Analisis Kegagalan Produk Spar Pesawat NC212i Dengan Integrasi *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) Di PT XYZ

1st Salmandika Listyanto Ramadhan
Teknik Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
salmandikalr@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Huki Chandra
Teknik Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
hukichandra@telkomuniversity.ac.id

3rd Benazir Imam Arif M.
Teknik Industri
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia
imambenazir@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Industri manufaktur pesawat terbang memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan keselamatan penerbangan. Salah satu komponen vital pada struktur pesawat adalah spar yang berfungsi sebagai penopang utama beban sayap. Namun, pada proses produksi spar pesawat NC212i di PT XYZ masih ditemukan berbagai jenis cacat seperti *hole wrong location*, *edge margin not according*, *out of tolerance edge margin*, *hole not match*, *unauthorized hole*, *extra hole* dan *guide hole*. Permasalahan tersebut berdampak pada penurunan kualitas struktur, meningkatnya *rework*, keterlambatan produksi serta potensi risiko keselamatan penerbangan. Penelitian ini bertujuam untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan produk dan menentukan prioritas perbaikan menggunakan metode *Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. Metode FMEA digunakan untuk menilai tingkat risiko kegagalan berdasarkan *severity*, *occurance* dan *detection* melalui perhitungan *Risk Priority Number* (RPN), sedangkan metode FTA digunakan untuk mengidentifikasi hubungan sebab akibat dan akar penyebab kegagalan secara sistematis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis cacat *hole wrong location* memiliki RPN tertinggi sebesar 450, *edge margin not according* dan *out of tolerance edge margin* sebesar 360, *hole not match* sebesar 300, *unauthorized hole* sebesar 270, *extra hole* sebesar 210 dan *guide hole* dengan RPN sebesar 200. Analisis FTA menunjukkan bahwa penyebab utama kegagalan berasal dari faktor *machine*, *method*, manpower dan lemahnya sistem kontrol proses. Upaya perbaikan yang diusulkan meliputi peningkatan kompetensi pekerja, penerapan *double check*, penggunaan *jig* dan *fixture* yang lebih presisi serta penguatan sistem pengendalian kualitas untuk menekan risiko kegagalan produk secara berulang.**

***Kata kunci*— FTA, FMEA, *Defect*, Spar Pesawat**

I. PENDAHULUAN

Industri manufaktur pesawat terbang salah satu bagian sektor industri yang mendukung hubungan antar global dan mendukung pertumbuhan ekonomi nasional. Keselamatan struktural dalam pesawat menjadi salah satu isu paling kritis karena kegagalan komponen struktural dapat menimbulkan konsekuensi yang fatal, baik dari segi keselamatan penerbangan maupun reputasi perusahaan. Berdasarkan laporan IATA *Safety Report* tahun 2024, meskipun keseluruhan rata-rata kejadian relatif stabil sekitar 0,97–1,13 kecelakaan per satu juta penerbangan untuk maskapai anggota dari tahun 2020 hingga 2024, sebagian kecelakaan tetap disebabkan oleh kegagalan teknis dan struktural pesawat, meskipun proporsinya lebih kecil dibanding faktor manusia dan operasional [1]. Kejadian yang sama juga memandang dalam standar regulasi penerbangan internasional yang menekankan bahwa komponen struktural harus memenuhi tingkat kehandalan yang tinggi untuk menghindari kerusakan selama operasi, *fatigue* atau kegagalan material. Pertumbuhan ini menuntut industri penerbangan untuk menjaga kualitas produk secara presisi sebab setiap cacat produksi dapat berdampak langsung pada keselamatan penerbangan. Dalam penerbangan nasional, indonesia menempatkan industri dirgantara sebagai bagian penting dari kemajuan teknologi strategis yang dipercaya dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional [2]. Oleh karena itu, peningkatan kualitas produk pesawat menjadi hal yang krusial yang tidak dapat diabaikan. Namun, mitigasi terhadap setiap potensi kegagalan menjadi kewajiban untuk memastikan keselamatan penerbangan dan menjaga reputasi industri dirgantara nasional.

Dalam industri nasional terutama di Indonesia memiliki posisi strategis dalam industri dirgantara melalui peran seperti PT XYZ. PT XYZ merupakan industri yang memproduksi dalam bidang industri manufaktur yang berfokus pada produksi dirgantara yang memenuhi kebutuhan penerbangan sipil, militer maupun misi tertentu dan digunakan sebagai pelatihan para pilot militer. Dengan dibangun PT XYZ telah mengembangkan kemampuan membangun pesawat baru sekaligus memodifikasi susunan sistem dan rangka pesawat sesuai kebutuhan untuk keperluan operasional khusus seperti patrol militer, pengawasan dan operasi penjagaan. Dengan salah satu buatan yang dikeluarkan oleh PT XYZ adalah pesawat NC212i yang menjadi produk andalan dengan berukuran sedang bertenaga turboprop yang dirancang khusus untuk keperluan militer khususnya pelatihan pilot. Pesawat NC212i memiliki banyak keunggulan yang mendukung fungsinya sebagai pesawat pelatihan pilot, keunggulan tersebut termasuk ke dalam kategori lepas landas dan mendarat dalam jarak pendek, memiliki pintu belakang, kabin yang luas memberikan ruang pelatihan dan sistem navigasi, serta komunikasi yang dibuat secara modern sehingga pesawat ini cocok sebagai pelatihan para pilot di wilayah geografis. Subsektor industri dirgantara

menjadi salah satu keutamaan dalam pembangunan industri, dengan penekanan pada peningkatan kualitas produk dan pengendalian proses produksi. Dengan demikian, penelitian ini mengidentifikasi kegagalan produk dalam komponen vital pesawat, khususnya spar, menjadi relevan untuk mendukung peningkatan daya saing industri nasional.

Pada proses manufaktur pada pembuatan komponen spar pesawat, menempati posisi fundamental sebagai elemen utama dalam struktur sayap yang berfungsi sebagai tulang struktural utama sayap penopang beban penggerak pesawat maupun beban statis selama operasi penerbangan. Spar yang mengalami cacat memicu dampak pada performa penerbangan yang menurunkan fungsi penggerak dan memungkinkan berpotensi bahaya terhadap keselamatan penumpang saat penerbangan [3]. Khususnya pada pesawat NC212i yang diproduksi oleh PT XYZ maupun unit produksi yang terlibat, spar menjadi bagian penting yang membutuhkan proses manufaktur dengan presisi tinggi melalui proses *drilling*, *riveting* dan *assembly*. Kegagalan pada tahap produksi, seperti kesalahan *drilling*, *riveting*, maupun treatment material, berpotensi menghasilkan cacat struktural yang sulit terdeteksi pada tahap awal [4]. Berdasarkan pengamatan dengan terjadinya kendala proses produksi dengan permasalahan yang mengakibatkan produk *defect* dipengaruhi suatu faktor seperti manusia, hal ini suatu kejadian umum yang tidak dapat diabaikan terus menerus.

Dalam proses manufaktur di PT XYZ terutama pada produksi spar, mengalami gangguan keterlambatan waktu produksi sehingga pekerjaan dalam proses produksi melebihi estimasi waktu yang telah di rencanakan, dengan dampaknya berakibat tertunda pada waktu produksi, dimana permasalahan ini muncul disebabkan oleh kesalahan pekerja pada bagian tersebut. Kesalahan ini muncul sebab efek lain yang dapat mengganggu pada kesehatan dan lingkungan pekerja produksi. Penyebab masalah tersebut muncul dapat mengeluarkan produk yang sering mengalami kegagalan secara berulang, salah satunya faktor manusia yang menjadi elemen penting dalam proses produksi. Kondisi ini sering muncul sebab efek kesehatan pekerja yang kurang optimal seperti fisik maupun mental, sehingga dapat menurunkan tingkat konsentrasi dan ketelitian saat aktivitas berjalan.

Selain faktor kesehatan, pengaruh lingkungan kerja yang kurang mendukung dapat menjadi pemicu terjadinya kegagalan saat proses produksi, terutama pada area kerja yang tidak strategis dapat menimbulkan gangguan selama proses produksi berjalan, khususnya pada penerangan yang terbatas menyebabkan pekerja harus melakukan tekanan yang tinggi saat beraktivitas. Pada efek lain seperti suhu dan kelembapan menjadi pemicu saat proses berjalan, masalah ini sebab fungsi blower yang tidak aktif secara baik dan kurangnya pemeliharaan secara rutin, sehingga memicu kemunculan ketidaknyamanan dan kehilangan konsentrasi selama aktivitas berjalan. Jika penyebab ini terus terjadi salah satu komponen akan mengalami keterlambatan waktu produksi, sehingga proses berikutnya tidak dapat dilanjut sebab dalam produksi manufaktur pesawat setiap bagian memiliki hubungan yang saling terhubung dengan komponen lain.

Permasalahan tersebut diperkuat dengan temuan dari hasil laporan PT XYZ menunjukkan masih tingginya tingkat kegagalan produk yang signifikan pada komponen struktur pesawat salah satunya bagian spar pesawat NC212i. Berdsarkan data internal yang diperoleh dari PT XYZ menunjukkan bahwa rata-rata produk yang mengalami *defect* mencapai total 14 produk dalam 4 tahun terakhir dari tahun 2022-2025, dengan kejadian peningkatan pada kategori *defect* seperti kesalahan proses *drilling*, *riveting* maupun *assembly*. Dari temuan data yang diperoleh menyebar sebanyak 44 komponen spar yang mengalami kegagalan produk dari bagian atas (*upper spar*), bawah (*lower spar*), kanan dan kiri pada bagian spar.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa faktor penyebab kegagalan tidak hanya berasal dari faktor saat proses produksi, melainkan berkaitan dengan efektivitas sistem pengendalian kualitas. Dampak ini dapat muncul melalui peningkatan rework time, pemborosan biaya atau *cost*, serta potensi penurunan reputasi perusahaan. Kemunculan kejadian pada kegagalan produk tersebut menegaskan bahwa pengendalian terhadap kualitas produk berbasis inspeksi belum cukup efektif dalam mencegah penyebab kegagalan produk. Oleh karena itu, penelitian ini membutuhkan pendekatan analisis kegagalan yang lebih mendalam dan mengintegrasikan akar penyebab agar dapat diidentifikasi secara tepat dan risiko dapat diminimalisirkan dengan cara mencegah sejak awal.

Dalam teori manajemen kualitas, metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dikenal efektif dalam mengidentifikasi mode kegagalan, menilai tingkat keparahan, frekuensi, dan kemampuan deteksi [5]. Sementara itu, *Fault Tree Analysis* (FTA) digunakan untuk menelusuri hubungan sebab-akibat yang bersifat logis dalam menentukan akar penyebab kegagalan [6]. Kedua metode tersebut banyak digunakan di industri penerbangan global untuk memperkuat sistem manajemen risiko dan keselamatan. Salah satu contoh studi "*Systematic Risk Analysis of Railway Component Quality*" menerapkan integrasi FTA dan FMEA untuk menganalisis *defect* pada komponen kereta, menunjukkan bahwa penggabungan dua metode tersebut efektif dalam mengidentifikasi mode kegagalan dan akar penyebabnya [7]. Selain itu, dalam sistem industri minyak dan gas juga terdapat studi integrasi FTA dan FMEA yang memperhitungkan tingkat *criticality* komponen berdasarkan minimal *cut sets* dan ukuran kepentingan seperti pengukuran untuk memperkuat rangking risiko [8]. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih cenderung menerapkan kedua metode tersebut secara terpisah. Sedangkan, integrasi FTA dan FMEA diyakini dapat menghasilkan analisis yang lebih komprehensif, baik dalam aspek preventif maupun korektif, sehingga lebih relevan bagi perusahaan manufaktur pesawat.

