

**Pengendalian Kualitas Dimensi *Mold Komposit* melalui Penambahan
Reinforcement Besi Menggunakan Metode FMEA dan FTA
(Studi Kasus: PT Karyatama *Komposit* Teknologi)**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Yusuf Setiawan
No. Mahasiswa : 19522281

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2026

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 22 – Juni - 2026

A handwritten signature in black ink is written over a 10,000 Rupiah postage stamp. The stamp is yellow and red, featuring the Garuda Pancasila and the text '10000', 'METERAI KEPOROS', and '429ABAJK02497972'.

(Yusuf Setiawan)
19522281

SURAT BUKTI PENELITIAN



PT KARYATAMA KOMPOSIT TEKNOLOGI
Jl. Tanjungsari Kencuran Sukoharjo, Kel. Sukoharjo, Kec. Ngaglik, Kab.
Sleman, Prov. Daerah istimewa Yogyakarta, 55584
Phone: 082221462582 Email: karyatamagarage@gmail.com

SURAT KETERANGAN SELESAI PENELITIAN

Nomor: 09.001/SKet/VI/2026
Yogyakarta, 22 Juni 2026

Kepada Yth,
Ketua Program Studi Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang KM 14,5 Sleman
Di Yogyakarta

Perihal : Surat Keterangan Selesai Penelitian

Dengan hormat,

Menerangkan bahwa, mahasiswa atas nama:

Nama : Yusuf Setiawan
Nim : 19522281
Prodi : Teknik Industri
Fakultas : Teknologi Industri
Universitas : Universitas Islam Indonesia (UII)

Bahwa yang bersangkutan telah selesai melakukan penelitian di PT. Karyatama Komposit Teknologi dengan pembimbing Manager HRGA Sdr. Gyan Cassandra Suwito, S.T.

Pelaksanaan penelitian mulai dari 9 Oktober 2025 s/d 22 Juni 2026 dengan judul penelitian "Evaluasi Risiko Ergonomi Industri Dengan Metode REBA Pada Pekerja Las di PT. Karyatama Komposit Teknologi".

Sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan perusahaan bahwa yang bersangkutan wajib menyerahkan 1 (satu) exemplar karya tulis hasil penelitian sebagai arsip di PT. Karyatama Komposit Teknologi.

Hormat Kami,
Manager HRGA

Gyan Cassandra Suwito

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**Pengendalian Kualitas Dimensi *Mold Komposit* melalui Penambahan
Reinforcement Besi Menggunakan Metode FMEA dan FTA
(Studi Kasus: PT Karyatama *Komposit* Teknologi)**



Dosen Pembimbing

(Ir. Hartomo, M.Sc., Ph.D. IPU., ASEAN.Eng)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**Pengendalian Kualitas Dimensi *Mold Komposit* melalui Penambahan
Reinforcement Besi Menggunakan Metode FMEA dan FTA
(Studi Kasus: PT Karyatama Komposit Teknologi)**

TUGAS AKHIR**Disusun Oleh :****Nama : Yusuf Setiawan****No. Mahasiswa : 19522281**

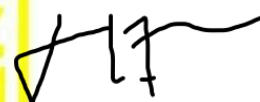
**Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Tekonologi Industri
Universitas Islam Indonesia**

Yogyakarta, 8 - Juli – 2026**Tim Penguji**

Ir. Hartomo, M.Sc., Ph.D. IPU., ASEAN.Eng
Ketua

Dr. Qurtubi, S.T., M.T.
Anggota I

Ratih Dianingtyas Kurnia, S.T., Ph.D.
Anggota II



**Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**


Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.,
NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil alamin, puji syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT yang maha atas segalanya, yang telah memberikan kemudahan hingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Terima kasih saya tujukan kedua orang tua saya yang selalu memberikan dukungan sehingga saya dapat mengerjakan tugas akhir dengan penuh semangat dan ketekunan. Terima kasih kepada bapak Ir. Hartomo, M.Sc.,Ph.D. IPU., ASEAN.Eng selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, dukungan serta bimbingan sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir. Terima kasih kepada seluruh dosen Teknik Industri UII yang telah memberikan ilmu nya sehingga saya mendapatkan banyak pengetahuan baru yang bermanfaat bagi masa depan saya.

Terima kasih kepada teman-teman yang telah memberikan dukungan, bantuan dan telah menemani saya dalam menyelesaikan pendidikan saya di Teknik Industri UII

MOTTO

“Jangan kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada berputus asa dari rahmat Allah, melainkan orang-orang yang tidak beriman”

(Qs. Yûsuf: 87)

“Barangsiapa menempuh suatu jalan untuk menuntut ilmu, maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga. Dan barangsiapa yang diperlambat amalnya, maka silsilahnya tidak akan dipercepat”

(Sunan Abi Dawud 3643)

KATA PENGANTAR

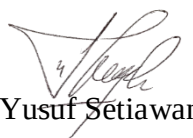
Assalamualaikum Wr.Wb

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang maha pengasih lagi maha penyayang, Tuhan semesta alam, Shalawat serta salam penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang kita tunggu syafaatnya kelak. Alhamdulillah atas segala pertolongan, rahmat, dan kasih sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengendalian Kualitas Dimensi *Mold Komposit* melalui Penambahan *Reinforcement* Besi Menggunakan Metode FMEA dan FTA di PT Karyatama *Komposit* Teknologi” dapat diselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya dengan setulus hati saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
 2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.Sc., selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknik Industri Universitas Islam Indonesia.
 3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Prodi Teknik Industri Program Sarjana Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
 4. Bapak Ir. Hartomo, M.Sc., Ph.D. IPU., ASEAN.Eng, selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bantuan dan arahnya dalam penyusunan Tugas Akhir.
 5. PT.Karyatama *Komposit* Teknologi yang telah mengizinkan dan mempermudah penulis untuk melakukan penelitian.
 6. Bapak Ibu serta keluarga saya yang selama ini telah memberikan dukungan dengan penuh kasih sayang seumur hidup saya.
 7. Bapak Gyan Cassandra Suwito selaku HRD di PT.Karyatama *Komposit* Industri tercinta yang telah memberikan dukungan dan motivasi yang diberikan tanpa henti.
 8. Teman-teman dan seluruh pihak yang telah turut serta dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis.
- Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, penulis mengharapkan kritik dan saran untuk menyempurnakan laporan ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamualaikum Wr.wb

Yogyakarta, 14 Oktober 2025


Yusuf Setiawan

19522281

ABSTRAK

Kualitas produk *komposit*, khususnya pada komponen *Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy (Part Drone)*, sangat dipengaruhi oleh ketepatan dimensi dan kestabilan proses produksi. Berdasarkan hasil inspeksi awal menggunakan *Hexagon 3D Scanner* dan analisis deviasi permukaan melalui software *PolyWorks*, ditemukan adanya penyimpangan dimensi pada beberapa segmen *mold* yang berpotensi menurunkan kualitas produk. Penyimpangan tersebut ditengarai berkaitan dengan desain dan kondisi *reinforcement* yang kurang optimal sehingga memengaruhi kestabilan struktur *mold* selama proses manufaktur.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengendalian kualitas proses produksi pada *Part Drone* dengan menerapkan metode *Integrated Definition Function Modeling (IDF/IDEF0)*, *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, dan *Fault Tree Analysis (FTA)*, serta merumuskan perbaikan menggunakan pendekatan 5W+1H. Data diperoleh melalui pemindaian 3D pada kondisi sebelum dan sesudah perbaikan *reinforcement*. Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa kegagalan terkait deformasi dan ketidaksesuaian dimensi memiliki nilai *Risk Priority Number (RPN)* yang tinggi sehingga menjadi prioritas perbaikan. Perbaikan dilakukan dengan penguatan dan penyesuaian desain *reinforcement* pada area kritis *mold*.

Hasil inspeksi lanjutan setelah perbaikan *reinforcement* menunjukkan penurunan signifikan deviasi permukaan, dengan mayoritas titik ukur berada dalam batas toleransi yang ditetapkan dan status inspeksi didominasi oleh hasil *PASS* dibandingkan data sebelumnya yang masih menunjukkan indikasi *FAIL/REPAIR*. Visualisasi peta warna juga memperlihatkan distribusi deviasi yang lebih homogen dan stabil pada seluruh segmen *mold*. Dari kondisi tersebut dapat diketahui bahwa perbaikan *reinforcement* terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan dimensi *mold* dan kualitas *Part Drone* secara keseluruhan, serta mampu mendukung penerapan sistem pengendalian kualitas yang lebih andal dan berkelanjutan.

Kata kunci: Pengendalian Kualitas, FMEA, FTA, IDF (IDEF0), 5W+1H, *Reinforcement*, *Hexagon 3D Scanner*, *PolyWorks*, *Part Drone*.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
SURAT BUKTI PENELITIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	v
MOTTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Literatur	7
2.2 Landasan Teori.....	10
2.2.1 Kualitas Produk	10
2.2.2 Pengendalian Kualitas.....	10
2.2.3 IDF (Integrated Definition Function Modeling / IDEF0).....	11
2.2.4 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	12
2.2.5 Fault Tree Analysis (FTA).....	16
2.2.6 5W+1H.....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Objek Penelitian	19
3.2 Subjek Penelitian.....	20
3.3 Jenis Data.....	21
3.4 Metode Pengumpulan Data	22
3.5 Alat dan Perangkat Lunak Penelitian.....	23
3.5.1 Reverse Engineering	23
3.5.2 3D Scanner.....	24
3.5.3 PolyWorks	25
3.6 Alur Penelitian.....	27
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	31
4.1 Pengumpulan Data	31
4.1.1 Sejarah Perusahaan.....	31
4.1.2 Produk yang dihasilkan.....	32
4.1.3 Pemetaan Proses Produksi Menggunakan Metode IDF (IDEF0).....	33
4.1.4 Proses Produksi	36
4.1.5 Reinforcement pada Mold Komposit.....	37
4.2 Pengolahan Data.....	39
4.2.1 Data Inspeksi	40

4.2.2 Data Cacat Dimensi Mold Hasil Inspeksi 3D Scanner	43
4.2.3 Prioritas Defect Berdasarkan Hasil Inspeksi 3D Scanner.....	46
4.3 Nilai RPN dan Mode Kegagalan.....	49
4.4 Titik Kritis Nilai RPN.....	52
4.5 Model FTA (Fault Tree Analysis).....	54
4.5.1 Penentuan Top Event	55
4.5.2 Identifikasi Intermediate Event dan Faktor Penyebab	55
4.5.3 Identifikasi Item Basic Event	55
4.5.4 Analisis Hasil Fault Tree Analysis.....	57
4.6 5W+1H	59
4.7 Usulan Perbaikan	59
BAB V PEMBAHASAN atau PENGUJIAN SISTEM DAN PEMBAHASAN	68
5.1 Tahap Define	68
5.2 Analisis <i>Defect</i> Produk	68
5.3 Analisis IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling).....	69
5.4 Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	73
5.5 Analisis Fault Tree Analysis (FTA).....	75
5.5.1 Faktor Struktur Mold Tidak Cukup Kaku	76
5.5.2 Faktor Tidak Adanya atau Kurangnya Reinforcement pada Mold	76
5.5.3 Faktor Handling dan Penyimpanan Mold.....	77
5.5.4 Faktor Variasi Deviasi Dimensi Berdasarkan Hasil SCAN 1–SCAN 4.....	77
5.5.5 Pembahasan Hasil FTA	78
5.6 5W+1H	80
5.6.1 Faktor Struktur Mold Tidak Cukup Kaku	80
5.6.2 Faktor Tidak Ada atau Kurang Reinforcement pada Mold	81
5.6.3 Faktor Handling dan Penyimpanan Mold Menyebabkan Perubahan Bentuk	82
5.6.4 Faktor Variasi Deviasi Dimensi Berdasarkan SCAN 1–SCAN 4.....	82
BAB VI PENUTUP	84
6.1 Kesimpulan.....	84
6.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN	1

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Induktif.....	8
Tabel 2. 2 <i>Rating Severity</i>	14
Tabel 2. 3 <i>Rating Occurence</i>	15
Tabel 2. 4 <i>Rating Detection</i>	16
Tabel 2. 5 Simbol FTA.....	17
Tabel 4. 1 Alur Proses Produksi	37
Tabel 4. 2 Data Hasil Inspeksi <i>Mold</i> Sebelum dan Setelah Perbaikan <i>Reinforcement</i> ...	43
Tabel 4. 3 Data Cacat Dimensi <i>Mold</i> Hasil Inspeksi 3D <i>Scanner</i>	44
Tabel 4. 4 Prioritas <i>Defect</i> Dimensi <i>Mold</i> SCAN 1	47
Tabel 4. 5 Prioritas <i>Defect</i> Dimensi <i>Mold</i> SCAN 2	47
Tabel 4. 6 Prioritas <i>Defect</i> Dimensi <i>Mold</i> SCAN 3	48
Tabel 4. 7 Prioritas <i>Defect</i> Dimensi <i>Mold</i> SCAN 4	49
Tabel 4. 8 Nilai RPN dan Mode Kegagalan (FMEA).....	50
Tabel 4. 9 Klasifikasi Kritis dan Tidak Kritis Nilai RPN	52
Tabel 4. 10 Urutan Nilai RPN Tertinggi dan Kritis (Rata-Rata)	53
Tabel 4. 11 Item Basic Event Deviasi Dimensi <i>Mold Wing Box Upper Skin Panel</i>	56
Tabel 4. 12 Table 1 <i>Cut Set</i>	58
Tabel 4. 13 Faktor Struktur <i>Mold</i> Tidak Cukup Kaku.....	61
Tabel 4. 14 Faktor Tidak Ada / Kurang <i>Reinforcement</i> pada <i>Mold</i>	62
Tabel 4. 15 Faktor Handling dan Penyimpanan <i>Mold</i>	64
Tabel 4. 16 Variasi Deviasi Dimensi	65
Tabel 4. 17 Usulan Perbaikan Berdasarkan Hasil FMEA dan FTA	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Lokasi PT Karyatama Komposit Teknologi.....	2
Gambar 1. 2 <i>Part Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy</i>	2
Gambar 3. 1 <i>Master Part Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy</i>	19
Gambar 3. 2 <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i>	20
Gambar 3. 3 Penyimpangan dimensi <i>mold</i> dari pengukuran hasil SCAN 1.....	20
Gambar 3. 4 Observasi dan pengecekan manual sebelum perbaikan	22
Gambar 3. 5 Hasil CAD dan 3D Desain	23
Gambar 3. 6 Hexagon 3D Scanner	24
Gambar 3. 7 <i>PolyWorks</i> perangkat lunak metrologi	25
Gambar 3. 8 Diagram alir (<i>flowchart</i>)	28
Gambar 4. 1 Website Resmi PT Karyatama Komposit Teknologi.....	31
Gambar 4. 2 Hasil Produk	33
Gambar 4. 3 Diagram Sistem Produksi <i>Mold Komposit</i>	34
Gambar 4. 4 Diagram IDF A-0 Proses Produksi <i>Mold Komposit</i>	34
Gambar 4. 5 <i>reinforcement Wing Box Upper Skin Panel</i>	38
Gambar 4. 6 Data inspeksi dimensi mold SCAN 1.....	40
Gambar 4. 7 Data inspeksi dimensi mold SCAN 2.....	41
Gambar 4. 8 Data inspeksi dimensi mold SCAN 3.....	42
Gambar 4. 9 Data inspeksi dimensi mold SCAN 4.....	42
Gambar 4. 10 Faktor Penyebab Deviasi Dimensi <i>Mold Wing Box Upper Skin Panel</i> ...	56
Gambar 4. 11 Faktor Penyebab Deviasi Dimensi <i>Mold Wing Box Upper Skin Panel</i> ...	57
Gambar 4. 12 Hasil SCAN 4 setelah penambahan <i>reinforcement</i>	60
Gambar 5. 1 IDEF0 Level A-0 Sistem Produksi <i>Mold Komposit</i>	70
Gambar 5. 2 Diagram IDEF0 Level A0 Produksi <i>Mold</i>	71
Gambar 5. 3 Hubungan Metode Penelitian yang Digunakan	72
Gambar 5. 4 <i>Mold Wing Box Upper Skin Panel</i> Setelah Penambahan <i>Reinforcement</i> ...	79

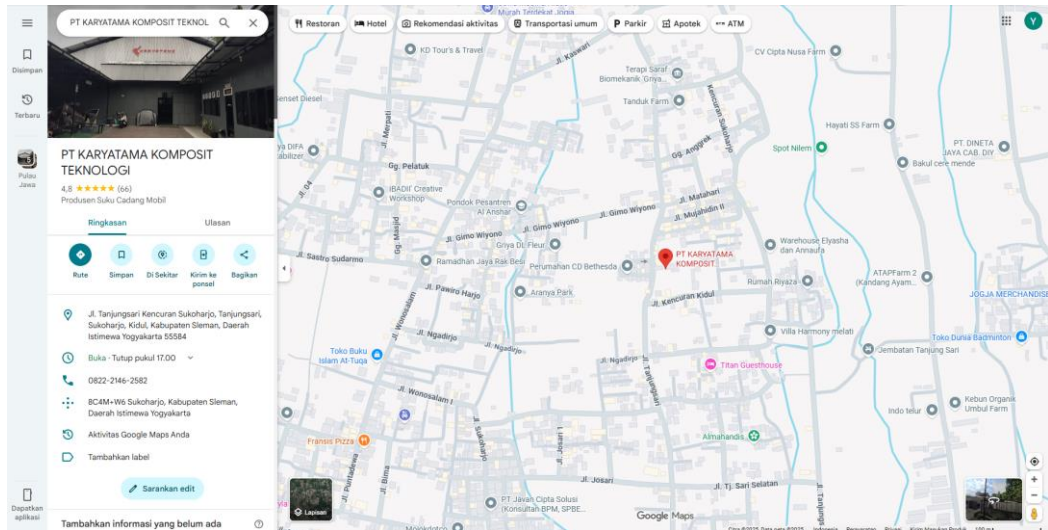
BAB I

PENDAHULUAN

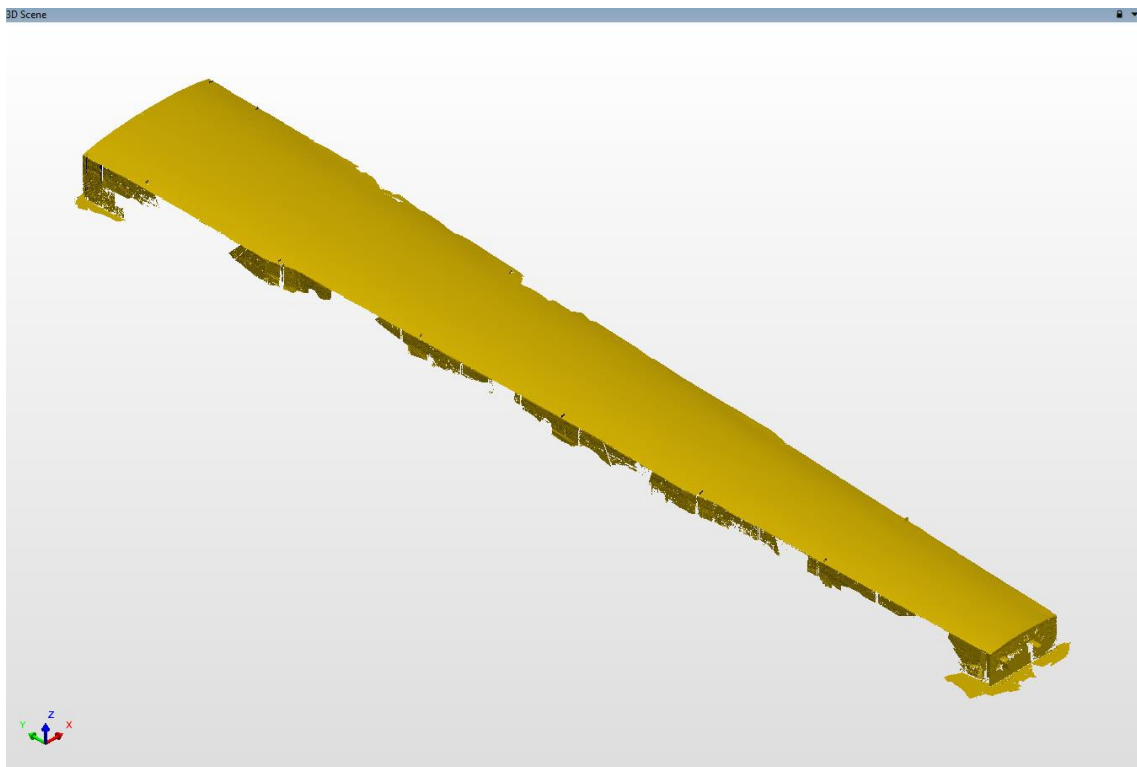
1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur, khususnya pada sektor *komposit*, menuntut perusahaan untuk menghasilkan produk yang memiliki kualitas tinggi, presisi dimensi, dan memenuhi spesifikasi desain. Menurut Montgomery, Douglas C. (2020), kualitas merupakan kemampuan suatu produk untuk memenuhi kebutuhan pelanggan dan kesesuaian terhadap spesifikasi yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, perusahaan perlu menerapkan sistem pengendalian kualitas yang efektif agar produk yang dihasilkan memiliki tingkat cacat yang rendah dan sesuai dengan standar yang ditentukan.

PT Karyatama *Komposit* Teknologi merupakan perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur material komposit yang memproduksi berbagai komponen untuk industri berteknologi tinggi, khususnya industri kedirgantaraan. Produk yang dihasilkan meliputi komponen struktur komposit serta *mold* komposit yang digunakan sebagai media pembentukan produk. Dalam proses manufaktur *komposit*, *mold* memiliki peranan yang sangat penting karena menentukan bentuk, ukuran, dan ketelitian dimensi produk akhir. Menurut Gibson, Ronald F. (2016), keberhasilan proses manufaktur material *komposit* sangat dipengaruhi oleh kualitas *tooling* atau *mold*, karena ketidakstabilan dimensi *mold* akan berdampak langsung terhadap akurasi dimensi dan kualitas produk *komposit* yang dihasilkan.



Gambar 1. 1 Lokasi PT Karyatama *Komposit* Teknologi



Gambar 1. 2 Part Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy

Dalam proses produksinya, PT Karyatama *Komposit* Teknologi memanfaatkan teknologi *Computer Aided Design* (CAD) dan *Computer Aided Inspection* (CAI) untuk menjamin kesesuaian antara desain dan produk aktual. Salah satu perangkat utama yang digunakan dalam pengendalian kualitas adalah *Hexagon 3D Scanner* yang berfungsi untuk melakukan pemindaian geometri secara non-kontak dengan tingkat akurasi tinggi. Data hasil pemindaian kemudian dianalisis menggunakan *software PolyWorks* untuk

membandingkan kondisi aktual produk atau *mold* terhadap model CAD nominal. Teknologi pemindaian 3D telah banyak digunakan dalam industri manufaktur presisi karena mampu mengidentifikasi deviasi dimensi secara menyeluruh dan visual (Bosché et al., 2015; Sun et al., 2021).

Berdasarkan hasil observasi di PT Karyatama Komposit Teknologi, masih ditemukan permasalahan pada *mold Wing Box Upper Skin Panel*, yaitu terjadinya deviasi dimensi yang melebihi batas toleransi pada beberapa area mold. Hasil inspeksi dimensi menggunakan Hexagon 3D Scanner yang dianalisis melalui perangkat lunak *PolyWorks* menunjukkan adanya penyimpangan dimensi pada beberapa titik pengukuran sehingga mold belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi yang ditetapkan perusahaan. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan ketidaksesuaian dimensi produk *komposit* terhadap model CAD, meningkatkan kebutuhan *rework*, memperpanjang waktu produksi, serta meningkatkan biaya produksi. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian Feng, Hong, Wang, dan Li (2019) yang menyatakan bahwa deviasi dimensi pada *mold komposit* dapat menurunkan akurasi produk serta meningkatkan risiko terjadinya cacat selama proses manufaktur.

Permasalahan deviasi dimensi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan suatu analisis yang mampu mengidentifikasi penyebab kegagalan secara sistematis sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan secara tepat. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis faktor-faktor penyebab deviasi dimensi pada *mold Wing Box Upper Skin Panel* melalui pendekatan pengendalian kualitas sehingga diperoleh rekomendasi perbaikan yang dapat meningkatkan kualitas *mold* dan mendukung proses produksi komposit di PT Karyatama Komposit Teknologi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas didapatkan rumusan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi pengendalian kualitas proses produksi *Part Drone* sebelum dan sesudah penambahan *reinforcement* besi pada *mold* berdasarkan hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D Scanner dan analisis *PolyWorks*?
2. Apa saja potensi kegagalan (*failure mode*) dan akar penyebab terjadinya cacat dimensi pada proses produksi *Part Drone* berdasarkan metode FMEA dan FTA?

