Pengembangan *Tool* Cetakan *Sand Casting* Pada *Bearing Housing* Di Pt.Xyz Menggunakan Metode *Quality Function Deployment (Qfd)*

1st Nazmal Ilman Ferriq
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
nazmal@studen.telkomuniversity.ac.id

2nd Agus Kusnayat
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
guskus@telkomuniversity.ac.id

3rd Sheila Amalia
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
sheilamalias@telkomuniversity.ac.id

Abstrak*— Proses sand casting komponen Bearing Housing di PT XYZ masih menggunakan pattern dan core box berbahan kayu yang memiliki umur pakai terbatas (sekitar 1,5 tahun) serta menunjukkan ketidakstabilan dimensi akibat pembengkakan, keausan, dan kerusakan permukaan. Kondisi tersebut menyebabkan ketidakstabilan cetakan pasir, reject produk, serta frekuensi rework sebesar 8–10% yang berdampak pada penurunan efisiensi dan peningkatan biaya produksi. Hal ini menunjukkan bahwa tooling eksisting belum mampu memenuhi kebutuhan pengguna secara konsisten selama siklus pemakaian. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain tooling cetakan sand casting dengan performa yang lebih baik melalui penerjemahan kebutuhan pengguna ke dalam parameter teknis desain serta mengevaluasi kelayakan ekonominya. Metode Quality Function Deployment (QFD) digunakan untuk memetakan kebutuhan pengguna melalui matriks House of Quality yang diintegrasikan dengan kerangka Product Development Process (PDP). Rancangan tooling usulan divalidasi melalui simulasi teknik untuk memastikan kestabilan struktural dan geometrik, serta dievaluasi secara ekonomi menggunakan pendekatan Total Cost of Ownership (TCO). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tooling usulan mampu meningkatkan kestabilan cetakan pasir dan kualitas produk dibandingkan tooling eksisting, serta memberikan efisiensi biaya jangka panjang.

Kata kunci: sand casting, tooling, pattern, core box, Quality Function Deployment, House of Quality, Product Development Process, Total Cost of Ownership.

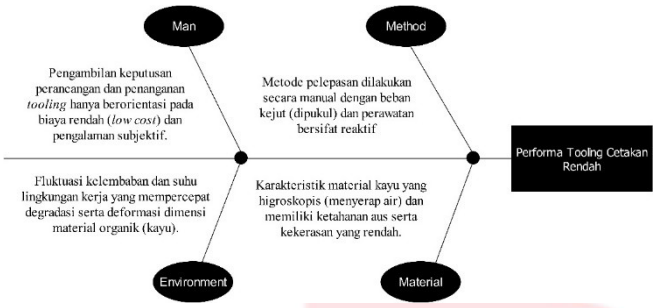
I. PENDAHULUAN

Cetakan (*mold*) merupakan alat produksi yang memiliki peran penting dalam industri manufaktur modern. Alat tersebut dapat mengukur presisi dimensi, stabilitas bentuk, dan konsistensi kualitas pada barang atau komponen yang dibuat. Keandalan sebuah cetakan berpengaruh langsung terhadap *repeatability* dan ketepatan proses. Oleh karena itu, kualitas cetakan sangat penting untuk mencapai efisiensi dan produktivitas tinggi dalam lingkungan produksi massal.[1] Selain itu, *tooling* secara umum merupakan bagian integral dari keseluruhan sistem desain produk dan proses, di mana desain cetakan tidak hanya memengaruhi kualitas fisik komponen yang dihasilkan tetapi juga memengaruhi kecepatan siklus, tingkat kerusakan, dan jumlah *scrap* yang dihasilkan perusahaan.[2] Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa umur pakai cetakan sangat mempengaruhi biaya operasional, karena cetakan yang mengalami keausan atau deformasi akan meningkatkan kebutuhan *rework* dan menyebabkan *downtime* yang signifikan.[3] Dengan demikian, cetakan harus dipahami bukan hanya sebagai komponen teknis tetapi sebagai elemen vital yang berdampak pada performa keseluruhan sistem produksi, mencakup aspek kualitas, ekonomi, dan keberlanjutan operasional perusahaan.[4]

Namun, pada proses produksi yang berjalan saat ini, terdapat permasalahan yang pada *tool*, yaitu *pattern* dan *core box*. Pada proses di lapangan menunjukkan bahwa *pattern* dan *core box* mudah mengalami kerusakan. Temuan kerusakan selalu terjadi setelah beberapa bulan bahkan setiap kali penggunaan sebagaimana dijelaskan dalam wawancara dengan pihak PT XYZ. Kondisi ini menyebabkan cetakan pasir yang terbentuk tidak stabil secara dimensional dan menimbulkan produk *reject* serta peningkatan frekuensi *rework*. Oleh karena itu, seluruh *tooling* utama yang terkait dengan produksi *Bearing* LH–RH baik komponen *pattern* dan *core box* perlu dilakukan evaluasi dan penggantian.

Selain permasalahan umum terkait umur pakai dan ketidakstabilan dimensi, hasil observasi lapangan dan dokumentasi langsung pada *tool* cetakan menunjukkan adanya pola kerusakan spesifik yang berulang pada *pattern* dan *core box*. Kerusakan tersebut muncul secara konsisten akibat interaksi material *tooling* dengan lingkungan produksi, metode kerja, serta karakteristik pasir resin yang digunakan. Terdapat empat jenis kerusakan utama pada *tooling* cetakan yang paling sering terjadi dan berdampak signifikan terhadap kualitas hasil pengecoran. Jenis kerusakan, penyebab utama, serta dampaknya terhadap *tool* dan hasil cetakan.

Produk dikatakan baik apabila mampu memenuhi spesifikasi target dan kebutuhan pengguna secara konsisten sepanjang siklus penggunaannya.[5] Berdasarkan observasi lapangan dan hasil wawancara dengan pihak PT XYZ, terdapat permasalahan utama yang mendasari ketidakstabilan kualitas cetakan pasir dan meningkatnya *reject* produk *Bearing* LH–RH adalah kondisi *tool* cetakan (*pattern* dan *core box*) yang belum baik performanya. Performa ini ditunjukkan oleh umur pakai yang singkat yaitu 1,5 tahun, frekuensi perbaikan atau *rework* mencapai 8-10%, serta ketidakmampuan *tooling* mempertahankan kestabilan geometrinya selama siklus produksi. Untuk mengidentifikasi secara ringkas sumber permasalahan tersebut, pemetaan sebab-akibat melalui pendekatan *fishbone diagram* digunakan untuk menstrukturkan faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap kerusakan *tool* cetakan yang menyebabkan *reject* pada cetakan pasir dan *reject* pada produk atau *part* yang dihasilkan yaitu *Bearing*, dapat dilihat pada Gambar 1.