Penelitian sebelumnya menunjukkan efektivitas FTA dan FMEA dalam dunia industri otomotif, energi, dan manufaktur umum, namun penerapan terintegrasi pada industri kedirgantaraan, khususnya komponen struktural seperti spar masih terbatas [9]. Beberapa studi menunjukkan bahwa kelemahan FMEA terletak pada subjektivitas dalam penilaian *Risk Priority Number* (RPN), sedangkan FTA membutuhkan data kegagalan yang detail untuk membangun pohon kesalahan yang akurat [10]. Dengan mengintegrasikan kedua metode tersebut, dapat diperoleh analisis kegagalan yang lebih akurat sekaligus praktis. Kejadian pada penelitian

ini yang menjadi prefensi bagi peneliti yaitu memberikan dasar teori dari analisis maupun usulan perbaikan untuk mengembangkan metode manajemen risiko pada sektor industri dirgantara. penelitian ini menjadi penting dan mendesak dilakukan untuk menjawab permasalahan kualitas produksi bagian spar pesawat NC212i.

Berdasarkan kajian literaur yang sudah dilakukan saat ini belum banyak penelitian yang mengintegrasikan metode FMEA dan FTA pada komponen pesawat terbang. Saat ini belum ada secara khusus membahas objek untuk part spar pada pesawat NC212i. Sebagian besar studi berfokus terhadap komponen non struktural atau pada industri selain penerbangan dan dengan integrasi kedua metode dalam komponen struktural dengan data perusahaan secara kuantitatif masih sangat terbatas. Penyebab ini juga dikarenakan kurangnya data publikasi mengenai tingkat kegagalan spar NC212i dengan analisis FMEA dan FTA secara terstruktur. Sehingga, kajian penelitian ini menimbulkan kebutuhan penelitian baru yang mampu memberikan teori ilmiah dan praktis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menjadi penting dan mendesak dilakukan untuk menjawab permasalahan kualitas produk spar pesawat NC212i. Analisis kegagalan dengan mengintegrasikan FMEA dan FTA diharapkan mampu memberikan gambaran holistik mengenai akar penyebab *defect* sekaligus memprioritaskan mode kegagalan yang paling kritis. Hasil penelitian tidak hanya berkontribusi pada pengembangan pengetahuan di bidang manajemen kualitas manufaktur, tetapi juga memberikan rekomendasi praktis bagi PT XYZ dalam menurunkan tingkat *reject* serta meningkatkan keandalan produk. Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk menjawab pertanyaan mendasar terkait penyebab utama kegagalan spar pesawat NC212i serta strategi mitigasi yang tepat berbasis metode analisis kualitatif dan kuantitatif yang teruji.

II. KAJIAN TEORI

Bab pada landasan teori ini menjelaskan terkait literatur dan teori yang relevan dengan mencakup variabel penelitian, teori teori kerangka kerja serta metode yang memperkuat penelitian ini dengan menjadi dasar alasan dalam pemilihan teori.

A. Profil Perusahaan

PT XYZ telah berdiri sejak pada bulan Agustus 1976, dengan keberhasilannya kini mampu mencapai pengiriman pesawat terbang lebih dari 470 unit diberbagai negara, dengan berbagai keahlian yang diandalkan seperti perusahaan ini mulai dari perancangan, riset dan pengembangan desain, uji coba, pembuatan komponen pesawat, produksi hingga jasa perawatan untuk pesawat sipil yang digunakan dalam berpergian maupun pesawat militer. Dengan produk yang di pasarkan berupa pesawat dengan seri NC212i, CN235 dan N219, serta PT XYZ memiliki kerja sama dengan Airbus Defence dan Space untuk pembuatan pesawat CN295.

Dalam bidangnya PT XYZ juga memiliki kerja sama dengan pihak lain seperti Airbus Helicopters dan Bell Helicopters untuk menghasilkan komponen seperti tail boom, door assembly, door post, pylon, serta ducts untuk helikopter Bell 412 dan Huey II. Kedua perusahaan memiliki kerja sama dalam untuk Bell 412EPI, kustom dan pemeliharaannya. Dengan inovasi produksinya mengeluarkan pesawat N219 salah satu pesawat turboprop ringan yang dirancang untuk melakukan penerbangan dengan jarak pendek dengan operasi multihop, terutama di daerah terpencil yang mendukung kebutuhan pembangunan penerbangan [11]

B. Pesawat NC212i

Pesawat NC212i berfungsi sebagai sarana transportasi udara sipil dan militer kelas menengah bertenaga turboprop yang dihasilkan oleh PT XYZ melalui kesepakatan lisensi dengan entitas *Spanyol Construcciones Aeronauticas SA* (CASA). Konsep dan manufaktur awal pesawat ini berlangsung di Spanyol untuk mendukung kebutuhan sipil dan militer. Dalam kurun waktu 2004 hingga 2008 mencatat pemindahan relokasi infrastruktur *jigs* dan *fixture* pesawat NC212-400 dari lokasi San Pablo, Spanyol ke kota Bandung. PT XYZ kemudia menjadi produsen tunggal untuk rangkaian pesawat dengan seri NC212. Pada tahun 2014, perusahaan menghentikan lini produksi NC212-200 dan NC212-400, dan kemudia beralih focus untuk mengembangkan pesawat ke seri NC212i yang memiliki spesifikasi modern [12]

C. *Spar* Pesawat

Spar adalah salah satu komponen yang ada pada bagian sayap pesawat, salah satunya bagian struktur utama sayap yang memanjang parallel pada sumbu lateral dan menjadi tempat pemasangan rib. Rib sendiri dalam spar menjadi bagian penting sebagai kerangka berbentuk airfoil yang berbentuk lengkung pada sayap serta menentukan dimensi pada bentuk dan ketebalannya. Skin sendiri dalam spar digunakan sebagai wing covering atau sebagai penutup dari semua bagian rib, dimana spar guna membentuk bagian fuselage sayap pesawat yang aerodinamis [13]

D. Produk *Defect*

Defect didefinisikan sebagai hasil proses produksi yang kualitasnya dibawah standar yang telah ditetapkan. Apabila terjadi produk yang tidak memenuhi standar, akan mengakibatkan penurunan profitabilitas perusahaan karena *cost* yang muncul dari kegagalan tersebut akan dipindahkan pada produk lain yang berkualitas sesuai standar yang telah ditetapkan (Lestari & Mahbubah, 2021). Berdasarkan uraian di atas, biaya kualitas dapat didefinisikan sebagai semua biaya yang terjadi sebab produk baru yang tidak memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Dalam industri manufaktur, *defect* mencakup cacat visual, dimensi di luar toleransi, kesalahan fungsional, hingga kesalahan pemasangan atau finishing yang menyebabkan produk menjadi tidak layak jual atau menurunkan nilai guna. Definisi ini menunjukkan bahwa produk *defect* sebagai salah satu indikator kegagalan proses produksi yang memerlukan tindakan langsung untuk dikendalikan agar dapat mencegah terjadinya kegagalan produk secara berulang.

E. Kualitas Produk

Kualitas produk didefinisikan sebagai kapasitas sebuah produk yang memenuhi spesifikasi pada ketentuan tersebut, fungsi ini termasuk fitur seperti daya tahan, keandalan

sistem, kemajuan fitur, kekuatan konstruksi, kemudahan dalam pengemasan dan perawatan serta karakteristik lainnya [15]. Untuk mendukung strategi dalm meningkatkan atau mempertahankan produk yang berkualitas, industri manufaktur harus mampu mengontrol tingkat mutu produk yang dibuat. Signifikansi aspek ini terletak pada korelasi antara kualitas produk dengan permintaan konsumen, yang merupakan fokus utama dari kegiatan promosi dan penjualan yang diimplementasikan.

F. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) adalah tools pendekatan sistematis yang digunakan untuk menentukan strategi perawatan atau pencegahan yang paling tepat terhadap suatu kerusakan produk atau proses yang menimbulkan dampak [16]. Metode ini berfokus pada upaya mengidentifikasi berbagai kemungkinan terjadinya kegagalan seperti menganalisis dampak yang mungkin dapat menimbulkan dari kegagalan tersebut, serta mencari tahu penyebab utama dari kejadian tersebut. Metode ini memiliki tujuan untuk mendeteksi dan menganalisis berbagai bentuk kegagalan atau kejadian sejak awal, sehingga dapat melakukan tindakan pencegahan sebelum kegagalan tersebut terjadi [17].

Sebagai penerapan yang lebih kompleks, metode FMEA memiliki pedoman sesuai dengan standar internasional *military standard* 1629a mengenai prosedur dan langkah-langkah dalam melakukan analisis mode kegagalan dan efeknya. Standar ini mencakup berbagai pengembangan dari *Failure Mode*, *Effect* and *Criticality Analysis* (FMECA) yaitu merupakan bentuk lanjutan dari metode FMEA dengan menilai tingkat risiko pada setiap kegagalan. Sebagian dari penerapan FMECA dengan standar yang telah ditetapkan, perhitungan tingkat risiko dan penetapan probabilitas terjadinya suatu kegagalan dilakukan secara sistematis dengan menggunakan lembar kerja *Criticality Analysis* (CA), dalam lembar kerja CA setiap mode kegagalan dianalisis dan didokumentasikan dengan mengisi setiap kolom lembar kerja. Adapun standar pengisiandalam perhiungan lembar kerja, yaitu:

1. Nomor identifikasi
2. Penentuan barang atau kegagalan
3. Fungsional barang.
4. Penentuan mode kegagalan dan penyebabnya
5. Mode operasional barang
6. Klasifikasi tingkat risiko

Dalam proses perhitungan pada metode FMEA memberikan hasil penilaian terhadap setiap potensi kejadian berdasarkan tiga aspek utama [18], yaitu:

1. *Severity* (S): tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan jika keggalan tersebut terjadi.
2. *Occurance* (O): kemungkinan kegagalan tersebut terjadi.
3. *Detection* (D): pengukuran sistem untuk mendeteksi kegagalan sebelum kejadian tersebut terjadi.

Risk Priority Number (RPN) adalah bentuk penilaian dari suatu kejadian yang bersifat relatif, nilai RPN sendiri di dapat dari hasil perhitungan perkalian antara ranking *Severity*, *Occurance* dan *Detection*. RPN ditentukan sebelum melakukan suatu rekomendasi perbaikan dari kejadian berlangsung dan digunakan untuk menentukan titik akar masalah tertinggi berdasarkan nilai RPN yang paling dominan.

1. *Severity*

Severity atau level tingkat keparahan merupakan perkiraan mengenai keparahan akibat terjadinya kegagalan dalam bentuk nilai atau skor [19]. Faktor dalam *severity* mencakup peran dalam menentukan tingkat risiko seperti akibat terhadap pelanggan sebagai analisis produk, kemudian untuk analisis proses melihat dai faktor akibat terjadi terhadap proses.

TABEL II
(1 SKOR LEVEL *SEVERITY)*

Rangking	Kriteria	Keterangan
1	Tidak ada	Kegagalan tidak ada efek samping
2	Sangat minor	Tidak terjadi langsung
3	Minor	Berpengaruh dengan komponen lain
4	Sangat rendah	Mempengaruhi kualitas struktural komponen
5	Rendah	Produk *defect* mempengaruhi terhadap waktu kinerja dan perlu sedikit *rework*
6	Sedang	Proses menjadi lama dan memerlukan banyak *rework*
7	Tinggi	Produk tidak dapat dilanjutkan dan perlu

Rangking	Kriteria	Keterangan
		komponen baru
8	Sangat tinggi	Produk kehilangan fungsi dan menurunkan kualitas
9	Berbahaya peringatan	Proses delay sehingga menggangu proses produksi
10	Berbahaya tanpa adanya peringatan	Menimbulkan resiko tinggi terhadap kekuatan komponen pesawat serta timbul benda asing masuk

Sumber: (Lestari & Mahbubah, 2021)

Severity digunakan sebagai penentuan suatu kegiatan yang mengalami atau memberikan dampak yang serius dari efek kejadian yang menimbulkan suatu kejadian kecelakaan pada suatu proses produksi. Penentuan nilai keparahan dengan menggunakan skala 1 hingga 10. Penentuan hasil dari tingkat risiko tertinggi yaitu pada mode kegagalan komponen yang tidak sesuai dan adanya cacat setelah proses produksi selesai. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat resiko yang sangat tinggi tanpa adanya peringatan dengan akibat komponen yang tidak memiliki kualitas yang baik.

