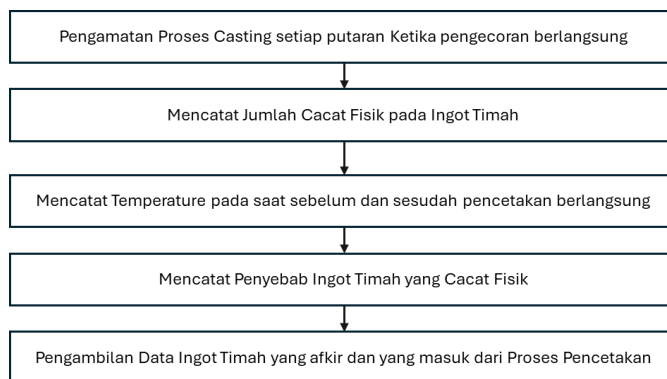
gambaran komprehensif mengenai karakteristik cacat fisik, akar penyebab, dan strategi mitigasi dalam rangka mendukung peningkatan kualitas proses produksi secara berkelanjutan.

2. Metodologi

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan secara sistematis karakteristik cacat fisik pada produk ingot timah yang dihasilkan melalui proses pengecoran manual. Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk mengamati fenomena di lapangan secara langsung, melakukan pengukuran variabel operasional, serta mendokumentasikan frekuensi dan variasi cacat yang muncul selama proses produksi. Dengan demikian, penelitian mampu menyajikan pemetaan kondisi aktual proses casting serta faktor-faktor yang berpotensi memengaruhi kualitas produk akhir.

Kegiatan penelitian dilaksanakan di Unit Metalurgi PT Timah Tbk, Muntok, yang mencakup area *kettle*, meja cetak, lapangan dan gudang. *Kettle* merupakan wadah peleburan atau penampungan di mana timah dilelehkan dan disiapkan sebelum dicetak menjadi ingot. Pada penelitian ini, *kettle 7* dan *kettle 8* sebagai sumber logam cair, meja cetak sebagai lokasi pencetakan ingot, serta area inspeksi lapangan dan gudang penyimpanan sebagai lokasi verifikasi kualitas. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk memperoleh cakupan data yang komprehensif, mulai dari kondisi proses peleburan hingga hasil pemeriksaan mutu. Pengamatan dilakukan selama beberapa batch pemartaian yang berbeda sehingga variasi kondisi operasional dapat terekam secara representatif.

Objek penelitian meliputi ingot timah hasil pengecoran manual dari kedua *kettle*, parameter proses operasional seperti temperatur logam cair, waktu penuangan dan pembekuan, kondisi peralatan cetak, serta data cacat fisik yang teridentifikasi baik pada tingkat inspeksi lapangan maupun gudang. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1, data dikumpulkan melalui tiga teknik utama, yaitu observasi langsung terhadap proses penuangan dan pembekuan, pengukuran temperatur logam cair pada lima titik putaran setiap batch pemartaian, serta pendataan jenis dan jumlah cacat fisik.



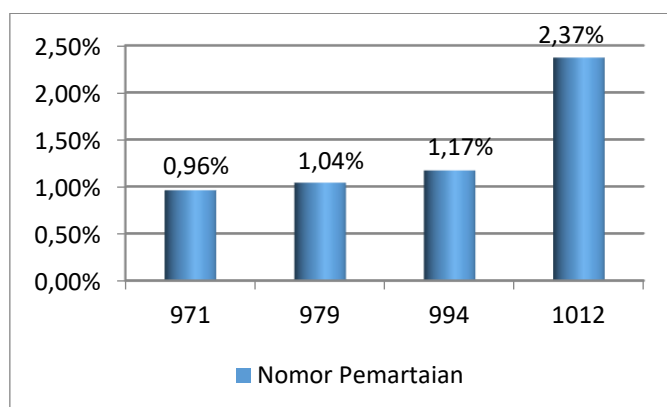
Gambar 1. Diagram Alir Pengamatan

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan menelaah distribusi cacat pada tiap nomor pemartaian dan meja cetak, mengidentifikasi pola hubungan antara variabilitas temperatur logam cair dengan munculnya cacat, serta membandingkan tingkat akhir antara inspeksi lapangan dan gudang guna mengevaluasi konsistensi mutu. Analisis ini memungkinkan identifikasi faktor operasional yang berkontribusi terhadap cacat fisik, sehingga hasil penelitian dapat menjadi dasar rekomendasi perbaikan pada proses casting manual di Unit Metalurgi PT Timah Tbk.