3. Bagaimana usulan perbaikan yang tepat untuk meningkatkan kualitas dan kestabilan dimensi *mold* setelah penambahan *reinforcement* besi dengan pendekatan IDF (IDEF0) dan 5W+1H?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian menjawab rumusan masalah. Berikut adalah contoh tujuan penelitian:

1. Menganalisis pengendalian kualitas proses produksi *Part Drone* sebelum dan sesudah penambahan *reinforcement* besi pada *mold* berdasarkan hasil pengukuran menggunakan Hexagon 3D *Scanner* dan analisis *PolyWorks*.
2. Mengidentifikasi dan menganalisis potensi kegagalan serta akar penyebab cacat dimensi pada proses produksi *Part Drone* menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA).
3. Menyusun usulan perbaikan yang sistematis untuk meningkatkan kualitas dan kestabilan dimensi *mold* melalui pendekatan *Integrated Definition Function* (IDF/IDEF0) dan 5W+1H.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat bagi Perusahaan (PT Karyatama *Komposit* Teknologi)
 1. Memberikan informasi rinci mengenai tingkat ketidaksesuaian dimensi pada master dan *mold* berdasarkan hasil inspeksi 3D, sehingga perusahaan dapat mengetahui area kritis yang memerlukan perhatian khusus.
 2. Membantu perusahaan mengidentifikasi mode kegagalan utama dan akar penyebab penyimpangan proses melalui analisis FMEA dan FTA, sehingga peningkatan kualitas dapat dilakukan secara lebih tepat dan terarah.
 3. Menyediakan rekomendasi tindakan korektif dan preventif melalui pendekatan IDF dan 5W+1H yang dapat digunakan untuk memperbaiki proses *finishing*, pembuatan *mold*, dan produksi komponen karbon.
 4. Mengurangi risiko *rework*, biaya produksi, dan waktu pengerjaan, karena perbaikan yang dirumuskan berfokus pada sumber penyebab ketidaksesuaian kualitas.
 5. Menjadi dasar penyusunan SOP dan standar kerja baru dalam inspeksi geometri serta pengendalian kualitas, sehingga proses dapat berjalan lebih konsisten dan efisien.

6. Meningkatkan kualitas produk karbon *Drone*, karena *mold* yang lebih presisi akan menghasilkan komponen dengan akurasi yang lebih tinggi sesuai spesifikasi CAD.
7. Memberikan kontribusi pada pengembangan sistem quality control perusahaan, sehingga dapat digunakan sebagai pembelajaran jangka panjang bagi tim produksi dan engineering.

2. Manfaat bagi Peneliti

1. Menambah wawasan dan pemahaman ilmiah mengenai pengendalian kualitas dalam proses manufaktur *komposit*, terutama melalui penerapan metode FMEA, FTA, IDF, dan 5W+1H.
2. Meningkatkan kemampuan teknis penulis dalam menggunakan teknologi metrologi digital seperti Hexagon 3D *Scanner* dan perangkat lunak *PolyWorks* untuk analisis deviasi geometri.
3. Mengembangkan keterampilan analitis dalam mengidentifikasi risiko proses, menelusuri akar masalah, serta merumuskan tindakan perbaikan yang sistematis pada proses produksi master, *mold*, dan produk karbon.
4. Memberikan pengalaman praktis di lingkungan industri, khususnya dalam memahami alur produksi, standar kualitas, serta tantangan nyata dalam pembuatan komponen *komposit* di industri kedirgantaraan.
5. Menjadi bekal penulis dalam dunia kerja di bidang manufaktur, quality control, atau engineering karena penelitian ini melibatkan metode analisis kualitas yang umum digunakan di industri global.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah batasan, antara lain:

1. Ruang lingkup objek penelitian hanya difokuskan pada proses pembuatan master, *mold*, dan produk karbon *Drone* di PT Karyatama *Komposit* Teknologi, khususnya pada komponen MOLD TDVA-57-11000-001-A.
2. Analisis dimensi hanya menggunakan data hasil pemindaian Hexagon 3D *Scanner* dan pengolahan data melalui software *PolyWorks*, tanpa membahas metode inspeksi lainnya seperti CMM atau alat ukur manual.

3. Fokus ketidaksesuaian dimensi hanya dianalisis pada area yang terdeteksi keluar toleransi, termasuk titik deviasi seperti surf pt 10 (+1,33 mm), tanpa membahas faktor estetika non-dimensi yang tidak memengaruhi geometri.
4. Proses produksi yang dianalisis terbatas pada tahapan:
 1. Pemodelan CAD
 2. pencetakan master 3D printing,
 3. finishing manual (amplas, coating, dempul),
 4. pembuatan mold,
 5. dan pembuatan produk karbon.

Analisis tidak mencakup tahapan perakitan akhir atau pengujian performa produk.
5. Metode perbaikan yang digunakan dibatasi pada pendekatan IDF (Identify Define Fix) dan perumusan tindakan korektif/preventif menggunakan 5W+1H, tanpa mengevaluasi metode perbaikan alternatif lainnya.
6. Penelitian ini tidak mengevaluasi faktor biaya, waktu produksi, atau manajemen sumber daya, melainkan hanya fokus pada kualitas dimensi dan proses.
7. Hasil penelitian difokuskan untuk meningkatkan kualitas master, *mold*, dan produk *komposit*, sehingga tidak mencakup pengaruhnya terhadap performa struktural produk karbon saat digunakan.
8. Data yang digunakan bersifat studi kasus, sehingga hasil dan kesimpulan hanya berlaku pada kondisi proses PT Karyatama *Komposit* Teknologi dan tidak digeneralisasikan untuk seluruh industri *komposit*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Pengendalian kualitas dalam industri manufaktur modern semakin menuntut pendekatan analitis yang mampu memetakan risiko proses secara akurat. Nourelfath et al. (2020) menekankan bahwa integrasi analisis keandalan, kualitas, dan pemeliharaan merupakan kunci untuk mengurangi kegagalan proses produksi. Dalam konteks manufaktur *komposit*, Selvaraj & Jayaprakash (2021) menunjukkan bahwa FMEA menjadi metode yang efektif untuk mengidentifikasi mode kegagalan dominan dan menentukan prioritas perbaikan berdasarkan tingkat risiko. Penelitian Gupta et al. (2020) memperkuat temuan tersebut dengan menyatakan bahwa kombinasi FMEA dan FTA mampu memberikan gambaran menyeluruh atas akar penyebab kegagalan, terutama pada proses produksi yang memiliki banyak tahapan dan ketergantungan seperti pembuatan master dan *mold*.

Selain itu, perkembangan teknologi metrologi digital seperti 3D *scanning* mendorong peningkatan akurasi dalam evaluasi dimensi. Lyu et al. (2021) membuktikan bahwa *structured-light scanning* sangat efektif dalam memverifikasi deviasi geometri hasil 3D printing sebelum proses lanjutan seperti pembuatan *mold*. Feng et al. (2019) menambahkan bahwa ketelitian dimensional pada *komposit* sangat bergantung pada akurasi tahap awal (master), sehingga inspeksi digital menjadi keharusan. Penerapan 3D *scanning* juga terbukti meningkatkan *feedback loop* proses, sebagaimana disampaikan oleh Bustos & Chica (2023), di mana data deviasi yang diperoleh dapat digunakan untuk mengatur ulang parameter produksi guna mengurangi kesalahan dimensional.

Dalam proses pembuatan *mold* dan produk berbahan serat karbon, risiko cacat seperti delaminasi, porositas, dan ketidaksesuaian dimensi memegang peran penting. Li et al. (2022) mengidentifikasi bahwa kegagalan pada *komposit* sering muncul akibat proses penyusunan serat, tekanan curing, dan kualitas *mold* itu sendiri. Penelitian Martinez & López (2019) memperkuat bahwa akurasi tooling atau *mold* merupakan faktor fundamental dalam menjaga kualitas produk akhir. Sementara itu, Wang et al. (2024) menunjukkan bahwa master yang diproduksi melalui 3D printing sering

mengalami penyimpangan geometri sehingga memerlukan proses koreksi berdasarkan data inspeksi digital untuk memastikan *mold* yang dihasilkan memenuhi spesifikasi CAD.

Pada tingkat metodologis, banyak penelitian internasional menekankan perlunya pendekatan sistematis dalam menentukan solusi perbaikan kualitas. Khan & Gupta (2022) menyatakan bahwa modifikasi FMEA, jika disertai teknik pencarian akar masalah, mampu menghasilkan rekomendasi perbaikan yang lebih aplikatif. Hal ini menjadi relevan terutama pada industri *komposit* yang memiliki variabel proses kompleks dan ketergantungan antar tahap. Dari kondisi tersebut dapat diketahui integrasi FMEA, FTA, dan teknik problem-solving seperti IDF serta 5W+1H menjadi strategi ideal dalam melakukan penyempurnaan proses produksi.

Penelitian nasional juga memperkuat pandangan tersebut. Ardiansyah & Triyono (2020) menunjukkan bahwa FMEA dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas proses industri lokal dengan mengidentifikasi mode kegagalan dominan secara lebih terukur. Putra & Yuliana (2021) menegaskan bahwa *Fault Tree Analysis* efektif untuk memetakan penyebab cacat produk *komposit* yang sulit diamati melalui inspeksi visual saja. Di sisi lain, Hermawan & Kusumo (2022) mengonfirmasi manfaat penggunaan 3D *scanner* dalam memvalidasi hasil 3D printing, terutama pada industri yang mengandalkan presisi geometri. Lebih lanjut, Ramadhan & Nugroho (2019) menekankan bahwa metode 5W+1H dapat merumuskan tindakan perbaikan proses secara praktis pada industri *mold komposit*. Terakhir, Safitri & Prakoso (2023) membuktikan bahwa integrasi FMEA dan IDF mampu menurunkan tingkat cacat secara signifikan dalam proses manufaktur komponen serat karbon di Indonesia.

Tabel 2. 1 Kajian Induktif

No	Penulis & Tahun	FTA	FMEA	IDF	5W+1H
1	Nourelfath, Ruiz & Bounkhel (2020)	√	√	—	—

2	Selvaraj & Jayaprakash (2021)	–	√	–	–
3	Gupta, Tewari & Rane (2020)	√	√	–	–
4	Lyu, Chen & Zhang (2021)	–	–	√	–
5	Feng, Wang & Li (2019)	–	–	√	–
6	Khan & Gupta (2022)	–	√	√	–
7	Bustos & Chica (2023)	–	–	√	–
8	Li, Xu & Yu (2022)	√	√	–	–
9	Martínez & López (2019)	–	–	√	–
10	Wang, Zhang & Zhao (2024)	–	–	√	–
11	Ardiansyah & Triyono (2020)	–	√	–	√
12	Putra & Yuliana (2021)	√	–	–	–
13	Hermawan & Kusumo (2022)	–	–	√	–

14	Ramadhan & Nugroho (2019)	–	–	–	√
15	Safitri & Prakoso (2023)	–	√	√	–
16	Penelitian Ini	√	√	√	√

2.2 Landasan Teori

Landasan teori berisikan tentang istilah, teori atau formula yang terkait dengan topik penelitian. Landasan teori disusun dengan bersumber pada jurnal bereputasi dan/atau buku.

2.2.1 Kualitas Produk

Kualitas produk pada sektor manufaktur sangat ditentukan oleh konsistensi proses produksi, kesesuaian bahan baku, dan kontrol kualitas. Juran (1999) menekankan bahwa kualitas berkaitan dengan “*fitness for use*,” yaitu kemampuan produk berfungsi sesuai tujuan penggunaannya. Sedangkan Crosby (1995) menyatakan bahwa kualitas adalah “*conformance to requirements*,” yaitu sejauh mana produk sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

Pada industri carbon fiber, aspek kualitas mencakup keseragaman lapisan, bebas cacat, tidak adanya delaminasi, dan permukaan yang memenuhi standar estetika dan fungsional. Setiap penyimpangan dari spesifikasi teknis dapat berdampak langsung pada kekuatan struktural produk.

2.2.2 Pengendalian Kualitas

Pengendalian kualitas merupakan aspek penting dalam memastikan konsistensi dan keandalan produk, terutama pada industri manufaktur berteknologi tinggi seperti *komposit*. Menurut Montgomery (2020) dan Juran (1999), cacat produk umumnya

disebabkan oleh variasi proses, ketidakkonsistenan bahan baku, kesalahan operator, peralatan yang tidak terkalibrasi, serta kondisi lingkungan yang tidak stabil. Pada produksi berbasis carbon fiber, faktor-faktor kecil seperti ketidaktepatan penempatan serat, suhu curing yang tidak merata, perbandingan resin yang tidak sesuai, serta kontaminasi debu dapat secara langsung memunculkan cacat seperti delaminasi, void, pinhole, gelombang permukaan, dan penurunan kekuatan mekanis. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas sangat ditentukan oleh kemampuan perusahaan dalam mengendalikan seluruh elemen proses sejak awal, bukan hanya melalui inspeksi akhir.

Selain itu, para ahli seperti Ishikawa (1985), Deming (1986), dan Taguchi (1993) menegaskan bahwa kelemahan dalam SOP, kurangnya pengawasan, dan minimnya kontrol statistik turut meningkatkan peluang cacat. *Diagram Fishbone*, SPC, dan metode *Pareto* terutama menyoroti bahwa penyebab dominan sering berasal dari 20% faktor utama yang tidak terkendali, seperti mesin yang aus, operator kurang kompeten, atau bahan baku yang tidak standar. Dalam konteks produksi *komposit*, ketiadaan standar kerja yang terstruktur dan perawatan mesin yang tidak optimal memperbesar risiko cacat berulang. Dari kondisi tersebut dapat diketahui pengendalian kualitas yang efektif harus berfokus pada stabilitas proses, disiplin operator, dan pemantauan terus-menerus agar produk akhir dapat memenuhi spesifikasi dan standar mutu yang ditetapkan.

2.2.3 IDF (*Integrated Definition Function Modeling* / IDEF0)

IDF atau lebih dikenal sebagai IDEF0, adalah metode pemodelan proses yang digunakan untuk menggambarkan alur kerja secara sistematis melalui hubungan antara *Input*, *Control*, *Mechanism*, dan *Output* (ICMO). Menurut FIPS Publication 183 (1993), IDEF0 dikembangkan sebagai alat pemodelan terstruktur untuk mengilustrasikan fungsi suatu sistem, bagaimana fungsi tersebut dijalankan, serta faktor-faktor yang memengaruhinya. Model ini sangat membantu dalam memahami proses yang kompleks, karena setiap fungsi dipetakan ke dalam diagram dengan format yang konsisten, sehingga memudahkan analisis perbaikan proses maupun identifikasi sumber masalah.

Para ahli seperti Mayer, Painter & deWitte (1995) menjelaskan bahwa IDEF0 efektif digunakan dalam analisis manufaktur karena mampu menunjukkan hubungan antarbagian dalam satu proses produksi, termasuk interaksi antaroperator, mesin,

material, dan aturan kerja. Dalam konteks industri *komposit* seperti pembuatan produk *Drone*, pemodelan IDF dapat mengilustrasikan alur produksi mulai dari persiapan material, layup carbon fiber, vacuum bagging, curing, proses *finishing*, hingga inspeksi kualitas. Setiap tahap dapat ditinjau melalui elemen *Input* (misal: serat karbon, resin), *Control* (SOP, standar kualitas, parameter curing), *Mechanism* (operator, mesin, peralatan), dan *Output* (komponen *Drone* yang telah diproses). Dengan pendekatan ini, perusahaan dapat mengidentifikasi titik kritis dalam proses yang menyebabkan cacat seperti delaminasi, pinhole, atau ketidaktepatan dimensi, sehingga IDEF0 menjadi alat pendukung utama dalam perbaikan kualitas dan efisiensi produksi.

Menurut Marca dan McGowan (1988), IDEF0 merupakan metode pemodelan fungsi yang digunakan untuk menggambarkan aktivitas, fungsi, dan hubungan antar elemen dalam suatu sistem melalui konsep Input, Control, Output, dan Mechanism (ICOM). Metode ini digunakan untuk memetakan proses secara sistematis sehingga memudahkan identifikasi aktivitas yang berpengaruh terhadap kinerja sistem.

Pada penelitian ini, IDEF0 digunakan untuk memetakan proses produksi mold Wing Box Upper Skin Panel mulai dari proses persiapan mold hingga inspeksi dimensi sehingga dapat diketahui aktivitas yang berpotensi menyebabkan deviasi dimensi.

2.2.4 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Berdasarkan hasil pengukuran deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* pada SCAN 1 hingga SCAN 4, ditemukan adanya variasi penyimpangan dimensi pada beberapa area *mold*. Hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan sebagai dasar identifikasi mode kegagalan menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) untuk menentukan prioritas risiko yang berkontribusi terhadap terjadinya deviasi dimensi.

FMEA adalah metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan pada suatu proses, produk, atau sistem, serta menganalisis dampaknya terhadap kualitas dan operasional. Menurut Stamatis (2003), FMEA bertujuan untuk memetakan berbagai *failure mode* yang mungkin terjadi, menentukan tingkat keparahan akibatnya (*severity*), frekuensi kemungkinan muncul (*occurrence*), serta kemampuan sistem untuk mendeteksinya sebelum produk diterima oleh konsumen (*detection*).

Dengan menilai ketiga parameter tersebut, FMEA menghasilkan nilai Risk Priority Number (RPN) yang digunakan sebagai dasar menentukan prioritas tindakan perbaikan. Semakin besar nilai RPN, semakin besar urgensi perbaikan yang harus dilakukan pada area proses tersebut.

Para ahli seperti McDermott, Mikulak & Beauregard (2009) dan AIAG-VDA (2019) menjelaskan bahwa FMEA tidak hanya mengevaluasi risiko tetapi juga mengarahkan perusahaan untuk merancang tindakan mitigasi yang efektif, seperti perbaikan SOP, penggantian material, peningkatan kualitas pelatihan, atau pengendalian proses lanjutan. Dalam industri manufaktur, termasuk produksi *komposit* seperti carbon fiber, FMEA sangat penting karena prosesnya melibatkan banyak tahap kritis, seperti pemotongan serat, penyusunan layup, vacuum bagging, curing, hingga *finishing*. Setiap ketidakkonsistenan pada tahapan tersebut dapat menimbulkan cacat seperti delaminasi, void, ketidaktepatan dimensi, dan *surface defect*. Hasil pengamatan menunjukkan FMEA membantu perusahaan mengidentifikasi penyebab dominan kegagalan, mengurangi variasi proses, mencegah cacat berulang, dan memastikan kualitas produk yang stabil dan sesuai spesifikasi.

1. *Severity*

merupakan kriteria dampak keparahan. Dalam memberikan penilaian *severity* perlu adanya diskusi antara *stakeholder* yang terkait berdasarkan kriteria parameter S yang telah disusun. Memiliki ukuran angka penilaian 1-10 (semakin besar nilai semakin parah)

Tabel 2. 2 *Rating Severity*

Skor	Kriteria Severity	Deskripsi
1	Tidak ada pengaruh terhadap fungsi atau kualitas.	Tidak Signifikan
2	Dampak sangat kecil terhadap performa.	Sangat Rendah
3	Cacat kecil pada tampilan, pengguna masih dapat menerima.	Rendah
4	Gangguan minor, tidak memengaruhi fungsi utama.	Rendah-Sedang
5	Cacat fungsional kecil, memerlukan perbaikan ringan.	Sedang
6	Kinerja berkurang, masih dapat digunakan tetapi tidak optimal.	Sedang-Tinggi
7	Penurunan fungsi, memerlukan rework besar.	Tinggi
8	Penurunan fungsi signifikan, produk tidak memenuhi spesifikasi utama.	Sangat Tinggi
9	Fungsi utama gagal total, berdampak besar pada kualitas.	Kritis
10	Kegagalan menyebabkan produk tidak dapat digunakan atau membahayakan keselamatan.	Sangat Kritis

2. Occurance

Menentukan kemungkinan terjadinya kegagalan dari setiap modus kegagalan. Dalam memberikan penilaian O maka perlu data yang jelas untuk mendasari penilaian terkait seberapa sering frekuensi kemungkinan kegagalan terjadi (Alijoyo et al., 2020).

Tabel 2. 3 *Rating Occurence*

Rating	Peluang Terjadi Kegagalan
1	Hampir tidak mungkin terjadi kegagalan
2	Sangat rendah
3	Rendah
4	Relatif rendah
5	Sedang
6	Sedang cenderung tinggi
7	Relatif tinggi
8	Tinggi kegagalan terus berulang
9	Sangat tinggi, kegagalan berhubungan dengan proses yang gagal sebelumnya
10	Sangat tinggi dan ekstrem, kegagalan hampir tak terhindarkan

3. *Detection*

Detection untuk menilai dan mengukur seberapa efektif mengendalikan mode kegagalan (Nuchpho et al., 2014). Deteksi adalah proses mengidentifikasi seberapa besar masalah yang terjadi dan menilai kemampuan untuk mengendalikan atau mengatur kegagalan.

Tabel 2. 4 *Rating Detection*

Rating	Kemampuan Deteksi	Deskripsi
1	Sangat Tinggi	Kegagalan hampir pasti terdeteksi oleh sistem pengendalian
2	Sangat Tinggi	Peluang kegagalan terdeteksi sangat besar
3	Tinggi	Kegagalan kemungkinan besar dapat terdeteksi
4	Cukup Tinggi	Sistem cukup mampu mendeteksi kegagalan
5	Sedang	Peluang deteksi kegagalan sedang
6	Rendah	Sistem pengendalian kurang mampu mendeteksi kegagalan
7	Rendah	Kegagalan sulit terdeteksi sebelum berdampak
8	Sangat Rendah	Kegagalan sangat sulit terdeteksi
9	Hampir Tidak Terdeteksi	Sistem hampir tidak mampu mendeteksi kegagalan
10	Tidak Terdeteksi	Tidak ada sistem pengendalian untuk mendeteksi kegagalan

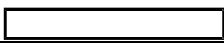
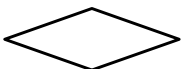
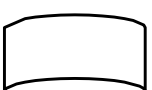
2.2.5 *Fault Tree Analysis (FTA)*

FTA adalah metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) dari suatu kejadian kegagalan dengan pendekatan deduktif. Menurut Vesely et al. (2002), FTA memulai analisis dari suatu *top event* atau kegagalan utama, kemudian menurunkannya ke dalam rangkaian penyebab yang lebih kecil secara hierarkis menggunakan simbol logika seperti *AND*, *OR*, dan *INHIBIT*. Melalui

pendekatan ini, FTA membantu memahami hubungan sebab-akibat dari berbagai faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan, sehingga memudahkan perusahaan menentukan titik kritis yang perlu mendapat perhatian khusus dalam proses produksi. Teknik ini banyak digunakan pada industri berisiko tinggi seperti aviasi, manufaktur otomotif, hingga produksi *komposit* yang membutuhkan ketelitian tinggi.

Menurut Ericson (2015) dan NASA System Safety Handbook (2019), FTA sangat efektif untuk memetakan kombinasi kegagalan yang kompleks, terutama ketika kegagalan dapat dipicu oleh beberapa faktor yang saling berinteraksi. Dalam konteks pengendalian kualitas pada produk *komposit* seperti carbon fiber, FTA dapat digunakan untuk menganalisis penyebab cacat seperti delaminasi, void, deformasi, atau permukaan tidak rata. Dengan membagi penyebab ke dalam *basic event* (misalnya: ketidaktepatan tekanan vacuum, kontaminasi material, kesalahan operator) dan *intermediate event*, perusahaan dapat menyusun strategi pencegahan yang lebih akurat dan terstruktur. Hasil pengamatan menunjukkan FTA menjadi alat penting untuk mengatasi masalah kualitas secara sistematis, memastikan setiap akar masalah ditangani, dan mencegah terulangnya kegagalan dalam siklus produksi berikutnya.

Tabel 2. 5 Simbol FTA

SIMBOL	KETERANGAN
	<i>Top Event</i>
	<i>Basic Event</i>
	<i>Undevelop Event</i>
	<i>Transferred Event</i>
	<i>Logic Event OR</i>
	<i>Logic Event AND</i>

2.2.6 5W+1H

Metode 5W+1H merupakan teknik analisis yang digunakan untuk merumuskan permasalahan dan menentukan solusi secara sistematis melalui enam pertanyaan dasar, yaitu *What*, *Why*, *When*, *Where*, *Who*, dan *How*. Menurut Gawal (2017) serta Ozuem & Bowen (2020), pendekatan ini membantu perusahaan memahami akar masalah secara lebih komprehensif dengan menguraikan aspek apa permasalahannya, mengapa terjadi, kapan terjadi, di mana lokasi dominannya, siapa yang terlibat, dan bagaimana proses tersebut berlangsung. Dengan struktur pertanyaan yang sederhana namun mendalam, metode ini mampu digunakan pada berbagai bidang industri, termasuk manufaktur, kualitas, keselamatan kerja, dan perbaikan proses.