2. *Occurance*

Level *occurance* adalah tingkat frekuensi terjadinya kegagalan dengan membentuk penilaian dari skor. Level kejadian ini ditentukan berdasarkan *track record* kegagalan selama satu tahum terakhir [19].

TABEL II
(2 SKOR LEVEL *OCCURANCE)*

Rangking	Kriteria	Tingkat Kegagalan
10	Kemungkinan sangat tinggi	1 in 2
9		1 in 3
8	Tinggi	1 in 8
7		1 in 20
6		1 in 80
5	Sedang	1 in 400
4		1 in 2000
3	Rendah	1 in 15000
2	Sangat rendah	1 in 150000
1	Peluang kecil	1 in 1500000

Sumber: [21]

Nilai kejadian pada nilai *occurance* dipergunakan sebagai penilaian peluang suatu mode kegagalan yang terjadi. Penentuan hasil nilai digunakan dengan skala 1 hingga 10 dimana skala 1 merupakan kegagalan yang tidak sering terjadi dan skala 10 merupakan kegagalan yang sering terjadi kegagalan hingga berpotensi risiko besar. Nilai ini menunjukkan sebagai tingkat kejadian yang dapat mengindikasian potensi kejadian secara berulang.

3. *Detection*

Level *detection* atau tingkat deteksi adalah penilaian dengan melihat seberapa besar kemungkinan kegagalan tersebut dapat terdeteksi atau akibar dari kegagalan tersebut, penilaian ini membentuk skor untuk menilai level tingkat risiko [19]. Faktor utama dalam penilaian ini dengan mengidentifikasi kontrol kegagalan atau efek dari kegagalan yang menjadi acuan dalam penilaian tersebut.

TABEL II
(3 SKOR LEVEL *DETECTION)*

Rangking	Kriteria	Keterangan
10	Tidak mungkin	Tidak ada kontrol
9	Sangat jarang	Alat kontrol kurang efektif dalam mendeteksi kegagalan
8	Jarang	Alat kontrol sulit mendeteksi kegagalan
7	Sangat rendah	Kemampuan kontrol dalam mendeteksi kegagalan sangat rendah
6	Rendah	Kemampuan kontrol dengan tingkat rendah
5	Sedang	Kemampuan kontrol dengan tingkat sedang
4	Cukup tinggi	Kemampuan kontrol cukup tinggi
3	Tinggi	Kemampuan kontrol memiliki tingkat tinggi dalam kegagalan

Rangking	Kriteria	Keterangan
2	Sangat tinggi	Kemampuan kontrol memiliki tingkat sangat tinggi dalam kegagalan
1	Hampir pasti	kemampuan kontrol kegagalan hampir pasti

Sumber: (Lestari & Mahbubah, 2021)

Nilai deteksi dalam mode kegagalan digunakan untuk mengidentifikasikan setiap deteksi dari kejadian kegagalan. Penetuan pada nilai deteksi menggunakan skala 1 hingga skala 10, dimana skala 1 menunjukkan mode kegagalan yang dapat terdeteksi dengan mudah dan dapat dirework langsung tanpa waktu yang lama, sedangkan skala 10 sebagai mode kegagalan yang sulit deteksi hingga tidak dapat dilanjut ke proses selanjutnya.

Dalam ketiga parameter dalam FMEA yaitu *severity*, *occurance* dan *detection* memiliki proses lanjutan dengan mengitung *Risk Priority Number* (RPN). Perhitungan tersebut memiliki kriteria yang dijadikan sebagai acuan dalam mengetahui tingkatan kegagalan. Berikut klasifikasi RPN dalam metode FMEA [22], yaitu:

TABEL II
(4 SKOR KLASIFIKASI PERHITUNGAN RPN)

Nilai RPN	Kriteria
> 200	Risiko Tinggi (tindakan langsung)
≤ 200	Tidak risiko (dapat ditoleransi)

Sumber: [23]

Hasil perhitungan RPN ini akan digunakan dalam proses *decision making* untuk menetapkan prioritas perbaikan. Mode kegagalan dengan nilai RPN paling tinggi hingga rendah dapat dipertimbangkan sebagai acuan tindakan dalam evaluasi serta dianalisis dengan kefokusan pada tingkat keparahan, frekuensi dan kesulitan dalam mendeteksi kegagalan tersebut.

G. Pendekatan *Failure Tree Analysis (FTA)*

Fault Tree Analysis (FTA) adalah suatu metode untuk mengidentifikasi risiko yang menggunakan pendekatan *top-down* untuk menganalisis kegagalan sistem, teknik ini memiliki peran yang dipergunakan terhadap kemunculan suatu pada risiko kegagalan [24]. Dalam istilah lain, metode FTA didefinisikan untuk menjelaskan maksud mengenai analaisis atau proses berpikir untuk menganalisis lebih dalam dan digunakan sebagai sinonim untuk memahami istilah yang dianggap benar secara analisis dari berbagai peneliti [25]. Metode dalam teknik ini dimulai dengan hasil kegagalan dari kejadian paling tinggi (*top event*), kemudian menguraikan berbagai faktor penyebab secara bertahap hingga menemukan sumber dari akar masalah (*root cause*). Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) menggambarkan keterkaitan kejadian antar faktor penyebab dalam bentuk diagram seperti bentuk diagram, sehingga memudahkan dalam analisis penyebab kecelakaan atau kegagalan dalam lingkungan atau area kerja. Untuk memperkuat analisis dalam metode FTA, memerlukan acuan dalam standar internasional yang menjadi pedoman dalam penerapannya, melalui standar yang telah ditetapkan pada proses identifikasi kegagalan dapat dilakukan secara terstruktur yang mencakup berbagai aspek [26], yaitu:

1. Pengertian dasar dalam prinsip metode FTA
2. Menggambarkan dan menjelaskan sistem dari pemodelan matematika.
3. Memberi penjelasan antara hubungan FTA dengan teknik pemodelan keandalan lainnya.
4. Penjelasan langkah-langkah yang saling berkaitan dalam penerapan FTA.
5. Identifikasi asumsi, peristiwa dan mode kegagalan
6. Penjelasan mengenai simbol secara umum yang sering digunakan

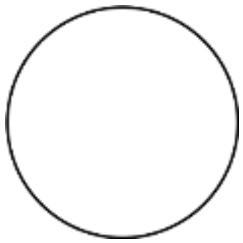
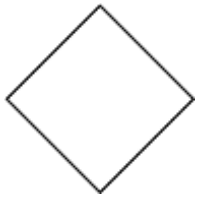
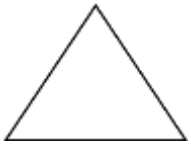
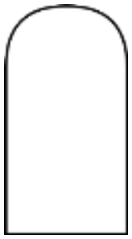
Analisis ini mengidentifikasi proses terjadinya kejadian tingkat atas, mengidentifikasi penyebab dari kejadian yang berulang. Melalui gerbang logika seperti gerbang AND dan gerbang OR menghubungkan berbagai sebab dari kejadian besar yang berpotensi mengakibatkan kejadian yang perlu dilakukan untuk memanfaatkan visualisasi grafis untuk menampilkan proses analisis lebih dalam. Pohon kesalahan menggambarkan kombinasi potensial dari berbagai kesalahan yang menghasilkan konsekuensi tidak diinginkan yang telah ditetapkan sebelumnya, sekaligus memvisualisasikan hubungan logis antara peristiwa pemicu yang mendasarinya. Adapun langkah-langkah dalam pembuatan alur kerja FTA [27], yaitu:

1. Mengidentifikasi peristiwa utama (*top event*).
2. Menetapkan kejadian yang berhubungan (*intermediate event*) di tingkat awal yang berhubungan dengan kejadian utama.
3. Menghubungkan antar *intermediate event* awal ke *top event* dengan menggunakan akar pohon gerbang logika (*logic gate*) dalam diagram pohon.
4. Menetapkan *intermediate* tingkat pertama atau level kedua.
5. Menghubungkan *intermediate event* tingkat kedua ke *intermediate* tingkat pertama dengan menggunakan akar pohon gerbang logika (*logic gate*).
6. Dan terakhir melajutkan hingga sampai ke basic event.

Dalam dunia industri manufaktur, metode teknik sperti FTA memiliki peran yang penting dalam mengidentifikasi dan menganalisis risiko yang dapat berpengaruh langsung terhadap kualitas produk, keselamatan kerja dan lingkungan kerja yang sehat. Dengan penggunaan FTA, perusahaan dapat mengambil keputusan yang tepat untuk mencegah dan mengurangi kejadian yang sering terjadi. Sistem kerja dalam penggunaan metode ini juga dapat di integrasikan dengan metode FMEA dalam mengukur tingkat risiko serta analisis kejadian yang lebih kompleks. FTA salah satu bentuk diagram yang bertujuan untuk menganalisis dengan memahami gejala yang timbul, dengan memberikan gamabar

visual yang mudah dipahami. Berikut jenis-jenis diagram pada simbol FTA [25], yaitu:

TABEL II
(5 SIMBOL ALUR SEBAB-AKIBAT)

Simbol	Istilah	Keterangan
	*Basic Event*	Simbol ini sebagai sumber dari faktor terjadinya risiko tersebut muncul. Bentuk ini menggambarkan lingkaran untuk menunjukkan akar atau sumber pemicu dari suatu kejadian pada risiko tersebut
	*Intermediate Event*	Bentuk pada tanda ini menggambarkan kejadian dengan memerlukan tahapan lanjutan yaitu dilanjut dengan simbol *logic gates* dalam menjelaskan kejadian
	*Undeveloped Event*	Simbol ini menunjukkan kejadian yang terjadi tidak dapat di analisis lebih mendalam sebab kekurangan informasi yang kurang memenuhi
	*Transfer Event*	Bentuk ini menunjukkan dari suatu kejadian yang memerlukan analisis lebih dalam, diluar dari kejadian utama pada analisis yang sedang diproses
	*AND Gate*	Pada simbol ini menggambarkan sebuah peristiwa risiko dapat terjadi apabila seluruh input peristiwa dibawahnya terjadi
	*OR Gate*	Simbol ini menunjukkan sebuah peristiwa risiko dapat terjadi apabila seluruh input peristiwa dibawahnya terjadi

Sumber: [25]

H. *Critical to Quality* (CTQ)

Critical to Quality (CTQ) merupakan karakterisitik kualitas yang paling penting dan berpengaruh terhadap kepuasan pelanggan maupun kesesuaian produk terhadap standar yang telah ditetapkan [28]. Dalam konsep pengendalian kualitas, CTQ digunakan untuk mengidentifikasi atribut atau spesifikasi produk yang bersifat kritis sehingga harus dikendalikan secara ketat selama proses produksi. Spesifikasi tersebut dapat berupa dimensi produk, kekuatan material, fungsi produk, tampilan visual, maupum tingkat kecacatan yang dapat mempengaruhi performa dan kualitas produk secara keseluruhan.

Dalam industri metode CTQ digunakan untuk mengidentifikasi jenis cacat dominan yang paling berpengaruh terhadap kualitas produk. Identifikasi CTQ dilakukan melalui pengumpulan data produk, observasi lapangan maupun evaluasi kebutuhan pelanggan. Setelah karakteristik CTQ ditentukan, perusahaan dapat melakukan pengendalian kualitas secara fokus pada titik kritis proses produksi yang memeili risiko tinggi.

Adapun tahapan dalam metode CTQ dalam menentukan kualitas produk [29]:

1. Identifikasi kebutuhan pelanggan atau identifikasi Voice of Customer (VOC)
2. Penentuan karakteristik kualitas produk
3. Pengumpulan data produk
4. Pengelompokkan berdasarkan karakteristik kualitas
5. Penentuan prioritas oerbaikan

Pada objek industri penerbangan, penerapan CTQ memiliki peran penting terhadap kualitas produk yang berkaitan langsung terhadap aspek keselamatan penerbangan. Pada komponen struktural pesawat, CTQ dapat berupa ketepatan dimensi, kekuatan material, kualitas produk serta kesesuaian struktur komponen. Identifikasi CTQ dilakukan

berdasarkan jenis kecacatan yang paling dominan pada proses produksi maupun inspeksi dan diperlukan untuk mengetahui jenis kegagalan yang terjadi.