GAMBAR 1
Fishbone Diagram

Interaksi antara faktor manusia, metode kerja, material, dan lingkungan yang ditunjukkan pada fishbone diagram menyebabkan kondisi *tool* cetakan (*pattern* dan *core box*) menjadi kurang baik performanya dalam mempertahankan kestabilan geometrinya selama proses produksi. *tool* tersebut berdampak langsung pada ketidakstabilan cetakan pasir yang terbentuk, sehingga *cavity* sering mengalami perubahan bentuk dari geometri awal yang dirancang. Kondisi ini menyebabkan terjadinya *reject* pada produk Bearing LH–RH dan meningkatkan frekuensi rework hingga sekitar 8-10%. Dampak lanjutan tidak hanya dirasakan pada penurunan kualitas produk akhir, tetapi juga pada meningkatnya beban kerja operator akibat aktivitas perbaikan berulang, terjadinya *downtime* produksi, serta meningkatnya biaya operasional dan perawatan perusahaan.

Hal ini menjadi dasar kuat untuk melakukan penelitian, pengukuran ulang, serta perbaikan alat dengan bahan dan desain yang lebih baik untuk meningkatkan produktivitas serta mengurangi beban kerja operator. Evaluasi konstruksi cetakan melalui simulasi teknik diperlukan untuk memastikan desain baru mampu menahan proses beban secara maksimal (Weinert et al., 2023). Pendekatan *Quality function deployment* (QFD) digunakan untuk menerjemahkan kebutuhan proses dan operator ke dalam parameter teknis desain *tooling*, sehingga rancangan baru dapat dievaluasi secara lebih objektif.

II. KAJIAN TEORI

A. Pengembangan Produk

Pengembangan produk dipandang sebagai sekumpulan aktivitas terstruktur yang dimulai dari identifikasi peluang hingga berakhir pada proses produksi hingga pengiriman. Seluruh tahapan tersebut bertujuan menghasilkan solusi yang mampu memenuhi kebutuhan pengguna secara konsisten. Pada tahap awal, pengembangan produk harus difokuskan pada pemahaman kebutuhan pengguna secara mendalam. Kualitas sebuah desain bergantung pada kemampuan pengembang untuk memahami kebutuhan pengguna secara komprehensif sebelum menentukan arah spesifikasi teknis dan konsep desain, sehingga tahapan awal pengembangan produk harus dilakukan secara sistematis dan bebas asumsi. Terdapat beberapa fase utama pengembangan produk [5]

B. Industri Manufaktur, *Tooling, Mold Casting*

Pengecoran (*casting*) merupakan salah satu teknik dalam pembuatan part atau produk dengan bahan logam, logam tersebut dicairkan di dalam tungku peleburan yang kemudian dituangkan pada sebuah cetakan (*mold*) yang berongga dengan bentuk yang diinginkan dan dibiarkan mengeras.[6] Umumnya cetakan sebagai media untuk pengecoran logam terbuat dari bahan pasir yang telah dicampur dengan bahan-bahan pengikat. Menurut Cvethovski terdapat 2 sifat jenis cetakan yang digunakan pada saat proses pengecoran yaitu cetakan yang sekali pakai atau mengalami degradasi saat proses seperti cetakan pasir, cetakan gips, cetakan evaporatif, dan cetakan investasi. Selanjutnya jenis cetakan yang tidak terintegrasi atau terdegradasi saat proses, seperti cetakan die, cetakan sentrifugal, cetakan peras, dan cetakan kontinu.[6], [7]

C. Material *Tool* Cetakan

Berbagai jenis alternatif material dipertimbangkan dalam menggantikan cetakan dengan material tradisional, terutama ketika diperlukan ketepatan geometri dan ketahanan yang lebih tinggi. Logam seperti aluminium dapat dibuat melalui proses pemesinan presisi seperti *milling* dan EDM, yang menjadikannya pilihan yang bagus untuk cetakan yang membutuhkan performa sederhana.[8]

Selain itu, komposit resin yang diperkuat oleh partikel logam, seperti epoxy yang dipenuhi aluminium atau komposit epoxy-metal (MEC), memiliki waktu pembuatan yang lebih cepat dan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan peralatan keras. Namun, mereka memiliki keterbatasan dalam hal ketahanan panas dan umur pakai. [9], [10]

D. Desain Konstruksi Cetakan

Pada proses *sand casting* desain konstruksi cetakan dipengaruhi oleh karakteristik aliran cairan logam, desain sistem saluran cairan logam (*gating system*), dan peforma *core* selama proses *curing* dan penuangan. Kualitas pada pengecoran ditentukan oleh kemampuan *gating system* dalam mengendalikan turbulensi, kecepatan aliran, pola pengisian, dan pembentukan cacat.[11],[12] Akurasi dimensi dan pembentukan rongga internal pada proses *curing core* dipengaruhi oleh karakteristik pengerasan inti cetakan saat menerima beban termal.[13] Dengan demikian, desain cetakan meliputi *pattern* dan *core box* harus mempertimbangkan perilaku aliran dan solidifikasi logam serta sifat kimia dan mekanik dari *core sand* selama proses produksi.

E. Ergonomi dalam Penggunaan *Tooling*

Kondisi fisik operator saat menangani *tooling* sangat memengaruhi kualitas hasil *sand casting*. Beban ergonomi yang buruk meningkatkan variabilitas kerja dan frekuensi kesalahan manusia, menyebabkan kualitas produk tidak konsisten.[14] Selain itu, operator yang bekerja dalam lingkungan yang lebih stabil dan terkendali, desain alat kerja ergonomis dapat mengurangi ketidakpresisian dalam *alignment*, mencegah pergeseran *core*, dan menurunkan risiko kerusakan secara signifikan.[15]

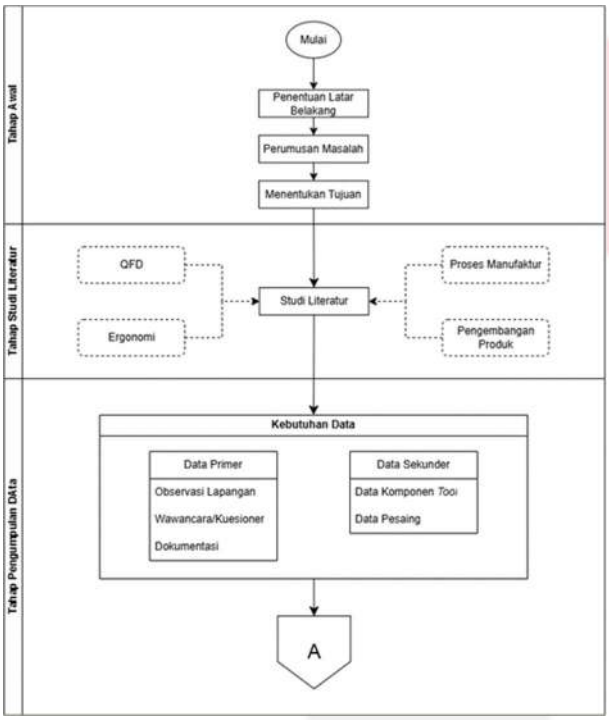
F. *Quality function deployment* (QFD)

Quality function deployment (QFD) adalah suatu pendekatan sistematis yang digunakan untuk menerjemahkan kebutuhan pelanggan ke dalam persyaratan teknis yang dapat dijadikan dasar perancangan produk atau proses produksi.[16] Konsep ini pertama kali dikembangkan oleh Akao dan Mizuno pada tahun 1960 sebagai metode untuk memastikan bahwa suara pelanggan (*voice of customer*) menjadi pusat orientasi dalam aktivitas desain dan rekayasa manufaktur.