Dalam konteks pengendalian kualitas pada industri *komposit* seperti produk *Drone*, 5W+1H berfungsi untuk memetakan penyebab terjadinya cacat dari sudut pandang operasional maupun teknis. Pertanyaan *What* menjelaskan jenis cacat yang muncul (misalnya delaminasi, pinhole, atau ketidaktepatan dimensi), sedangkan *Why* mengungkap alasan terjadinya seperti ketidakteraturan tekanan vacuum, ketidaktepatan resin-matrix, atau kompetensi operator. Pertanyaan *Where* dan *When* membantu mengidentifikasi tahap proses yang kritis, sementara *Who* menyoroti pihak yang bertanggung jawab. Pertanyaan *How* menguraikan bagaimana cacat tersebut terjadi selama proses produksi. Dari kondisi tersebut dapat diketahui metode 5W+1H memberikan landasan untuk merumuskan tindakan perbaikan yang efektif, terutama ketika digunakan bersama metode analisis risiko lainnya seperti FMEA dan FTA.

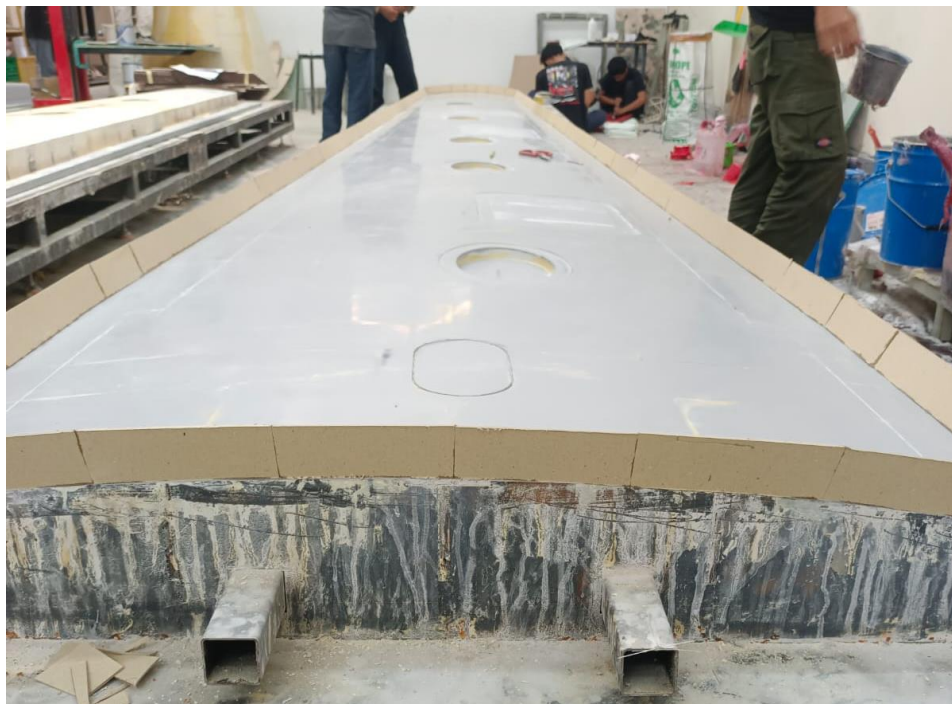
Berdasarkan teori mengenai *mold komposit*, deviasi dimensi, *reinforcement*, dan kekakuan struktur *mold*, diperlukan suatu metode untuk mengidentifikasi risiko kegagalan dan akar penyebabnya. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode IDEF0 untuk memetakan proses, FMEA untuk menentukan prioritas risiko, FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab, serta 5W+1H untuk menyusun usulan perbaikan yang sesuai dengan kondisi aktual di perusahaan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah *mold komposit* yang digunakan dalam proses produksi *Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy* di PT Karyatama Komposit Teknologi, dengan fokus pada kualitas dimensi dan kestabilan struktur *mold* sebelum dan sesudah penambahan *reinforcement* besi. Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil pemindaian menggunakan *Hexagon 3D Scanner* dan analisis deviasi permukaan menggunakan perangkat lunak *PolyWorks* dengan membandingkan kondisi *aktual mold* terhadap model CAD nominal. Selain itu, penelitian ini juga mencakup analisis proses produksi dan pengendalian kualitas *mold* untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, akar penyebab terjadinya ketidaksesuaian dimensi, serta menilai efektivitas perbaikan yang diterapkan guna meningkatkan kualitas dan konsistensi hasil produksi.



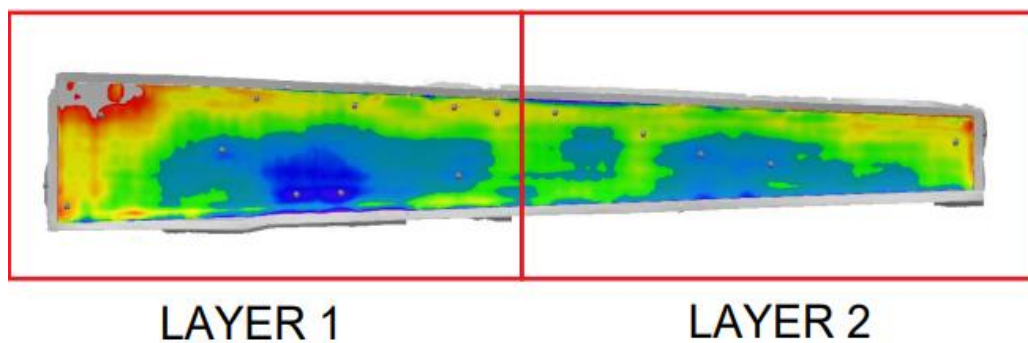
Gambar 3. 1 *Master Part Wing Box Upper Skin Panel Bonded Assy*

3.2 Subjek Penelitian



Gambar 3. 2 *mold Wing Box Upper Skin Panel*

Subjek penelitian dalam penelitian ini adalah *mold Wing Box Upper Skin Panel* yang digunakan sebagai *tooling* pada proses manufaktur komponen komposit di PT Karyatama Komposit Teknologi. *Mold* tersebut menjadi objek penelitian karena berdasarkan hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D Scanner dan analisis PolyWorks ditemukan adanya deviasi dimensi yang bervariasi pada beberapa area *mold*.



Gambar 3. 3 Penyimpangan dimensi *mold* dari pengukuran hasil SCAN 1

Penelitian difokuskan pada analisis penyimpangan dimensi *mold* melalui pengukuran hasil SCAN 1, SCAN 2, SCAN 3, dan SCAN 4 yang kemudian dibandingkan dengan model CAD sebagai referensi nominal. Data hasil pengukuran digunakan untuk mengidentifikasi tingkat deviasi dimensi, menentukan mode kegagalan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), mengidentifikasi akar penyebab menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA), serta menyusun usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H.

Subjek penelitian dipilih karena *mold* merupakan komponen penting yang menentukan ketelitian dimensi produk komposit. Deviasi dimensi pada *mold* dapat mempengaruhi kualitas produk akhir sehingga diperlukan analisis untuk mengetahui faktor-faktor penyebab dan tindakan perbaikan yang dapat dilakukan guna meningkatkan kestabilan dimensi *mold*.

3.3 Jenis Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder.

1. Data primer diperoleh secara langsung dari objek penelitian melalui observasi proses produksi produk *Drone* di PT Karyatama *Komposit* Teknologi, wawancara dengan pihak terkait seperti operator produksi dan staf *quality control*, serta hasil inspeksi kualitas produk yang meliputi jenis dan jumlah cacat yang terjadi. Selain itu, data primer juga mencakup hasil pengukuran dan analisis dimensi menggunakan software *PolyWorks* berdasarkan data pemindaian Hexagon 3D *Scanner*.
2. Data sekunder diperoleh dari dokumen perusahaan dan sumber pendukung lainnya, seperti standar operasional prosedur (SOP), spesifikasi produk, catatan produksi dan laporan kualitas, serta literatur ilmiah berupa buku, jurnal nasional dan internasional yang relevan dengan pengendalian kualitas, metode FMEA, FTA, IDF (IDEF0), dan 5W+1H. Data sekunder ini digunakan sebagai dasar teori dan pembanding dalam menganalisis serta merumuskan usulan perbaikan kualitas produk.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa teknik, yaitu :

1. Observasi dilakukan secara langsung pada proses produksi produk *Drone* di PT Karyatama *Komposit* Teknologi, mulai dari pembuatan master dengan 3D printer, proses pemindaian menggunakan *Hexagon 3D Scanner*, pengolahan data dengan software *PolyWorks*, hingga proses manufaktur produk berbahan carbon fiber. Observasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi tahapan proses yang berpotensi menimbulkan cacat produk.



Gambar 3. 4 Observasi dan pengecekan manual sebelum perbaikan

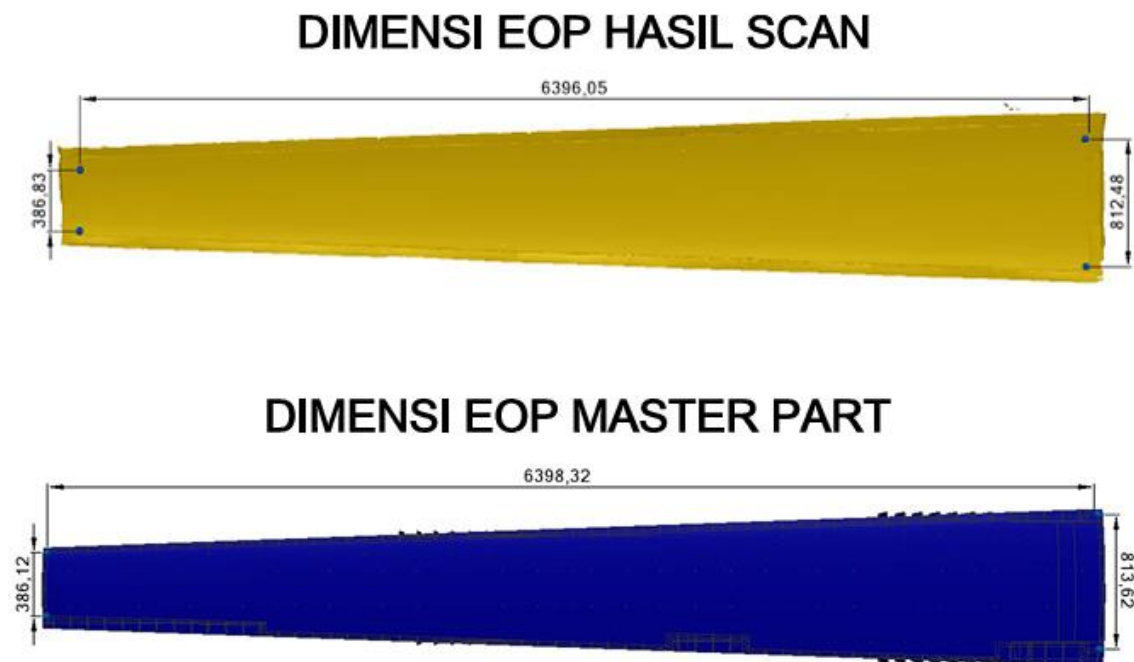
2. Wawancara dilakukan dengan pihak terkait, seperti operator produksi dan staf quality control, untuk memperoleh informasi mengenai permasalahan kualitas yang sering terjadi, penyebab cacat, serta tindakan perbaikan yang telah dilakukan.
3. Dokumentasi digunakan untuk mengumpulkan data pendukung berupa SOP, spesifikasi produk, laporan produksi, dan catatan inspeksi kualitas.

4. Studi pustaka dilakukan dengan menelaah buku teks, jurnal nasional dan internasional, serta standar mutu yang relevan sebagai dasar teori dan referensi dalam penerapan metode FMEA, FTA, IDF (IDEF0), dan 5W+1H.

3.5 Alat dan Perangkat Lunak Penelitian

Alat dan perangkat dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa proses :

3.5.1 Reverse Engineering



Gambar 3. 5 Hasil CAD dan 3D Desain

Reverse Engineering merupakan suatu proses untuk memperoleh informasi desain, bentuk geometri, dimensi, dan karakteristik suatu produk atau komponen yang telah ada melalui proses pengukuran dan analisis. Metode ini banyak digunakan dalam industri manufaktur untuk melakukan evaluasi produk, pengembangan desain, perbaikan kualitas, serta reproduksi komponen yang tidak memiliki data desain lengkap. Hasil dari proses *reverse engineering* umumnya berupa model digital tiga dimensi yang dapat digunakan sebagai referensi dalam analisis maupun proses manufaktur selanjutnya.

Menurut Raja dan Fernandes (2008), *reverse engineering* adalah proses memperoleh model geometrik dari suatu objek fisik melalui tahapan pengukuran, pengolahan data, dan rekonstruksi model digital. Dalam penelitian ini, metode *reverse engineering* digunakan untuk memperoleh data aktual *dimensi mold Wing Box Upper*

Skin Panel melalui proses pemindaian 3D dan membandingkannya dengan model CAD sebagai acuan. Hasil perbandingan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi deviasi dimensi yang terjadi pada *mold*.

3.5.2 3D Scanner



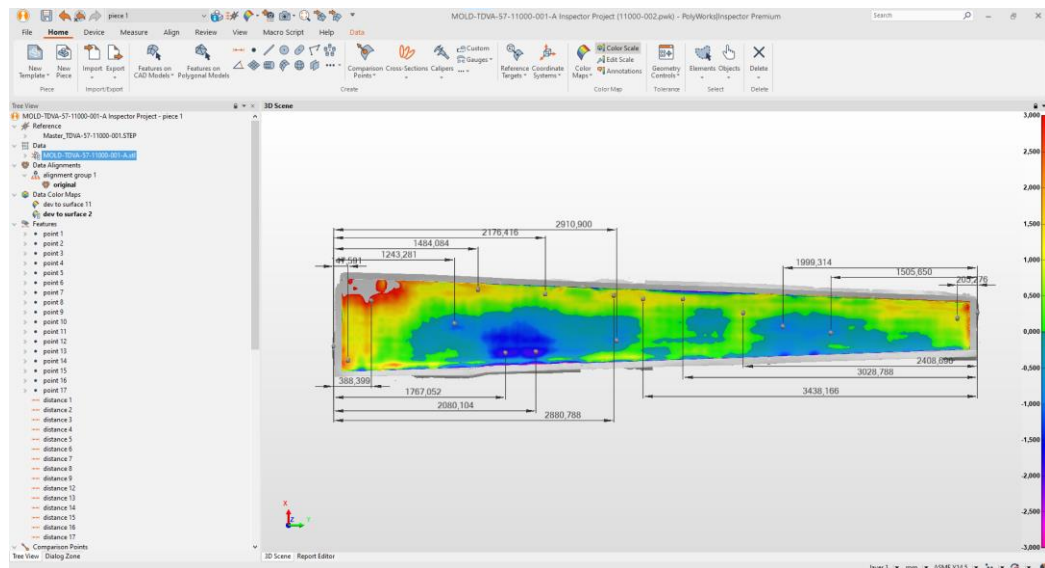
Gambar 3. 6 Hexagon 3D Scanner

3D Scanner merupakan perangkat pengukuran yang digunakan untuk menangkap bentuk dan geometri suatu objek secara tiga dimensi sehingga menghasilkan data digital yang merepresentasikan kondisi aktual objek tersebut. Teknologi ini bekerja dengan mengumpulkan jutaan titik koordinat pada permukaan objek yang kemudian membentuk *point cloud* atau model tiga dimensi. Penggunaan 3D scanner memiliki tingkat akurasi yang tinggi sehingga banyak dimanfaatkan dalam proses inspeksi kualitas, *reverse engineering*, dan pengukuran dimensi produk manufaktur.

Menurut Várady et al. (1997), teknologi 3D scanning memungkinkan proses pengukuran geometri dilakukan secara cepat dan akurat dibandingkan metode pengukuran konvensional. Dalam penelitian ini, Hexagon 3D Scanner digunakan untuk melakukan pemindaian mold *Wing Box Upper Skin Panel* pada pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4. Data hasil pemindaian kemudian diolah menggunakan perangkat lunak

PolyWorks untuk mengetahui besarnya deviasi dimensi antara kondisi aktual *mold* dengan model CAD yang menjadi standar referensi.

3.5.3 *PolyWorks*



Gambar 3. 7 *PolyWorks* perangkat lunak metrologi

PolyWorks merupakan perangkat lunak metrologi 3D yang digunakan untuk mengolah data hasil pemindaian 3D *scanner*. Software ini mampu membandingkan model hasil pemindaian dengan model CAD referensi sehingga dapat diketahui besarnya penyimpangan atau deviasi dimensi. Dalam penelitian ini, *PolyWorks* digunakan untuk menganalisis hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4 pada *mold Wing Box Upper Skin Panel* (InnovMetric, 2021).

Dalam proses pengendalian kualitas, *PolyWorks* digunakan untuk melakukan *alignment data*, analisis deviasi, serta visualisasi peta warna (*color map*) yang menunjukkan perbedaan antara permukaan aktual dengan permukaan nominal. Hasil analisis ini memudahkan identifikasi area yang mengalami penyimpangan dimensi, baik ke arah positif maupun negatif, serta menentukan apakah penyimpangan tersebut masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan. Menurut Sun et al. (2021), penggunaan perangkat lunak inspeksi berbasis 3D seperti *PolyWorks* dapat meningkatkan akurasi evaluasi kualitas dibandingkan metode inspeksi konvensional.

Data hasil pemindaian yang diperoleh dari 3D *Scanner* memerlukan proses pengolahan dan analisis lebih lanjut untuk mengetahui tingkat penyimpangan

dimensinya. Oleh karena itu, digunakan perangkat lunak *PolyWorks* sebagai alat bantu dalam proses analisis deviasi dimensi terhadap model CAD referensi *mold* dan mendukung pengambilan keputusan dalam pengendalian kualitas proses produksi (Bosché et al., 2015).

1. Deviasi Dimensi

Deviasi dimensi adalah selisih antara ukuran nominal (desain CAD) dan ukuran hasil pengukuran menggunakan *scanner*. Deviasi dapat bernilai positif maupun negatif:

- Deviasi positif → objek lebih besar / menonjol daripada desain
- Deviasi negatif → objek lebih kecil / masuk daripada desain

2. Rumus Deviasi

Rumus umum deviasi adalah:

$$\text{Deviasi} = M - N$$

dengan:

M = nilai hasil pengukuran (measured)

N = nilai referensi (nominal / CAD)

Interpretasi:

- Jika Deviasi = 0 → sempurna
- Jika Deviasi > 0 → dimensi membesar
- Jika Deviasi < 0 → dimensi mengecil

3. Konsep Toleransi Dimensional

Toleransi adalah batas penyimpangan yang masih dapat diterima sehingga produk tetap berfungsi sesuai desain. Dalam industri, toleransi ditentukan berdasarkan kebutuhan fungsi produk, kemampuan alat produksi, dan standar kualitas.

4. Rumus Batas Toleransi

Lower Tolerance Limit (LTL)= $N-T$

Upper Tolerance Limit (UTL)= $N+T$

dengan:

TTT = batas toleransi (misalnya $\pm 0{,}5$ mm)

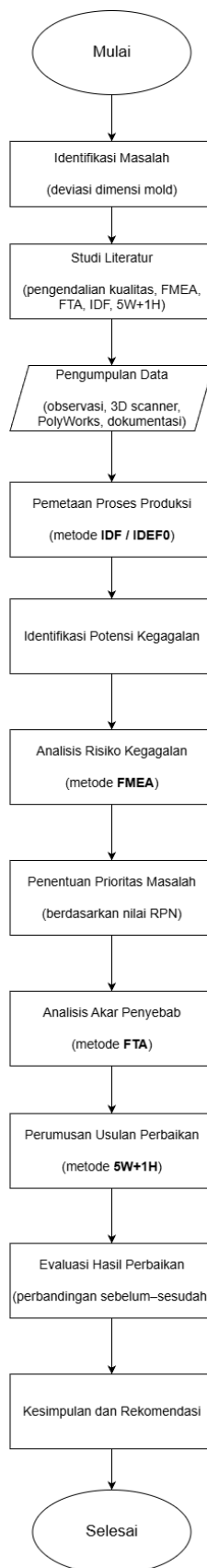
5. Kriteria Lulus/Gagal (PASS/FAIL)

PASS jika $LTL \leq M \leq$

FAIL jika $M < LTL$ atau $M > UTL$

3.6 Alur Penelitian

Untuk memberikan gambaran menyeluruh, berikut bagan alur teori penelitian dari proses desain hingga inspeksi.



Gambar 3. 8 Diagram alir (*flowchart*)

Tahap Mulai merupakan awal pelaksanaan penelitian yang menandai dimulainya seluruh rangkaian kegiatan penelitian pengendalian kualitas dimensi *mold komposit* di PT Karyatama *Komposit* Teknologi. Pada tahap ini ditetapkan ruang lingkup penelitian, objek penelitian, serta metode dan pendekatan yang akan digunakan agar penelitian berjalan secara terstruktur.

Tahap Identifikasi Masalah dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan utama yang terjadi pada proses produksi, khususnya terkait ketidaksesuaian dimensi *mold*. Identifikasi masalah didasarkan pada hasil inspeksi awal menggunakan 3D *scanner* dan analisis *PolyWorks* yang menunjukkan adanya deviasi permukaan *mold* yang berpotensi menurunkan kualitas produk.

Tahap Studi Literatur bertujuan untuk memperoleh landasan teori dan referensi ilmiah yang mendukung penelitian. Literatur yang dikaji meliputi konsep pengendalian kualitas, *mold komposit*, teknologi pemindaian 3D, serta metode FMEA, FTA, IDF (IDEF0), dan 5W+1H yang digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian.

Tahap Pengumpulan Data dilakukan dengan mengumpulkan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan, pemindaian *mold* menggunakan 3D *scanner*, dan hasil analisis deviasi menggunakan perangkat lunak *PolyWorks*. Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis perusahaan, spesifikasi desain, serta standar pengendalian kualitas yang berlaku.

Tahap Pemetaan Proses Produksi (IDF/IDEF0) digunakan untuk menggambarkan alur proses produksi *mold* secara sistematis. Pemetaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi aktivitas utama, input, output, serta keterkaitan antar proses sehingga dapat diketahui tahapan yang berpotensi menimbulkan ketidaksesuaian dimensi *mold*.

Tahap Identifikasi Potensi Kegagalan dilakukan berdasarkan hasil pemetaan proses dan data inspeksi dimensi. Pada tahap ini diidentifikasi berbagai potensi kegagalan yang dapat menyebabkan deviasi dimensi *mold*, baik yang berasal dari faktor proses, material, maupun desain *mold*.

Tahap Analisis Risiko Kegagalan (FMEA) bertujuan untuk menilai tingkat risiko dari setiap potensi kegagalan yang telah diidentifikasi. Penilaian dilakukan dengan menentukan nilai severity, occurrence, dan detection untuk memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN), yang digunakan sebagai dasar penentuan prioritas permasalahan.

Tahap Penentuan Prioritas Masalah dilakukan dengan mengurutkan potensi kegagalan berdasarkan nilai RPN tertinggi. Tahap ini membantu peneliti dalam menentukan permasalahan yang memiliki dampak paling signifikan terhadap kualitas dimensi *mold* dan perlu dilakukan analisis lanjutan.

Tahap Analisis Akar Penyebab (FTA) digunakan untuk menelusuri hubungan sebab-akibat dari potensi kegagalan yang menjadi prioritas. Melalui diagram *Fault Tree*, akar penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold* dapat diidentifikasi secara lebih mendalam dan sistematis.

Tahap Perumusan Usulan Perbaikan (5W+1H) bertujuan untuk menyusun rekomendasi perbaikan yang terstruktur dan aplikatif. Usulan perbaikan difokuskan pada penambahan *reinforcement* besi pada *mold* serta pengendalian proses produksi agar kualitas dimensi *mold* dapat ditingkatkan secara berkelanjutan.

Tahap Evaluasi Hasil Perbaikan dilakukan dengan membandingkan kondisi *mold* sebelum dan sesudah penambahan *reinforcement* besi berdasarkan hasil pemindaian 3D dan analisis *PolyWorks*. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai efektivitas perbaikan dalam menurunkan deviasi dimensi *mold*.

Tahap Kesimpulan dan Rekomendasi berisi rangkuman hasil analisis dan kesimpulan yang diperoleh dari penelitian. Pada tahap ini juga disusun rekomendasi lanjutan yang dapat diterapkan oleh perusahaan untuk meningkatkan sistem pengendalian kualitas *mold* di masa mendatang.

Tahap Selesai menandai berakhirnya seluruh rangkaian penelitian setelah seluruh tujuan penelitian tercapai dan hasil penelitian terdokumentasi dengan baik.