I. Pareto

Pareto adalah salah satu *tools* atau suatu diagram untuk menganalisis dalam pengendalian kualitas yang digunakan sebagai identifikasi masalah utama berdasarkan tingkat frekuensi kejadian, sehingga perusahaan dapat menentukan prioritas dalam melakukan perbaikan [30]. Urutan prioritas dalam perbaikan untuk mengatasi permasalahan dapat dilakukan dengan memulai permasalahan dengan kontribusi paling banyak atau masalah paling dominan yang diperoleh dari diagram pareto. Diagram pareto mengikuti teori 80:20 yang mengartikan 20% jenis cacat dapat menyebabkan 80% dari kegagalan proses. Diagram pareto menggunakan gabungan dua grafik yaitu grafik batas dan grafik garis, grafik batang difungsikan untuk menunjukan item data yang disusun berurutan dari nilai yang terbesar hingga paling kecil, sedangkan grafik bentuk garis digunakan untuk menunjukkan persentase pada jumlah keseluruhan [31]. Adapun langkah-langkah dalam pembuatan diagam pareto:

1. Menentukan masalah yang akan diteliti, selanjutnya melakukan identifikasi pada kategori penyebab dari masalah yang akan diperbandingkan, lalu merencanakan dan mengumpulkan hasil data.

2. Membuat table atau cek list untuk mencatat frekuensi kejadian dari masalah yang hendak diteliti dengan berupa formulir pengumpulan data atau lembar kerja.

3. Membuat daftar masalah secara berurutan berdasarkan frekuensi kejadian dari tertinggi hingga ke terendah, hitung presentase frekuensi kumulatif dari total kejadian dan persentase dari total kejadian secara kumulatif.

4. Lalu menggambar dua garis vertikal pada sisi kanan dan kiri, sumbu x dan sebuah garis horizontal sumbu y.

5. Membuat grafik histogram atau diagram batang pada diagram pareto.

6. Menggambar suatu kurva kumulatif, lalu antumkan nilai kumulatif disebelah kanan atas dari interval setiap item masalah.

7. Kemudian pada diagram batang tertinggi merupakan prioritas perbaikan sebagai penyebab utama dari masalah kejadian.



GAMBAR II. 1
(PARETO DIAGRAM)

III. METODE

1. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)
Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) adalah metode yang digunakan untuk menilai dan memprioritaskan potensi kegagalan berdasarkan tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan terjadinya kegagalan (*occurance*) dan kemampuan dalam mendeteksi terjadinya kegagalan (*detection*) mengukur sejauh mana kemampuan sistem dalam mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak. Dalam penelitian ini, metode FMEA memberikan penilaian terhadap setiap kejadian atau kegagalan yang ditemukan pada komponen spar. Analisis ini dilakukan melalui dua langkah, yaitu menentukan penilaian peluang kejadian dan melakukan pehitungan hasil penilaian. Dalam kriteria penilaian FMEA, setiap parameter diberi skor antara 1 hingga 10, dengan setiap kejadian memiliki tingkat yang berbeda dan diperhitungkan lebih lanjut ke dalam perhitungan hasil penilaian.
Setelah setiap mode kegagalan diberi tingkat penilai berdasarkan nilai *severity*, *occurance* dan *detection*, kemudia dihitung dengan *Risk Priority Number* (RPN) yang digunakan sebagai menentukan prioritas dalam kegagalan untuk dievaluasi atau diperbaiki. Berikut rumus perhitungan RPN:

$$RPN = S \times O \times D \qquad \text{(I.1)}$$

Mode kegagalan dari hasil nilai RPN tertinggi menjadi prioritas utama untuk tindakan usulan perbaikan. Perbaikan yang dapat dilakukan mencakup peningkatan kontrol kualitas, pemeliharaan mesin atau prosedur sistem kerja. Setelah pendeketan FMEA dilakukan untuk menilai efektivitas perbaikan dalam menurunkan risiko, maka pendekatan ini dapat menjadi bahan prefensi perusahaan dalam mengambil keputusan yang tepat dalam menangani masalah dalam kejadian tersebut. Dari hasil analisis tersebut tahap berikutnya dapat dijadikan sebagai input dalam proses *Fault Tree Analysis* (FTA), agar dapat menghubungkan akar penyebab dari tingkat risiko dengan jelas.

2. *Fault Tree Analysis* (FTA)
Penggunaan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dilakukan setelah penilaian tingkat risiko penyebab kegagalan ditemukan melalui metode FMEA. Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) merupakan pendekatan analisis untuk mengidentifikasi secara deduktif antara hubungan sebab-akibat dengan kegalalan utama (*top*

event) dengan berbagai penyebab yang berkontribusi terhadap peristiwa pada kejadian tersebut. Setiap hubungan faktor yang terlibat dianalsis lebih lanjut menggunakan simbol seperti AND *Gate* dan OR *Gate*, yang menunjukkan gambaran hubungan antara faktor-faktor lain.

a. Menentukan Akar Masalah
Tahap pertama adalah menentukan akar permasalahan berdasarkan dari hasil observasi lapangan dan laporan data *defect*. Proses ini berkaitan dengan berbagai jenis cacat yang sering berulang pada komponen spar seperti kesalahan dalam proses produksi maupun kesalahan pekerja.

b. Menentukan Hubungan Penyebab
Tahap kedua, tahap ini menghubungkan setiap penyebab dasar dengan kejadian puncak melalui simbol (*logic gate*), seperti AND *Gate* dan OR *Gate*. Hubungan kedua simbol menggambarkan integrasi dari kondisi yang dapat memicu kegagalan utama dari kejadian tersebut. Dengan tahapan ini, peneliti dapat menggambarkan secara sistematis terkait faktor pemicu kegagalan antara manusia, mesin, material atau ligkungan.

c. Menentukan Sebab-Akibat
Tahapan terakhir, tahap pada proses ini menentukan pola hubungan sebab-akibat yang paling dominan terhadap kejadian yang paling tinggi. Dari alur pohon kesalahan yang telah disusun, peneliti dapat mengetahui jalur kegagalan dari akar hingga kejadian yang menyebabkan kegagalan.

Dengan cara ini, penggunaan metode FTA dapat membantu dalam mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan produk dengan memitigasi penyebab utama yang telah teridentifikasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Hasil Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

1. *Hole Wrong Location* (Lubang salah posisi) pada Lower Spar (212-23201-01.2) dan *L* Explice (212-23200-07.2)

Berdasarkan hasil analisis FMEA pada nilai *Risk Priority Number* (RPN) dengan jenis cacat '*Hole Wrong Location* (Lubang salah posisi) pada *Lower Spar* (212-23201-01.2) dan L *Explice* (212-23200-07.2)' memiliki skor sebesar 450. Berdasarkan kajian literatur, skor RPN > 200 merupakan kegagalan sebagai prioritas utama untuk dilakukan perbaikan secara langsung [23]. Kejadian ini terjadi akibat posisi lubang tidak sesuai dengan gambar teknik, yang berdampak signifikan terhadap kualitas produk yaitu dapat menurunkan kekuatan sambungan antar komponen serta berpotensi mengganggu kekuatan dimensi lubang lain, serta kesalahan posisi lubang tidak hanya berdampak pada area 9yste komponen, akan tetapi dapat mempengaruhi integritas keseluruhan struktur part.

Berdasarkan hasil analisa 5W1H, penyebab utama kegagalan ini disebabkan oleh kesalahan operator dalam menginterpretasikan hasil gambar teknik, seperti ketelitian dan pemahaman terhadap gambar teknik juga dapat menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan. Kegagalan ini terjadi pada proses *drilling* dan *assembly*, khususnya pada komponen yang memerlukan tingkat presisi tinggi. Secara teknis kejadian ini muncul ketika proses pengeboran salah satunya pada kondisi awal produksi saat dilakukan proses *drilling* berlangsung. Pihak yang terlibat dalam melakukan proses ini meliputi operator produksi yang memiliki peran dalam pelaksanaan dan melakukan langsung tahapan produksi. Untuk mengatasi permasalahan ini memerlukan upaya perbaikan berupa peningkatan sistem pengendalian proses, baik melalui perbaikan metode kerja, peningkatan akurasi alat, maupun penguatan dalam inspeksi.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan sistem kontrol proses, pelatihan operator dan penerapan metode perbaikan berekalnjutan mampu mengurangi peningkatan kegagalan secara signifikan [32]. Kejadian pada penyebab ini memiliki kejadian yang serupa bahwa kegagalan *hole wrong location* dipengaruhi dari kombinasi penyebab faktor pekerja dan faktor mesin, sehingga memerlukan pendekatan perbaikan yang terintergrasi dalam menurunkan risiko kegagalan dan meningkatkan kualitas produk.

2. Edge margin not according *pada* Skin Sheet *P/N 212-23201-11.2*

Dari hasil FMEA pada hasil perhitungan RPN, skor pada jenis cacat '*Edge margin not according* pada *Skin Sheet* P/N 212-23201-11.2' memiliki skor sebesar 360. Hasil skor tersebut mengacu pada hasil kajian literatur bahwa skor > 200 menunjukkan skor ini dalam kategori prioritas tinggi untuk segera memerlukan tindakan langsung [23]. Permasalahan ini ditandai oleh penyimpangan jarak antara pusat lubang dengan tepi material yang tidak sesuai dengan standar minimum memiliki dampak signifikan terhadap kualitas struktur. Kondisi ini berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan diarea sekitar lubang, sehingga meningkatkan risiko terjadinya retak, terutama ketika komponen mengalami beban dinamis seperti getaran yang tinggi saat diterbangkan diudara.

Apabila dianalisa menggunakan 5W1H, faktor utama dari permasalahan ini dikaitkan dengan masalah *workmanship error*, seperti kurangnya ketelitian operator dalam menentukan posisi pengeboran yang mengakibatkan standar tidak sesuai dan penandaan titik lubang tidak sesuai. Pihak yang berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan produk ini berkaitan dengan operator atau teknisi *drilling* yang melakukan pengoperasian dalam proses berlangsung. Selain itu, faktor tidak teliti dalam pembacaan *drawing* juga berpotensi mengakibatkan kesalahan dalam interpretasi titik referensi dan kurangnya koordinasi dengan perubahan *drawing*.

Dengan beberapa studi menyatakan bahwa cacat dominan seperti *hole distance* memiliki RPN tinggi yang disebabkan oleh alat ukur yang tidak presisi, kurangnya *maintenance* dan pelatihan operator [33]. Pada hasil temuan jenis cacat ini memperkuat pentingnya penerapan kontrol kualitas yang

ketat pada proses *drilling*, khususnya dalam memastikan kesesuaian terhadap drawing dan standar teknis yang telah ditentukan. Implikasi dari hasil ini tidak hanya berdampak pada kualitas produk, tetapi juga pada efisiensi proses produksi. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan seperti peningkatan kompentensi operator, penggunaan alat bantu yang lebih presisi serta penguatan sistem inspeksi untuk menekan potensi terjadinya kegagalan yang serupa.

3. Out of Tolerance Edge Margin *pada* skin sheet *P/N 212-23100-13.1 dan 212-23100-15.1*

Berdasarkan evaluasi menggunakan metode FMEA menunjukkan jenis cacat '*Out of Tolerance Edge Margin* pada *skin sheet* P/N 212-23100-13.1 dan 212-23100-15.1' memiliki hasil perhitungan RPN yang sama yaitu skor sebesar 360. Hasil studi literatur menunjukkan bahwa skor > 200 menunjukkan skor ini dalam kategori prioritas tinggi untuk segera dilakukan perbaikan langsung [23]. Jenis cacat ini mengindikasikan bahwa terdapat penyimpangan dimensi yang secara langsung memengaruhi kinerja struktural sambungan komponen. Ketidaksesuaian jarak tepi dengan standar yang ditentukan menyebabkan distribusi beban pada area *rivet* menjadi tidak seimbang, sehingga memicu terjadinya konsentrasi tegangan. Dengan kondisi masalah tersebut berpotensi munculnya retakan awal serta meningkatkan risiko kegagalan akibat beban atau tekanan berulang.