3. Hasil dan Pembahasan

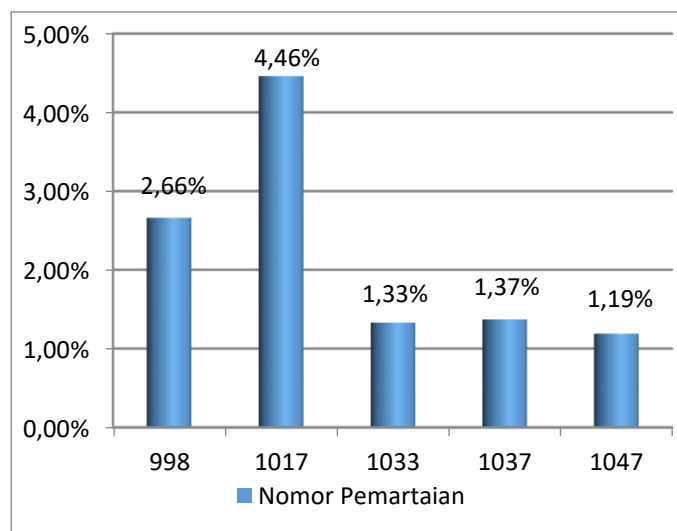
3.1 Analisis Persentase Cacat Fisik Ingot Timah pada *Kettle 7* dan *Kettle 8* di Meja Cetak

Persentase cacat fisik ingot timah pada *kettle 7* dan *kettle 8* ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pada Gambar 2, empat nomor pemartaian (971, 979, 994, 1012) pada *kettle 7* menunjukkan variasi persentase cacat yang mencerminkan ketidakkonsistenan parameter proses. Sementara itu, Gambar 3 menampilkan lima nomor pemartaian pada *kettle 8* (998, 1017, 1033, 1037, 1047) dengan pola persentase cacat yang tidak seimbang antar meja cetak, mengindikasikan adanya perbedaan kondisi atau performa pada masing-masing meja.



Gambar 2. Diagram Persentase Jumlah Cacat Fisik Ingot Timah di *Kettle 7* pada meja cetak 1-5

Pengamatan pada *kettle* 7 menunjukkan variasi persentase cacat antara 0,96% hingga 2,37%, sedangkan *kettle* 8 memiliki kisaran yang lebih tinggi pada beberapa batch, yaitu 1,19% hingga 4,46%. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya ketidakseragaman kondisi operasional antar meja cetak, terutama pada aspek temperatur, pengisian cetakan, dan tingkat keausan permukaan cetakan. Pola cacat yang terlokalisasi pada meja tertentu menegaskan bahwa parameter mekanis seperti kestabilan meja cetak dan distribusi logam cair memiliki kontribusi besar terhadap cacat fisik yang muncul. Batch nomor 19.B.998 dan 19.B.1017 tercatat sebagai outlier dengan tingkat cacat signifikan lebih tinggi dibandingkan batch lain. Hal ini mengindikasikan gangguan proses pada periode tersebut, kemungkinan akibat fluktuasi temperatur atau kondisi operasional yang tidak optimal.