BAB IV

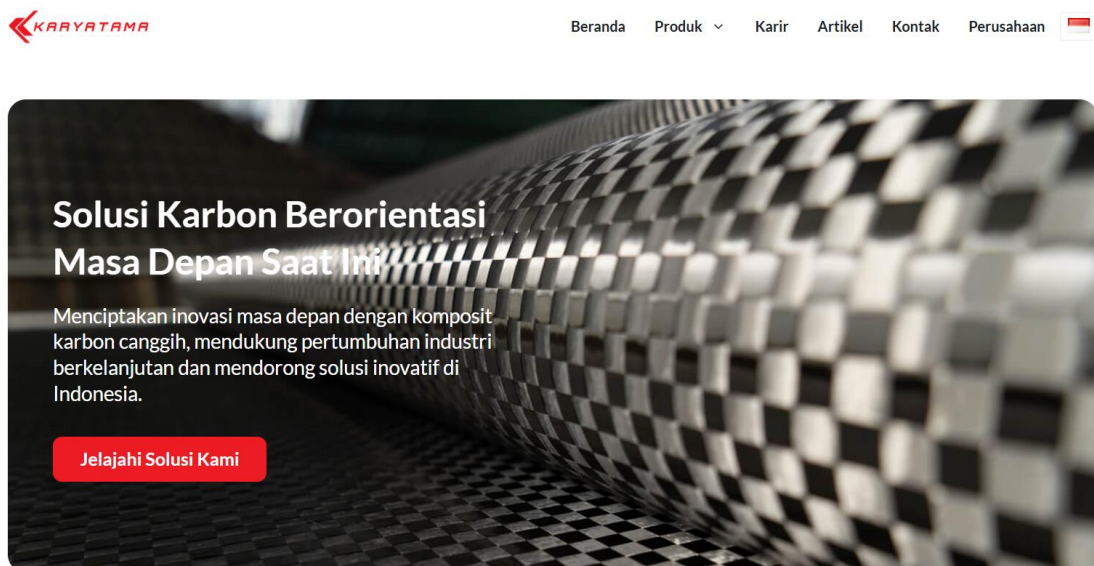
PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi yang diperlukan dalam analisis pengendalian kualitas dimensi *mold komposit*. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung proses produksi, pemindaian dimensi *mold* menggunakan 3D scanner Hexagon, serta hasil pengolahan data inspeksi menggunakan perangkat lunak *PolyWorks*. Data ini digunakan untuk mengidentifikasi deviasi dimensi *mold* sebelum dan sesudah penambahan *reinforcement* besi.

Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis perusahaan, seperti spesifikasi desain, standar toleransi dimensi, prosedur operasional standar (SOP), serta referensi literatur yang relevan. Seluruh data yang terkumpul selanjutnya digunakan sebagai dasar pemetaan proses dengan metode IDF (IDEF0), analisis risiko kegagalan menggunakan FMEA, analisis akar penyebab dengan FTA, serta perumusan usulan perbaikan melalui pendekatan 5W+1H.

4.1.1 Sejarah Perusahaan



Gambar 4. 1 Website Resmi PT Karyatama Komposit Teknologi

PT Karyatama *Komposit* Teknologi merupakan perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur dan pengembangan material *komposit*, khususnya untuk kebutuhan industri kedirgantaraan dan industri berbasis teknologi tinggi. Perusahaan ini berfokus pada proses perancangan, pembuatan, serta pengendalian kualitas komponen berbahan *komposit* dengan tingkat presisi yang tinggi. Dalam operasionalnya, PT Karyatama *Komposit* Teknologi menerapkan standar kualitas dan prosedur kerja yang ketat untuk memastikan produk yang dihasilkan memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan.

Seiring dengan perkembangan teknologi manufaktur, PT Karyatama *Komposit* Teknologi terus mengadopsi peralatan dan metode modern, seperti penggunaan teknologi pemindaian 3D dan perangkat lunak analisis dimensi, guna meningkatkan efektivitas pengendalian kualitas. Komitmen perusahaan terhadap peningkatan kualitas dan perbaikan berkelanjutan menjadikan PT Karyatama *Komposit* Teknologi sebagai objek yang relevan untuk dilakukan penelitian terkait pengendalian kualitas *mold komposit*.

4.1.2 Produk yang dihasilkan

PT Karyatama *Komposit* Teknologi menghasilkan berbagai produk berbahan material *komposit* yang digunakan untuk kebutuhan industri berteknologi tinggi, khususnya industri kedirgantaraan. Produk yang dihasilkan meliputi komponen struktur *komposit* dan *mold komposit* yang berfungsi sebagai alat bantu utama dalam proses pembentukan produk dengan tingkat presisi dimensi yang tinggi.

Dalam konteks penelitian ini, produk yang menjadi fokus adalah *mold komposit*, yang digunakan sebagai acuan pembentukan komponen *komposit*. Kualitas *mold*, terutama dari segi kestabilan dan ketepatan dimensi, sangat berpengaruh terhadap kualitas produk akhir. Hasil pengamatan menunjukkan pengendalian kualitas *mold* menjadi aspek penting untuk menjamin kesesuaian produk dengan spesifikasi desain yang ditetapkan.



Gambar 4. 2 Hasil Produk

4.1.3 Pemetaan Proses Produksi Menggunakan Metode IDF (IDEF0)

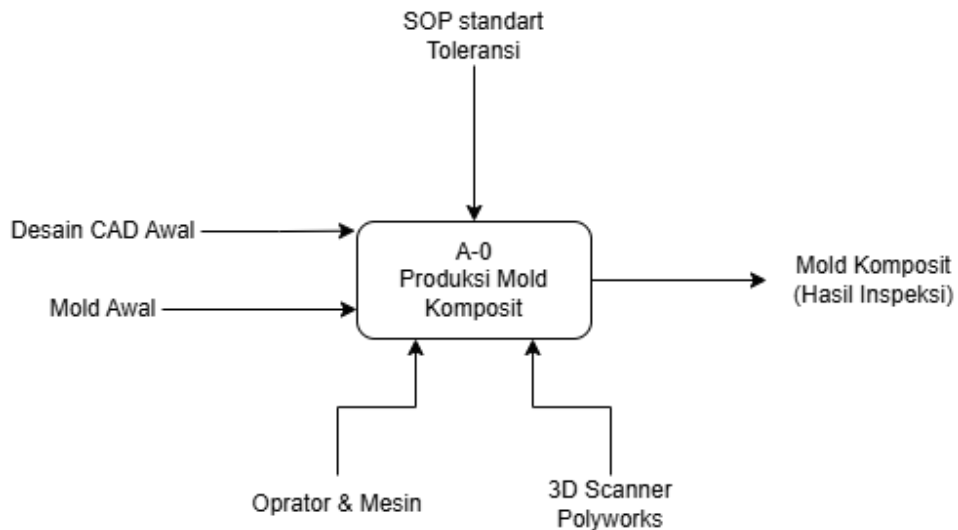
Metode IDF (*Integrated Definition Function Modeling*) atau yang dikenal sebagai IDEF0 digunakan dalam penelitian ini untuk memetakan dan memahami alur proses produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel* secara sistematis. Pemetaan ini bertujuan untuk menggambarkan hubungan antara input, proses, kontrol, dan output pada setiap tahapan produksi *mold*, sehingga dapat diketahui titik-titik kritis yang berpotensi menyebabkan terjadinya deviasi dimensi *mold* sebagaimana ditunjukkan pada hasil pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4.

Penggunaan metode IDF sangat relevan dalam penelitian ini karena permasalahan utama yang dikaji tidak hanya berasal dari satu proses tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi antara faktor manusia, metode, mesin, material, dan lingkungan. Dengan memodelkan proses menggunakan IDF, alur produksi *mold* dapat divisualisasikan secara menyeluruh, sehingga memudahkan peneliti dalam mengidentifikasi proses yang belum terstandarisasi dan berkontribusi terhadap ketidaksesuaian dimensi *mold*.

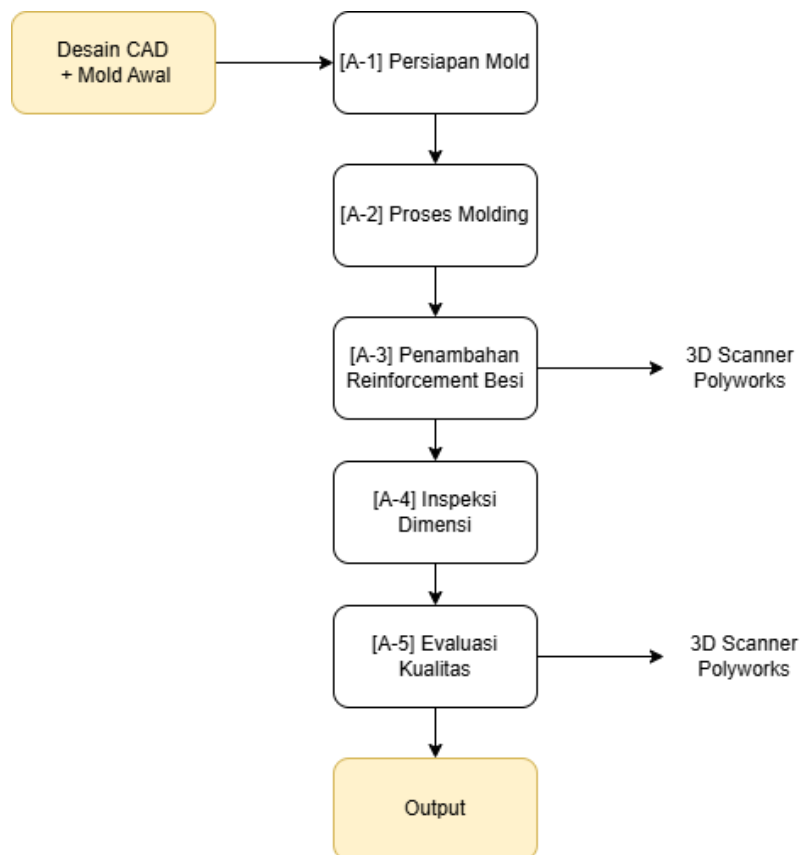
Berdasarkan pemodelan proses menggunakan IDEF0, tahapan yang memiliki potensi risiko tertinggi terhadap ketidaksesuaian dimensi *mold* adalah proses handling *mold*, penyimpanan *mold*, serta proses inspeksi dimensi. Ketiga tahapan tersebut kemudian dijadikan dasar dalam penyusunan mode kegagalan pada analisis FMEA.

4.1.3.1 Diagram Konteks IDF (A-0)

Diagram konteks IDF A-0 menggambarkan sistem produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel* secara keseluruhan sebagai satu kesatuan proses. Pada level ini, fokus utama adalah hubungan antara input utama yang masuk ke sistem, proses inti produksi *mold*, serta output yang dihasilkan.



Gambar 4. 3 Diagram Sistem Produksi *Mold Komposit*



Gambar 4. 4 Diagram IDF A-0 Proses Produksi *Mold Komposit*

Dalam penelitian ini, input utama berupa model CAD *mold*, material *mold*, serta standar desain produk, yang kemudian diproses melalui rangkaian aktivitas produksi *mold*. Proses ini dikendalikan oleh SOP produksi, spesifikasi teknis, dan standar kualitas, serta didukung oleh sumber daya seperti operator, peralatan, dan lingkungan kerja. Output yang diharapkan dari sistem ini adalah *mold Wing Box Upper Skin Panel* yang sesuai dengan toleransi dimensi desain CAD.

Diagram A-0 ini menjadi dasar untuk memahami ruang lingkup sistem yang diteliti dan menjadi acuan dalam penurunan proses ke level yang lebih rinci pada diagram A0.

4.1.3.2 Diagram IDF Level A0 Proses Produksi Mold

Diagram IDF A0 menjabarkan proses utama produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel* ke dalam beberapa subproses yang lebih detail. Pada level ini, setiap tahapan produksi dianalisis berdasarkan elemen Input–Control–Mechanism–Output (ICOM).

Subproses yang dipetakan meliputi:

1. Persiapan desain dan spesifikasi *mold*,
2. Proses pembuatan dan perakitan *mold*,
3. Handling dan penyimpanan *mold*,
4. Inspeksi dimensi *mold* menggunakan 3D scanner (*PolyWorks*).

Melalui pemetaan ini, dapat terlihat bahwa beberapa aktivitas, seperti proses handling dan penyimpanan *mold*, belum memiliki kontrol yang kuat dalam SOP. Kondisi ini sejalan dengan temuan pada analisis FMEA dan FTA, yang menunjukkan bahwa lemahnya pengendalian proses dan struktur *mold* menjadi penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold* pada hasil SCAN 1–4.

4.1.3.3 Keterkaitan Metode IDF dengan Analisis FMEA dan FTA

Hasil pemetaan proses menggunakan metode IDF digunakan sebagai dasar dalam pelaksanaan analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA). IDF membantu mengidentifikasi tahapan proses yang memiliki risiko tinggi terhadap kegagalan, yang selanjutnya dianalisis lebih lanjut menggunakan FMEA untuk menentukan nilai risiko (RPN).

Tahapan proses yang memiliki kontribusi besar terhadap deviasi dimensi *mold*, seperti ketidakkakuan struktur *mold* dan proses handling yang tidak terkontrol, kemudian

dianalisis lebih mendalam menggunakan FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan. Dari kondisi tersebut dapat diketahui bahwa metode IDF berperan sebagai fondasi awal dalam memahami sistem produksi secara menyeluruh sebelum dilakukan analisis risiko dan penentuan usulan perbaikan.

4.1.3.4 Peran IDF dalam Menentukan Usulan Perbaikan

Pemetaan proses menggunakan metode IDF memungkinkan peneliti untuk menghubungkan langsung antara hasil pengukuran deviasi dimensi *mold* dari SCAN 1–4 dengan aktivitas proses yang menyebabkannya. Melalui IDF, dapat diketahui bahwa tidak adanya *reinforcement* pada struktur *mold* serta SOP *handling* yang belum konsisten merupakan bagian dari proses yang memerlukan perbaikan.

Hasil pemetaan ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam perumusan usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H, dengan fokus pada penambahan *reinforcement* besi pada struktur *mold*, perbaikan SOP, serta pengendalian proses dan lingkungan kerja. Dengan penerapan usulan perbaikan tersebut, diharapkan proses produksi *mold* menjadi lebih terkendali dan kualitas *mold Wing Box Upper Skin Panel* dapat meningkat secara berkelanjutan.

4.1.4 Proses Produksi

Proses produksi *mold komposit* di PT Karyatama Komposit Teknologi dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan untuk menghasilkan *mold* dengan ketepatan dimensi dan kualitas permukaan yang sesuai standar. Proses diawali dari perancangan desain *mold* berdasarkan model CAD, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *mold* menggunakan metode *molding komposit*. Setelah proses pembentukan selesai, *mold* dilakukan inspeksi dimensi menggunakan teknologi pemindaian 3D untuk memastikan kesesuaian dengan desain awal. Pada tahap perbaikan, ditambahkan *reinforcement* besi pada struktur *mold* untuk meningkatkan kestabilan dan mengurangi potensi deformasi selama proses produksi.

Tabel 4. 1 Alur Proses Produksi



Proses produksi Penelitian ini diawali dengan input berupa *mold komposit* awal yang belum menggunakan *reinforcement*, data desain CAD sebagai acuan geometri, serta standar toleransi dimensi yang ditetapkan oleh perusahaan. Input ini menjadi dasar utama dalam mengevaluasi kondisi awal *mold* dan menentukan tingkat kesesuaian dimensi terhadap spesifikasi desain.

Tahap selanjutnya adalah proses, yang dimulai dengan pemindaian *mold* menggunakan 3D *scanner* untuk memperoleh data aktual permukaan *mold*. Data hasil pemindaian kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak *PolyWorks* untuk mengetahui besarnya deviasi dimensi. Setelah itu dilakukan pemetaan proses produksi menggunakan metode IDF untuk mengidentifikasi tahapan yang berpotensi menyebabkan deviasi. Berdasarkan hasil pemetaan tersebut, dilakukan analisis risiko kegagalan menggunakan FMEA dan analisis akar penyebab menggunakan FTA. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketiadaan *reinforcement* struktural menjadi penyebab utama ketidakstabilan *mold*, sehingga dilakukan penambahan *reinforcement* besi sebagai tindakan perbaikan. Setelah perbaikan, *mold* kembali dipindai untuk memperoleh data dimensi terbaru.

4.1.5 Reinforcement pada Mold Komposit

Reinforcement merupakan elemen penguat yang ditambahkan pada suatu struktur untuk meningkatkan kekakuan, kekuatan, dan stabilitas dimensi. Pada *mold komposit*, *reinforcement* berfungsi untuk mengurangi deformasi yang terjadi akibat beban proses produksi, *handling*, maupun penyimpanan. Penambahan *reinforcement* pada bagian struktur *mold* dapat meningkatkan kemampuan *mold* dalam mempertahankan bentuk geometrinya sehingga penyimpangan dimensi dapat diminimalkan.



Gambar 4. 5 *reinforcement Wing Box Upper Skin Panel.*

Dalam penelitian ini, *reinforcement* menjadi salah satu faktor penting karena hasil analisis FTA menunjukkan bahwa tidak adanya atau kurangnya *reinforcement* pada *mold* berkontribusi terhadap terjadinya deviasi dimensi *Wing Box Upper Skin Panel*.

Kekakuan struktur merupakan kemampuan suatu struktur untuk menahan deformasi ketika menerima beban kerja. Struktur yang memiliki kekakuan rendah akan lebih mudah mengalami perubahan bentuk sehingga dapat menyebabkan ketidaksesuaian dimensi terhadap desain awal.

Pada proses manufaktur *komposit*, kekakuan *mold* menjadi faktor penting karena *mold* berfungsi sebagai acuan pembentukan geometri produk. Apabila struktur *mold* tidak cukup kaku, maka deformasi yang terjadi selama proses produksi maupun handling dapat menyebabkan penyimpangan dimensi produk akhir.

Deviasi dimensi merupakan perbedaan antara ukuran aktual hasil pengukuran dengan ukuran nominal yang terdapat pada model desain CAD. Deviasi dimensi dapat terjadi akibat deformasi struktur, kesalahan proses produksi, pengaruh lingkungan, maupun ketidaksesuaian metode handling dan penyimpanan. Apabila nilai deviasi

melebihi batas toleransi yang ditetapkan, maka kualitas dan fungsi produk dapat menurun.

Dalam penelitian ini, deviasi dimensi dievaluasi menggunakan Hexagon 3D *Scanner* dan perangkat lunak *PolyWorks* dengan membandingkan hasil pemindaian *mold* terhadap model CAD sebagai referensi.

Tahap akhir adalah output, yaitu *mold komposit* yang telah dilengkapi dengan *reinforcement* besi dan menunjukkan penurunan deviasi dimensi dibandingkan kondisi awal. Selain itu, dihasilkan pula data perbandingan sebelum dan sesudah perbaikan yang membuktikan bahwa tindakan penambahan *reinforcement* besi efektif dalam meningkatkan kestabilan dan kualitas dimensi *mold*.

4.2 Pengolahan Data

Pada tahap ini, setelah pengumpulan data selesai, data diolah untuk mengidentifikasi jenis cacat yang paling umum, tingkat cacat produk *drone*, dan faktor yang menyebabkan cacat tersebut.

4.2.1 Data Inspeksi

Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	 surf pt 1	Surface Distance		-2,017	±1,000	-2,017	Fail	-1,017
	 surf pt 2	Surface Distance		-3,586	±1,000	-3,586	Fail	-2,586
	 surf pt 3	Surface Distance		-1,108	±1,000	-1,108	Fail	-0,108
	 surf pt 4	Surface Distance		0,845	±1,000	0,845	Pass	
	 surf pt 5	Surface Distance		-2,045	±1,000	-2,045	Fail	-1,045
	 surf pt 6	Surface Distance		0,422	±1,000	0,422	Pass	
	 surf pt 7	Surface Distance		1,808	±1,000	1,808	Fail	0,808
	 surf pt 8	Surface Distance		-1,454	±1,000	-1,454	Fail	-0,454
	 surf pt 9	Surface Distance		1,485	±1,000	1,485	Fail	0,485
	 surf pt 10	Surface Distance		1,164	±1,000	1,164	Fail	0,164
	 surf pt 11	Surface Distance		-0,940	±1,000	-0,940	Pass	
	 surf pt 12	Surface Distance		0,863	±1,000	0,863	Pass	
	 surf pt 13	Surface Distance		-1,355	±1,000	-1,355	Fail	-0,355
Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	 surf pt 14	Surface Distance		-1,269	±1,000	-1,269	Fail	-0,269
	 surf pt 15	Surface Distance		0,575	±1,000	0,575	Pass	
	 surf pt 16	Surface Distance		-0,256	±1,000	-0,256	Pass	
	 surf pt 17	Surface Distance		-0,612	±1,000	-0,612	Pass	
	 surf pt 18	Surface Distance		0,741	±1,000	0,741	Pass	
	 surf pt 19	Surface Distance		0,834	±1,000	0,834	Pass	
	 surf pt 20	Surface Distance		-0,469	±1,000	-0,469	Pass	
	 surf pt 21	Surface Distance		0,767	±1,000	0,767	Pass	
	 surf pt 22	Surface Distance		0,833	±1,000	0,833	Pass	
	 surf pt 23	Surface Distance		0,492	±1,000	0,492	Pass	
	 surf pt 24	Surface Distance		-0,515	±1,000	-0,515	Pass	
	 surf pt 25	Surface Distance		-1,295	±1,000	-1,295	Fail	-0,295
	 surf pt 26	Surface Distance		0,475	±1,000	0,475	Pass	
	 surf pt 27	Surface Distance		-0,739	±1,000	-0,739	Pass	
	 surf pt 28	Surface Distance		-0,901	±1,000	-0,901	Pass	
	 surf pt 29	Surface Distance		-2,125	±1,000	-2,125	Fail	-1,125
	 surf pt 30	Surface Distance		-0,940	±1,000	-0,940	Pass	
	 surf pt 31	Surface Distance		-0,726	±1,000	-0,726	Pass	

Gambar 4. 6 Data inspeksi dimensi mold SCAN 1

Data inspeksi menunjukkan bahwa kualitas dimensi *mold* mengalami peningkatan bertahap setelah dilakukan perbaikan. Pada Data 1 (SCAN 1), jumlah titik yang tidak memenuhi toleransi masih dominan.

Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	 surf pt 1	Surface Distance		0,928	±0,500	0,928	Fail	0,428
	 surf pt 2	Surface Distance		0,798	±0,500	0,798	Fail	0,298
	 surf pt 3	Surface Distance		0,948	±0,500	0,948	Fail	0,448
	 surf pt 4	Surface Distance		1,293	±0,500	1,293	Fail	0,793
	 surf pt 5	Surface Distance		1,186	±0,500	1,186	Fail	0,686
	 surf pt 6	Surface Distance		0,738	±0,500	0,738	Fail	0,238
	 surf pt 7	Surface Distance		1,542	±0,500	1,542	Fail	1,042
	 surf pt 8	Surface Distance		0,867	±0,500	0,867	Fail	0,367
	 surf pt 9	Surface Distance		0,766	±0,500	0,766	Fail	0,266
	 surf pt 10	Surface Distance		1,244	±0,500	1,244	Fail	0,744
	 surf pt 11	Surface Distance		0,935	±0,500	0,935	Fail	0,435
	 surf pt 12	Surface Distance		1,155	±0,500	1,155	Fail	0,655
	 surf pt 13	Surface Distance		0,954	±0,500	0,954	Fail	0,454
	 surf pt 14	Surface Distance		0,691	±0,500	0,691	Fail	0,191
	 surf pt 15	Surface Distance		1,048	±0,500	1,048	Fail	0,548
Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	 surf pt 16	Surface Distance		-0,723	±0,500	-0,723	Fail	-0,223
	 surf pt 17	Surface Distance		-0,635	±0,500	-0,635	Fail	-0,135
	 surf pt 18	Surface Distance		-1,819	±0,500	-1,819	Fail	-1,319
	 surf pt 19	Surface Distance		-1,664	±0,500	-1,664	Fail	-1,164
	 surf pt 20	Surface Distance		-0,567	±0,500	-0,567	Fail	-0,067
	 surf pt 21	Surface Distance		-0,546	±0,500	-0,546	Fail	-0,046
	 surf pt 22	Surface Distance		-0,587	±0,500	-0,587	Fail	-0,087
	 surf pt 23	Surface Distance		-0,645	±0,500	-0,645	Fail	-0,145
	 surf pt 24	Surface Distance		-1,241	±0,500	-1,241	Fail	-0,741
	 surf pt 25	Surface Distance		-1,170	±0,500	-1,170	Fail	-0,670
	 surf pt 26	Surface Distance		-1,386	±0,500	-1,386	Fail	-0,886
	 surf pt 27	Surface Distance		-1,294	±0,500	-1,294	Fail	-0,794
Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	 surf pt 28	Surface Distance		-1,225	±0,500	-1,225	Fail	-0,725
	 surf pt 29	Surface Distance		-0,677	±0,500	-0,677	Fail	-0,177
	 surf pt 30	Surface Distance		-0,422	±0,500	-0,422	Pass	
	 surf pt 31	Surface Distance		-1,521	±0,500	-1,521	Fail	-1,021
	 surf pt 32	Surface Distance		-0,707	±0,500	-0,707	Fail	-0,207
	 surf pt 33	Surface Distance		0,812	±0,500	0,812	Fail	0,312
	 surf pt 34	Surface Distance		0,730	±0,500	0,730	Fail	0,230
	 surf pt 35	Surface Distance		1,258	±0,500	1,258	Fail	0,758
	 surf pt 36	Surface Distance		1,754	±0,500	1,754	Fail	1,254
	 surf pt 37	Surface Distance		1,887	±0,500	1,887	Fail	1,387
	 surf pt 38	Surface Distance		1,608	±0,500	1,608	Fail	1,108
	 surf pt 39	Surface Distance		1,582	±0,500	1,582	Fail	1,082
	 surf pt 40	Surface Distance		1,174	±0,500	1,174	Fail	0,674

Gambar 4. 7 Data inspeksi dimensi mold SCAN 2

Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	surf pt 1	Surface Distance		1,503	±1,000	1,503	Fail	0,503
	surf pt 2	Surface Distance		1,559	±1,000	1,559	Fail	0,559
	surf pt 3	Surface Distance		1,587	±1,000	1,587	Fail	0,587
	surf pt 4	Surface Distance		1,079	±1,000	1,079	Fail	0,079
	surf pt 5	Surface Distance		-0,332	±1,000	-0,332	Pass	
	surf pt 6	Surface Distance		-0,516	±1,000	-0,516	Pass	
	surf pt 7	Surface Distance		-0,400	±1,000	-0,400	Pass	
	surf pt 8	Surface Distance		-0,733	±1,000	-0,733	Pass	
	surf pt 9	Surface Distance		-1,951	±1,000	-1,951	Fail	-0,951
	surf pt 10	Surface Distance		-1,232	±1,000	-1,232	Fail	-0,232
	surf pt 11	Surface Distance		-1,612	±1,000	-1,612	Fail	-0,612
	surf pt 12	Surface Distance		-1,690	±1,000	-1,690	Fail	-0,690

Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	surf pt 13	Surface Distance		-1,38	±1,00	-1,38	Fail	-0,38
	surf pt 14	Surface Distance		-1,48	±1,00	-1,48	Fail	-0,48
	surf pt 15	Surface Distance		-2,21	±1,00	-2,21	Fail	-1,21
	surf pt 16	Surface Distance		-1,16	±1,00	-1,16	Fail	-0,16
	surf pt 17	Surface Distance		-1,39	±1,00	-1,39	Fail	-0,39
	surf pt 18	Surface Distance		0,34	±1,00	0,34	Pass	
	surf pt 19	Surface Distance		0,28	±1,00	0,28	Pass	
	surf pt 20	Surface Distance		-1,04	±1,00	-1,04	Fail	-0,04

Gambar 4. 8 Data inspeksi dimensi mold SCAN 3

Perbaikan awal pada Data 2 (SCAN 2) mampu menurunkan jumlah titik gagal, namun pada Data 3 (SCAN 3) masih ditemukan deviasi tidak signifikan pada beberapa segmen *mold*.