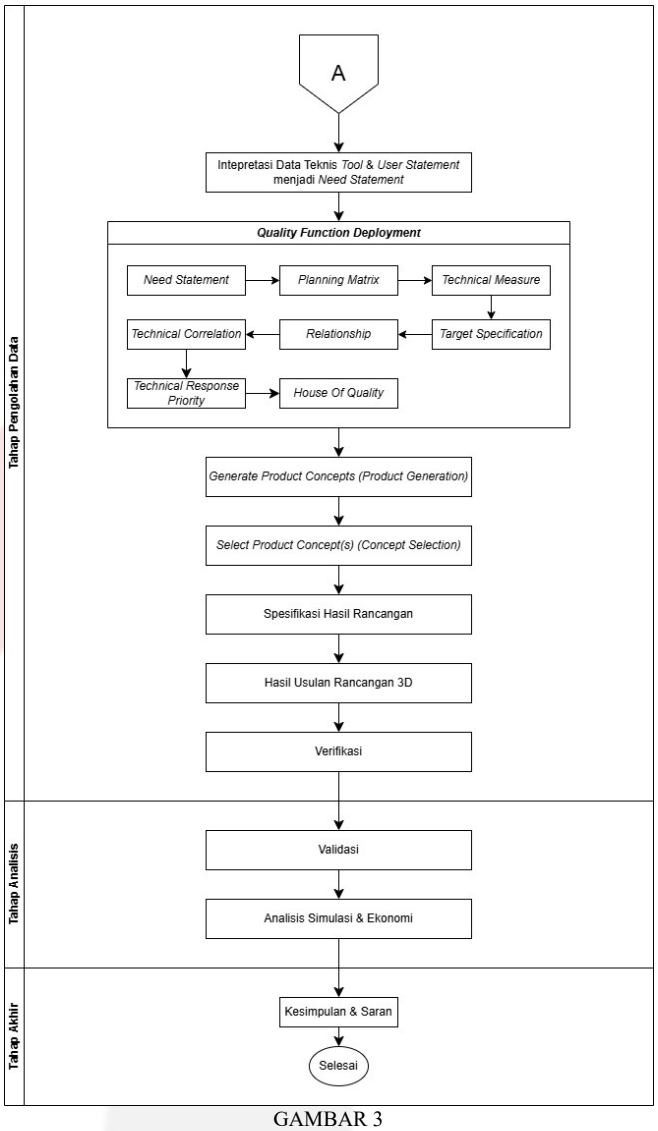
Dalam perkembangannya, QFD menjadi salah satu alat utama untuk meningkatkan kualitas, mengurangi variasi, serta mengontrol karakteristik kritis dari produk atau proses .[17]

III. METODE

Penelitian ini dirancang dengan menggunakan metode *Quality function deployment* (QFD) yang disusun secara sistematis dengan menggunakan diagram alir. Diagram alir sistematika penyelesaian masalah ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



GAMBAR 2
(Sistematika Penyelesaian)



GAMBAR 3
(Sistematika Penyelesaian Lanjutan)

Langkah awal penelitian ini dimulai dengan menentukan latar belakang permasalahan permasalahan *tooling* pada proses pengecoran di PT XYZ untuk kemudian dirumuskan menjadi isu-isu utama yang perlu diselesaikan. Selanjutnya, studi literatur dilakukan untuk menyediakan landasan teoritis bagi perancangan ulang *tooling sand casting* yang dianalisis dalam penelitian ini. Kajian dimulai dari teori *Quality function deployment* (QFD).

Data pada penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer berasal dari observasi proses *sand casting*, wawancara dengan user serta dokumentasi kondisi *tooling* eksisting. Data sekunder diperoleh dari dokumen internal perusahaan serta berbagai referensi ilmiah yang berkaitan dengan material, proses pengecoran, QFD, ergonomi, dan desain produk. Kedua jenis data tersebut menjadi dasar dalam penyusunan *need statement*, konstruksi *House of Quality*, dan perancangan alternatif desain *tooling* usulan.

Seluruh informasi yang telah diperoleh melalui observasi, wawancara, dokumentasi, dan data sekunder diolah menjadi dasar analitis untuk merancang ulang *tooling sand casting*. Proses pengolahan mencakup interpretasi data, penyusunan *House of Quality* (HoQ), perhitungan prioritas teknis,

pengembangan alternatif konsep, dan pemilihan konsep terbaik menggunakan kerangka pemilihan desain.

Rancangan *tooling* yang terpilih dievaluasi untuk memastikan bahwa desain yang diusulkan layak diterapkan pada proses *sand casting Bearing Housing* di PT XYZ. Evaluasi difokuskan pada dua aspek utama, yaitu validasi desain berdasarkan umpan balik pengguna serta analisis teknis melalui simulasi untuk menilai kinerja rancangan dalam kondisi operasional. Analisis ekonomi juga dilakukan setelah spesifikasi teknis akhir ditetapkan. Analisis ekonomi difokuskan pada identifikasi dan perbandingan biaya *tooling* eksisting dan *tooling* usulan, yang meliputi biaya awal pembuatan, biaya operasional, serta biaya kepemilikan selama masa pakai. Perbandingan dilakukan menggunakan pendekatan *Total Cost of Ownership* (TCO) untuk menilai kelayakan ekonomi rancangan secara menyeluruh.

Tahap akhir penelitian terdiri dari penyusunan kesimpulan dan rekomendasi. Kesimpulan dirumuskan berdasarkan hasil pengolahan data, analisis teknis, dan evaluasi biaya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

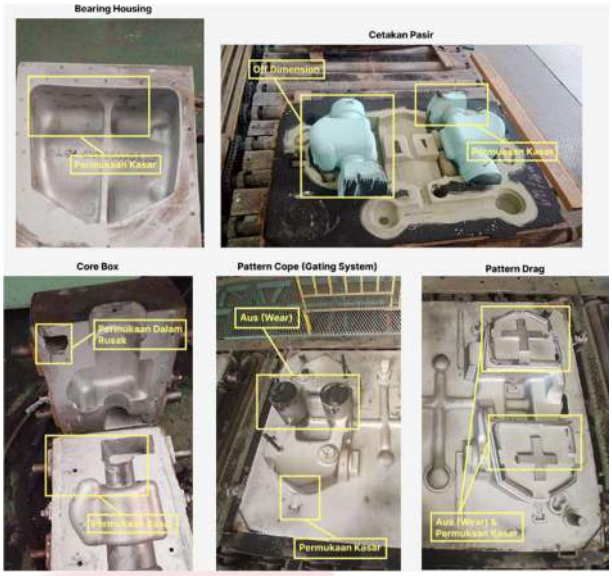
A. Data Primer

Data primer diperoleh melalui observasi langsung pada proses produksi *sand casting* dan wawancara dengan operator, Supervisor, dan *engineer* untuk mendapat kan *customer statement*. Data yang dikumpulkan mencakup kondisi aktual *pattern* dan *core box,* terutama pada jenis-jenis kerusakan yang terjadi dan penyebabnya serta persepsi operator terhadap performa *tooling*.