Maka dari hasil analisa 5W1H permasalahan ini terjadi adanya kemunculan jenis cacat berupa *edge margin* yang berada diluar toleransi pada beberapa titik *rivet*, yang dilakukan pada proses *drilling* dan *riveting* di area *skin sheet* di komponen tertentu. Kemunculan jenis cacat ini terjadi saat proses pengeboran dan pemasangan *rivet* berlangsung, keterlibatan dalam proses produksi ini melibatkan operator produksi yang memungkinkan melakukan dan mengatur posisi lubang. Penyebab utama ini terjadi disebabkan oleh faktor *manpower*, seperti kesalahan *setting* dan kurangnya arahan prosedur kerja. Sementara itu, kegagalan ini terjadi dapat dijelaskan melalui proses penentuan titik lubang yang tidak presisi, sehingga posisi *rivet* bergeser dari standar yang ditentukan dan terjadinya penyimpangan *edge margin*.

Beberapa studi menjelaskan bahwa area di sekitar kepala *rivet* merupakan zona kritis yang paling rentan terhadap kerusakan dan delaminasi, terutama ketika terjadi ketidaksesuain geometri lubang [34]. Dengan kejadian kegagalan penerapan kontrol kualitas yang baik dan konsisten terhadap standar teknis, khususnya pada proses manufaktur yang sangat penting menjaga kualitas agar produk sesuai jangka waktu dan sesuai permintaan. Dampak yang dihasilkan tidak hanya bepengaruh pada kualitas produk, tetapi pada efisiensi produksi serta potensi risiko kegagalan ketika digunakan. Maka, dengan upaya perbaikan seperti peningkatan kemampuan operator, penggunaan alat yang lebih presisi, serta penguatan sistem inspeksi agar hasil produksi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

4. Hole Not Match *atau* Misalignment *pada* Former *212-21107-01.4*

Pada hasil analisis FMEA nilai perhitungan RPN pada jenis cacat '*Hole Not Match* atau *Misalignment* pada *Former* 212-21107-01.4' memiliki skor sebesar 300. Dengan studi literatur sebelumnya skor ini dengan > 200 menunjukkan bahwa permasalahan ini memerlukan tindakan secara langsung [23]. Dengan adanya jenis kegagalan lubang dengan diameter 2,5 mm yang tidak sesuai spesifikasi desain menunjukkan bahwa proses *drilling* tidak sesuai secara tepat pada refrensi gambar teknik. Kondisi ini dapat mengganggu saat proses perakitan, sehingga distribusi beban menjadi tidak seimbang dan meningkatkan terjadinya deformasi atau kegagalan pada sambungan pada komponen lain.

Jika dianalisa menggunakan 5W1H, permasalahan ketidaksesuaian posisi lubang terjadi pada proses *drilling* pada komponen *former* 212-21107-01.4, khususnya pada penentuan titik pengeboran. Permasalahan ini berkaitan dengan bagian produksi dan *supplier* internal, dimana terdapat kesalahan alat pada mesin dan hasil gambar teknik yang tidak sesuai menjadi faktor utama penyebab terjadinya cacat produk. Selain itu, kondisi pendukung seperti kurangnya pelatihan serta kurang optimalnya pengawasan memperbesar kemungkinan terjadinya penyimpangan tersebut. Proses terbentuknya cacat terjadi ketika pengeboran dilakukan tidak sesuai dengan *layout*, sehingga menghasilkan lubang yang tidak berada pada posisi yang telah ditentukan. Studi sebelumnya menegaskan bahwa kualitas lubang hasil *drilling* sangat menentukan ketahanan kelemahan struktur karena lubang berperan sebagai titik konsentrasi tegangan [35]. Temuan ini sejalan dengan hasil analisis yang menunjukkan adanya penyimpangan pada proses *drilling* yang tidak hanya berdampak pada penurunan kualitas produk, melainkan dapat meningkatkan potensi perbaikan ulang dan pemborosan waktu dan biaya. Oleh sebab itu, dari kejadian ini memerlukan langkah perbaikan yang menyeluruh seperti peningkatan pengalaman kerja, *maintenance* terhadap alat agar lebih akurat serta penguatan sistem pengendalian kualitas agar proses produksi berjalan sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan.

5. Unauthorized Hole *atau* Pre-drilled Hole *pada* Profile *212-21100-10.3*

Berdasarkan hasil FMEA pada perhitungan RPN dengan jenis cacat '*Unauthorized Hole* atau *Pre-drilled Hole* pada *Profile* 212-21100-10.3' memiliki skor sebesar 270. Berdasarkan studi literatur jika skor > 200 dapat dikatakan bahwa memerlukan tindakan secara langsung, serta perbaikan dengan prioritas utam [23]. Masalah ini menunjukkan adanya kondisi lubang telah dibuat sebelum proses *drilling* dilakukan dan tidak sesuai dengan posisi yang ditentukan dalam gambar teknik. Lubang yang tidak sesuai spesifikasi akan berpotensi menjadi lokasi kemunculan retakan pada material, terutama ketika komponen menerima beban berulang maupun getaran selama digunakan di udara. Dengan hasil analisa menggunakan 5W1H, permasalahan keberadaan lubang yang tidak sesuai posisi ini terjadi pada tahap sebelum proses *drilling* dilakukan dan berkaitan dengan aktivitas pada proses sebelumnya. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh *supplier* internal yang menjadi penyebab utama kegagalan produk, seperti kesalahan mesin yang tidak sesuai titik koordinat dan kegagalan sistem kontrol. Dengan adanya lubang yang tidak terkontrol akan berdampak pada penurunan kekuatan struktur, sebab area material pada sekitar lubang menjadi titik

lemah yang rentan terhadap konsetrasi tegangan. Selain itu, penggunaan pada proses sebelumnya juga dapat menjadi penurunan kualitas atau mengganggu *tool* yang digunakan. Proses terjadinya cacat produk dapat dijelaskan sebagai akibat aktivitas pada *supplier* internal dan kurangnya tahapan koordinasi pada bagian produksi, sehingga kesalahan tersebut dapat mengganggu ke proses selanjutnya.

Berdasarkan penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa cacat akibat proses *drilling*, seperti delaminasi dan kerusakan mikrostruktur pada lubang, berhubungan langsung dengan konsentras tegangan yang dapat memicu kegagalan pada struktur lubang [36]. Kondisi tersebut menunjukkan bawha permasalahan kualitas bersifat menyeluruh dan saling berkaitan antar tahapan proses. Dampaknya tidak hanya menurunkan kualitas produk, melainkan juga terhadap seluruh rantai pasok internal perusahaan. Implikasi dari kejadian ini tidak hanya berdampak pada kualitas produk, akan tetapi dapat meningkatkan biaya akibat *rework* dan penundaan produksi. Maka, diperlukan tahap perbaikan yang terstruktur seperti penguatan standar penerimaan material, audit rutin terhadap supplier internal, serta peningkatan koordinasi antar departemen untuk memastikan setiap komponen yang dipasok telah memenuhi spesifikasi sebelum dilanjutkan ke tahap produksi lainnya.

6. Extra Hole *pada LH* side *pada (*Fillet *212-22106-02.1 dan 212-22106-04.1) dan* Extra Hole *pada RH* side *pada (*Fillet *212-22106-02.2 dan 212-22106-04.2)*

Pada hasil perhitungan RPN jenis cacat '*Extra Hole* pada LH *side* pada (*Fillet* 212-22106-02.1 dan 212-22106-04.1) dan *Extra Hole* pada RH *side* pada (*Fillet* 212-22106-02.2 dan 212-22106-04.2)' memiliki skor sebesar 210. Hasil ini membuktikan bahwa skor ditas > 200 menunjukkan permasalahan ini tetap memerlukan perhatian dan tindakan perbaikan [23]. Jenis cacat ini menunjukkan bahwa adanya lubang tambahan pada proses *drilling* yang berdampak pada penurunan pada sambungan antar komponen lain. Kemunculan lubang tambahan dalam gambar teknik menyebabkan penurunan efektivitas material, sehingga kemampuan komponen dalam menahan beban, getaran, maupun tekanan udara menjadi lemah. Kondisi ini memicu terbentukanya konsentrasi tegangan pada area tertentu yang dapat menimbulkan retakan dan meningkatkan resiko kegagalan, salah satunya pada bagian *fillet* yang memiliki distribusi beban yang cukup kompleks.

Analisis 5W1H ini menunjukkan bahwa permasalahan terjadi pada area *fillet* komponen dan muncul pada tahap proses *drilling* sebelum dilakukan ke proses *assembly*. Hal ini berkaitan dengan aktivitas operator ketika melakukan eksekusi hasil gambar teknik, dimana lubang tambahan terbentuk akibat ketidaksesuaian terhadap gambar teknik. penyebab utama dipengaruhi oleh kesalahan dalam memahami interpretasi hasil gambar teknik, kondisi ini menjadi memicu terjadinya cacat produk seperti tidak adanya proses verifikasi sebelum dan sesudah dilakukan ke dalam proses *drilling*, sehingga menimbulkan adanya lubang tambahan.

Hasil penelitian sebelumnya membuktikan bahwa kesalahan geometris pada lubang, seperti ketidaktegakan atau deviasi posisi, secara signifikan memengaruhi kekuatan sambungan dan kelemahan umur komponen [37]. Dengan adanya kejadian ini penting dalam disiplin terhadap prosedur kerja dan standar teknis dalam setiap tahapan produksi. Dampak yang akan ditimbulkan tidak hanya berkaitan dengan penurunan kualitas komponen, melainkan dapat menghambat kelanjutan proses ke tahap *assembly* serta meningkatkan potensi perbaikan ulang bahkan pembuangan komponen. Maka dari itu, diperlukan perbaikan ulang yang terstruktur, seperti peningkatan kinerja operator dan sistem pengendalian kualitas agar hasil produksi tetap sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

7. Guide hole gusset *212-21121-10.1 pada* spar *212-21347-1A01 / -2A02 dan* frame *4B 212-21354.1A01 / -1A02*

Berdasakan hasil perhitungan RPN pada jenis cacat '*Guide hole gusset* 212-21121-10.1 dipasang ke spar 212-21347-1A01 / -2A02 dan *frame* 4B 212-21354.1A01 / -1A02' memiliki skor diambang batas dengan sebesar 200. Dari skor tersebut pada kajian literatur menunjukkan bahwa skor melebihi batas atau > 200 memerlukan adanya tindaka untuk dilakukan perbaikan [23]. Hal ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian posisi lubang yang terlalu dekat dengan tepi material, kondisi ini mengakibatkan area disekitar lubang mengalami penurunan kekuatan jarak tepi yang tidak memenuhi standar minimum. Dalam proses teknik posisi lubang yang terlalu dekat dengan tepi dapat meningkatkan konsentrasi tegangan pada material, sehingga memicu munculnya retakan ketika komponen menerima beban, getaran maupun tekanan udara.

Berdasrkan analisa menggunakan 5W 1H proses ini menunjukkan bahwa permasalahan terjadi pada tahap *drilling guide hole* diarea sambungan *gusset*, *spar* dan *frame*. Ketidaksesuaian muncul akibat posisi pengeboran yang terlalu dekat dengan tepi komponen sehingga melampaui batas toleransi yang telah ditentukan dalam gambar teknik. Kondisi tersebut berkaitan dengan aktivitas operator saat melakukan penandaan dan pengeboran lubang. Kemungkinan besar penyebab utama disebabkan oleh penggunaan alat bantu yang kurang presisi dan tidak optimalnya verifikasi pengukuran sebelum proses dilakukan, sehingga menyebabkan komponen tidak dapat dilanjutkan ke tahap proses berikutnya karena tidak memenuhi standar kualitas struktur.