Char No.	Object Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
	surf pt 1	Surface Distance		-0,32	±1,00	-0,32	Pass	
	surf pt 2	Surface Distance		0,28	±1,00	0,28	Pass	
	surf pt 3	Surface Distance		0,42	±1,00	0,42	Pass	
	surf pt 5	Surface Distance		-0,01	±1,00	-0,01	Pass	
	surf pt 6	Surface Distance		-0,31	±1,00	-0,31	Pass	
	surf pt 7	Surface Distance		-0,65	±1,00	-0,65	Pass	
	surf pt 8	Surface Distance		0,00	±1,00	0,00	Pass	
	surf pt 9	Surface Distance		-0,21	±1,00	-0,21	Pass	
	surf pt 10	Surface Distance		1,33	±1,00	1,33	Fail	0,33
	surf pt 11	Surface Distance		0,31	±1,00	0,31	Pass	
	surf pt 12	Surface Distance		0,36	±1,00	0,36	Pass	
	surf pt 13	Surface Distance		-0,05	±1,00	-0,05	Pass	

Gambar 4. 9 Data inspeksi dimensi mold SCAN 4

Setelah dilakukan perbaikan struktural berupa penambahan *reinforcement* besi, hasil Data 4 (SCAN 4) menunjukkan sebagian besar titik ukur berada dalam batas toleransi, sehingga *mold* dinyatakan memenuhi kriteria kualitas.

Tabel 4. 2 Data Hasil Inspeksi *Mold* Sebelum dan Setelah Perbaikan *Reinforcement*

Data	Kode Scan	Kondisi <i>Mold</i>	Jumlah Titik Ukur	Titik Pass	Titik Fail	Status Umum
Data 1	SCAN 1	Sebelum perbaikan (tanpa <i>reinforcement</i>)	31 titik	19	12	Tidak Layak
Data 2	SCAN 2	Sebelum perbaikan (tanpa <i>reinforcement</i>)	40 titik	1	39	Tidak Layak
Data 3	SCAN 3	Sebelum perbaikan (tanpa <i>reinforcement</i>)	20 titik	6	14	Layak Bersyarat
Data 4	SCAN 4	Setelah perbaikan penambahan <i>reinforcement</i> besi & <i>finishing</i> (<i>final</i>)	13 titik	12	1	Layak / PASS

Untuk mengevaluasi efektivitas usulan perbaikan, dilakukan pengukuran ulang deviasi dimensi *mold* setelah penambahan *reinforcement*. Hasil pengukuran ini kemudian dibandingkan dengan data deviasi sebelum perbaikan untuk menilai tingkat penurunan penyimpangan dimensi.

4.2.2 Data Cacat Dimensi *Mold* Hasil Inspeksi 3D Scanner

Proses inspeksi dimensi dilakukan menggunakan Hexagon 3D Scanner yang kemudian dianalisis dengan perangkat lunak *PolyWorks Inspector*. Tujuan inspeksi ini adalah untuk mengetahui tingkat kesesuaian dimensi *mold* terhadap model CAD sebagai acuan desain. Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk nilai deviasi pada setiap titik ukur (*surface distance*), kemudian dibandingkan dengan batas toleransi yang telah ditentukan. Titik pengukuran yang berada di luar batas toleransi dikategorikan sebagai *Fail*, sedangkan titik yang masih berada dalam batas toleransi dikategorikan sebagai *Pass*.

Inspeksi dilakukan pada empat tahap pemindaian (SCAN 1 sampai SCAN 4) selama proses pengembangan *mold Wing Box Upper Skin Panel*. Setiap hasil pemindaian menunjukkan jumlah titik ukur dan jumlah titik yang mengalami penyimpangan dimensi yang berbeda. Rekapitulasi hasil inspeksi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 3 Data Cacat Dimensi *Mold* Hasil Inspeksi 3D *Scanner*

Data Scan	Jumlah Titik Ukur	Toleransi	Titik <i>Pass</i>	Titik <i>Fail</i>	Persentase Titik Cacat (%)
SCAN 1	31	$\pm 1,00$ mm	19	12	38,7%
SCAN 2	40	$\pm 0,50$ mm	1	39	97,5
SCAN 3	20	$\pm 1,00$ mm	5	15	75,0
SCAN 4	13	$\pm 1,00$ mm	12	1	7,7
Total	104	-	37	67	64,4

Berdasarkan hasil inspeksi dimensi menggunakan Hexagon 3D *Scanner* yang dianalisis dengan perangkat lunak *PolyWorks*, diperoleh hasil pengukuran pada empat tahap inspeksi (SCAN 1–SCAN 4). Rekapitulasi hasil inspeksi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Berdasarkan Tabel 4.3 diketahui bahwa jumlah keseluruhan titik ukur yang diperiksa sebanyak 104 titik, terdiri dari 37 titik memenuhi toleransi (*Pass*) dan 67 titik berada di luar batas toleransi (*Fail*). Hal tersebut menunjukkan bahwa secara keseluruhan persentase cacat dimensi mold mencapai 64,4%, sehingga masih diperlukan analisis lebih lanjut terhadap penyebab terjadinya penyimpangan dimensi.

Hasil inspeksi SCAN 1 menunjukkan bahwa dari 31 titik ukur, terdapat 12 titik yang berada di luar batas toleransi atau sebesar 38,7%, sedangkan 19 titik lainnya masih

memenuhi toleransi. Pada SCAN 2 diperoleh jumlah cacat tertinggi, yaitu 39 titik dari 40 titik ukur atau sebesar 97,5%, sehingga menunjukkan bahwa sebagian besar area yang diperiksa mengalami penyimpangan dimensi.

Selanjutnya pada SCAN 3, dari 20 titik ukur terdapat 15 titik cacat atau sebesar 75,0%, sedangkan 5 titik memenuhi batas toleransi. Berbeda dengan tiga tahap inspeksi sebelumnya, SCAN 4 menunjukkan hasil yang paling baik, di mana hanya terdapat 1 titik cacat dari 13 titik ukur atau sebesar 7,7%, sedangkan 12 titik lainnya telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa SCAN 2 merupakan tahap dengan tingkat cacat tertinggi, sedangkan SCAN 4 menunjukkan peningkatan kualitas yang signifikan dengan jumlah titik cacat paling rendah. Hasil inspeksi ini menjadi dasar dalam analisis lanjutan menggunakan metode FMEA untuk menentukan prioritas risiko kegagalan dan FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab terjadinya deviasi dimensi pada *mold*.

1. Deviasi Dimensi Melebihi Toleransi

Pada proses pembuatan *mold Wing Box Upper Skin Panel*, ditemukan cacat produk berupa deviasi dimensi yang melebihi batas toleransi. Cacat ini ditandai dengan perbedaan jarak permukaan *mold* terhadap model CAD nominal yang terdeteksi melalui hasil pemindaian menggunakan Hexagon 3D Scanner dan dianalisis menggunakan perangkat lunak *PolyWorks*. Deviasi ini dapat berupa nilai positif (*overbuild*) maupun nilai negatif (*undercut*) yang melebihi batas toleransi ± 1 mm.

Mold yang mengalami deviasi dimensi berlebih akan menyebabkan ketidaksesuaian bentuk pada produk *komposit* yang dihasilkan, sehingga berpotensi menurunkan kualitas geometri dan kesesuaian perakitan. Penyebab utama terjadinya cacat ini adalah kurangnya kekakuan struktur *mold* sebelum perbaikan, tidak adanya *reinforcement*, serta pengaruh gaya dan beban selama proses produksi dan handling. Kondisi tersebut menyebabkan deformasi pada *mold*, terutama pada area panjang dan tipis, sehingga hasil pengukuran menunjukkan penyimpangan yang signifikan.

2. Ketidakrataan Permukaan *Mold*

Cacat lain yang ditemukan pada *mold* adalah ketidakrataan permukaan, yang ditandai dengan variasi warna pada peta deviasi hasil pemindaian 3D. Area dengan warna biru hingga merah menunjukkan perbedaan ketinggian permukaan yang tidak seragam dibandingkan dengan model CAD acuan. Ketidakrataan ini dapat memengaruhi kualitas permukaan produk *komposit*, terutama pada proses bonding dan *finishing*.

Ketidakrataan permukaan *mold* umumnya disebabkan oleh proses pembuatan awal yang belum optimal, deformasi akibat beban, serta ketidakseimbangan struktur *mold*. Selain itu, absennya *reinforcement* pada tahap awal menyebabkan *mold* tidak mampu mempertahankan kestabilan bentuknya dalam jangka waktu penggunaan tertentu.

3. Deformasi Struktur *Mold*

Deformasi struktur *mold* merupakan cacat yang terlihat jelas pada hasil pemindaian, khususnya pada area ujung dan bagian tengah *mold*. Cacat ini ditandai dengan pergeseran geometri *mold* secara menyeluruh yang menyebabkan beberapa titik pengukuran berada jauh di luar batas toleransi.

Penyebab utama deformasi ini adalah tidak digunakannya *reinforcement* struktural pada *mold* sebelum perbaikan, sehingga *mold* tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban dan perubahan lingkungan. Setelah dilakukan penambahan *reinforcement* besi, tingkat deformasi *mold* mengalami penurunan yang signifikan, yang dibuktikan dengan meningkatnya jumlah titik pengukuran yang memenuhi toleransi pada hasil SCAN 4.

4.2.3 Prioritas *Defect* Berdasarkan Hasil Inspeksi 3D Scanner

Berdasarkan data *defect* yang diperoleh dari hasil inspeksi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* menggunakan Hexagon 3D Scanner dan dianalisis dengan perangkat lunak PolyWorks, diperoleh beberapa jenis cacat dimensi yang terjadi selama tahapan inspeksi (SCAN 1 sampai SCAN 4). Penentuan prioritas *defect* dilakukan berdasarkan jumlah kejadian cacat dan persentase kontribusinya terhadap total cacat, sehingga dapat diketahui jenis cacat yang paling dominan dan perlu diprioritaskan penanganannya.

Tabel 4. 4 Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 1

No	Jenis <i>Defect</i>	Jumlah <i>Defect</i>	Persentase (%)	Kumulatif (%)
1	Deviasi dimensi negatif melebihi toleransi	9	75,0	75,0
2	Deviasi dimensi positif (<i>overbuild</i>)	3	25,0	100
Total		12	100	

Berdasarkan Tabel Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 1, diperoleh 12 titik *defect* dari hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D *Scanner* yang dianalisis melalui perangkat lunak *PolyWorks*. Jenis *defect* yang paling dominan adalah deviasi dimensi negatif melebihi batas toleransi, yaitu sebanyak 9 titik atau 75,0% dari total *defect*. Sementara itu, deviasi dimensi positif (*overbuild*) ditemukan sebanyak 3 titik atau 25,0%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada SCAN 1 penyimpangan dimensi didominasi oleh deviasi negatif, yang mengindikasikan bahwa ukuran aktual pada beberapa area *mold* lebih kecil dibandingkan ukuran nominal pada model CAD. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat penyimpangan dimensi yang cukup signifikan pada tahap awal inspeksi sehingga *mold* belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Oleh karena itu, deviasi dimensi negatif melebihi batas toleransi menjadi prioritas utama untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FMEA dan FTA guna mengidentifikasi penyebab utama serta menentukan tindakan perbaikan yang sesuai.

Tabel 4. 5 Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 2

No	Jenis <i>Defect</i>	Jumlah <i>Defect</i>	Persentase (%)	Kumulatif (%)
1	Deviasi dimensi positif (<i>overbuild</i>)	23	59,0	59,0

2	Deviasi dimensi negatif melebihi toleransi	16	41,0	100
Total		39	100	

Berdasarkan Tabel Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 2, diperoleh 39 titik defect dari hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D *Scanner* yang dianalisis melalui perangkat lunak *PolyWorks*. Jenis defect yang paling dominan adalah deviasi dimensi positif (*overbuild*), yaitu sebanyak 23 titik atau 59,0% dari total *defect*. Sementara itu, deviasi dimensi negatif melebihi batas toleransi ditemukan sebanyak 16 titik atau 41,0%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada SCAN 2 penyimpangan dimensi lebih banyak terjadi ke arah positif, yang mengindikasikan ukuran aktual *mold* melebihi ukuran nominal yang ditetapkan pada model CAD. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas dimensi *mold* pada tahap inspeksi SCAN 2 masih belum memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, deviasi dimensi positif (*overbuild*) menjadi prioritas utama untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FME) dan FTA guna mengidentifikasi penyebab utama serta menentukan usulan tindakan perbaikan yang tepat.

Tabel 4. 6 Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 3

No	Jenis <i>Defect</i>	Jumlah <i>Defect</i>	Persentase (%)	Kumulatif (%)
1	Deviasi dimensi negatif melebihi toleransi	10	71,4	71,4
2	Deviasi dimensi positif (<i>overbuild</i>)	4	28,6	100
Total		14	100	

Berdasarkan Tabel Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 3, diketahui bahwa terdapat 14 titik *defect* yang teridentifikasi dari hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D

Scanner dan analisis *PolyWorks*. Jenis *defect* yang paling dominan adalah deviasi dimensi negatif melebihi batas toleransi, yaitu sebanyak 10 titik atau 71,4% dari total defect. Sementara itu, deviasi dimensi positif (*overbuild*) ditemukan sebanyak 4 titik atau 28,6%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan dimensi pada SCAN 3 masih didominasi oleh deviasi ke arah negatif, sehingga menjadi prioritas utama untuk dilakukan analisis penyebab menggunakan metode FMEA dan FTA. Dominasi deviasi negatif juga mengindikasikan bahwa kondisi *mold* masih mengalami perubahan dimensi yang menyebabkan sebagian besar titik pengukuran belum memenuhi batas toleransi yang telah ditetapkan.

Tabel 4. 7 Prioritas *Defect* Dimensi *Mold* SCAN 4

No	Jenis <i>Defect</i>	Jumlah <i>Defect</i>	Persentase Defect (%)	Kumulatif (%)
1	Deviasi dimensi positif (<i>overbuild</i>) melebihi toleransi	1	100,0	100,0
Total		1	100,0	

Berdasarkan hasil inspeksi SCAN 4, diperoleh 13 titik pengukuran, dimana 12 titik memenuhi batas toleransi dan 1 titik berada di luar batas toleransi. *Defect* yang ditemukan berupa deviasi dimensi positif (*overbuild*) pada surf pt 10 dengan nilai deviasi sebesar +1,33 mm, sehingga melebihi batas toleransi $\pm 1,00$ mm. Dengan demikian, seluruh *defect* pada SCAN 4 didominasi oleh deviasi dimensi positif, dengan persentase 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan perbaikan pada *mold*, jumlah penyimpangan dimensi mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan SCAN sebelumnya, sehingga kualitas dimensi *mold* menjadi lebih baik dan mendekati spesifikasi yang ditetapkan.

4.3 Nilai RPN dan Mode Kegagalan

Penentuan mode kegagalan pada penelitian ini didasarkan pada kejadian-kejadian yang menyebabkan terjadinya cacat dimensi pada *mold Wing Box Upper Skin Panel* selama proses produksi dan penggunaan *mold*. Identifikasi mode kegagalan dilakukan

berdasarkan hasil inspeksi menggunakan Hexagon 3D Scanner yang dianalisis dengan perangkat lunak PolyWorks, serta observasi langsung terhadap kondisi *mold* sebelum dan sesudah perbaikan.

Pengisian nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) dilakukan melalui diskusi dengan pihak yang terlibat langsung dalam proses pembuatan dan perbaikan *mold*, yaitu operator produksi dan personel quality control di PT terkait. Sebelum penilaian dilakukan, responden diberikan penjelasan mengenai skala penilaian SOD agar penentuan nilai dapat dilakukan secara objektif dan konsisten. *Nilai Risk Priority Number* (RPN) diperoleh dari hasil perkalian nilai S, O, dan D, yang kemudian digunakan untuk menentukan prioritas perbaikan pada mode kegagalan dengan risiko tertinggi.

Tabel 4. 8 Nilai RPN dan Mode Kegagalan (FMEA)

<i>Potential Failure Mode</i>	<i>Potential Failure Effect</i>	S	<i>Failure Cause</i>	O	<i>Current Control</i>	D	RPN
Deviasi dimensi negatif melebihi toleransi	Dimensi <i>mold</i> lebih kecil dari model CAD sehingga produk komposit tidak memenuhi spesifikasi dimensi	7	Tidak adanya <i>reinforcement</i> pada struktur <i>mold</i> sehingga <i>mold</i> mudah mengalami deformasi	6	Pemeriksaan dimensi menggunakan 3D Scanner dan penambahan <i>reinforcement</i> pada <i>mold</i>	4	168
Deviasi dimensi positif (overbuild)	Dimensi <i>mold</i> melebihi model CAD sehingga mempengaruhi kesesuaian dimensi produk	6	Perubahan temperatur dan kelembapan selama proses manufaktur serta penyusutan material yang tidak terkendali	5	Pengendalian kondisi lingkungan kerja dan inspeksi dimensi berkala	5	150
Deviasi dimensi akibat <i>handling</i>	Dimensi <i>mold</i> berubah akibat proses pemindahan dan penyimpanan yang tidak sesuai	7	<i>Handling</i> dan penyimpanan <i>mold</i> tidak sesuai prosedur	5	Penerapan SOP <i>handling</i> , penggunaan jig penyangga, dan pelatihan operator	3	105
Ketidaksesuaian geometri <i>mold</i>	Komponen sulit dirakit dan tidak sesuai dengan model CAD	6	Kesalahan referensi saat proses pembuatan <i>mold</i>	4	Validasi ulang model CAD menggunakan hasil <i>scan</i> 3D	3	72

Deformasi struktur <i>mold</i>	Perubahan bentuk <i>mold</i> secara permanen sehingga mempengaruhi kualitas produk	7	Struktur <i>mold</i> kurang kaku akibat umur pakai dan beban proses	3	Penambahan <i>reinforcement</i> serta inspeksi berkala	3	63
--------------------------------	--	---	---	---	--	---	----

Berdasarkan hasil identifikasi mode kegagalan menggunakan metode FMEA, diperoleh lima mode kegagalan utama yang berpotensi menyebabkan penyimpangan dimensi pada mold *Wing Box Upper Skin Panel*. Penilaian dilakukan dengan memberikan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) berdasarkan hasil observasi proses produksi, data inspeksi dimensi menggunakan *Hexagon 3D Scanner* yang dianalisis melalui *PolyWorks*, serta mengacu pada kriteria penilaian FMEA menurut Stamatis (2003). Nilai *Risk Priority Number* (RPN) diperoleh dari hasil perkalian nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection* ($RPN = S \times O \times D$).

Hasil analisis menunjukkan bahwa deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi akibat tidak adanya *reinforcement* pada struktur *mold* memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 168. Nilai tersebut menunjukkan bahwa mode kegagalan ini merupakan risiko paling kritis karena dapat menyebabkan dimensi *mold* tidak sesuai dengan model CAD sehingga berdampak pada ketidaksesuaian dimensi produk komposit yang dihasilkan. Kondisi tersebut juga didukung oleh hasil inspeksi pada SCAN 1 hingga SCAN 3 yang masih menunjukkan jumlah titik di luar toleransi cukup tinggi.

Mode kegagalan berikutnya adalah deviasi dimensi positif (*overbuild*) dengan nilai RPN sebesar 150. Risiko ini disebabkan oleh perubahan dimensi *mold* akibat faktor lingkungan, seperti temperatur dan kelembapan, sehingga ukuran aktual mold melebihi ukuran nominal yang ditetapkan. Selanjutnya, deviasi dimensi akibat proses *handling* dan penyimpanan *mold* memiliki nilai RPN sebesar 105, yang menunjukkan bahwa proses pemindahan dan penyimpanan mold yang kurang baik masih berpotensi menyebabkan perubahan dimensi.

Selain itu, ketidaksesuaian geometri *mold* memperoleh nilai RPN sebesar 72, sedangkan deformasi struktur *mold* memiliki nilai RPN sebesar 63. Kedua mode kegagalan tersebut memiliki tingkat risiko yang lebih rendah dibandingkan tiga mode

kegagalan sebelumnya, namun tetap memerlukan tindakan pengendalian untuk menjaga kualitas *mold* selama proses produksi.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa prioritas utama perbaikan difokuskan pada peningkatan kekakuan struktur *mold* melalui penambahan *reinforcement*, karena mode kegagalan tersebut memiliki nilai RPN tertinggi. Setelah dilakukan tindakan perbaikan, hasil inspeksi pada SCAN 4 menunjukkan penurunan jumlah titik di luar toleransi secara signifikan, sehingga mengindikasikan bahwa tindakan perbaikan yang dilakukan mampu meningkatkan kestabilan dimensi *mold* dan menghasilkan kualitas *mold* yang lebih baik.

4.4 Titik Kritis Nilai RPN

Pengkategorian nilai kritis RPN dilakukan untuk mencari nilai RPN mana saja yang masuk kategori kritis, sehingga perlu mendapatkan perhatian khusus dan perlu untuk diberikan usulan perbaikan secepatnya. menentukan mode kegagalan kritis atau tidak dilakukan dengan membandingkan nilai RPN dan nilai rata-rata. Jika nilai RPN > nilai rata-rata maka mode kegagalan termasuk kritis.