Gambar 3. Diagram Persentase Jumlah Cacat Fisik Ingot Timah di *Kettle* 8 pada meja cetak 1-5

3.2 Perbandingan Afkir Fisik Ingot Timah di lapangan dan di gudang

Data pengamatan jumlah afkir fisik ingot timah di gudang diperlihatkan pada Tabel 1. Pengamatan diambil sebelum dilakukan proses penimbangan, strapping, dan packing. Afkir fisik pada gudang diketahui dengan cara penimbangan ingot timah yang di bawah 23 kg atau yang lewat di atas 27 kg, dianggap afkir fisik karena tidak memenuhi standar uji AQL di gudang. Berat standar ingot timah adalah 25 kg (PT Timah, 2017).

Tabel 1. Data Pengamatan Jumlah Produk dan Afkir Fisik Ingot Timah di lapangan dan di gudang

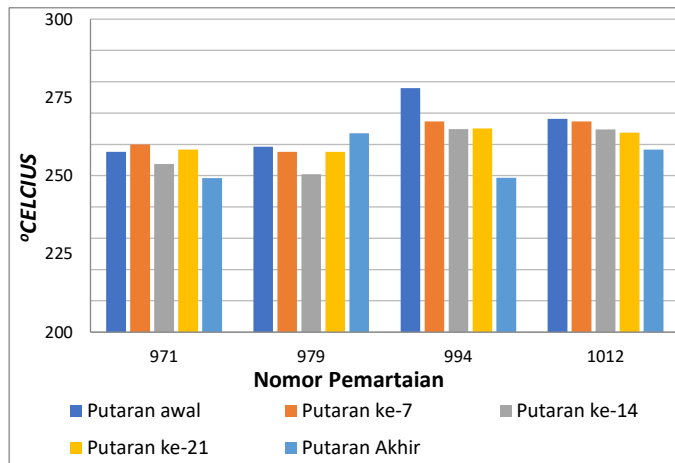
Nomor Pemartaian	Jumlah Produk pada Proses Casting di Lapangan	Afkir fisik ingot timah di lapangan	Ingot timah yang diterima di gudang	Afkir fisik ingot timah di gudang
19.B.971	1560	15	1545	10
19.B.979	1620	17	1603	0
19.B.994	1620	19	1601	1
19.B.998	1800	48	1752	1
19.B.1012	1728	41	1687	5
19.B.1017	1836	82	1754	3
19.B.1033	1800	24	1744	6
19.B.1037	1740	24	1499	2
19.B.1047	1680	20	1660	1

Hasil pengamatan pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa persentase afkir di lapangan berkisar antara 0,96% hingga 4,47%, dengan rata-rata sekitar 1,96%. Perbandingan antara afkir fisik di lapangan dan afkir yang dicatat di gudang memperlihatkan adanya inkonsistensi standar inspeksi. Beberapa batch menunjukkan pengurangan jumlah afkir ketika diterima di gudang, bahkan ada batch yang tidak memiliki afkir sama sekali di gudang meskipun terdapat afkir saat inspeksi di lapangan. Kondisi ini dapat menyiratkan dua hal: pertama, adanya perbedaan persepsi atau kriteria evaluasi kualitas antara unit produksi dan unit penerimaan; kedua, potensi evaluasi ulang di gudang yang lebih toleran terhadap cacat minor. Ketidaksamaan standar inspeksi ini dapat menimbulkan ketidakefisienan, memengaruhi pelacakan kualitas, dan berisiko menurunkan konsistensi mutu produk akhir.