Dengan hasil temuan ini bahwa permasalahan posisi *guide hole* yang telalu dekat dengan tepi tidak hanya faktor teknis, akan tetapi juga berkaitan dengan aspek pengendalian proses dan kompentensi operator. Hal ini juga menunjukkan bahwa cacat akibat proses *drilling* mampu meningkatkan konsentrasi deformasi dan memicu kerusakan disekitar area lubang [36]. Dampak yang ditimbulkan tidak hanya mempengaruhi kualitas produk, tetapi juga meningkatkan potensi *rework*, scrap dan keterlambatan proses produksi. Maka, tahap ini memerlukan langkah perbaikan, seperti peningkatan ketelitian operator dalam proses *marking* dan *drilling*, pengunnaan *jig* atau *fixture* yang lebih presisi dan penguatan pengawasan kualitas setiap proses agar berjalan sesuai standar dan spesifikasi yang ditetapkan.

B. Analisis Hasil Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)

1. *Hole Wrong Location* (Lubang salah posisi) pada *Lower Spar* (212-23201-01.2*)* dan L Explice (212-23200-07.2)

Dengan jenis cacat '*Hole Wrong Location* (Lubang salah posisi) pada *Lower Spar* (212-23201-01.2) dan L Explice (212-23200-07.2)' yang dianalisis menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) menunjukkan bahwa akar penyebab utama berasal dari dua faktor, yaitu ketidaksesuaian pengukuran dan kesalahan dalam memahami gambar teknik. berdasrkan analisa pada 5W1H permasalahan yang terjadi berupa kesalahan posisi lubang pada komponen *lower spar* dan *lower explice* yang berdampak pada penurunan kualitas sambungan serta berpotensi menyebabkan kegagalan strukrur. Kondisi ini dipengaruhi oleh faktor manusia atau *manpower* seperti kurangnya ketelitian ketika proses *marking* atau *layout*, tidak melakukan verifikasi posisi lubang, serta lemahnya kontrol kualitas. Selain itu, adanya faktor sistem seperti desain gambar yang tidak sesuai atau kesalahan dalam interpretasi posisi koordinat lubang. Dengan pihak yang melakukan dalam proses ini bekaitan dengan pekerja produksi yang bertanggung jawab terhadap penyusunan dan validasi gambar teknik. permasalahan ini muncul pada proses *drilling* dan *assembly* di area produksi komponen struktur, khususnya pada tahap pengeboran lubang sebelum proses perakitan berlangsung, sehingga kesalahan yang terjadi berdampak ke tahap berikutnya. Mekanisme kegagalan ini terjadi akibat kesalahan kecil yang tidak terdeteksi sejak awal, terutama tidak adanya proses verifikasi yang memadai, sehingga menghasilkan deviasi posisi lubang yang tidak sesuai dengan standar yang telah ditentukan.

Beberapa studi sebelumnya menyatakan pentingnya sistem monitoring dan evaluasi kualitas lubang secara *real-time* untuk mendeteksi potensi cacat sejak dini [38]. Dengan hal tersebut menegaskan bahwa keberadaan sistem pengendalian yang mampu mendeteksi kesalahan posisi lubang secara langsung selama proses produksi dapat mencegah peningkatan kesalahan menjadi cacat produk yang lebih serius. Hal ini serupa dengan kejadian bahwa permasalahan ini tidak muncul akibat satu penyebab, melainkan hasil dari kombinasi berbagai kelemahan yang saling berkaitan, baik dari sisi manusia seperti kurangnya ketelitian, maupun dari sisi metode berupa kurang optimalnya proses verifikasi. Dengan adanya sistem monitoring yang terintegrasi, setiap potensi kesalahan dari berbagai aspek tersebut dapat segera diidentifikasi dan dilakukan tindakan sebelum berdammpak lebih luas.

2. *Edge margin not according pada* Skin Sheet *P/N 212-23201-11.2*

Berdasarkan hasil penyusunan menggunakan metode FTA pada jenis cacat '*Edge margin not according* pada *Skin Sheet* P/N 212-23201-11.2' menunjukkan adanya permasalahan yang disebabkan dari dua faktor penyebab, yaitu ketidaktelitian dalam membaca *drawing* serta kesalahan dalam penntuan dan pengukuran posisi lubang. Dengan hasil analisa 5W1H, permasalahan ini terjadi berupa ketidaksesuaian jarak tepi pada komponen *skin sheet* P/N 212-23201-11.2 yang berpotensi menurunkan kekuatan sambungan dan meningkatkan risiko kegagalan struktural komponen. Penyebab utama ini berasal dari kesalahan interpretasi titik referensi lubang, kurangnya koordinasi terhadap hasil revisi gambar teknik, serta kesalahan dalam penandaan titik lubang yang tidak sesuai dimensi. Kondisi ini melibatkan operator produksi yang memiliki peran dalam mengimplementasikan gambar teknik. Kemudian kejadian ini muncul pada proses *marking* dan *drilling* ketika proses *drlling* dilakukan, khususnya pada tahap perakitan sehingga kesalahan yang terjadi dapat berdampak pada keseluruhan kualitas produk. Proses terjadinya cacat produk ini merupakan penyebab dari kesalahan yang tidak terdeteksi sejak awal akibatnya terdapat lemahnya proses verifikasi dan kurangnya pengawasan.

Temuan dari hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kualitas lubang sangat dipengaruhi oleh parameter proses, jenis alat dan metode pengerjaan, yang berhubungan langsung dengan potensi terjadinya cacat seperti *edge margin violation* [39]. Kejadian ini berkaitan dengan hasil analisis yang menegaskan bahwa cacat dalam proses manufaktur tidak hanya bergantung pada faktor tunggal, melainkan akibat dari kurangnya peningkatan antara perencanaan desan dan pelaksaaan dilapangan. Ketika spesifikasi teknis yang telah dirancang tidak sesuai atau diterapkan secara konsisten oleh operator, maka berakibat deviasi pada posisi lubang dan ketidaksesuaian jarak tepi. Oleh sebab itu, implikasi dari hasil temuan ini menekankan pentingnya peningkatan kemampuan operator melalui pelatihan, penerapan prosedur kerja khusunya pada tahap *marking* dan *drilling*.

3. *Out of Tolerance Edge Margin* pada *skin sheet* P/N 212-23100-13.1 dan 212-23100-15.1

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dengan jenis cacat '*Out of Tolerance Edge Margin pada skin sheet* P/N 212-23100-13.1 dan 212-23100-15.1' menunjukkan bahwa akar masalah yang terjadi berasal dari kesalahan pada tahap setting serta belum optimalnya penerapa prosedur kerja. Pada hasil analisa menggunakan 5W1H, permasalahan yang terjadi berupa ketidaksesuaian jarak tepi pada komponen *skin sheet* P/N 212-23100-13.1 dan 212-23100-15.1 yang dapat menurunkan kekuatan sambungan dan meningkatkan potensi kegagalan struktur komponen. Kondisi ini dipicu oleh berbagai faktor, seperti tidak ditetapkannya batas minimum *edge margin*, kesalahan dalam memasukkan posisi lubang, ketidakstabilan benda kerja saat proses berlangsung, serta tidak adanya proses verifikasi sebelum pekerjaan dilanjutkan ke tahap berikutnya. Keterlibatan dalam proses produksi melibatkan operator produksi yang berperan sebagai pelaksana utama dan memastikan kesesuaian proses. Permasalahan ini terjadi ketika dilakukannya pada tahap awal seperti *setup*, *marking* dan *drilling*, sehingga kesalahan yang tidak terdeteksi sejak awal dapat berdampak pada proses berikutnya dan merusak komponen.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kualitas lubang sangat bergantung pada kombinasi antara parameter pemotongan, metode pengerjaan dan kondisi alat yang digunakan, sehingga kesalahan kecil pada tahap awal berdampak langsung terhadap hasil akhir [39]. Dengan hasil ini menegaskan bahwa kegagalan dengan jenis cacat produk

tersebut sangat penting dalam peningkatan kinerja operator melalui pelatihan agar memahami keterkaitan parameter proses dan kualitas produk, serta penguatan sistem validasi agar setiap peruahan dapat diimplementasikan secara tepat. Maka, dengan pendekatan tersebut dapat meminimalisirkan muncul nya kejadian seruupa dan meningkatkan kualitas produk secara berkelanjutan.

4. *Hole Not Match* atau *Misalignment* pada *Former* 212-21107-01.4

Hasil analisis dengan menggunakan metode FTA pada jenis cacat '*Hole Not Match* atau *Misalignment* pada *Former* 212-21107-01.4' mengindikasikan adanya cacat produk dengan penyebab utama disebabkan oleh berbagai faktor, yaitu kesalahan alat atau mesin serta ketidaksesuain gambar teknik. Hasil analisa 5W1H, menunjukkan permasalahan ini muncul terjadi berupa ketidakselarasan posisi lubang pada komponen *former* yang dapat menghambat proses perakitan dan menurunkan kualitas sambungan terhadap komponen lain. Penyebab yang terjadi meliputi ketidaksesuain *locator* pada mesin, kode program yang tidak terbaca dengan baik, serta kondisi mata bor yang tidak stabil selama pengeboran. Selain itu, dengan hasil gambar teknik juga ditemukan suatu masalah seperti *jig* atau *fixture* yang tidak sesuai *drawing* pada dimensi lubang. Keterlibatan dalam proses ini melibatkan supplier internal dalam menangani proses produksi berlangsung sebelum dilanjutkan ke proses berikutnya. Pengaruh ini juga timbul pada tahap saat proses *drilling*, sehingga kesalahan yang muncul berdampak langsung terhadap kualitas komponen.
Berdasarkan beberapa studi menunjukkan bahwa kualitas lubang sangat dipengaruhi oleh kondisi proses dan dapat diprediksi melalui sinyal mesin seperti getaran dan gaya potong, yang berkaitan dengan stabilitas alat dan akurasi hasil pengeboran [40]. Dengan hasil penelitian ini memperkuat bahwa kesalahan lubang secara acak yang tidak sesuai ketentuan dipicu oleh faktor pekerja atau kesalahan dokumen teknis, tetapi juga berhubungan dengan proses yang terjadi ketika dilakukan secara langsung. Hubungan ini berkaitan dengan hasil analisis yang menunjukkan adanya ketidakstabilan alat, kesalahan pada tahap setting, serta lemahnya verifikasi yang menjadi pemicu kemunculan kejadian produk cacat. Maka dari itu, memerlukan integrasi dengan pengendalian kondisi mesin, serta kesesuaian desain terhadap pelaksanaan ketika proses berlangsung, sehingga kualitas hasil akhir dapat ditingkatkan secara tepat.

5. *Unauthorized Hole* atau *Pre-drilled Hole* pada *Profile* 212-21100-10.3

Dengan hasil pembahasan pada jenis cacat '*Unauthorized Hole* atau *Pre-drilled Hole* pada *Profile* 212-21100-10.3' juga mengindikasikan adanya permasalahan dari berbagai faktor, yaitu kesalahan mesin dan kegagalan sistem kontrol. Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan dengan 5W1H, kemunculan awal pada permasalahan ini berupa lubang yang tidak sesuai atau tidak direncanakan terhadap komponen *spar* yang berpotensi menurunkan integritas struktur serta mengganggu proses pembuatan. Kondisi ini dipicu oleh faktor seperti tidak akurat sensor posisi, adanya bekas tekanan pada proses sebelumnya, serta kesalahan dalam menginput titik koordinat lubang. Selain itu, dengan sistem kontrol yang dilakukan juga terdapat kesalahan seperti tidak akuratnya *locator* serta adanya keterlambatan respon sistem yang menjadi proses tidak berjalan sesuai ketentuannya. Permasalahan ini juga disebakan dari *supplier* internal, yang berpengaruh terhadap proses produksi yang akan dikirim dan dilanjutkan ke tahap produksi. Mekanisme kegagalan ini dibentuk dari dua aspek anatara kurang tepatnya sistem sensor dan lemahnya respon sistem dalam mendeteksi saat proses berlangsung.
Temuan pada beberapa studi menyatakan bahwa penggunaan sensor seperti getaran, gaya potong, dan temperatur sangat penting dalam sistem monitoring modern untuk mendeteksi kondisi alat dan potensi cacat selama proses *machining* [41]. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam mengidentifikasi penyimpangan proses secara dini akan meningkat apabila di dukung oleh perawatan mesin agar sensor dapat mendeteksi secara tepat. Dengan hasil analisis ini mengindikasikan bahwa munculnya cacat seperti *Unauthorized Hole* tidak dipengaruhi oleh faktor pekerja, akan tetapi juga dengan adanya keterbatasan sistem dalam merespon dan mendeteksi yang kurang tepat. Oleh sebab itu, penerapan sistem monitoring menjadi hal penting untuk meningkatkan ketelitian dan mengurangi kemungkinan kejadian yang berulang.