TABEL 1
Jenis Kerusakan

No	Jenis Kerusakan	Penyebab Utama	Dampak pada *Tooling*	Dampak pada Hasil Cetakan dan Produk
1	Pembengkakan (*Swelling)*	Kelembapan	Dimensi membesar atau *bending*	*Off-dimension*
2	Permukaan Dalam Rusak	Benturan	Cekung, mengelupas (*chipping*), atau retak	*Sand inclusion*
3	Aus (*Wear*)	Gesekan Pasir	Dimensi mengecil atau *thinning*	*Surface defect*
4	Permukaan Kasar	Pemakaian	Tekstur rusak	Produk kasar – *rework*

Dugaan awal pada permasalah utama terletak pada ketidakcocokan material kayu (mahoni) terhadap lingkungan proses *sand casting*, terutama terkait kelembapan, gesekan abrasif, dan beban benturan. Selain itu, pengembangan atau redesain *tooling* untuk meminimalkan kerusakan akibat proses.



GAMBAR 4
Jenis Kerusakan Pada Tooling, Cetakan, dan Bearing

B. Data Sekunder

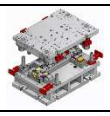
Data diperoleh dari dokumen teknis perusahaan. Pengumpulan data sekunder dilakukan untuk memastikan bahwa proses qfd memiliki dasar objektif dalam menetapkan *target specification*, *technical response*, dan prioritas desain. Selain itu, data pembanding menjadi penting untuk menilai kelayakan material baru serta memastikan rancangan yang dikembangkan sesuai dengan standar manufaktur modern dan praktik terbaik industri pengecoran.

TABEL 2
Komponen *Tooling*

No	Komponen	Fungsi Teknis	Deskripsi Teknis
1	*Pattern* (*Cope & Drag Pattern*)	Membentuk geometri utama *Bearing Housing*	*Pattern* dua bagian (*cope & drag*) yang membentuk kontur eksternal produk.
2	*Core box*	Membentuk rongga internal *Bearing Housing*	*Core box* digunakan untuk mencetak *core pasir* yang membentuk lubang poros dan rongga internal produk.
3	*Gating system* (*Sprue*, *Runner*, *Ingate*)	Mengalirkan logam cair ke *cavity*	Sistem saluran masuk logam cair yang dirancang untuk mengontrol aliran.
4	*Base Plate*	Menopang dan menstabilkan seluruh *tooling*	Pelat dasar datar yang menjadi dudukan *pattern* dan *core box*.
5	Sistem *Alignment*	Menjaga keselarasan *cope & drag*	Sistem pemandu untuk memastikan posisi *cope* dan *drag* selalu sejajar dan konsisten antar siklus produksi

Pembanding dilakukan untuk membandingkan praktik industri lain dalam penggunaan material dan desain *tooling* pengecoran.

TABEL 3
Data *Tooling* Pembanding

Produk Sejenis	Konsep 1	Konsep 2	Konsep 3
Gambar			
Fungsi *Tooling*	Melakukan proses *piercing*, *cam-piercing*, dan *separating* pada *stamping part*	Melakukan proses *piercing*, *cam-piercing*, dan *separating* pada *stamping part*	Melakukan proses *piercing*, *cam-piercing*, dan *separating* pada *stamping part*
Konfigurasi Desain	*Die holder* dan *punch holder* berupa satu blok *casting* (*one-block construction*)	*Punch holder* terdiri dari *insert locator* terpisah dan *back plate*	*Die* dan *punch holder* berupa satu blok *casting*, namun dengan konfigurasi *stopper* ganda
Material Utama	SKD11 Steel	SKD11 Steel	SKD11 Steel
Perawatan	Sulit, jika terjadi kerusakan pada *die holder*, seluruh blok harus diganti	Mudah, *insert locator* dapat dilepas dan diganti tanpa membongkar seluruh *die*	Sulit, sama seperti konsep 1 karena konstruksi satu blok
Ergonomi & Handling	Kurang ergonomis, proses pelepasan part sulit	Lebih ergonomis dan aman bagi operator	Lebih baik dari konsep 1, namun tetap terbatas pada perawatan
Ketahanan Dimensi	Rentan terhadap masalah *alignment* pasca perbaikan	Paling stabil, *alignment* lebih terkontrol	Stabil, namun risiko perbaikan tetap tinggi
Biaya Jangka Panjang	Tinggi akibat biaya penggantian satu blok	Lebih rendah, hanya bagian rusak yang diganti	Tinggi akibat perawatan dan penggantian blok
Kelebihan	Konstruksi sederhana dan kuat	Mudah dirawat, ergonomis, *alignment* stabil, biaya lebih efisien	Peredaman getaran lebih baik
Kekurangan	Perawatan rumit dan tidak fleksibel	Redaman getaran lebih rendah dibanding konsep 3	Perawatan sulit karena konstruksi satu blok

C. *Need Statement*

Berdasarkan hasil wawancara dengan berbagai pemangku kepentingan yang terlibat langsung dalam proses produksi *Bearing* LH–RH, meliputi supervisor produksi, *engineer* produksi, *quality check*, serta operator pada beberapa tahapan proses, diperoleh sejumlah kebutuhan utama terkait pengembangan *tool* cetakan pasir yang disusun dalam bentuk *need statement*.

TABEL 4
Unit WHATs

Kode	Need Statement (WHATs)
W1	*Tooling* tidak mengalami deformasi dimensi akibat kelembapan
W2	*Tooling* memiliki ketahanan terhadap benturan saat handling
W3	*Tooling* memiliki ketahanan aus terhadap kontak pasir resin
W4	Permukaan *tooling* tetap halus selama umur pakai
W5	Fleksibilitas & stabilitas *gating system*
W6	*Tooling* membutuhkan perawatan dan koreksi manual yang minimal
W7	*Tooling* aman bagi operator saat digunakan
W8	*Tooling* memiliki umur pakai yang panjang dan konsisten
W9	*Tooling* lebih efisien dalam jangka panjang

Hasil *need statement* diperoleh melalui proses pengolahan dari seluruh narasumber yang terlibat langsung dalam proses produksi *Bearing* LH–RH. Proses pengolahan dilakukan dengan mengelompokkan pernyataan pengguna dan temuan lapangan ke dalam kebutuhan.