Tabel 4. 9 Klasifikasi Kritis dan Tidak Kritis Nilai RPN

Potential Failure Mode	Faktor Defect	Mode Kegagalan	Nilai RPN	Kategori
Deviasi dimensi <i>mold</i> melebihi toleransi	Struktur	<i>Mold</i> mengalami deformasi karena tidak menggunakan <i>reinforcement</i> sehingga dimensi tidak sesuai model CAD	168	Kritis
Deviasi dimensi positif (<i>overbuild</i>)	Lingkungan	Perubahan temperatur dan kelembapan lingkungan menyebabkan dimensi <i>mold</i> melebihi spesifikasi	150	Kritis
Deviasi dimensi akibat proses <i>handling</i>	Metode	Proses pemindahan dan penyimpanan <i>mold</i> yang kurang tepat menyebabkan perubahan dimensi	105	Tidak Kritis
Ketidaksesuaian geometri <i>mold</i>	Desain	Kesalahan referensi saat pembuatan <i>mold</i> menyebabkan geometri tidak sesuai model CAD	72	Tidak Kritis
Deformasi struktur <i>mold</i>	Struktur	Kekakuan struktur <i>mold</i> menurun akibat umur pakai dan beban proses	63	Tidak Kritis

Karena pada penelitian Anda rata-rata nilai RPN adalah 111,6, maka batas klasifikasi dapat ditetapkan sebagai berikut:

$RPN \geq 111,6 \rightarrow$ Kritis

$RPN < 111,6 \rightarrow$ Tidak Kritis

Perhitungan rata-rata:

$$\text{Rata-rata RPN} = \frac{168 + 150 + 105 + 72 + 63}{5} = 111,6$$

Sehingga:

168 $\rightarrow$ Kritis

150 $\rightarrow$ Kritis

105 $\rightarrow$ Tidak Kritis

72 $\rightarrow$ Tidak Kritis

63 $\rightarrow$ Tidak Kritis

Tabel 4. 10 Urutan Nilai RPN Tertinggi dan Kritis (Rata-Rata)

Peringkat	Failure Mode	Nilai RPN	Prioritas
1	Deviasi dimensi mold melebihi toleransi	168	I
2	Deviasi dimensi positif (Overbuild)	150	II
3	Handling mold	105	III
4	Kesalahan referensi CAD	72	IV

5	Deformasi struktur mold	63	V
---	-------------------------	----	---

Berdasarkan hasil analisis FMEA, diperoleh lima mode kegagalan yang berpotensi menyebabkan penyimpangan dimensi pada *mold*. Nilai *Risk Priority Number* (RPN) berkisar antara 63 hingga 168, dengan rata-rata sebesar 111,6. Nilai rata-rata tersebut digunakan sebagai batas klasifikasi tingkat risiko, di mana $RPN \geq 112$ dikategorikan sebagai kritis, sedangkan $RPN < 112$ dikategorikan sebagai tidak kritis.

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa terdapat dua mode kegagalan yang termasuk kategori kritis, yaitu deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi ($RPN = 168$) dan deviasi dimensi positif (*overbuild*) ($RPN = 150$). Kedua mode kegagalan tersebut menjadi prioritas utama dalam penyusunan usulan perbaikan karena memiliki tingkat risiko tertinggi terhadap kualitas dimensi *mold*. Sementara itu, deviasi dimensi akibat proses *handling* ($RPN = 105$), ketidaksesuaian geometri *mold* ($RPN = 72$), dan deformasi struktur *mold* ($RPN = 63$) termasuk kategori tidak kritis, namun tetap memerlukan pengendalian agar tidak berkembang menjadi penyebab utama kegagalan proses.

4.5 Model FTA (Fault Tree Analysis)

Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi selanjutnya dianalisis lebih mendalam menggunakan metode FTA untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat secara hierarkis serta menentukan akar penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold*.

Metode analisis deduktif yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab terjadinya kegagalan atau cacat pada suatu sistem dengan pendekatan logika sebab-akibat. Pada penelitian ini, FTA digunakan untuk menganalisis penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* yang terdeteksi melalui hasil pengukuran 3D *scanning* pada SCAN 1 sampai SCAN 4. Deviasi dimensi tersebut berdampak langsung terhadap ketidaksesuaian geometri produk *komposit* terhadap model CAD dan spesifikasi desain.

Analisis FTA difokuskan pada mode kegagalan dengan nilai RPN tinggi dan masuk kategori kritis. Selama proses penelitian ditemukan bahwa FMEA sebelumnya.

Mode kegagalan utama yang dianalisis lebih lanjut adalah deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi, karena mode kegagalan ini muncul secara konsisten pada beberapa hasil pemindaian dan memiliki dampak signifikan terhadap kualitas produk *Wing Box Upper Skin Panel*.

4.5.1 Penentuan *Top Event*

Top event dalam analisis FTA ini didefinisikan sebagai:

“*Deviasi dimensi mold Wing Box Upper Skin Panel melebihi toleransi desain.*”

Top event ini diperoleh dari hasil evaluasi data SCAN 1–4, yang menunjukkan adanya penyimpangan dimensi aktual *mold* terhadap model CAD nominal, terutama pada area tertentu yang berpotensi memengaruhi proses bonding dan perakitan panel.

4.5.2 Identifikasi *Intermediate Event* dan Faktor Penyebab

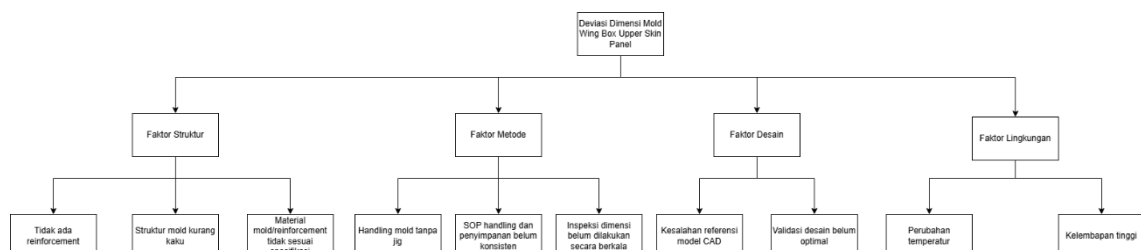
Berdasarkan observasi lapangan, diskusi dengan engineer quality, serta hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4, penyebab terjadinya top event dikelompokkan menjadi empat faktor utama, yaitu struktur *mold* yang tidak cukup kaku, tidak adanya atau kurangnya *reinforcement* pada *mold*, proses *handling* dan penyimpanan *mold* yang menyebabkan perubahan bentuk, serta variasi deviasi dimensi yang terjadi pada hasil pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4.

4.5.3 Identifikasi *Item Basic Event*

Item basic event merupakan kejadian dasar yang secara langsung berkontribusi terhadap terjadinya deviasi dimensi *mold* dan tidak dapat diuraikan lagi ke tingkat penyebab yang lebih rendah. Item basic event dalam penelitian ini diperoleh dari hasil diskusi dan validasi dengan pihak terkait di area produksi *mold*.

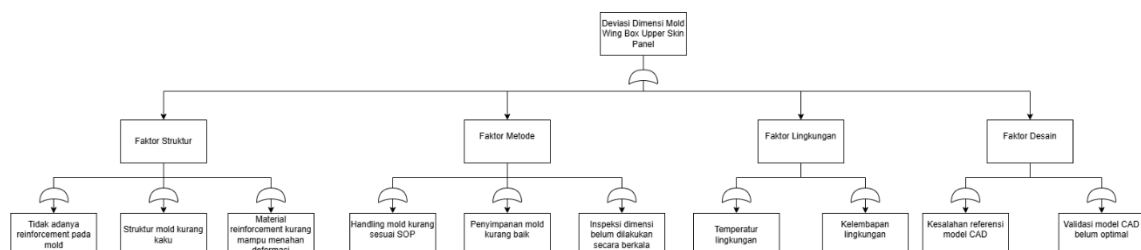
Tabel 4. 11 Item Basic Event Deviasi Dimensi *Mold Wing Box Upper Skin Panel*

No	Kejadian Defect	Item Basic Event
1	Deviasi dimensi <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i>	Tidak adanya <i>reinforcement</i> pada struktur <i>mold</i> .
2		Struktur <i>mold</i> kurang kaku sehingga mudah mengalami deformasi.
3		Proses pemindahan <i>mold</i> tanpa menggunakan jig atau alat penyangga.
4		Handling <i>mold</i> dilakukan secara manual dan tidak terkontrol.
5		SOP handling dan penyimpanan <i>mold</i> belum diterapkan secara konsisten.
6		Perubahan temperatur lingkungan kerja menyebabkan perubahan dimensi <i>mold</i> .
7		Kelembapan lingkungan kerja yang tinggi memengaruhi kestabilan dimensi <i>mold</i> .
8		Kesalahan referensi model CAD saat pembuatan <i>master mold</i> .
9		Material <i>mold</i> atau material <i>reinforcement</i> tidak sesuai spesifikasi teknis.
10		Inspeksi dimensi dan pengendalian kualitas belum dilakukan secara berkala.

Gambar 4. 10 Faktor Penyebab Deviasi Dimensi *Mold Wing Box Upper Skin Panel*

4.5.4 Analisis Hasil *Fault Tree Analysis*

Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* berasal dari faktor struktur, terutama belum adanya *reinforcement* pada struktur *mold* sehingga kekakuan *mold* belum optimal dan lebih mudah mengalami deformasi selama proses produksi maupun *handling*. Selain itu, faktor metode, seperti proses *handling*, penyimpanan *mold*, dan inspeksi dimensi yang belum dilakukan secara berkala, turut berkontribusi terhadap terjadinya penyimpangan dimensi. Faktor lingkungan, berupa perubahan temperatur dan kelembapan, juga memengaruhi kestabilan dimensi *mold*, sedangkan faktor desain, seperti kesalahan referensi dan validasi model CAD yang belum optimal, berpotensi menyebabkan ketidaksesuaian dimensi sejak tahap pembuatan *mold*. Kombinasi dari keempat faktor tersebut menyebabkan deviasi dimensi terdeteksi pada hasil inspeksi SCAN 1, SCAN 2, dan SCAN 3. Setelah dilakukan tindakan perbaikan berupa penambahan *reinforcement* pada struktur *mold*, hasil inspeksi SCAN 4 menunjukkan penurunan jumlah titik di luar batas toleransi, sehingga mengindikasikan bahwa tindakan perbaikan tersebut mampu meningkatkan kekakuan struktur dan kestabilan dimensi *mold*.



Gambar 4. 11 Faktor Penyebab Deviasi Dimensi *Mold Wing Box Upper Skin Panel*

Berdasarkan Diagram Faktor Penyebab Deviasi Dimensi *Mold Wing Box Upper Skin Panel*, diketahui bahwa penyimpangan dimensi pada *mold* dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu struktur, metode, lingkungan, dan desain. Faktor struktur terdiri atas tidak adanya *reinforcement* dan kekakuan struktur *mold* yang belum memadai sehingga *mold* lebih mudah mengalami deformasi. Faktor metode meliputi proses *handling*, penyimpanan *mold*, serta pelaksanaan inspeksi dimensi yang belum optimal. Faktor lingkungan mencakup pengaruh temperatur dan kelembapan yang dapat memengaruhi kestabilan dimensi *mold*, sedangkan faktor desain berkaitan dengan kesalahan referensi dan validasi model CAD pada proses pembuatan *mold*. Keempat faktor tersebut menjadi

dasar dalam penyusunan analisis FMEA dan FTA untuk menentukan penyebab utama deviasi dimensi serta menetapkan prioritas tindakan perbaikan.

Tabel 4. 12 Table 1 *Cut Set*

No	Kode Cut Set	Basic Event
1	{X1}	Tidak adanya reinforcement pada mold
2	{X2}	Struktur mold kurang kaku
3	{X3}	Struktur mold belum memiliki reinforcement yang memadai
4	{X4}	Handling mold kurang sesuai SOP
5	{X5}	Penyimpanan mold kurang baik
6	{X6}	Inspeksi dimensi belum dilakukan secara berkala
7	{X7}	Temperatur lingkungan
8	{X8}	Kelembapan lingkungan
9	{X9}	Kesalahan referensi model CAD

10	{X10}	Validasi model CAD belum optimal
----	-------	----------------------------------

4.6 5W+1H

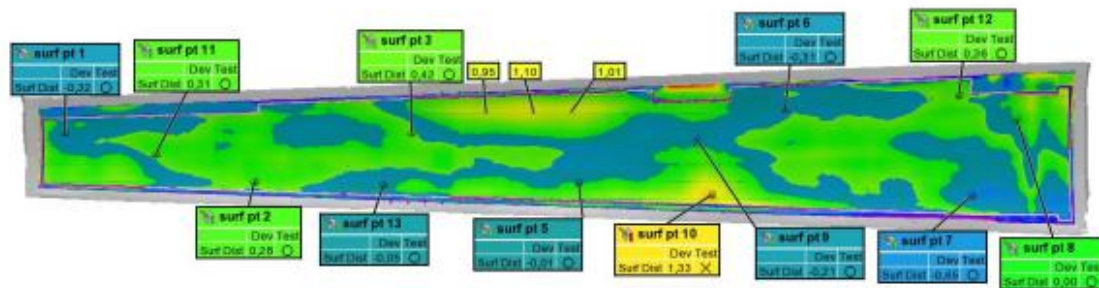
Analisis pada tahapan sebelumnya menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) menunjukkan bahwa jenis kegagalan yang harus diprioritaskan adalah deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* yang melebihi toleransi. Mode kegagalan ini memiliki nilai Risk Priority Number (RPN) tertinggi dan disebabkan oleh beberapa faktor dominan, terutama ketiadaan *reinforcement* pada struktur *mold* serta proses handling dan penyimpanan *mold* yang belum terkontrol dengan baik, yang berdampak langsung pada ketidaksesuaian hasil pengukuran dimensi berdasarkan data SCAN 1 hingga SCAN 4. Hasil pengamatan menunjukkan pada tahap selanjutnya dilakukan analisis untuk merumuskan usulan perbaikan menggunakan metode 5W (*What, Why, Where, When, Who*) dan 1H (*How*). Hasil usulan perbaikan ini diharapkan dapat diterapkan oleh perusahaan sebagai langkah pengendalian kualitas untuk menurunkan tingkat deviasi dimensi *mold*, meningkatkan stabilitas proses produksi, serta memperbaiki kualitas produk *komposit* secara keseluruhan.

Faktor penyebab yang diperoleh dari hasil analisis FTA kemudian dijadikan dasar dalam penyusunan usulan perbaikan menggunakan pendekatan 5W+1H. Pendekatan ini digunakan untuk merumuskan tindakan perbaikan yang sistematis dan aplikatif terhadap penyebab utama deviasi dimensi *mold*.

4.7 Usulan Perbaikan

Berdasarkan hasil analisis FMEA diketahui bahwa *failure mode* dengan tingkat risiko tertinggi adalah deviasi dimensi *mold* melebihi batas toleransi dan deviasi dimensi positif (*overbuild*), sehingga kedua *failure mode* tersebut menjadi prioritas utama untuk dilakukan analisis penyebab menggunakan FTA. Hasil FTA menunjukkan bahwa penyebab dominan berasal dari faktor struktur, khususnya belum adanya *reinforcement* pada struktur *mold*, sehingga kekakuan *mold* belum mampu menahan deformasi yang terjadi selama proses *handling*, penyimpanan, maupun proses produksi. Oleh karena itu,

tindakan perbaikan disusun menggunakan pendekatan 5W+1H dengan memprioritaskan penambahan *reinforcement* sebagai solusi utama untuk mengurangi deviasi dimensi.



Gambar 4. 12 Hasil SCAN 4 setelah penambahan *reinforcement*

Diketahui bahwa penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* berasal dari faktor struktur, khususnya belum adanya *reinforcement* sehingga kekakuan *mold* menjadi kurang optimal dan mudah mengalami deformasi selama proses produksi maupun *handling*. Oleh karena itu, tindakan perbaikan diprioritaskan pada penambahan *reinforcement* sebagai solusi untuk meningkatkan kekakuan struktur *mold*. Setelah usulan perbaikan tersebut diimplementasikan, dilakukan inspeksi ulang menggunakan Hexagon 3D Scanner dan analisis *PolyWorks* yang ditampilkan pada hasil SCAN 4 untuk mengevaluasi efektivitas tindakan perbaikan terhadap penurunan deviasi dimensi.

Implementasi usulan perbaikan tersebut kemudian dievaluasi melalui proses inspeksi ulang menggunakan Hexagon 3D Scanner yang dianalisis dengan perangkat lunak *PolyWorks* pada SCAN 4. Hasil inspeksi menunjukkan adanya peningkatan kualitas dimensi *mold* dibandingkan hasil inspeksi sebelumnya. Dari 13 titik ukur yang diperiksa pada SCAN 4, 12 titik (92,3%) berada dalam batas toleransi (*Pass*) dan hanya 1 titik (7,7%) yang masih berada di luar batas toleransi (*Fail*). Titik yang masih mengalami penyimpangan berada pada *Surface Point* 10 dengan nilai deviasi sebesar 1,33 mm, sehingga melebihi batas toleransi $\pm 1,00$ mm sebesar 0,33 mm. Sementara itu, seluruh titik pengukuran lainnya telah memenuhi spesifikasi dimensi yang ditetapkan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *reinforcement* mampu meningkatkan kekakuan struktur *mold* sehingga deformasi dapat diminimalkan dan jumlah titik yang berada di luar batas toleransi mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan hasil inspeksi pada SCAN 1, SCAN 2, dan SCAN 3. Dengan demikian,

tindakan perbaikan yang diusulkan terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* dan mendukung proses produksi komponen *komposit* yang lebih presisi. Meskipun demikian, titik yang masih berada di luar toleransi perlu menjadi perhatian melalui evaluasi lanjutan terhadap proses *handling*, penyimpanan, serta inspeksi berkala agar seluruh titik pengukuran dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.

a. Usulan Perbaikan Faktor Struktur *Mold* Tidak Cukup Kaku

Tabel 4. 13 Faktor Struktur *Mold* Tidak Cukup Kaku

Jenis	5W+1H	Deskripsi
Tujuan Utama	<i>What</i>	1. Meningkatkan kekakuan struktur <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i> agar stabil terhadap beban proses produksi. 2. Mengurangi deviasi dimensi <i>mold</i> yang terdeteksi pada hasil pengukuran SCAN 1–SCAN 4.
Alasan Kegunaan	<i>Why</i>	1. Struktur <i>mold</i> yang tidak cukup kaku menyebabkan deformasi saat proses produksi dan handling. 2. Deformasi struktur berkontribusi langsung terhadap ketidaksesuaian dimensi produk <i>komposit</i> .
Lokasi	<i>Where</i>	Area produksi dan area penyimpanan <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i> .
Waktu Pelaksanaan	<i>When</i>	Sebelum proses produksi dimulai dan saat evaluasi hasil inspeksi dimensi <i>mold</i> .
Pihak Terkait	<i>Who</i>	Tim engineering, operator produksi, dan quality control.

Metode Perbaikan	<i>How</i>	1. Menambahkan <i>reinforcement</i> pada struktur <i>mold</i> untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas. 2. Melakukan evaluasi desain struktur <i>mold</i> berdasarkan hasil deviasi dimensi. 3. Melakukan inspeksi berkala terhadap deformasi <i>mold</i> setelah penggunaan. 4. Mengontrol distribusi beban saat proses produksi dan handling <i>mold</i>.
------------------	------------	--

Struktur *mold* yang tidak cukup kaku merupakan penyebab utama terjadinya deformasi bentuk yang berdampak langsung pada deviasi dimensi produk *komposit Wing Box Upper Skin Panel*. Berdasarkan hasil pengukuran deviasi dimensi pada SCAN 1 hingga SCAN 4, perubahan bentuk *mold* terjadi akibat ketidakmampuan struktur menahan beban proses produksi dan handling. Kondisi ini menunjukkan bahwa stabilitas struktur *mold* belum optimal sehingga diperlukan peningkatan kekakuan melalui penambahan *reinforcement* serta evaluasi desain struktur. Hasil pengamatan menunjukkan usulan perbaikan difokuskan pada penguatan struktur *mold* dan pengendalian kondisi operasional agar deformasi dapat diminimalkan dan akurasi dimensi produk dapat terjaga secara konsisten.

b. Usulan Perbaikan Faktor Tidak Ada / Kurang *Reinforcement* pada *Mold*

Tabel 4. 14 Faktor Tidak Ada / Kurang *Reinforcement* pada *Mold*

Jenis	5W+1H	Deskripsi
Tujuan Utama	<i>What</i>	1. Menambah kekuatan dan kekakuan struktur <i>mold</i> melalui <i>reinforcement</i> yang memadai. 2. Mengurangi deformasi <i>mold</i> yang menyebabkan deviasi dimensi produk <i>komposit</i>.
Alasan Kegunaan	<i>Why</i>	1. Ketiadaan atau kekurangan <i>reinforcement</i> membuat struktur <i>mold</i> tidak stabil saat menerima beban proses dan handling.

		2. Struktur yang lemah meningkatkan risiko perubahan bentuk dan ketidaksesuaian dimensi.
Lokasi	<i>Where</i>	Area produksi <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i> dan area inspeksi dimensi.
Waktu Pelaksanaan	<i>When</i>	Sebelum proses produksi berjalan dan saat evaluasi hasil inspeksi dimensi <i>mold</i> .
Pihak Terkait	<i>Who</i>	Tim engineering, operator produksi, dan quality control.
Metode Perbaikan	<i>How</i>	1. Mendesain dan memasang <i>reinforcement</i> tambahan pada bagian struktur yang mengalami deformasi. 2. Menentukan posisi <i>reinforcement</i> Selama proses penelitian ditemukan bahwa deviasi dimensi SCAN 1–SCAN 4. 3. Melakukan verifikasi kekakuan struktur setelah penambahan <i>reinforcement</i>. 4. Menetapkan prosedur inspeksi berkala terhadap kondisi struktur <i>mold</i>.

Ketiadaan atau kekurangan *reinforcement* pada struktur *mold* menyebabkan kemampuan menahan beban proses menjadi rendah sehingga *mold* mudah mengalami deformasi. Hal ini terbukti dari hasil pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4 yang menunjukkan penyimpangan dimensi pada area tertentu. Hasil pengamatan menunjukkan penambahan *reinforcement* dan evaluasi posisi penguat menjadi langkah utama untuk meningkatkan stabilitas struktur *mold*, menjaga akurasi dimensi, serta menekan potensi cacat pada produk *komposit*.

c. Usulan Perbaikan Faktor Handling dan Penyimpanan *Mold*

Tabel 4. 15 Faktor Handling dan Penyimpanan *Mold*

Jenis	5W+1H	Deskripsi
Tujuan Utama	<i>What</i>	1. Menjaga stabilitas bentuk <i>mold</i> selama proses handling dan penyimpanan. 2. Mengurangi deviasi dimensi <i>mold</i> akibat deformasi non-proses.
Alasan Kegunaan	<i>Why</i>	1. Handling yang tidak terkendali dapat menyebabkan beban tidak merata pada struktur <i>mold</i>. 2. Penyimpanan tanpa penyangga yang tepat meningkatkan risiko perubahan bentuk permanen.
Lokasi	<i>Where</i>	Area produksi, area pemindahan <i>mold</i> , dan area penyimpanan <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i> .
Waktu Pelaksanaan	<i>When</i>	Saat pemindahan <i>mold</i> , setelah proses produksi, dan selama penyimpanan.
Pihak Terkait	<i>Who</i>	Operator produksi, tim handling material, dan quality control.
Metode Perbaikan	<i>How</i>	1. Menetapkan prosedur handling <i>mold</i> menggunakan alat bantu dan titik angkat yang terstandar. 2. Menyediakan jig atau penyangga khusus untuk menjaga bentuk <i>mold</i> saat penyimpanan. 3. Mengontrol posisi dan distribusi beban <i>mold</i> selama penyimpanan. 4. Melakukan inspeksi dimensi <i>mold</i> setelah handling dan sebelum digunakan kembali.

Proses handling dan penyimpanan *mold* yang tidak terkendali dapat menimbulkan distribusi beban yang tidak merata pada struktur, sehingga *mold* mengalami perubahan

bentuk secara bertahap. Hasil pengukuran deviasi dimensi pada SCAN 1 hingga SCAN 4 menunjukkan bahwa deformasi tidak hanya terjadi saat proses produksi, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi pemindahan dan penyimpanan *mold*. Hasil pengamatan menunjukkan pengendalian prosedur handling serta penggunaan sistem penyangga yang sesuai menjadi langkah penting untuk menjaga stabilitas bentuk *mold* dan mempertahankan akurasi dimensi produk *komposit*.

d. Usulan Perbaikan Variasi Deviasi Dimensi SCAN 1–SCAN 4

Tabel 4. 16 Variasi Deviasi Dimensi

Jenis	5W+1H	Deskripsi
Tujuan Utama	<i>What</i>	1. Menstabilkan hasil dimensi <i>mold</i> agar konsisten pada setiap pengukuran. 2. Mengurangi variasi deviasi antar proses produksi.
Alasan Kegunaan	<i>Why</i>	1. Perbedaan deviasi antar SCAN menunjukkan proses dan kondisi <i>mold</i> belum stabil. 2. Variasi bentuk <i>mold</i> berpotensi menurunkan akurasi dan kualitas produk <i>komposit</i> .
Lokasi	<i>Where</i>	Area produksi <i>mold</i> , area inspeksi dimensi, dan area penyimpanan <i>mold Wing Box Upper Skin Panel</i> .
Waktu Pelaksanaan	<i>When</i>	Sebelum produksi, saat proses berlangsung, dan setelah inspeksi dimensi setiap siklus produksi.
Pihak Terkait	<i>Who</i>	Tim engineering, operator produksi, dan quality control.
Metode Perbaikan	<i>How</i>	1. Melakukan evaluasi tren deviasi berdasarkan hasil SCAN 1–SCAN 4 untuk mengidentifikasi area deformasi dominan. 2. Menetapkan standar kondisi operasional yang konsisten (posisi <i>mold</i> , metode penyanggaan, dan urutan proses).