3.3 Analisis Temperatur pada *Kettle* 7 dan *Kettle* 8

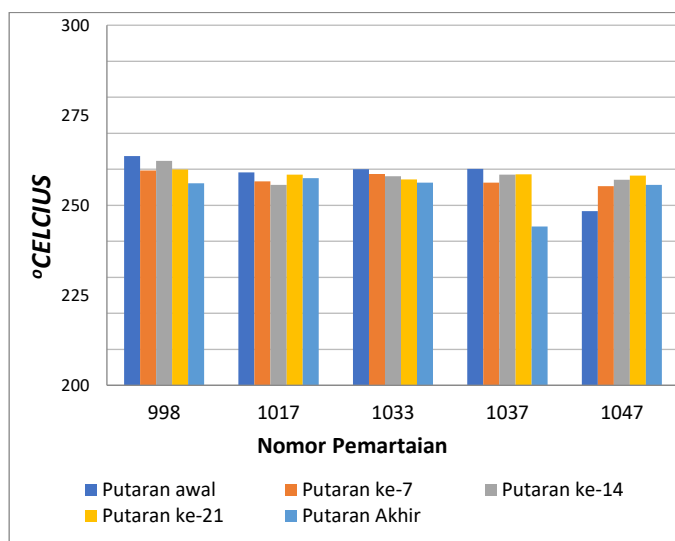
Data hasil pengamatan temperatur pada *kettle* 7 dan *kettle* 8 saat proses pencetakan berlangsung diperlihatkan masing-masing pada grafik batang di Gambar 4 dan Gambar 5. Kedua grafik temperatur ini memiliki peran penting dalam menganalisis kualitas proses pencetakan ingot. Temperatur pada *kettle* 7 dan *kettle* 8 selama proses pencetakan merupakan parameter operasional penting yang menentukan stabilitas proses serta kualitas ingot yang dihasilkan. Grafik batang pada Gambar 4 menunjukkan dinamika temperatur pada *kettle* 7 yang dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan pemanasan. Fluktuasi temperatur yang muncul pada grafik tersebut mencerminkan respons sistem terhadap perubahan kondisi proses, seperti penambahan material atau variasi kinerja elemen pemanas. Ketidakkonsistenan temperatur berpotensi memengaruhi viskositas logam cair, yang pada gilirannya dapat menyebabkan pengisian cetakan yang tidak seragam dan meningkatkan kemungkinan terjadinya cacat fisik pada ingot. Dengan demikian, pola temperatur

pada *kettle* 7 menjadi indikator awal terhadap performa proses pencetakan.



Gambar 4. Diagram Temperatur pada *Kettle* 7 pada saat proses pencetakan berlangsung

Sementara itu, grafik batang pada Gambar 5 yang menggambarkan temperatur *kettle* 8 memungkinkan analisis komparatif terhadap kestabilan sistem pencairan. Jika variasi temperatur pada *kettle* 8 lebih kecil dibandingkan *kettle* 7, hal ini menandakan pengendalian panas yang lebih baik dan kondisi operasi yang lebih stabil, yang biasanya berkontribusi terhadap kualitas ingot yang lebih tinggi. Identifikasi anomali temperature, baik berupa puncak yang jauh lebih tinggi maupun penurunan mendadak, dapat memberikan informasi mengenai potensi gangguan teknis seperti ketidakseimbangan distribusi panas atau masalah sirkulasi logam cair. Secara keseluruhan, evaluasi kedua grafik ini memberikan gambaran mengenai efektivitas sistem pemanasan serta potensi sumber cacat, sehingga dapat mendukung upaya peningkatan konsistensi proses pencetakan ingot.

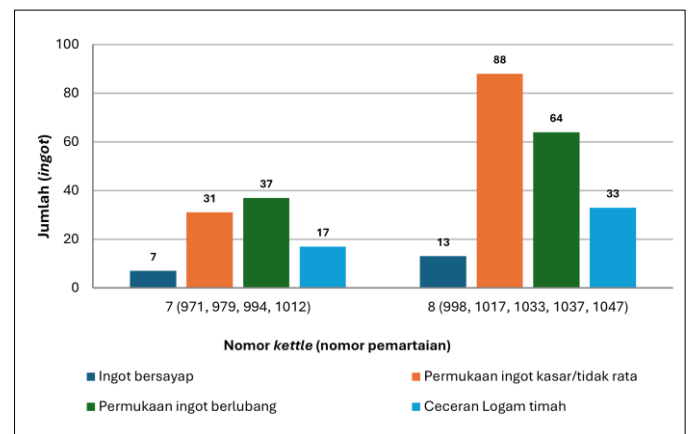


Gambar 5. Diagram Temperatur pada *Kettle* 8 pada saat proses pencetakan berlangsung