D. *Technical Response*

TABEL 5
Technical Response

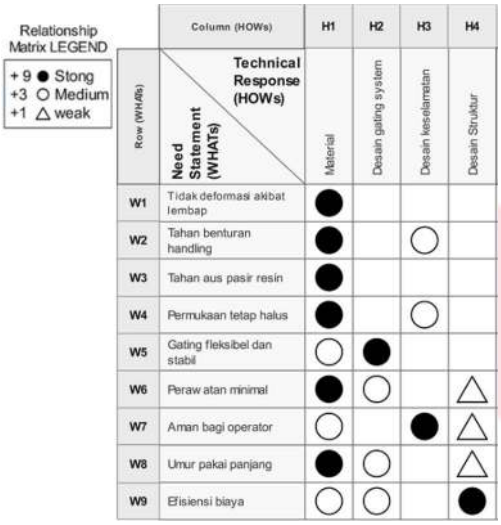
Atribut Kebutuhan	***Need statement*** **(WHATs)**	***Technical Responses*** **(HOWs)**
W1	*Tooling* tidak deformasi dimensi akibat kelembapan selama pemakaian	Penggantian material *tooling* ke material non-higroskopis/ stabilitas tinggi
W2	*Tooling* memiliki ketahanan terhadap benturan saat handling	Penggunaan material *tooling* dengan kekuatan mekanik lebih baik
W3	*Tooling* memiliki ketahanan aus terhadap kontak pasir resin	Pemilihan material *tooling* dengan ketahanan aus lebih tinggi
W4	Permukaan tooling tetap halus selama umur pakai	Penggunaan material *tooling* yang mampu mempertahankan kualitas permukaan
W5	Fleksibilitas & stabilitas *gating system*	*Redesign* gating system
W6	*Tooling* membutuhkan perawatan dan koreksi manual yang minimal	Penggunaan material tooling dengan kebutuhan perawatan rendah
W7	*Tooling* aman bagi operator saat digunakan	Perbaikan desain yang lebih aman untuk operator
W8	*Tooling* memiliki umur pakai yang panjang dan konsisten	Optimasi pemilihan material untuk umur pakai yang panjang
W9	*Tooling* lebih efisien dalam jangka panjang	Optimasi struktur *tooling*

Untuk memastikan bahwa setiap *technical response* dapat dianalisis dan divalidasi secara objektif, diperlukan penetapan satuan pengukuran yang sesuai dan dikonversikan ke dalam bentuk *units of HOWs,* sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam penentuan spesifikasi target serta evaluasi desain *tooling* usulan.

TABEL 6
Unit Hows

Kode	HOWs	Unit HOWs
H1	Material	Jenis Material
H2	Desain *gating system*	Desain & Jenis Material
H3	Desain keselamatan	Desain & Jenis Material
H4	Desain struktur	Desain

Setelah setiap *technical response* didefinisikan beserta unit atau bentuk karakteristik teknisnya, tahap selanjutnya adalah menentukan arah perbaikan (*direction of goodness*) dari masing-masing respon teknis untuk memberikan panduan konseptual mengenai kecenderungan perubahan yang diharapkan pada setiap karakteristik teknis. Penentuan *direction of goodness* dilakukan melalui analisis logika teknis dari masing-masing respon teknis, dengan mempertimbangkan sifat fisik parameter, tujuan peningkatan kinerja proses, serta adanya potensi *trade-off* desain.



GAMBAR 5
Relationship Matrix

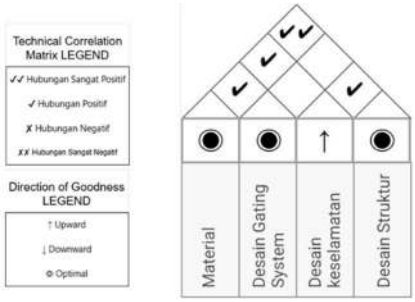
Berdasarkan *relationship matrix* terlihat bahwa respon teknis material (H1) memiliki hubungan kuat dengan sebagian besar kebutuhan utama pengguna, khususnya yang berkaitan dengan kestabilan terhadap kelembapan, ketahanan aus, kualitas permukaan, presisi geometri *cavity*, serta umur pakai *tooling*.

Penentuan TRP dilakukan dengan mengombinasikan bobot kebutuhan pengguna yang telah dinormalisasi dengan kekuatan hubungan pada *relationship matrix*, sehingga diperoleh nilai *technical importance* (TI) dan *absolute importance* untuk masing-masing respon teknis. Hasil perhitungan ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan fokus utama pengembangan desain *tooling* usulan.

TABEL 7
Technical Response Priority

Kode	*Technical Response*	*Technical Importance* (TI)	*Absolute Importance*	*Ranking*
H1	Material	7,191	0,608	**1**
H2	Desain *gating system*	2,259	0,191	**2**
H3	Desain keselamatan	1,365	0,115	**3**
H4	Desain struktur	1,020	0,086	**4**
Σ		11,835	1,000	

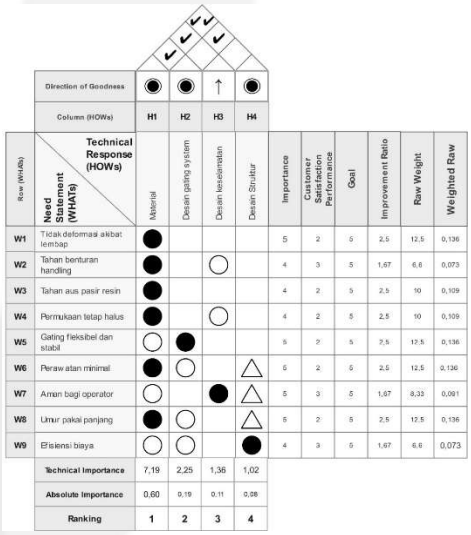
Hasil *Technical Response Priority* (TRP), menunjukkan bahwa aspek material menjadi faktor paling dominan dalam menjawab kebutuhan pengguna, khususnya yang berkaitan dengan kestabilan dimensi, ketahanan terhadap keausan, kualitas permukaan, serta umur pakai *tooling*. Sementara itu, desain *gating system* dan optimasi struktur *tooling* berperan sebagai respon teknis pendukung yang berpengaruh terhadap kestabilan proses pengecoran, presisi, serta efisiensi biaya. Analisis korelasi teknis dilakukan untuk menilai hubungan antar respon teknis dalam *roof matrix.* Langkah ini penting untuk mengidetifikasi sinergi maupun potensi konflik antar parameter desain.