		3. Melakukan kalibrasi dan verifikasi alat ukur 3D <i>scanner</i> secara berkala. 4. Menerapkan inspeksi dimensi berkala pada titik kritis <i>mold</i> sebelum dan sesudah produksi.
--	--	--

Perbedaan nilai deviasi dimensi pada SCAN 1 hingga SCAN 4 menunjukkan bahwa kondisi *mold* dan proses produksi belum stabil, sehingga perubahan bentuk terjadi secara tidak konsisten. Variasi ini mengindikasikan adanya pengaruh kondisi operasional, struktur *mold*, serta metode penyanggaan yang belum seragam pada setiap siklus produksi. Hasil pengamatan menunjukkan diperlukannya evaluasi tren deviasi untuk menentukan area kritis, penetapan standar proses yang konsisten, serta penguatan sistem inspeksi dimensi secara berkala. Melalui pengendalian variasi ini, stabilitas bentuk *mold* dapat ditingkatkan dan ketepatan dimensi produk *komposit* dapat lebih terjamin.

Tabel 4. 17 Usulan Perbaikan Berdasarkan Hasil FMEA dan FTA

No	Penyebab Utama	Usulan Perbaikan	Tujuan
1	Tidak adanya <i>reinforcement</i> pada struktur <i>mold</i>	Menambahkan <i>reinforcement</i> berbahan baja pada bagian bawah dan sisi <i>mold</i> untuk meningkatkan kekakuan struktur.	Mengurangi deformasi dan menjaga kestabilan dimensi <i>mold</i> .
2	Struktur <i>mold</i> kurang kaku	Mendesain ulang konfigurasi <i>reinforcement</i> agar distribusi beban lebih merata selama proses produksi.	Meningkatkan kekuatan struktur <i>mold</i> .
3	<i>Handling</i> dan penyimpanan <i>mold</i> belum optimal	Menyusun dan menerapkan SOP <i>handling</i> serta menggunakan <i>jig</i> atau penyangga saat pemindahan <i>mold</i> .	Mencegah perubahan dimensi akibat proses pemindahan dan penyimpanan.

4	Variasi deviasi dimensi berdasarkan hasil inspeksi SCAN 1–SCAN 4	Melakukan evaluasi dan analisis hasil inspeksi setiap SCAN sebagai dasar tindakan perbaikan berkelanjutan terhadap struktur <i>mold</i> dan proses produksi.	Variasi deviasi dimensi antar hasil inspeksi dapat dikurangi sehingga kualitas dimensi <i>mold</i> menjadi lebih konsisten.
---	--	--	---

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan FTA, tindakan perbaikan difokuskan pada penyebab yang memiliki pengaruh paling besar terhadap terjadinya deviasi dimensi, yaitu belum adanya *reinforcement* pada struktur *mold*. Penambahan *reinforcement* dipilih karena secara langsung meningkatkan kekakuan struktur sehingga *mold* lebih mampu mempertahankan kestabilan dimensinya selama proses produksi, *handling*, dan penyimpanan. Selain itu, penerapan SOP *handling* dan penyimpanan dilakukan sebagai tindakan pendukung untuk mengurangi risiko deformasi akibat perlakuan terhadap *mold*.

Efektivitas tindakan perbaikan tersebut dievaluasi melalui hasil inspeksi menggunakan Hexagon *3D Scanner* dan analisis *PolyWorks* pada SCAN 4. Hasil inspeksi menunjukkan bahwa jumlah titik yang berada di luar batas toleransi mengalami penurunan dibandingkan hasil inspeksi sebelumnya. Dari 13 titik ukur, 12 titik (92,3%) telah memenuhi batas toleransi dan hanya 1 titik (7,7%) yang masih berada di luar batas toleransi. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *reinforcement* mampu meningkatkan kestabilan dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel*, sehingga usulan perbaikan yang diterapkan dinilai efektif dalam mengurangi deviasi dimensi.

BAB V

PEMBAHASAN atau PENGUJIAN SISTEM DAN PEMBAHASAN

5.1 Tahap Define

Tahap define bertujuan untuk mendefinisikan permasalahan kualitas yang terjadi pada proses pembuatan *mold komposit Wing Box Upper Skin Panel* di PT KARYATAMA KOMPOSIT INDUSTRI (PT Karyatama). Berdasarkan standar kualitas perusahaan, *mold komposit* diberikan batas toleransi kecacatan sebesar 3% terhadap keseluruhan hasil inspeksi dimensi. Toleransi ini ditetapkan untuk menjamin kesesuaian dimensi *mold* terhadap desain CAD serta menjaga kualitas produk *komposit* yang dihasilkan.

Namun, berdasarkan hasil inspeksi dimensi menggunakan 3D *Scanner* (*PolyWorks*) pada SCAN 1 sampai SCAN 4, ditemukan bahwa jumlah titik ukur yang mengalami deviasi dimensi melebihi toleransi mencapai $\pm 5\%$, sehingga melampaui batas toleransi yang telah ditetapkan. Deviasi tersebut terutama terjadi pada area *mold* yang tidak memiliki kekakuan struktur yang memadai, sehingga menyebabkan perubahan bentuk *mold* selama proses *molding* dan *handling*.

Hasil pemetaan proses menggunakan metode IDEF0 pada diagram A-0 dan A0 menunjukkan bahwa tahapan proses *molding*, *handling mold*, serta inspeksi dimensi merupakan tahapan kritis yang berkontribusi terhadap terjadinya deviasi dimensi. Hasil pengamatan menunjukkan permasalahan deviasi dimensi *mold* yang melebihi toleransi menjadi fokus utama dalam penelitian ini untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FMEA, FTA, dan 5W+1H.

5.2 Analisis Defect Produk

Selama proses penelitian ditemukan bahwa data inspeksi dimensi *mold* dari SCAN 1–4, diperoleh beberapa jenis *defect* utama yang menyebabkan ketidaksesuaian dimensi *mold* terhadap desain CAD. Secara keseluruhan, persentase kecacatan dimensi *mold* tercatat sebesar $\pm 5\%$, yang melebihi toleransi kecacatan sebesar 3% yang ditetapkan oleh perusahaan.

Jenis *defect* dengan kontribusi tertinggi adalah deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi, dengan persentase terbesar dibandingkan jenis *defect* lainnya. Berdasarkan hasil

FMEA, mode kegagalan ini memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 168, yang disebabkan oleh tidak adanya *reinforcement* pada struktur *mold*, sehingga *mold* mengalami deformasi saat proses *molding* dan *handling*. Mode kegagalan ini menjadi *defect* dominan karena langsung berdampak pada ketidaksesuaian dimensi produk *komposit* yang dihasilkan.

Jenis *defect* berikutnya adalah deviasi dimensi akibat faktor lingkungan, dengan persentase yang cukup signifikan dan nilai RPN sebesar 150, yang disebabkan oleh perubahan temperatur dan kelembapan lingkungan kerja yang tidak terkontrol. Selanjutnya, *defect* ketidakrataan permukaan *mold* memiliki nilai RPN sebesar 105, yang disebabkan oleh kekakuan struktur *mold* yang rendah.

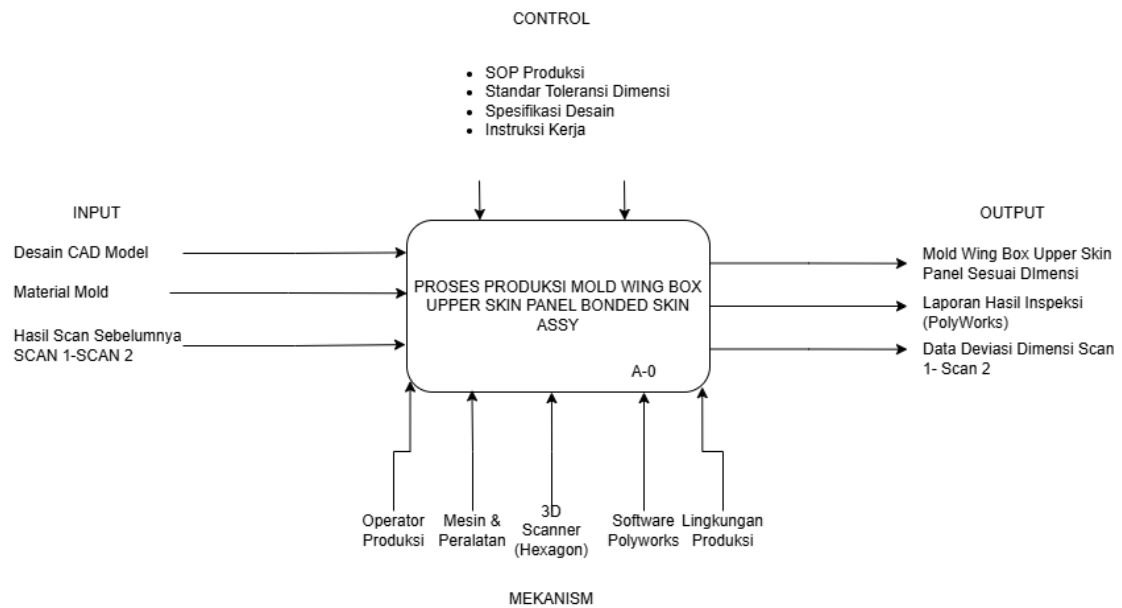
Sementara itu, jenis *defect* dengan persentase lebih rendah antara lain ketidaksesuaian geometri *mold* dengan nilai RPN sebesar 72 dan deformasi struktur *mold* akibat beban kerja dan umur pemakaian dengan nilai RPN sebesar 63, yang dikategorikan sebagai *defect* tidak kritis.

Selama proses penelitian ditemukan bahwa tersebut, dapat disimpulkan bahwa deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi merupakan *defect* dengan persentase tertinggi dan tingkat risiko paling besar, sehingga perlu menjadi prioritas utama dalam perbaikan proses. Penyebab utama *defect* ini kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengidentifikasi akar permasalahan, serta dirumuskan usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H guna menurunkan persentase kecacatan dan meningkatkan kualitas *mold komposit* secara keseluruhan.

5.3 Analisis IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling)

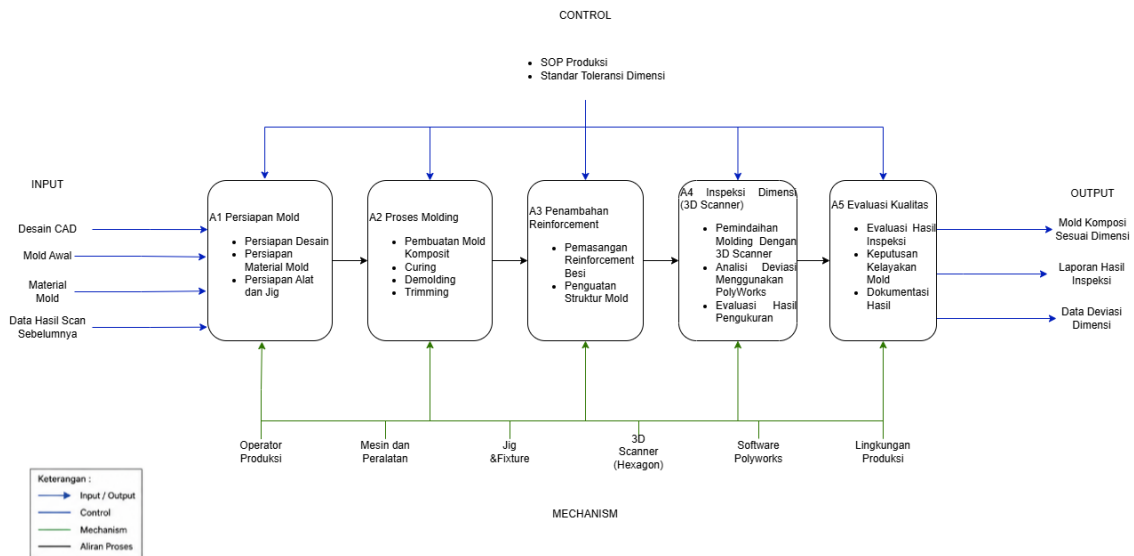
Metode IDEF0 digunakan untuk memetakan aktivitas dan aliran proses produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel* secara sistematis sehingga dapat diketahui hubungan antara input, kontrol, mekanisme, dan output pada setiap tahapan proses. Pemetaan proses ini diperlukan untuk memahami aktivitas yang berpotensi menimbulkan deviasi dimensi *mold* yang terdeteksi pada hasil pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4. Dengan menggunakan IDEF0, aliran proses produksi dapat dianalisis secara menyeluruh sehingga mempermudah identifikasi mode kegagalan yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode FMEA.

Pada level konteks (A-0), sistem produksi *mold komposit Wing Box Upper Skin Panel* memiliki input berupa desain CAD dan *mold* awal. Proses produksi dikendalikan oleh SOP produksi dan standar toleransi dimensi yang telah ditetapkan perusahaan. Aktivitas produksi dijalankan dengan dukungan operator, peralatan produksi, serta sistem pengukuran menggunakan 3D *Scanner* dan perangkat lunak *PolyWorks*. Output yang dihasilkan berupa *mold komposit* yang memiliki dimensi sesuai dengan spesifikasi desain.



Gambar 5. 1 IDEF0 Level A-0 Sistem Produksi *Mold Komposit*

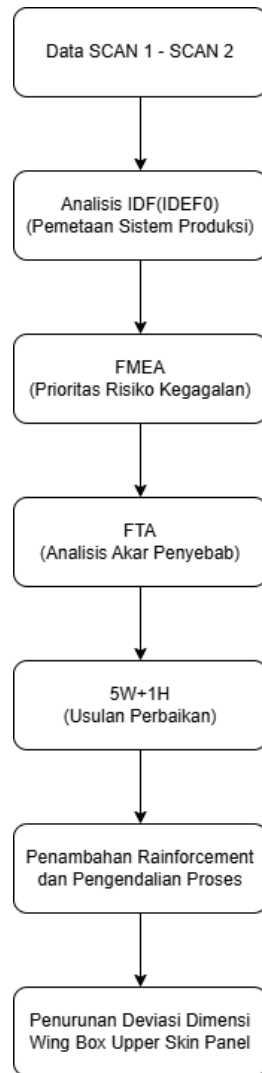
Selanjutnya, proses produksi pada diagram A-0 diuraikan lebih rinci menjadi beberapa aktivitas utama pada level A0 yang meliputi persiapan *mold*, proses *molding*, penambahan *reinforcement*, inspeksi dimensi menggunakan 3D *Scanner*, serta evaluasi kualitas hasil produksi. Setiap aktivitas saling berkaitan dan mempengaruhi kualitas dimensi *mold* yang dihasilkan.



Gambar 5. 2 Diagram IDEF0 Level A0 Produksi *Mold*

Berdasarkan diagram IDEF0 level A0, diketahui bahwa proses produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel* terdiri atas lima aktivitas utama, yaitu persiapan *mold* (A1), proses *molding* (A2), penambahan *reinforcement* (A3), inspeksi dimensi menggunakan 3D Scanner dan PolyWorks (A4), serta evaluasi kualitas (A5). Hasil pemetaan proses ini menunjukkan bahwa kualitas dimensi *mold* tidak hanya dipengaruhi oleh proses *molding*, tetapi juga oleh kekakuan struktur *mold*, proses handling, dan tahapan inspeksi dimensi.

Selain itu, hasil pengukuran pada SCAN 1 sampai SCAN 4 menunjukkan adanya variasi deviasi dimensi yang mengindikasikan bahwa stabilitas struktur *mold* belum sepenuhnya terjaga selama proses produksi. Hasil pengamatan menunjukkan hasil analisis menggunakan IDEF0 menjadi dasar dalam mengidentifikasi mode kegagalan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Melalui FMEA, setiap potensi kegagalan yang terjadi pada tahapan proses produksi dapat dianalisis berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemampuan deteksi, sehingga diperoleh prioritas perbaikan yang selanjutnya ditelusuri akar penyebabnya menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan dirumuskan usulan perbaikan melalui pendekatan 5W+1H.



Gambar 5. 3 Hubungan Metode Penelitian yang Digunakan

Diagram ini menunjukkan hubungan antar metode penelitian yang digunakan. Data hasil pengukuran deviasi dimensi dari SCAN 1 hingga SCAN 4 dianalisis menggunakan IDEF0 untuk memetakan sistem produksi *mold Wing Box Upper Skin Panel*. Selanjutnya, metode FMEA digunakan untuk menentukan prioritas risiko kegagalan berdasarkan nilai RPN. Mode kegagalan yang memiliki risiko tertinggi dianalisis lebih lanjut menggunakan FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan. Selama proses penelitian ditemukan bahwa tersebut, disusun usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H yang difokuskan pada penambahan *reinforcement* dan pengendalian proses, sehingga diharapkan dapat menurunkan deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel*.

5.4 Analisis Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Hasil pengukuran deviasi dimensi pada SCAN 1 hingga SCAN 4 menunjukkan adanya ketidaksesuaian dimensi *mold* terhadap model CAD. Data deviasi tersebut digunakan sebagai dasar identifikasi mode kegagalan pada analisis FMEA untuk menentukan prioritas risiko penyebab penyimpangan dimensi.

Selama proses penelitian ditemukan bahwa *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) terhadap proses pembuatan *mold komposit Wing Box Upper Skin Panel*, diperoleh beberapa mode kegagalan yang memiliki tingkat risiko berbeda-beda. Penentuan tingkat risiko dilakukan dengan menghitung nilai Risk Priority Number (RPN) dari setiap mode kegagalan yang teridentifikasi berdasarkan data inspeksi dimensi SCAN 1 sampai SCAN 4. Nilai RPN digunakan sebagai dasar untuk menentukan prioritas perbaikan, di mana semakin tinggi nilai RPN maka semakin besar tingkat risiko kegagalan yang harus segera ditangani.

Mode Kegagalan dengan RPN Tertinggi (RPN = 168 – Kategori Kritis)

Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi sebesar 168 adalah deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi yang disebabkan oleh tidak adanya *reinforcement* pada struktur *mold*. Kegagalan ini dikategorikan sebagai kritis karena memiliki dampak langsung terhadap ketidaksesuaian dimensi *mold* dengan desain CAD. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan 3D *Scanner* dan analisis *PolyWorks* pada SCAN 1–4, ditemukan deviasi dimensi yang dominan pada area *mold* yang memiliki kekakuan struktur rendah.

Dari sudut pandang FMEA, kegagalan ini memiliki nilai severity yang tinggi karena berpotensi menyebabkan produk *komposit* yang dihasilkan tidak memenuhi spesifikasi dimensi dan dapat berujung pada penolakan produk. Nilai occurrence juga relatif tinggi karena kondisi *mold* tanpa *reinforcement* sering mengalami deformasi selama proses *molding* dan *handling*. Selain itu, nilai detection masih tergolong sedang karena deviasi baru teridentifikasi secara menyeluruh setelah dilakukan inspeksi dimensi menggunakan alat ukur 3D. Mode kegagalan ini kemudian menjadi titik kritis utama dalam penelitian dan dianalisis lebih lanjut menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengidentifikasi akar penyebabnya secara detail.

Mode Kegagalan dengan RPN Tinggi Kedua (RPN = 150 – Kategori Kritis)

Mode kegagalan berikutnya dengan nilai RPN sebesar 150 adalah ketidakrataan permukaan mold yang disebabkan oleh struktur mold yang tidak cukup kaku. Kegagalan ini termasuk kategori kritis karena struktur mold yang memiliki kekakuan rendah cenderung mengalami deformasi selama proses produksi maupun proses handling. Akibatnya, permukaan mold menjadi tidak stabil dan menghasilkan penyimpangan dimensi terhadap model CAD.

Dari hasil pengukuran menggunakan 3D Scanner dan analisis PolyWorks pada SCAN 1 hingga SCAN 4, ditemukan bahwa area tertentu pada mold mengalami perubahan bentuk secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa struktur mold belum mampu mempertahankan kestabilan geometri secara optimal. Oleh karena itu, faktor kekakuan struktur mold menjadi salah satu prioritas perbaikan setelah faktor kurangnya reinforcement.

Hasil pemetaan proses menggunakan diagram IDEF0 A-0 dan A0 menunjukkan bahwa faktor lingkungan berada di luar kontrol langsung proses inti, namun memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil akhir *mold*. Nilai severity kegagalan ini cukup tinggi karena berdampak pada perubahan dimensi *mold* secara gradual, sedangkan nilai occurrence tinggi karena fluktuasi temperatur dan kelembapan sering terjadi di area produksi dan penyimpanan *mold*. Mode kegagalan ini diperkuat oleh hasil FTA yang menunjukkan bahwa faktor lingkungan menjadi salah satu cabang utama penyebab deviasi dimensi *mold*.

Mode Kegagalan dengan RPN Tinggi Ketiga (RPN = 105 – Kategori Kritis, RPN Rata-rata)

Mode kegagalan deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi juga memiliki nilai RPN rata-rata sebesar 105, yang diperoleh dari dua penyebab utama, yaitu tidak adanya *reinforcement* struktur *mold* (RPN 168) dan proses handling serta penyimpanan *mold* yang tidak terkontrol (RPN 105). Nilai RPN rata-rata ini digunakan untuk memberikan gambaran risiko keseluruhan dari satu mode kegagalan yang dipengaruhi oleh lebih dari satu faktor penyebab.

Nilai RPN rata-rata sebesar 105 ini tetap berada di atas batas kategori kritis yang telah ditetapkan dalam penelitian, sehingga mode kegagalan ini tetap diklasifikasikan

sebagai kritis. Penggunaan RPN rata-rata memberikan pendekatan yang lebih objektif dalam menentukan prioritas perbaikan, karena mencerminkan kontribusi gabungan dari beberapa penyebab kegagalan. Mode kegagalan ini menjadi fokus utama dalam penyusunan usulan perbaikan karena memiliki dampak langsung terhadap kualitas *mold* dan produk *komposit* yang dihasilkan.

Mode Kegagalan Tidak Kritis (RPN < 100)

Beberapa mode kegagalan lainnya, seperti ketidaksesuaian geometri *mold* akibat kesalahan referensi CAD dengan nilai RPN sebesar 72 dan deformasi struktur *mold* akibat beban kerja dan umur pemakaian dengan nilai RPN sebesar 63, dikategorikan sebagai tidak kritis. Meskipun demikian, mode kegagalan ini tetap perlu diperhatikan dalam jangka panjang sebagai bagian dari upaya peningkatan kualitas berkelanjutan.

Keterkaitan dengan Diagram dan Analisis Lanjutan

Berdasarkan urutan nilai RPN tertinggi, dapat disimpulkan bahwa permasalahan struktur *mold* dan faktor lingkungan merupakan penyebab dominan terjadinya deviasi dimensi *mold*. Hasil ini selaras dengan pemetaan proses pada diagram IDEF0 A-0 dan A0, yang menunjukkan bahwa tahapan proses *molding*, *handling*, dan inspeksi dimensi merupakan titik kritis dalam sistem produksi. Mode kegagalan yang masuk kategori kritis selanjutnya dianalisis lebih lanjut menggunakan FTA untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan secara sistematis, serta dirumuskan usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H dengan fokus utama pada penambahan *reinforcement* besi, pengendalian lingkungan kerja, dan perbaikan prosedur *handling mold*.

5.5 Analisis Fault Tree Analysis (FTA)

Setelah dilakukan analisis menggunakan metode (FMEA), diketahui bahwa mode kegagalan yang memiliki tingkat risiko tertinggi pada proses pembuatan *mold Wing Box Upper Skin Panel* adalah terjadinya deviasi dimensi *mold* melebihi batas toleransi. Nilai RPN tertinggi sebesar 168 menunjukkan bahwa kegagalan tersebut menjadi prioritas utama untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FTA. Metode FTA digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab terjadinya kegagalan secara sistematis berdasarkan hubungan sebab-akibat dari kejadian puncak (*top event*) hingga kejadian dasar (*basic event*).

Top event pada penelitian ini adalah deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* melebihi toleransi. Berdasarkan hasil observasi lapangan, analisis hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4, serta diskusi dengan pihak engineering dan operator produksi, diperoleh beberapa faktor utama yang mempengaruhi terjadinya deviasi dimensi tersebut, yaitu faktor struktur *mold*, faktor *reinforcement*, faktor handling dan penyimpanan *mold*, serta variasi deviasi dimensi yang terjadi selama beberapa siklus proses produksi. Faktor-faktor tersebut kemudian diuraikan menjadi beberapa basic event yang menjadi penyebab utama terjadinya ketidakstabilan dimensi *mold*.

5.5.1 Faktor Struktur *Mold* Tidak Cukup Kaku

Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa salah satu penyebab utama deviasi dimensi *mold* adalah struktur *mold* yang tidak memiliki kekakuan yang memadai. Kondisi ini menyebabkan *mold* mengalami deformasi ketika menerima beban selama proses produksi maupun pada saat pemindahan. Struktur yang kurang kaku menyebabkan distribusi beban pada *mold* tidak merata sehingga terjadi perubahan bentuk secara bertahap. Selain itu, deformasi yang terjadi selama proses produksi secara berulang mengakibatkan perubahan dimensi pada beberapa area kritis yang terlihat pada hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4.