3.4 Pengamatan Cacat Fisik Ingot Timah di Lapangan pada *Kettle* 7 dan *Kettle* 8

Gambar 6 menampilkan diagram batang jumlah cacat fisik ingot timah pada *kettle* 7 dan *kettle* 8 selama proses pencetakan berlangsung. Grafik ini membandingkan secara langsung banyaknya ingot cacat berdasarkan jenis cacat ingot yang muncul pada kedua *kettle*. Setiap batang mewakili jumlah cacat fisik yang terdeteksi pada periode pengamatan tertentu, sehingga grafik ini memberikan gambaran mengenai seberapa sering cacat terjadi di masing-masing *kettle*.

Grafik pada Gambar 6 memperlihatkan pengaruh kondisi operasional *kettle* terhadap kualitas ingot. Jika jumlah cacat fisik pada *kettle* 7 lebih tinggi dibandingkan *kettle* 8, hal ini dapat mengindikasikan adanya ketidakstabilan temperatur, ketidaksesuaian pengadukan, atau kondisi permukaan cetakan yang kurang optimal pada *kettle* 7. Sebaliknya, bila *kettle* 8 menunjukkan jumlah cacat yang lebih besar, maka sistem pemanasan atau prosedur pencetakan pada *kettle* tersebut kemungkinan mengalami gangguan. Pola distribusi batang juga penting untuk dianalisis. Konsistensi cacat yang tinggi pada suatu *kettle* menandakan masalah proses yang bersifat sistematis, sedangkan cacat yang muncul secara sporadis dapat disebabkan oleh faktor operasional sesaat seperti kontaminasi material, fluktuasi temperatur mendadak, atau kesalahan operator.



Gambar 6. Diagram Jumlah Cacat Fisik Ingot Timah berdasarkan Jenis di *Kettle* 7 dan 8

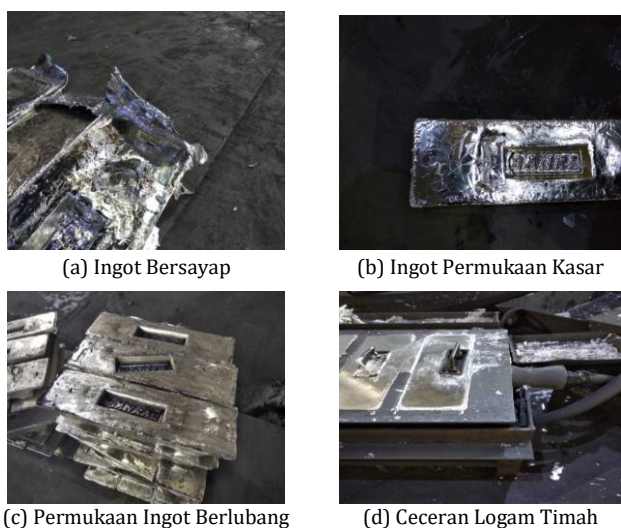
Hasil observasi proses pengecoran manual di Unit Metalurgi PT Timah Tbk selama periode penelitian ditemukan empat jenis cacat yang muncul secara dominan, yaitu: ingot bersayap, permukaan ingot kasar atau tidak rata, permukaan ingot berlubang, serta ceceran logam timah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 6. Keempat cacat ini berkontribusi pada sekitar 300 ingot cacat dari

total 1620 ingot dalam satu batch produksi, setara dengan $\pm 7,6$ ton material cacat, sehingga memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi produksi (PT Timah, 2017).