GAMBAR 6
Technical Correlation

Berdasarkan *technical correlation matrix* pada Gambar diatas, hubungan antar respon teknis menunjukkan korelasi positif dominan yang mencerminkan sinergi desain dalam pengembangan *tooling* cetakan pasir. Korelasi positif terdapat antara material (H1) dan desain *gating system* (H2), antara material (H1) dan desain keselamatan (H3), korelasi sangat positif juga teridentifikasi antara material (H1) dan desain struktur (H4), selain itu, korelasi positif juga terdapat pada desain keselamatan (H3) dan desain struktur (H4).

House of Quality merupakan integrasi dari seluruh komponen QFD yang telah disusun. HOQ menjadi representasi komprehensif antara kebutuhan pengguna dan arah pengembangan teknis yang dapat dilihat pada Gambar 7.



GAMBAR 7
Cetakan *House of Quality Tool*

E. *Concept Generation*

Setelah batas sistem ditetapkan, dilakukan penguraian fungsi utama ke dalam sub-fungsi yang lebih spesifik untuk memudahkan pencarian solusi [5]. Setiap sub-fungsi direalisasikan oleh satu atau lebih subsistem fisik yang memiliki peran spesifik dalam menjalankan fungsi tersebut. Dengan demikian, dekomposisi produk memastikan bahwa setiap fungsi sistem memiliki representasi fisik yang jelas

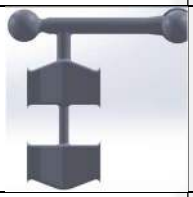
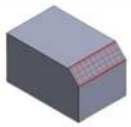
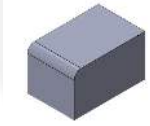
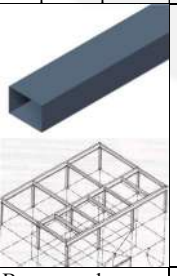
sebelum dilakukan pengembangan alternatif konsep desain yang dapat dilihat pada Gambar 8. [5]



GAMBAR 8
Dekomposisi Produk

Setelah dekomposisi produk ditetapkan, pencarian internal dilakukan untuk setiap sub-fungsi yang telah diidentifikasi. Proses pencarian internal dilakukan secara sistematis melalui *expert judgement* dan studi literature untuk mengidentifikasi berbagai alternatif solusi yang dapat diimplementasikan pada setiap bagian *tooling* sebelum dilakukan penggabungan dan pemilihan konsep yang dapat dilihat pada Tabel 8. [5]

TABEL 8
Pencarian Internal

Function	**Alternatif 1**	**Alternatif 2**	**Alternatif 3**
Pemilihan material *tooling*			
	Aluminium Dural (Duralumin)	*Carbon Steel S45C*	*Gray Cast Iron* (*Ferrous Casting*)
Desain *gating system*			-
	Gating terintegrasi pada *pattern*	*Gating semi-modular*	-
Desain *keselamatan*			-
	Chamfer pada tepi	Radius (*fillet*) pada tepi	-
Optimasi struktur *tooling*			-
	Berongga	Berongga dengan rangka penguat	-

Setelah alternatif *tooling* diidentifikasi pada tahap pencarian internal, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap karakteristik teknis masing-masing material untuk mendukung proses pengambilan keputusan desain. Oleh karena itu, dilakukan analisis sifat material yang relevan dengan kebutuhan *tool* cetakan pasir, khususnya yang berkaitan dengan stabilitas dimensi, ketahanan mekanik, kemudahan manufaktur, serta efisiensi berat dan biaya.

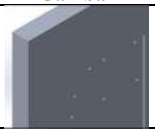
Parameter yang dianalisis meliputi kekuatan (*strength*), kekakuan (*hardness)*, durabilitas, keselamatan penggunaan, densitas, serta *machinability*. Data sifat material ini digunakan sebagai dasar teknis dalam membandingkan kelayakan Aluminium Dural, Steel S45C, dan Gray Cast Iron untuk diaplikasikan pada *tool* cetakan pasir *Bearing Housing*, sebelum dilakukan pemilihan material pada tahap pengembangan konsep selanjutnya.

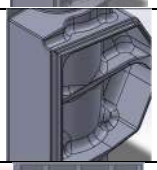
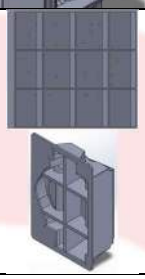
Berdasarkan perbandingan sifat material, *Aluminium Dural, Carbon Steel S45C,* dan *Gray Cast Iron* memiliki karakteristik yang berbeda dalam mendukung kinerja *tool* cetakan pasir. *Carbon Steel S45C* memiliki kekuatan mekanik dan kekerasan tertinggi, namun densitasnya yang besar berimplikasi pada meningkatnya beban *handling* dan kebutuhan alat bantu angkat serta *durability* yang rendah atau mudah korosi. *Gray Cast Iron* menawarkan biaya material yang rendah dan *machinability* yang baik, namun memiliki keterbatasan pada stabilitas dimensi untuk aplikasi *pattern* presisi. Aluminium Dural menunjukkan kombinasi sifat yang paling seimbang untuk aplikasi *tool* cetakan pasir, dengan densitas rendah, ketahanan terhadap kelembapan, serta kekuatan yang memadai untuk penggunaan berulang.

Karakteristik ini mendukung stabilitas dimensi, kemudahan manufaktur, dan keselamatan operator tanpa menambah beban *handling* secara signifikan.

Berdasarkan hasil eksplorasi konsep, diperoleh delapan alternatif konsep desain *tool* cetakan pasir yang paling representatif. Masing-masing konsep merupakan kombinasi solusi dari fungsi-fungsi utama, meliputi pemilihan material *tooling*, desain *gating system*, desain keselamatan, serta optimasi struktur *pattern* dan *core box* berongga. Setiap alternatif dirancang sebagai satu kesatuan sistem dan merepresentasikan pendekatan desain yang berbeda dalam memenuhi kebutuhan. Delapan konsep ini belum merupakan rancangan final, namun digunakan sebagai dasar evaluasi komparatif pada tahap selanjutnya untuk menentukan konsep yang paling baik performanya bagi PT XYZ.

TABEL 9
3D Alternatif Konsep

No	**Jenis**		**Gambar**
1	Material	Alumunium Dural	
2		Carbon Steel S45C	
3	Desain *gating system*	Terintegrasi	

No	Jenis		Gambar
4	Desain keselamatan	*Semi-modular*	
5		*Chamfer*	
6		*Fillet*	
7	Struktur *tooling*		

F. *Concept Selection*

Penentuan *selection criteria* pada tahap *concept selection* dilakukan dengan mengelompokkan kebutuhan pengguna (WHATs) yang memiliki tujuan desain dan mekanisme kegagalan yang serupa. Penentuan *selection criteria* dilakukan dengan mengelompokkan kebutuhan pengguna (N1–N11) berdasarkan kesamaan tujuan teknis dan implikasi desain.