Basic event yang menyebabkan struktur *mold* tidak cukup kaku meliputi:

1. Kekakuan struktur *mold* masih rendah.
2. Distribusi beban pada struktur *mold* tidak merata.
3. Terjadi deformasi selama proses produksi berlangsung.

Kondisi tersebut mengakibatkan struktur *mold* menjadi tidak stabil sehingga berkontribusi langsung terhadap munculnya deviasi dimensi yang melebihi batas toleransi.

5.5.2 Faktor Tidak Adanya atau Kurangnya *Reinforcement* pada *Mold*

Selama proses penelitian ditemukan bahwa FTA, faktor dominan lainnya adalah tidak adanya atau kurangnya *reinforcement* pada struktur *mold*. Pada desain awal *mold*, beberapa bagian struktur belum dilengkapi dengan *reinforcement* yang cukup sehingga kekuatan *mold* dalam menahan beban proses menjadi rendah. Beban yang diterima secara

berulang selama proses produksi menyebabkan terjadinya deformasi lokal pada beberapa area tertentu.

Basic event yang menyebabkan kondisi tersebut antara lain:

1. Desain awal *mold* belum menggunakan *reinforcement* yang memadai.
2. Struktur *mold* menerima beban berulang selama proses produksi.
3. Terjadi deformasi lokal pada area yang memiliki kekakuan rendah.

Kurangnya *reinforcement* menyebabkan struktur *mold* kehilangan kestabilannya dan menghasilkan penyimpangan dimensi yang terdeteksi pada hasil inspeksi SCAN 1 sampai SCAN 4. Faktor ini juga menjadi penyebab dengan nilai RPN tertinggi sehingga menjadi prioritas utama dalam penyusunan usulan perbaikan.

5.5.3 Faktor Handling dan Penyimpanan Mold

Hasil analisis FTA juga menunjukkan bahwa proses handling dan penyimpanan *mold* memiliki pengaruh terhadap perubahan bentuk *mold*. Aktivitas pemindahan *mold* yang dilakukan tanpa jig atau penyangga yang memadai dapat menyebabkan pembebanan tidak merata pada struktur *mold*. Selain itu, kondisi penyimpanan yang kurang baik menyebabkan *mold* menerima beban tambahan yang dapat mengakibatkan deformasi secara perlahan.

Basic event yang mempengaruhi faktor ini terdiri dari:

1. Pemindahan *mold* tanpa menggunakan jig atau penyangga.
2. Posisi penyimpanan *mold* tidak rata.
3. Terjadinya beban berlebih selama proses handling dan penyimpanan.

Akibat dari kondisi tersebut, bentuk *mold* mengalami perubahan secara bertahap sehingga menyebabkan hasil pengukuran dimensi pada SCAN 1, SCAN 2, SCAN 3, dan SCAN 4 menunjukkan penyimpangan yang berbeda pada setiap siklus pengukuran.

5.5.4 Faktor Variasi Deviasi Dimensi Berdasarkan Hasil SCAN 1–SCAN 4

Analisis terhadap hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4 menunjukkan bahwa besarnya deviasi dimensi pada *mold* tidak selalu sama pada setiap pengukuran. Perbedaan nilai deviasi tersebut mengindikasikan bahwa kondisi *mold* belum stabil dan masih

mengalami perubahan bentuk selama proses produksi berlangsung. Variasi deviasi yang terjadi menunjukkan adanya deformasi kumulatif akibat pengaruh struktur *mold*, pembebanan, serta kondisi operasional yang berbeda pada setiap siklus produksi.

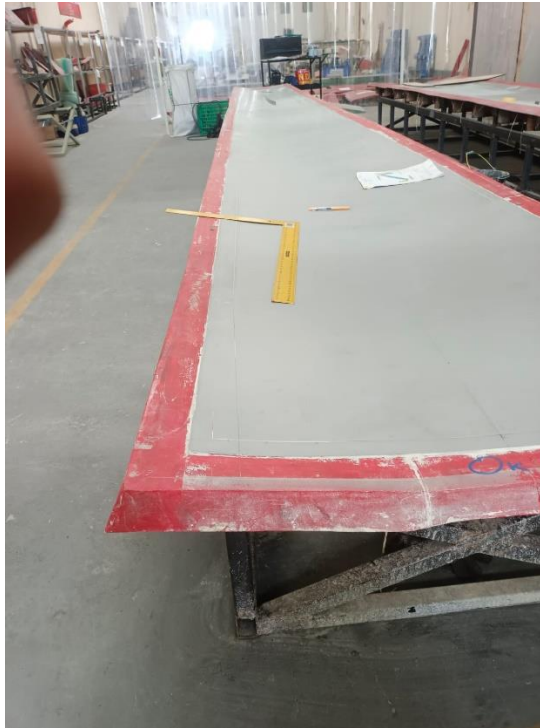
Basic event yang menyebabkan variasi deviasi dimensi antara lain:

1. Terjadi perubahan bentuk *mold* pada setiap siklus penggunaan.
2. Adanya deformasi kumulatif akibat pembebanan berulang.
3. Perbedaan kondisi operasional selama proses produksi.

Hasil pengukuran SCAN 1 hingga SCAN 4 memperlihatkan bahwa beberapa area *mold* mengalami perubahan dimensi secara bertahap, yang menunjukkan bahwa stabilitas struktur *mold* masih belum optimal.

5.5.5 Pembahasan Hasil FTA

Selama proses penelitian ditemukan bahwa FTA, dapat diketahui bahwa penyebab utama terjadinya deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* berasal dari ketidakcukupan kekakuan struktur *mold* serta tidak adanya *reinforcement* yang memadai pada beberapa bagian struktur. Selain itu, faktor handling dan penyimpanan *mold* yang kurang terkontrol turut mempercepat terjadinya deformasi, sehingga menyebabkan nilai deviasi yang berbeda pada hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4. Variasi hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk *mold* terjadi secara bertahap akibat kombinasi pengaruh struktur, pembebanan, dan kondisi operasional selama proses produksi.



Gambar 5. 4 *Mold Wing Box Upper Skin Panel* Setelah Penambahan *Reinforcement*

Dari kondisi tersebut dapat diketahui akar penyebab yang diperoleh dari analisis FTA mengarahkan fokus perbaikan pada peningkatan kekakuan struktur *mold* melalui penambahan *reinforcement*, pengendalian proses handling dan penyimpanan *mold*, serta evaluasi berkala berdasarkan data deviasi dimensi hasil SCAN 1–SCAN 4. Hasil analisis ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H pada subbab berikutnya, sehingga tindakan perbaikan yang diusulkan dapat lebih tepat sasaran dalam menurunkan risiko deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel*.

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan FTA, diketahui bahwa penyebab dominan terjadinya deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* berkaitan dengan ketidakstabilan struktur *mold* selama proses produksi, handling, dan penyimpanan. Oleh karena itu, dilakukan penyusunan usulan perbaikan menggunakan metode 5W+1H agar tindakan perbaikan dapat diterapkan secara sistematis dan tepat sasaran.

5.6 5W+1H

Selama proses penelitian ditemukan bahwa FMEA dan *Fault Tree Analysis* (FTA), penyebab dominan deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* berkaitan dengan ketidakstabilan struktur *mold* selama proses produksi, handling, dan penyimpanan. Variasi deviasi yang teridentifikasi pada hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4 menunjukkan bahwa perubahan bentuk *mold* terjadi secara progresif akibat kekakuan struktur yang belum optimal serta kurangnya sistem pengendalian kondisi *mold* secara menyeluruh. Hasil pengamatan menunjukkan dirumuskan beberapa usulan perbaikan menggunakan pendekatan 5W+1H untuk memastikan tindakan perbaikan bersifat sistematis, terukur, dan aplikatif dalam lingkungan produksi.

Selama proses penelitian FMEA dan FTA, penyebab dominan deviasi dimensi *mold* berasal dari ketidakstabilan struktur *mold* akibat tidak adanya *reinforcement*. Hasil pengamatan menunjukkan dilakukan perbaikan dengan menambahkan *reinforcement* besi pada struktur *mold* untuk meningkatkan kekakuan dan kestabilan dimensi.

Karena karakteristik produk memiliki toleransi dimensi yang sangat ketat dan proses produksi masih didominasi aktivitas manual ($\pm 80\%$), maka diperlukan usulan perbaikan yang sistematis dan terstruktur. Untuk itu digunakan metode 5W+1H (*What, Why, Where, When, Who, How*) sebagai pendekatan perumusan tindakan perbaikan agar lebih operasional dan mudah diimplementasikan. Ada 4 usulan perbaikan yang menjadi pembahasan dalam metode ini, 4 usulan perbaikan ini diambil dari item basic event pada metode FTA.

5.6.1 Faktor Struktur *Mold* Tidak Cukup Kaku

Faktor struktur *mold* berkaitan dengan ketidakmampuan *mold* mempertahankan bentuk geometrinya saat menerima beban proses produksi, handling, dan penyimpanan. Berdasarkan hasil pengukuran SCAN 1 sampai SCAN 4, ditemukan adanya perubahan bentuk *mold* yang menunjukkan bahwa kekakuan struktur belum optimal dalam menahan distribusi beban kerja.

Tujuan utama (*What*) dari perbaikan ini adalah meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur *mold* agar deformasi dapat diminimalkan serta deviasi dimensi dapat dikurangi secara signifikan. Perbaikan diperlukan (*Why*) karena struktur yang tidak kaku

menyebabkan perubahan bentuk selama proses produksi dan penggunaan berulang. Perbaikan dilakukan pada area produksi dan penyimpanan *mold* (*Where*), sebelum produksi dimulai dan saat evaluasi hasil inspeksi dimensi (*When*). Pihak yang terlibat (*Who*) meliputi tim engineering, operator produksi, dan quality control. Metode perbaikan (*How*) dilakukan melalui evaluasi desain struktur *mold* berdasarkan data deviasi dimensi, penambahan elemen pengaku struktural, serta inspeksi deformasi secara berkala.

Langkah ini diharapkan mampu menstabilkan dimensi *mold* pada setiap siklus produksi dan menurunkan variasi deviasi pada hasil pengukuran SCAN.

5.6.2 Faktor Tidak Ada atau Kurang *Reinforcement* pada *Mold*

Faktor *reinforcement* berkaitan dengan ketidakhadiran atau ketidakcukupan elemen penguat pada struktur *mold* yang berfungsi menahan deformasi akibat beban proses. Hasil analisis deviasi dimensi menunjukkan bahwa area tertentu pada *mold* mengalami perubahan bentuk yang mengindikasikan kurangnya dukungan struktural.

Tujuan utama (*What*) dari perbaikan ini adalah meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur *mold* melalui penambahan *reinforcement* yang sesuai. Perbaikan diperlukan (*Why*) karena struktur tanpa penguat yang memadai tidak mampu mempertahankan kestabilan bentuk saat menerima beban produksi dan handling. Perbaikan dilakukan pada area produksi dan inspeksi dimensi *mold* (*Where*), sebelum produksi berjalan dan saat evaluasi hasil pengukuran (*When*). Pihak yang terlibat (*Who*) meliputi tim engineering, operator produksi, dan quality control. Metode perbaikan (*How*) dilakukan melalui penentuan area deformasi dominan berdasarkan hasil SCAN 1–SCAN 4, perancangan dan pemasangan *reinforcement* tambahan, serta verifikasi kekakuan struktur setelah modifikasi.

Langkah ini diharapkan dapat meningkatkan stabilitas bentuk *mold* dan mengurangi risiko deviasi dimensi produk *komposit*.

5.6.3 Faktor *Handling* dan Penyimpanan *Mold* Menyebabkan Perubahan Bentuk

Faktor handling dan penyimpanan berkaitan dengan perubahan bentuk *mold* akibat metode pemindahan, penempatan, dan penyimpanan yang belum mampu menjaga distribusi beban secara merata. Kondisi ini berpotensi menyebabkan deformasi permanen yang berdampak pada deviasi dimensi.

Tujuan utama (*What*) dari perbaikan ini adalah menjaga kestabilan bentuk *mold* selama proses pemindahan dan penyimpanan. Perbaikan diperlukan (*Why*) karena handling dan penyimpanan yang tidak terkendali dapat mengubah geometri *mold* secara bertahap. Perbaikan dilakukan pada area produksi dan penyimpanan *mold* (*Where*), sebelum dan setelah proses produksi berlangsung (*When*). Pihak yang terlibat (*Who*) meliputi operator produksi, supervisor produksi, dan quality control. Metode perbaikan (*How*) dilakukan dengan menetapkan standar prosedur handling *mold*, penggunaan penyangga struktural saat penyimpanan, serta inspeksi dimensi setelah proses handling.

Langkah ini diharapkan dapat mempertahankan kestabilan geometri *mold* dan mencegah deformasi selama siklus penggunaan.

5.6.4 Faktor Variasi Deviasi Dimensi Berdasarkan SCAN 1–SCAN 4

Faktor variasi deviasi berkaitan dengan perbedaan hasil pengukuran dimensi *mold* pada setiap siklus inspeksi. Variasi ini menunjukkan bahwa kondisi struktur *mold* dan parameter proses belum stabil secara konsisten.

Tujuan utama (*What*) dari perbaikan ini adalah menstabilkan hasil dimensi *mold* agar konsisten pada setiap pengukuran. Perbaikan diperlukan (*Why*) karena variasi deviasi menunjukkan adanya perubahan kondisi struktur *mold* dan proses produksi. Perbaikan dilakukan pada area produksi, inspeksi dimensi, dan penyimpanan *mold* (*Where*), sebelum, selama, dan setelah proses produksi (*When*). Pihak yang terlibat (*Who*) meliputi tim engineering, operator produksi, dan quality control. Metode perbaikan (*How*) dilakukan melalui evaluasi tren deviasi dimensi, penetapan kondisi operasional yang konsisten, kalibrasi alat ukur 3D *scanner* secara berkala, serta inspeksi dimensi pada titik kritis *mold*.

Langkah ini diharapkan mampu menghasilkan kestabilan dimensi *mold* dan meningkatkan konsistensi kualitas produk *komposit*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi metode IDEF0, FMEA, FTA, dan 5W+1H mampu mengidentifikasi penyebab utama deviasi dimensi *mold* secara sistematis serta menghasilkan usulan tindakan perbaikan yang diharapkan mampu menurunkan nilai deviasi dimensi *mold* pada proses produksi berikutnya.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis deviasi dimensi *mold Wing Box Upper Skin Panel* menggunakan metode IDEF0, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Fault Tree Analysis* (FTA), dan 5W+1H, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil inspeksi dimensi menggunakan Hexagon 3D *Scanner* menunjukkan bahwa pada SCAN 1 terdapat 12 titik yang berada di luar batas toleransi dari total 31 titik ukur, pada SCAN 2 terdapat 39 titik dari 40 titik ukur, pada SCAN 3 terdapat 16 titik dari 20 titik ukur, sedangkan pada SCAN 4 hanya terdapat 1 titik dari 13 titik ukur yang masih berada di luar batas toleransi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi dimensi *mold* mengalami perbaikan yang signifikan setelah dilakukan tindakan perbaikan.
2. Berdasarkan hasil analisis FMEA diperoleh lima *failure mode* dengan nilai RPN, yaitu deviasi dimensi *mold* melebihi toleransi (168), deviasi dimensi (*overbuild*) (150), deviasi dimensi akibat proses *handling* (105), ketidaksesuaian geometri *mold* (72), dan deformasi struktur *mold* (63). Berdasarkan nilai rata-rata RPN sebesar 111,6, tiga *failure mode* pertama termasuk kategori kritis, sedangkan dua *failure mode* lainnya termasuk kategori tidak kritis sehingga prioritas perbaikan difokuskan pada penyebab dengan nilai RPN tertinggi.
3. Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa penyebab utama deviasi dimensi *mold* berasal dari faktor struktur, metode, lingkungan, dan desain, dengan penyebab dominan berupa tidak adanya *reinforcement* pada struktur *mold* sehingga kekakuan *mold* menjadi kurang optimal dan mudah mengalami deformasi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, tindakan perbaikan disusun menggunakan pendekatan 5W+1H, yaitu dengan menambahkan *reinforcement* pada struktur *mold*, memperbaiki prosedur *handling* dan penyimpanan, melaksanakan inspeksi dimensi secara berkala, serta meningkatkan pengendalian terhadap kondisi lingkungan dan validasi model CAD. Implementasi penambahan *reinforcement* terbukti mampu meningkatkan kestabilan dimensi *mold*, yang ditunjukkan dengan

hasil inspeksi SCAN 4 di mana hanya 1 dari 13 titik ukur (7,7%) yang masih berada di luar batas toleransi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Bagi Perusahaan

- a. Perusahaan perlu melakukan penambahan *reinforcement* pada bagian struktur *mold* yang terindikasi mengalami deformasi berdasarkan hasil pengukuran SCAN 1–SCAN 4.
- b. Perusahaan disarankan melakukan evaluasi desain struktur *mold* secara berkala untuk memastikan tingkat kekakuan *mold* mampu menahan beban selama proses produksi dan handling.
- c. Perlu diterapkan standar prosedur handling dan penyimpanan *mold* yang lebih terkontrol guna mencegah perubahan bentuk akibat distribusi beban yang tidak merata.
- d. Perusahaan perlu melakukan inspeksi dimensi berkala menggunakan 3D *Scanner* untuk memonitor perubahan geometri *mold* dan mendeteksi potensi deviasi sejak dini.
- e. Data hasil inspeksi dimensi sebaiknya digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan perbaikan desain *mold* dan evaluasi performa *mold* selama masa pemakaian.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya

- a. Melakukan penelitian pada jenis *mold* atau komponen komposit lainnya untuk mengetahui apakah metode inspeksi dimensi menggunakan Hexagon 3D *Scanner*, analisis *PolyWorks*, serta metode FMEA dan FTA dapat memberikan hasil yang konsisten dalam mengidentifikasi penyebab deviasi dimensi.
- b. Melakukan evaluasi secara berkala terhadap efektivitas penambahan *reinforcement* pada *mold*, sehingga dapat diketahui pengaruhnya terhadap kestabilan dimensi, umur pakai *mold*, serta konsistensi kualitas produk dalam jangka panjang.

- c. Mengembangkan sistem inspeksi dan pengendalian kualitas yang lebih terintegrasi, seperti penyusunan standar inspeksi dimensi, penjadwalan inspeksi berkala, dan pembaruan SOP *handling* serta penyimpanan *mold* untuk meminimalkan terjadinya deviasi dimensi pada proses produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of Composites Manufacturing*. SME.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.
- Sitnik, R., Bunsch, E., et al. (2013). "Optical 3D Measurement Techniques in Industrial Metrology." *Optics and Lasers in Engineering*.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQ.
- Vesely, W. E., et al. (1981). *Fault Tree Handbook*. U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Taguchi, G., & Clausing, D. (1990). "Robust Quality." *Harvard Business Review*.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International.
- Zhang, S. (2018). *Handbook of 3D Machine Vision*. Springer.
- InnovMetric Software Inc. (2020). *PolyWorks Inspector Technical Documentation*.
- Hull & Clyne. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- Alfiansyah, M. I., Saputra, A., & Yulianto, A. (2024). *Optimization of dimensional accuracy in FDM printing using statistical analysis*. *Journal of Manufacturing Processes*.
- Kalilayeva, A., Jafarzadeh, S., Sabirova, Z., & Tokhirov, A. (2024). *Surface accuracy evaluation of 3D-printed polymer components for industrial applications*. *Materials Today: Proceedings*.
- Juergensen, L., Carter, A., & Dunlop, J. (2024). *Error propagation analysis in 3D-printed anatomical models using 3D scanning validation*. *Additive Manufacturing Letters*.
- Juergensen, L., & Schneider, M. (2024). *Surface deviation analysis for precision-critical 3D-printed parts using optical scanning*. *Journal of 3D Printing and Additive Manufacturing*.

- Lei, C., Wang, T., Huang, Y., & Chen, Z. (2025). *GraphCompNet: Graph-based shape compensation for position-dependent deformation in additive manufacturing*. Additive Manufacturing.
- Mandasari, D., Mulyani, S., & Sadysamara, C. A. B. (2019). *Analisis presisi produk manufaktur dengan metode pengukuran digital*. Jurnal Teknologi.
- Ntousia, F., Fudos, I., Moschopoulos, C., & Stamati, D. (2022). *Probabilistic prediction of geometric errors in additive manufacturing*. Additive Manufacturing.
- Orth, A., Li, H., & Taylor, J. A. (2022). *On-the-fly 3D metrology for continuous volumetric additive manufacturing*. Scientific Reports.
- Petsiuk, V., & Pearce, J. M. (2021). *Open-source real-time anomaly detection for 3D printing processes*. Additive Manufacturing.
- Pratama, M., & Adib, N. (2022). *Pengaruh orientasi pencetakan dan suhu ekstruder terhadap akurasi dimensi material TPE*. Jurnal GIGA.
- Rivaldi, F., Yunus, M., & Pristiansyah, R. (2023). *Pengaruh parameter pencetakan terhadap kekuatan mekanik komponen polycarbonate hasil 3D printing*. Jurnal Teknologi Terapan.
- Rosa, R., Subhan, N., & Pristiansyah, N. (2024). *Optimasi parameter pencetakan PETG menggunakan metode Taguchi untuk akurasi dimensional*. Jurnal Teknologi Terapan.
- Samadi, H., Ahsan, M., & Raman, S. (2025). *Hybrid machine learning framework for surface deviation prediction in additively manufactured parts*. Engineering Applications of Artificial Intelligence.
- Setyoadi, Y., Hermana, D., Hakim, R., Riyadi, S., & Widiastuti, S. (2023). *Rancang bangun printer Cartesian dan evaluasi presisi geometrinya*. Jurnal Aplikasi Teknik & Robotika.
- Wei, X., Zhu, W., & Zhao, Y. (2025). *Comprehensive analysis of geometric accuracy in FDM 3D-printed gears*. Polymers.
- Zarkasih, M., Hasdiansah, F., & Sugianto, A. (2024). *Pengaruh proses annealing terhadap akurasi dimensi dan kekuatan tarik material ST-PLA*. Jurnal Teknologi Terapan.
- AIAG. (2019). *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook*. Southfield, Michigan: AIAG.
- AIAG & VDA. (2019). *FMEA Handbook First Edition*. Germany: VDA QMC.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 Quality Management Systems — Requirements*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk Management — Guidelines*. Geneva: ISO.

- Stamatis, D. H.. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee: ASQ Quality Press.
- McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R.. (2009). *The Basics of FMEA*. New York: CRC Press.
- Ericson, Clifton A.. (2011). *Fault Tree Analysis Primer*. Virginia: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Vesely, William E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (1981). *Fault Tree Handbook*. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Gaspersz, Vincent. (2002). *Pedoman Implementasi Program Six Sigma*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Gaspersz, Vincent. (2007). *Lean Six Sigma for Manufacturing and Service Industries*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Heizer, Jay., & Render, B. (2017). *Operations Management* (12th Edition). New Jersey: Pearson Education.
- Purnomo, Hari. (2004). *Pengantar Teknik Industri*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Sutalaksana, Iftikar Z.. (2006). *Teknik Perancangan Sistem Kerja*. Bandung: ITB Press.
- Wignjosoebroto, Sritomo. (2008). *Ergonomi Studi Gerak dan Waktu*. Surabaya: Guna Widya.
- Pande, Peter S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2002). *The Six Sigma Way*. New York: McGraw-Hill.
- Kusnadi. (2018). *Teknologi Material Komposit*. Bandung: Alfabeta.
- InnovMetric Software. (2024). *PolyWorks Inspector User Guide*. Quebec, Canada.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D2563 Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts*. ASTM International.
- Society of Automotive Engineers. (2020). *Aerospace Composite Manufacturing Guidelines*. SAE International.
- Várady, T., Martin, R.R., & Cox, J. (1997). *Reverse Engineering of Geometric Models: An Introduction*. Computer-Aided Design, 29(4), 255–268.
- Raja, V., & Fernandes, K.J. (2008). *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Springer.
- Gibson, R.F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*.
- Campbell, F.C. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International.

- Marca, D.A., dan McGowan, C.L. (1988). *IDEF0/SADT Business Process and Enterprise Modelling*. Eclectic Solutions Corporation.
- Bosché, F. (2010). *Automated Recognition of 3D CAD Model Objects in Laser Scans and Calculation of As-Built Dimensions for Dimensional Compliance Control in Construction*. *Advanced Engineering Informatics*, 24(1), 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.08.006>
- Ozuem, W., & Bowen, G. (2020). *Digital Marketing and Customer Engagement: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global.
- Gawal, M. (2017). *The 5W1H Method: A Comprehensive Approach to Problem Solving and Process Improvement*. *Journal of Quality Management and Organizational Development*, 5(2), 45–52.

LAMPIRAN