6. *Extra Hole* pada *LH* side pada *(*Fillet 212-22106-02.1 dan 212-22106-04.1) dan Extra Hole *pada RH* side *pada (*Fillet 212-22106-02.2 dan 212-22106-04.2)

Dari hasil analisis pada jenis cacat '*Extra Hole* pada LH *side* pada (*Fillet* 212-22106-02.1 dan 212-22106-04.1) dan *Extra Hole* pada RH *side* pada (*Fillet* 212-22106-02.2 dan 212-22106-04.2)' mengindikasikan bahwa permasalahan utama ini disebabkan dari adanya ketidaktelitian dalam membaca gambar teknik. Berdasarkan analisa menggunakan 5W1H, penyebab utama terjadi berupa munculnya lubang tambahan yang tidak sesuai pada kompononen *fillet* pada sisi LH dan RH, yang akan berdampak melemahkan kekuatan struktur komponen serta memperlambat proses produksi. Kejadian dengan kondisi tersebut meliputi tidak mengikuti referensi dimensi lubang secara tepat, tidak adanya *double check* terhadap dokumen baru dan kesalahan dalam membaca skala koordinat lubang. Dalam proses ini melibatkan pekerja produksi yang melakukan proses tersebut, kemudian masalah ini mempengaruhi tahapan proses produksi yaitu tahap *drilling*, khususnya pada pembuatan pengeboran lubang, sehingga kesalahan ini sulit jika tidak dilakukan tindakan sejak awal.
Berdasarkan penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa sistem monitoring dan verifikasi berbasi *real-time* sangat penting untuk memastikan kesesuaian antara desain dan implementasi proses produksi [38]. Dari penelitian ini sejalan dengan hasil analisis yang menunjukkan bahwa jenis cacat produk *extra hole* terjadi akibat kurangnya ketelitian dalam membaca gambar teknik serta tidak adanya proses verifikasi terhadap dokumen baru. Maka dari itu, peningkatan sistem monitoring secara *real-time* dengan prodsedur kerja yang telah ditetapkan menjadi hal penting untuk memastikan setiap tahapan proses dilakukan sesuai spesifikasi, sehingga

mengurangi risiko kegagalan produk dan menjaga kualitas komponen tetap terjaga.

7. *Guide hole gusset* 212-21121-10.1 pada *spar* 212-21347-1A01 / -2A02 dan *frame 4B 212-21354.1A01 / -1A02*

Berdasarkan hasil FMEA yang dilanjut menggunakan metode FTA pada jenis cacat '*Guide hole gusset* 212-21121-10.1 pada *spar* 212-21347-1A01 atau -2A02 dan *frame* 4B 212-21354.1A01 atau 1A02' menunjukkan bahwa penyebab utama kejadian kegagalan produk ini disebabkan dari ketidaksesuaian proses pengukura serta penggunaan *jig* yang tidak tepat. Dengan hasil analisa pada 5W1H, permasalahan ini terjadi karena adanya ketidaktepatan posisi guide hole pada komponen *gusset* 212-21121-10.1 yang dipasang pada *spar* 212-21347-1A01/-2A02 dan *frame* 4B 212-21354.1A01 atau -1A02. Kondisi tersebut berpotensi terjadinya ketidaksesuaian posisi lubang, menghambat proses perakitan serta menurunkan kualitas sambungan pada struktur komponen. Penyebab utamanya adalah berasal dari tidak dilakukannya pengukuran ulang, pengukuran tanpa bantuan *jig* serta kondisi *locator jig* yang longgar dan aus. Kejadian ini muncul pada tahap proses *drilling*, khususnya pada proses awal sebelum dilakukan ke dalam proses *assembly*, sehingga kesalahan kecil dapat mempengaruhi ke proses selanjutnya. Kegagalan ini terbentuk akibat lemahnya kontrol pengukuran dan kurang optimalnya penggunaan alat bantu yang dapat menjaga akurasi posisi lubang selama proses berlangsung.
Pada hasil temuan jenis cacat *guide hole* memperluas pemahaman bahwa kegagalan dalam proses manufaktur sering terjadi akibat kurangnya integrasi antara prosedur pengukuran, kondisi *jig* serta pengawasan proses dilapangan. Dengan hal yang serupa bahwa getaran selama proses *drilling* dapat menyebabkan *chatter* yang berdampak pada penurunan akurasi lubang apabila tidak dimonitor dengan baik [42]. Maka dengan kondisi ini memerlukan perawatan dan pemeriksaan terhadap kondisi *locator jig* agar dapat meminimalisirkan kejadian berulang dan menjaga kualitas produk tetap terjaga.

C. Implikasi Manajerial

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode FMEA dan FTA implikasi pada hasil analisis pada studi ini memberikan gambaran bahwa permasalahan kualitas yang terjadi tidak hanya berdampak pada produk akhir melainkan juga mencerminkan kondisi sistem operasional perusahaan. Tingginya nilai RPN pada beberapa jenis cacat menunjukkan risiko kegagalan masih berada pada level yang signifikan dan berpotensi mempengaruhi kinerja produksi, baik dari bentuk kualitas, waktu dan biaya. Tahapan kritis seperti *marking* dan *drilling* masih terdapat adanya kelemahan dalam pengendalian proses, salah satunya akibat belum ada standar operasional yang mampu meminimalkan varabilitas kerja operator. Kurangnya konsistensi dalam menjalankan prosedur seperti pemeriksaan sejak awal sebelum memasuki proses *drilling*, hal ini menjadi salah satu penyebab utama munculnya berbagai jenis cacat, termasuk kesalahan posisi lubang, ketidaksesuaian *edge margin* hingga terbentuknya lubang tambahan pada struktural komponen.
Dalam implikasi ini diperlukan upaya untuk memperkuat prosedur kerja yang lebih sistematis dan mudah dipahami oleh seluruh operator. Perusahaan juga dapat melakukan hasil referensi ini dalam perbaikan pada kemunculan produk cacat. Berikut implikasi manajerial pada setiap kategori penyebab masalah:

TABEL V. 1.
(HASIL IMPLIKASI MANAJERIAL)

Kategori Penyebab	Penyebab	Implikasi
Manpower (manusia)	Kurangnya ketelitian dalam melakukan marking, kontrol pada proses drilling	Peningkatan kemampuan melalui pelatihan dengan fokus pada proses dilapangan dan pemahaman teknik batas toleransi yang sesuai dengan standar
	interpretasi hasil gambar desain tidak sesuai	
	Kesalahan dimensi pada lubang	
	Tidak mengikuti referensi dimensi lubang	
	Kesalahan pembacaan skala koodinat lubang	
Mesin	*Locator* mesin *tool* tidak sesuai *hole*	Penggunaan dan melakukan *maintanance* pada alat bantu jig dan fixture agar tingkat presisi lebih tinggi
	Code tidak terbaca	
	Mata bor tidak stabil	
	Sensor posisi tidak akurat	
	Locator jig longgar dan aus	
	Penyimpangan dalam titik koordinat	
	Bekas tekanan *tool* pada proses sebelumnya	
Metode	Kurangnya koordinasi pada perubahan *drawing* dan hasil titik referensi	Penyusunan prosedur kerja yang lebih sistematis dan penyajian instruksi kerja dalam bentuk visual yang mudah dipahami.
	Tidak melakukan sesuai standar ketentuan batas minimum *edge margin* dan standar dimensi titik lubang	
	Tidak menstabilkan benda kerja dengan benar	
	Drawing tidak sesuai dengan *jig* atau *fixture*	

Kategori Penyebab	Penyebab	Implikasi
Sistem kontrol	Tidak ada *double check* pada verifikasi dokumen baru	Melakukan mekanisme pengecekan dan verifikasi sebelum dan sesudah setelah dilakukan proses selanjutnya
	Kurangnya koordinasi pada perubahan *drawing* dan hasil titik referensi	
	kesalahan menginput posisi lubang	
	Tidak melakukan verifikasi sebelum proses dilanjut	
	Locator tidak presisi	
	Delay respon pada sistem	
	Tidak dilakukan pengukuran ulang	

Berdasarkan hasil implikasi manajerial ini dalam peningkatan kualitas produk memerlukan perbaikan yang terintegrasi pada aspek manusia, mesin, metode dan sistem kontrol. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui peningkatan kompetensi operator, pemeliharaan peralatan secara berkala, penyempurnaan prosedur kerja yang lebih sistematis, serta penerapan mekanisme verifikasi dan pengecekan secara berkala pada setiap tahapan proses. Implementasi perbaikan ini diharapkan mampu mengurangi terjadinya kesalahan operasional, meningkatkan konsistensi proses produksi, menekan risiko cacat dan *rework*, serta mendukung efisiensi dan keandalan kualitas produk secara berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan metode *failure mode and effect analysis* (FMEA) dan *fault tree analysis* (FTA) pada komponen spar pesawat NC212i di PT XYZ dapat disimpulkan bahwa permasalahan kualitas produk masih dipengaruhi oleh beberapa faktor yang saling berhubungan dalam proses produksi. Proses *drilling*, *riveting* dan *assembly* menjadi tahapan dengan risiko kegagalan tertinggi berdasarkan nilai RPN yang tinggi, sehingga berdampak pada kualitas komponen, efisiensi produksi, serta potensi *rework* dan keterlambatan produksi. Hasil FTA menunjukkan bahwa penyebab utama kegagalan disebabkan oleh faktor mesin, metode kerja, pekerja dan sistem kontrol serta ketidaksesuaian penerapan gambar teknik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis cacat dengan tingkat risiko tertinggi pada komponen spar pesawat NC212i dari hasil FMEA jenis cacat *hole wrong location* sebesar 450, kemudian jenis cacat lainnya seperti *edge margin not according* dan *out of tolerance edge* margin sebesar 360, *hole not match* sebesar 300, *unauthorized* sebesar 270, *extra hole* dengan RPN sebesar 210 dan *guide hole* sebesar 200, yang menunjukkan seluruh jenis cacat masih berada pada kategori prioritas tinggi. Hasil FTA menunjukkan bahwa penyebab utama kegagalan berasal dari faktor *manpower*, *machine* dan *method*, seperti kesalahan pembacaan drawing, kurangnya verifikasi proses *drilling*, ketidakstabilan mesin, kesalahan *setting* serta kurang optimalnya prosedur kerja, sehingga faktor tersebut saling berhubungan dan memicu terjadinya cacat produk secara berulang.

Berdasarkan hasil analisis metode FMEA dan FTA penanganan dan pencegahan kegagalan produk perlu dilakukan melalui penguatan sistem pengendalian kualitas pada setiap tahapan produksi. Upaya perbaikan dapat dilakukan dengan meningkatkan kemampuan operator melalui pelatihan gambar teknik, pemahaman standar toleransi, penerapan *double check* sebelum proses *drilling* serta penggunaan alat bantu yang lebih presisi sepert *jig* dan *fixture*. Selain itu, penguatan sistem monitoring, peningkatan koordinasi antar departemen dan evaluasi terhadap proses produksi diperlukan untuk meminimalisir terjadinya cacat produk secara berulang, menjaga kualitas komponen dan menigkatkan efisiensi produksi.