Berdasarkan hasil *concept screening* yang dilakukan dengan membandingkan setiap alternatif konsep terhadap *reference concept* berupa *tooling* eksisting PT XYZ, konsep K4 dan K8 memperoleh nilai *net score* tertinggi dan menempati peringkat pertama. Kedua konsep tersebut menunjukkan kinerja paling konsisten pada sebagian besar kriteria seleksi tanpa adanya nilai negatif, sehingga dinilai paling representatif untuk dilanjutkan ke tahap *concept scoring*.

Selanjutnya, tahap *selection criteria weighting* dilakukan untuk menentukan tingkat kepentingan relatif dari setiap *selection criteria* berdasarkan kebutuhan pengguna (W1–W9), sebagai dasar evaluasi pada tahap *concept scoring*.

TABEL 11
Selection Criteria Weighting

Atribut Kebutuhan	Need statement	Selection Criteria	Presentase
W1	Tooling tidak deformasi dimensi akibat kelembapan selama pemakaian	Daya tahan & Umur pakai	56%
W2	Tooling memiliki ketahanan terhadap benturan saat handling		
W3	Tooling memiliki ketahanan aus terhadap kontak pasir resin		
W4	Permukaan tooling tetap halus selama umur pakai		
W8	Tooling memiliki umur pakai yang panjang dan konsisten		
W5	Fleksibilitas & stabilitas *gating system*	Fleksibilitas & stabilitas *gating system*	**14%**
W6	*Tooling* membutuhkan perawatan dan koreksi manual yang minimal	Operasional & Perawatan	**14%**
W7	*Tooling* aman bagi operator saat digunakan	Keselamatan	**9%**
W9	*Tooling* memiliki efisiensi biaya dari sisi pembuatan dan kepemilikan	Biaya	**7%**
Total Pembobotan			**100%**

Hasil pembobotan menunjukkan bahwa kriteria stabilitas serta daya tahan & umur pakai *tooling* memiliki bobot tertinggi. Hal ini mencerminkan bahwa permasalahan utama pada *tooling* eksisting berakar pada ketidakstabilan material dalam mempertahankan performa jangka panjang. Sementara itu, aspek fleksibilitas & stabilitas *gating system* dan kemudahan perawatan juga memiliki bobot yang cukup tinggi karena berpengaruh langsung terhadap kualitas hasil pengecoran dan efisiensi operasional. Bobot *selection criteria* yang telah ditetapkan selanjutnya digunakan sebagai faktor pengali dalam tahap *concept scoring*. Berikut merupakan hasil *concept scoring* pada Tabel 12.

TABEL 12
Concept Scoring

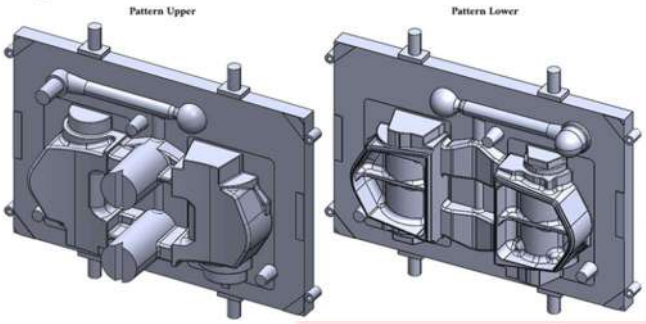
Selection Criteria	***Weight***	**Rating K4**	***Weight* K4**	**Rating K8**	***Weight* K8**
Daya Tahan & Umur Pakai	56%	5	2,80	4	2,24
Fleksibilitas & Stabilitas *Gating System*	14%	5	0,70	5	0,70
Operasional & Perawatan	14%	5	0,70	4	0,56
Keselamatan	9%	4	0,36	4	0,36
Biaya	7%	4	0,28	5	0,35
Total Score		**4,84**		4,21	
Rank		**1**		2	
Continue?		***Yes***		*No*	

Berdasarkan hasil *concept scoring* yang dilakukan dengan mempertimbangkan bobot kepentingan setiap *selection criteria*, bahwa Konsep K4 memiliki nilai total tertinggi sebesar 4,84. Keunggulan Konsep K4 terutama ditunjukkan pada kriteria daya tahan & umur pakai, fleksibiltas & stabilitas gating system, operasional & perawatan, yang masing-masing memperoleh nilai tinggi dan memiliki kontribusi signifikan terhadap skor total. Selain itu, Konsep K4 juga menunjukkan kinerja yang stabil pada kriteria dengan bobot rendah, yaitu keselematan dan biaya, sehingga konsep tersebut dapat dinilai paling memenuhi semua aspek kebutuhan pengguna. Dengan demikian, konsep terpilih dinilai dengan performa tooling paling baik dan

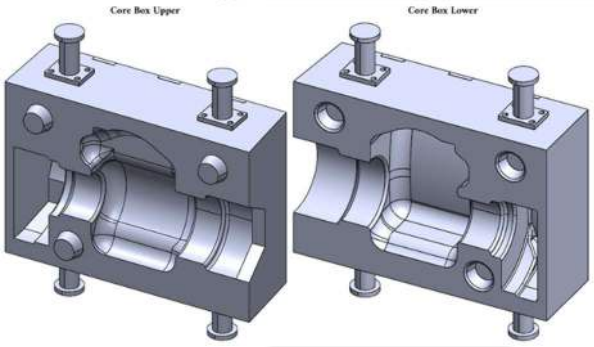
seimbang atau sesuai dengan kebutuhan dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

G. Hasil Perancangan

Hasil usuluan desain yang optimal ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas cetakan pasir serta kualitas *Bearing Housing*. Usulan dibuat dalam bentuk model 3D, yang mencakup konfigurasi *pattern* dan *core box* yang sesuai dengan konsep terpilih. Berikut merupakan hasil rancangan 3D pada Gambar 9 dan 10.



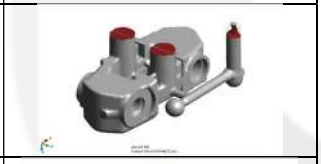
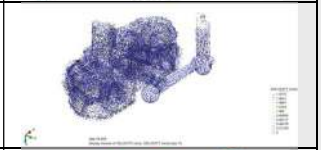
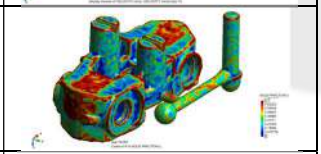
GAMBAR 9
3D *Pattern Upper & Lower + Gating System*



GAMBAR 10
3D *Core Box Upper & Lower*

H. Hasil Simulasi *Casting*

TABEL 13
Hasil Simulasi *Casting*

No	Jenis	Hasil Simulasi
1	*Contour fill distance*	
2	*Velocity contour*	
3	*Solid fraction contour*	
4	*Macro porosity contour*	
5	*Iso surface shrinkage*	

No	Jenis	Hasil Simulasi
		

Hasil simulasi pada *contour fill distance* menunjukkan bahwa pengisian *cavity* berlangsung secara bertahap dan merata dari area *inlet* menuju seluruh bagian *cavity* tanpa adanya area yang tertinggal signifikan.