3.5 Jenis Cacat Fisik pada Ingot Timah di Lapangan

Macam-macam cacat fisik ingot timah diperlihatkan pada Gambar 7, yaitu (a) ingot bersayap, (b) permukaan ingot kasar, (c) permukaan ingot berlubang, dan (d) ceceran logam timah. Ingot bersayap terjadi akibat penuangan logam cair melebihi kapasitas cetakan, biasanya karena laju penuangan terlalu cepat. Permukaan ingot kasar diakibatkan oleh getaran mekanis pada meja cetak, yang umumnya bersumber dari pergerakan forklift atau aktivitas penyusunan ingot di area sekitar. Permukaan ingot berlubang muncul ketika solidifikasi tidak sempurna akibat pencetakan terlalu cepat atau sirkulasi pendingin yang kurang optimal. Sementara itu, ceceran logam timah disebabkan oleh pemuncratan cairan timah yang berkaitan dengan permeabilitas cetakan yang kurang baik atau terperangkapnya gas selama penuangan.

Cacat-cacat tersebut mencerminkan pentingnya kestabilan proses penuangan, kontrol mekanis lingkungan kerja, dan efektivitas sistem pendinginan. Dengan memperkuat kontrol terhadap keempat aspek tersebut, tingkat cacat fisik pada ingot timah dapat ditekan secara signifikan.



Gambar 7. Macam-macam cacat fisik pada ingot timah di lapangan; a) ingot bersayap, b) ingot permukaan kasar/tidak rata, c) permukaan ingot berlubang, d) ceceran logam

3.6 Analisis Penyebab Cacat Fisik pada Ingot Timah di Lapangan

Proses pencetakan ingot timah memiliki sensitivitas tinggi terhadap kondisi operasional, sehingga variabilitas kecil pada suhu, getaran, maupun prosedur kerja dapat

memengaruhi kualitas akhir produk. Salah satu faktor penting adalah suhu pada *kettle*, di mana suhu yang terlalu tinggi menyebabkan timah cair membeku lebih lambat. Untuk mempercepat pembekuan, operator sering menyiramkan air ke permukaan ingot. Meskipun metode ini efisien dalam mengurangi waktu, penyiraman berlebihan menyebabkan permukaan ingot tidak rata atau berlubang karena pembekuan terjadi secara tiba-tiba dan tidak merata. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi waktu tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas fisik ingot.

Selain suhu, proses stering pada *kettle rafinasi* juga menjadi penyebab cacat fisik. Pengadukan dengan rotor menghasilkan getaran yang merambat ke meja cetak, sehingga ingot yang sedang dalam fase pembekuan mengalami gangguan struktural. Cacat yang muncul berupa permukaan yang bergelombang atau berlubang, menunjukkan bahwa kestabilan mekanik selama pembekuan sangat menentukan hasil akhir. Penggunaan bantalan karet sebagai peredam getaran merupakan solusi yang logis, karena mampu meminimalkan transfer getaran dan menjaga kondisi pembekuan tetap stabil.

Proses pembekuan itu sendiri sangat dipengaruhi oleh faktor waktu, sebagaimana terlihat pada data Tabel 2 dan Tabel 3, waktu pengecoran sekitar 10 detik per lubang meja. Pada rentang waktu tersebut, timah cair harus segera mengalami pendinginan tanpa gangguan agar struktur padatnya terbentuk sempurna. Sistem sirkulasi air di dalam meja cetak dan aliran udara dari kipas menjadi mekanisme pendinginan utama. Penyiraman air tambahan dapat membantu, namun hanya jika dilakukan secara terkontrol. Penyiraman berlebihan justru meningkatkan risiko cacat karena menimbulkan pendinginan mendadak yang tidak seragam.

Tabel 2. Waktu pengecoran setiap lubang meja cetak dalam 1 putaran

Nomor Meja	Putaran pada Lubang Meja Cetak (detik)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Meja 1	15.36	10.22	9.21	10.12	9.32	9.00	9.57	8.65	9.78	9.57	10.26	12.42
Meja 2	12.03	9.94	9.20	8.96	9.52	9.05	10.42	7.16	9.30	9.50	12.12	13.00
Meja 3	14.60	9.63	9.73	9.12	11.07	10.00	11.11	11.12	8.85	8.20	10.89	8.93
Meja 4	15.06	10.77	10.40	9.40	10.03	9.47	9.15	9.47	9.28	10.45	9.94	12.48
Meja 5	15.13	10.98	9.02	9.73	9.59	9.97	10.80	10.23	9.93	9.90	10.07	10.87