VI. REFERENSI

[1] iata.org, “IATA Releases 2024 Safety Report,” iata.org.

[2] D. Jenderal Industri Logam, A. Transportasi, and dan Elektronika Kementerian Perindustrian, “RENCANA STRATEGIS 2020-2024.”

[3] M. Jayadi *et al.*, “ANALISIS NUMERIK PART SPAR PADA SUB SYSTEM WING TO FUSELAGE JOINNER ASSEMBLY PESAWAT BERKATEGORI UTILITY MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA,” 2021.

[4] K. Hassan, A. K. Thakur, G. Singh, J. Singh, L. R. Gupta, and R. Singh, “Application of Artificial Intelligence in Aerospace Engineering and Its Future Directions: A Systematic Quantitative Literature Review,” Sep. 01, 2024, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11831-024-10105-7.

[5] R. Y. Prasetya, S. Suhermanto, and M. Muryanto, “Implementasi FMEA dalam Menganalisis Risiko Kegagalan Proses Produksi Berdasarkan RPN,” *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, vol. 20, no. 2, p. 133, Nov. 2021, doi: 10.20961/performa.20.2.52219.

[6] A. H. Sakti, “Penggunaan Metode Fault Tree Analysis (FTA) dan Failure Mode Analysis (FMEA) Sebagai Usulan Reduksi Cacat Produk Obat Batuk Komix Peppermint Di PT. Bintang Toedjoe,” vol. 2, Mar. 2021.

[7] W. A. Prastyabudi, R. A. Faharga, and H. Chandra, “Systematic Risk Analysis of Railway Component Quality: Integration of Failure Mode & Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA),” *Spektrum Industri*, vol. 22, no. 2, pp. 77–89, Oct. 2024, doi: 10.12928/si.v22i2.223.

[8] C. Chen and G. Reniers, “Chemical industry in China: The current status, safety problems, and pathways for future sustainable development,” *Saf. Sci.*, vol. 128, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104741.

[9] A. Maulana Effendi and Y. Pandu Negoro, “IDENTIFICATION OF CAUSES OF PRODUCTION DEFECTS IN DUCTING

MANUFACTURING PROCESS AT PT. RAVANA JAYA USING FMEA AND FTA METHODS IDENTIFIKASI PENYEBAB CACAT PRODUKSI PADA PROSES MANUFAKTUR DUCTING DI PT. RAVANA JAYA DENGAN METODE FMEA DAN FTA," *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, vol. 8, no. 3, p. 2025, 2025.

[10] R. Hidayat and V. Hakim, "Analisis Kegagalan Sistem Preventive Maintenance Alat BTT 413 Dengan Menggunakan Metode FMEA Dan FTA Pada Perusahaan Pelayanan Pesawat Di Bandara Soekarno-Hatta," 2021.

[11] P. D. Indonesia, "NC212i," https://www.indonesian-aerospace.com/en/portfolio/aircraft/fixed_wing/detail/12/nc212i.

[12] indonesian-aerospace, "pesawat terbang besutan PTDI," indonesian-aerospace.

[13] A. L. Karimah, M. I. Mawarda, W. Pauru', Y. Ramadhan, and Y. Amalia, "Analisis Kegagalan Material Pada Sayap Pesawat Terbang (Review)," *Jumantara Jurnal Manajemen dan Teknologi Rekayasa*, vol. 1, no. 1, p. 26, 2022, doi: 10.28989/jumantara.v1i1.1266.

[14] A. Lestari and N. A. Mahbubah, "Analisis Defect Proses Produksi Songkok Berbasis Metode FMEA Dan FTA di Home - Industri Songkok GSA Lamongan," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 6, no. 3, 2021, doi: 10.32672/jse.v6i3.3254.

[15] A. C. Oktaviana and T. A. Auliandri, "Analisis Pengendalian Kualitas Produksi Meja Dan Kursi Menggunakan Diagram Pareto Dan Fishbone Pada PK. SKM JATI," *INOBIS: Jurnal Inovasi Bisnis dan Manajemen Indonesia*, vol. 6, no. 4, pp. 559–572, 2023, doi: 10.31842/jurnalinobis.v6i4.310.

[16] A. Z. Ghani, A. Najwa, M. Yosi, Ma'ruf, and R. Yusuf, "Analisis Faktor Permasalahan Kegiatan Operasional dengan Metode FMEA di PT Indonesia Kendaraan Terminal," vol. 7, no. 299, p. 40154, 2024.

[17] O. Suseno and S. I. Kalid, "PENGENDALIAN KUALITAS CACAT PRODUK TAS KULIT DENGAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) DAN FAULT TREE ANALYSIS (FTA) DI PT MANDIRI JOGJA INTERNASIONAL," 2022. [Online]. Available: http://bajangjournal.com/index.php/JCI

[18] M. S. Maulidy, A. W. Rizqi, and E. Dhartikasari Priyana, "Analisis Kegagalan Sistem Ship Unloader 2 Menggunakan Metode FMEA dan FTA," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 4, no. 3, pp. 1106–1117, 2025.

[19] Y. Hisprastin and I. Musfiroh, "Ishikawa Diagram dan Failure Mode Effect Analysis (FMEA) sebagai Metode yang Sering Digunakan dalam Manajemen Risiko Mutu di Industri," *Majalah Farmasetika*, vol. 6, no. 1, p. 1, Oct. 2020, doi: 10.24198/mfarmasetika.v6i1.27106.

[20] A. Lestari and N. A. Mahbubah, "Analisis Defect Proses Produksi Songkok Berbasis Metode FMEA dan FTA di Home-Industri Songkok GSA Lamongan," *Serambi Engineering*, vol. VI, no. 3, Jul. 2021.

[21] B. N. Nabila, S. S. Dahda, and E. D. Priyana, "Penerapan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) pada Mesin Produksi untuk Peningkatan Keandalan," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 4, no. 4, pp. 1613–1623, 2025.

[22] A. M. Azzahra, "Penilaian Risiko menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) terkait Kontaminasi Silang pada Area Pengemasan di Industri Farmasi 'XYZ,'" *OBAT: Jurnal Riset Ilmu Farmasi dan Kesehatan*, vol. 2, no. 5, pp. 01–11, Jul. 2024, doi: 10.61132/obat.v2i5.600.

[23] T. Wibowo, N. P. Sari, and H. R. Kusumantoro, "Analisis Risiko Kegagalan Menggunakan Metode FMEA pada Mesin Cetak Digital UV di PT XYZ," *JURAL RISET RUMPUN ILMU TEKNIK*, vol. 4, no. 2, pp. 173–184, Jun. 2025, doi: 10.55606/jurritek.v4i2.5524.

[24] Muhdor, H. Abdillah, and M. Sidik, "ANALISA PEMELIHARAAN MESIN BUBUT DENGAN FAULT TREE ANALYSIS (FTA) DAN FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) DI CV. MAJA TEKNIK PANDEGLANG," 2023.

[25] P. Kusuma, "ANALISIS PENGENDALIAN RISIKO KEGAGALAN PROSES PADA PEKERJAAN RIG DENGAN METODE FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) DAN FAULT TREE ANALYSIS (FTA) PT. XYZ," 2024.

[26] IEC, "Fault tree analysis (FTA)," 2006. [Online]. Available: www.iec.ch/searchpub

[27] S. Meutia and A. Ghufron Nasution, "ANALISA KERUSAKAN PADA MESIN FIRST PRESS DAN SECOND PRESS PADA STASIUN PRESS EXPELLER DENGAN METODE FAULT TREE ANALYSIS (FTA) DI PERKEBUNAN NUSANTARA III (PERSERO) PKO SEI MANGKEI," vol. 13, 2024, doi: 10.53912/iej.v10i2.xxx.

[28] N. Herlyza Noor and O. Ovtavianty, "ANALISIS KEGAGALAN DAN STRATEGI PENGENDALIAN KUALITAS PRODUK SHUTTLECOCK MENGGUNAKAN PENDEKATAN SIX SIGMA PADA PRODUKSI SHUTTLECOCK FAILURE ANALYSIS AND QUALITY CONTROL STRATEGY OF SHUTTLECOCK PRODUCTS USING SIX SIGMA APPROACH AT SHUTTLECOCK PRODUCTION," vol. 02, 2025.

[29] L. L. Salomon, H. J. Kristina, and W. Kosasih, "ANALYSIS OF PRODUCT QUALITY IMPROVEMENT ELECTRICAL COMPONENTS BASED ON THE SIX SIGMA METHOD," *International Journal of Application on Sciences, Technology and Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 1029–1039, Aug. 2023, doi: 10.24912/ijaste.v1.i3.1029-1039.

[30] W. R. Kurniawan, G. Anindita, and M. R. Dhani, "Analisis Kecelakaan Pekerjaan Lifting dengan

Overhead Crane Menggunakan Metode ECFA, Fishbone, dan Pareto Analysis," vol. 01, Dec. 2023.

[31] R. P. Wardhani, Lukman, S. Sarungu, and S. Norhidayah, "TEKNIK PENGENDALIAN MUTU DENGAN MENGGUNAKAN METODE DIAGRAM PARETO DALAM MENCAPAI CUSTOMER SATISFACTION," *Jurnal Teknosains Kodepena* |, vol. 04, pp. 7–11, 2024.

[32] F. Sumasto *et al.*, "PDCA Method Application to Mitigate No Hole Drilling Defects in Housing Large RCL Products in the Automotive Sector," *Engineering Journal*, vol. 29, no. 10, pp. 55–69, Oct. 2025, doi: 10.4186/ej.2025.29.10.55.

[33] T. Zakaria, A. Dyah Juniarti, D. Bima, and S. Budi, "ANALISIS PENGENDALIAN KUALITAS CACAT DIMENSI PADA HEADER BOILER MENGGUNAKAN METODE FMEA DAN FTA," 2023.

[34] Y. Yang, Y. Bao, X. Liu, J. Wang, and F. Du, "Progressive Failure Analysis of Composite/Aluminum Riveted Joints Subjected to Pull-Through Loading," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 36, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s10033-023-00839-z.

[35] M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad, and A. Vafadar, "A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications," Nov. 01, 2020, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.

[36] J. Ge, T. Fisher, Z. Kazanci, Y. Jin, and D. Sun, "Drilling-induced defects and mechanical performance of open-hole structures in thermoplastic and thermoset polymer composites," Dec. 2024.

[37] M. Li, W. Tian, and W. H. Liao, "Fatigue properties of riveted joints under different hole perpendicularity errors and squeeze forces," *Microsc. Res. Tech.*, vol. 87, no. 6, pp. 1262–1270, Jun. 2024, doi: 10.1002/jemt.24516.

[38] S. K. H. Lee, P. G. Mongan, A. Farhadi, E. P. Hinchy, N. P. O'Dowd, and C. T. McCarthy, "In-situ evaluation of hole quality and cutting tool condition in robotic drilling of composite materials using machine learning," *J. Intell. Manuf.*, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02528-7.

[39] N. Habib *et al.*, "Analysis of hole quality and chips formation in the dry drilling process of al7075-t6," *Metals (Basel).*, vol. 11, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/met11060891.

[40] F. He and M. Weigold, "QUALITY MONITORING FOR DRILLING BASED ON INTERNAL DATA OF MACHINE TOOL," *MM Science Journal*, vol. 2023-November, pp. 6984–6991, Nov. 2023, doi: 10.17973/MMSJ.2023_11_2023120.

[41] R. Binali, M. Kuntoğlu, D. Y. Pimenov, Ü. Ali Usca, M. K. Gupta, and M. E. Korkmaz, "Advance monitoring of hole machining operations via intelligent measurement systems: A critical review and future trends," Sep. 30, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.measurement.2022.111757.

[42] S. Dayam and K. A. Desai, "Development of a Smart Supervision System for Achieving Chatter-free Manual Drilling Operation," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2023, pp. 371–377. doi: 10.1016/j.procir.2023.03.063.