Distribusi kecepatan aliran logam cair pada hasil simulasi berada pada rentang yang relatif stabil dan tidak menunjukkan lonjakan kecepatan ekstrem pada *runner* maupun *ingate*. Kondisi ini menandakan bahwa desain *gating system* usulan mampu mengendalikan aliran logam cair dengan baik, sehingga potensi erosi pasir dan ketidakstabilan aliran dapat diminimalkan.

Distribusi fraksi padat pada hasil simulasi memperlihatkan bahwa proses solidifikasi terjadi secara bertahap dan tidak terjadi pembekuan dini pada jalur aliran utama. Pola ini menunjukkan bahwa aliran logam cair tetap berlanjut hingga tahap akhir pengisian, sehingga kontinuitas pembentukan produk dapat terjaga.

Hasil simulasi porositas makro menunjukkan bahwa tidak terdapat konsentrasi porositas yang signifikan pada area fungsional dan area machining kritis dari bearing housing. Temuan ini mengindikasikan bahwa desain *gating system* usulan berpotensi menghasilkan kualitas internal produk yang lebih baik dibandingkan *tooling* eksisting.

Hasil *iso surface shrinkage* menunjukkan bahwa penyusutan material terkonsentrasi pada area non-kritis dan tidak memengaruhi geometri utama produk. Hal ini menandakan bahwa desain *gating system* usulan mampu mengendalikan fenomena *shrinkage* dengan baik, sehingga kestabilan dimensi produk dapat dipertahankan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pengembangan *tooling* cetakan *sand casting* (*pattern* dan *core box*) dengan metode *Quality Function Deployment* (QFD) berhasil menghasilkan rancangan tooling dengan performa yang lebih baik dibandingkan tooling eksisting. Penerapan QFD mampu menerjemahkan kebutuhan proses dan pengguna ke dalam parameter teknis yang terstruktur, sehingga desain *tooling* usulan memiliki kestabilan dimensi yang lebih baik, ketahanan terhadap keausan dan benturan yang lebih tinggi. Hasil seleksi konsep menunjukkan bahwa konfigurasi *tooling* berbahan aluminium dural dengan *gating system semi-modular*, desain keselamatan berbasis *fillet*, serta struktur berongga dengan rangka penguat merupakan solusi yang paling representatif terhadap kebutuhan pengguna. Hasil validasi serta analisis menunjukkan bahwa tooling usulan berpotensi mempertahankan kestabilan geometri cetakan pasir dan menghasilkan kualitas internal produk yang lebih baik. Validasi kualitatif dengan pengguna juga menunjukkan bahwa seluruh kebutuhan pengguna telah terpenuhi oleh desain *tooling* usulan. konsistensi kualitas cetakan pasir dan produk. Implikasi biaya jangka panjang lebih efisien berdasarkan analisis *Total Cost Ownership* (TCO). Dengan demikian, tujuan penelitian untuk

mengembangkan desain *tooling* cetakan *sand casting* dengan performa yang lebih baik dalam menjaga kestabilan cetakan pasir dan mendukung kualitas produk Bearing Housing telah tercapai.

REFERENSI

[1] A. Weinert, D. Tormey, C. O'Hara, and M. McAfee, "Condition Monitoring of Additively Manufactured Injection Mould *Tooling*," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, doi: 10.3390/s23042313.

[2] M. A. Islam *et al.*, "Additive Manufacturing in Polymer Research," *Polymer Testing*, vol. 132, 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108364.

[3] S. Jhavar, C. P. Paul, and N. K. Jain, "Causes of Failure and Repairing Options for Dies and Molds: A Review," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 34–45, 2013.

[4] X. Özkaymak Jiang and F. Kong, "Understanding Mold Wear Mechanisms and Optimizing Performance through Nico Coating: An In-Depth Analysis," 2023.

[5] K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, and M. C. Yang, *Product Design and Development*, 7th ed. McGraw-Hill, 2020.

[6] A. A. Adeleke *et al.*, "Recent Development in Casting Technology: A Pragmatic Review," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol. 32, no. 2, 2022, doi: 10.18280/rcma.320206.

[7] D. Santika, A. M. Siregar, C. A. Siregar, and A. R. Nasution, "Uji Eksperimental Kekerasan dan Struktur Mikro pada Produk Footstep Berbahan Limbah Aluminium," *RMME*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.30596/rmme.v5i1.10266.

[8] Hendra *et al.*, "The Manufacture and Distribution Temperature of Aluminum Molding for Plastic Beam from Waste PP," *METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal*, vol. 9, no. 1, pp. 46–53, 2025, doi: 10.25077/metal.9.1.46-53.2025.

[9] R. Hussin *et al.*, "Hybrid Mold: Comparative Study of Rapid and Hard *Tooling* for Injection Molding Application Using Metal Epoxy Composite (MEC)," *Materials*, vol. 14, no. 3, 2021, doi: 10.3390/ma14030665.

[10] C.-C. Kuo and X.-Y. Pan, "Development of a Rapid *Tool* for Metal Injection Molding Using Aluminum-Filled Epoxy Resins," *Polymers*, vol. 15, no. 17, 2023, doi: 10.3390/polym15173513.

[11] M. Brůna, M. Galcik, R. Pastircak, and E. Kantorikova, "Effect of Gating System Design on the Quality of Aluminum Alloy Castings," *Metals*, vol. 14, no. 3, p. 312, 2024, doi: 10.3390/met14030312.

[12] M. H. Raza, A. Wasim, M. Sajid, and S. Hussain, "Investigating the Effects of Gating Design on Mechanical Properties of Aluminum Alloy in Sand Casting Process," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 3, pp. 201–212, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.03.004.

[13] M. S. Khan, N. M. Mrowka, J. Sablowski, M. T. Asghar, C. Kupsch, and M. Szucki, "Investigations of the Cold *Box Core* Curing Stage Using an Augmented Simulation Approach," *International Journal of Metalcasting*, vol. 19, no. 4, pp. 2062–2078, 2025, doi: 10.1007/s40962-024-01445-y.

[14] V. Firescu and D. Filip, "Human Factors and Ergonomics in Sustainable Manufacturing Systems," *Machines*, vol. 13, no. 7, 2025, doi: 10.3390/machines13070595.

[15] A. Reiman, J. Kaivo-oja, E. Parviainen, E. Takala, and T. Lauraeus, "Human Factors and Ergonomics in Manufacturing in the Industry 4.0 Context," *Technology in Society*, vol. 65, 2021, doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101572.

[16] J. P. Ficalora and L. Cohen, *Quality function deployment and Six Sigma*. Prentice Hall, 2010.

[17] International Organization for Standardization, "ISO 16355-1: Application of Statistical and Related Methods to New Technology and Product Development Process," 2021.