Tabel 3. Waktu Rata-rata yang dihasilkan setiap meja untuk proses pengecoran

Nomor meja	Rata-rata (detik)
Meja 1	10.29
Meja 2	10.01
Meja 3	10.27
Meja 4	10.49
Meja 5	10.51

Faktor manusia juga berperan signifikan dalam

pembentukan cacat fisik ingot. Human error seperti lupa mematikan pompa cetak, mengangkat ingot sebelum membeku sempurna, atau kelalaian dalam pengangkatan dross menyebabkan kerusakan langsung pada produk. Kurangnya komunikasi antar pekerja memperbesar peluang terjadinya kesalahan-kesalahan ini. Oleh karena itu, penerapan prosedur kerja yang konsisten, komunikasi yang baik, serta orientasi pada kualitas menjadi prinsip penting dalam meminimalkan cacat fisik dan memastikan stabilitas proses produksi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa cacat fisik pada ingot timah, yang diproduksi melalui proses casting manual, disebabkan oleh interaksi kritis antara faktor termal, mekanik, dan prosedural. Secara ilmiah, proses pembekuan sangat sensitif terhadap gangguan mekanik, di mana getaran dari aktivitas stering pada *kettle* merambat ke meja cetak, merusak struktur padat yang sedang terbentuk dan menyebabkan cacat permukaan. Secara termal, meskipun sistem pendinginan air dan kipas telah terintegrasi, praktik penyiraman air yang berlebihan justru menginduksi pendinginan mendadak yang tidak merata, menghasilkan porositas dan permukaan yang tidak rata. Selain itu, data menunjukkan bahwa variabilitas persentase cacat antar meja cetak mengindikasikan ketidakkonsistenan operasional lokal, diperburuk oleh faktor manusia (*human error*) yang signifikan. Oleh karena itu, kestabilan kualitas ingot timah memerlukan solusi terintegrasi, meliputi implementasi peredaman getaran (misalnya, bantalan karet) serta penegakan prosedur kerja yang ketat untuk mengontrol waktu pendinginan dan meminimalisasi kesalahan operasional.

5. Referensi

- ASTM. (2024). ASTM B339: Standard Specification for Pig Tin. ASTM International.
- Dańczak, A., et al. (2021). Thermodynamic considerations on magnesium oxide solubility in metallurgical slags and its influence on tin behavior. *Journal of Mining and Metallurgy*, 57(2), 347–356.
- Faisalhariyanto, A., & Irfai, M. A. (2018). Hubungan Variasi Temperatur Tuang pada Pengecoran Logam Timah dengan Porositas Hasil Coran. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 5(1). <https://doi.org/10.26740/jrm.v5i1.26386>.
- Fosu, S., et al. (2024). Metallurgical extraction of tin from cassiterite: Processes, progress, and challenges. *Minerals Engineering*, 207, 108145.
- International Committee of Foundry Technical Associations (1993). *International atlas of casting defects*. American Foundrymen's Society.
- PT Timah Tbk (2017). SO Induk PT Timah Tbk Nomor 1900 Tahun 2017.
- Park, J., et al. (2022). Effect of slag composition on the distribution of minor elements during metal smelting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 53, 1123–1135.
- Rahmasuci, F., et al. (2023). Penerapan Six Sigma metode DMAIC untuk peningkatan kualitas produk timah ingot merek Bangka. *Jurnal Teknologi Produksi*, 12(2), 45–58.
- Sembiring, P., Girsang, E. R., Ginting, D. P., & Hermanto, T. (2024). The Metal Casting Process Using Plastilin Molds with Tin Material. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 3(2), 48–53. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v3i2.117>.
- Taskinen, P., et al. (2021). Slag–metal equilibrium of trace elements in metallurgical systems. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52, 987–1002.
- Wang, Y., et al. (2022). Recovery of tin from secondary resources: Challenges and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 179, 106130.