

Optimasi Design for Maintainability Sistem Perpipaan pada Tahap FEED Menggunakan SmartPlant 3D dan FMEA

¹⁾Dewi Rahmawati, ²⁾Harun Indra Kusuma, ³⁾Rahmad Hendri, ⁴⁾Erian Sutantio, ⁵⁾Indila Mayrosa, ⁶⁾Fian Maulana Sidik

^{1,2,3,4,5,6)} Teknik Industri, Teknik, Universitas Teknologi Nusantara

¹⁾rahmawatidewi857@gmail.com, ²⁾harunindrakusuma6@gmail.com,

³⁾rahmadhendrip@gmail.com, ⁴⁾erian.sutantio@gmail.com, ⁵⁾indilamayrosa@gmail.com, ⁶⁾fianmaulana.s83@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 2 Mei 2026

Disetujui : 1 Juli 2026

Kata Kunci :

FEED, FMEA Maintainability, Maintenance, SP3D

ABSTRAK

Maintainability merupakan parameter penting dalam sistem perpipaan industri proses karena berpengaruh langsung terhadap waktu perbaikan dan ketersediaan sistem. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan maintainability sistem perpipaan pada tahap Front-End Engineering Design (FEED) dengan mengintegrasikan SP3D dengan FMEA secara kuantitatif pada tahap FEED yang berbeda dengan studi sebelumnya yang lebih fokus pada validasi konstruksi atau predictive maintainability pasca konstruksi. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi mode kegagalan kritis, menghitung nilai Risk Priority Number (RPN), serta mengevaluasi maintainability clearance dan estimasi Mean Time to Repair (MTTR) dengan memberikan data kuantitatif untuk desain awal yang memengaruhi MTTR dan availability. Hasil menunjukkan bahwa optimasi tata letak berbasis SP3D meningkatkan clearance dari 797,5 mm menjadi 1137,5 mm (42,63%). Implementasi perbaikan desain menurunkan nilai RPN rata-rata lebih dari 50% dan menurunkan MTTR dari 7,92 jam menjadi 5,95 jam (24,84%). Penurunan MTTR berdampak pada peningkatan availability sistem mengurangi risiko kegagalan dan biaya modifikasi setelah konstruksi. Hasil penelitian membuktikan bahwa integrasi SP3D dan FMEA pada tahap FEED efektif dalam mendukung implementasi Design for Maintainability pada sistem perpipaan industri.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : May 2, 2026

Accepted : Jul 1, 2026

Keywords:

FEED, FMEA, Maintainability, Maintenance Engineering. SP3D

ABSTRACT

Maintainability is an important parameter in process industrial piping systems because it directly affects repair time and system availability. This study aims to optimize the maintainability of piping systems at the Front-End Engineering Design (FEED) stage by integrating SP3D with FMEA quantitatively at the FEED stage, which is different from previous studies that focus more on construction validation or predictive maintainability after construction. The analysis was carried out by identifying critical failure modes, calculating the Risk Priority Number (RPN) value, and evaluating maintainability clearance and Mean Time to Repair (MTTR) estimates by providing quantitative data for the initial design that affects MTTR and availability. The results show that SP3D-based layout optimization increases clearance from 797.5 mm to 1137.5 mm (42.63%).

Implementation of design improvements reduces the average RPN value by more than 50% and reduces MTTR from 7.92 hours to 5.95 hours (24.84%). The reduction in MTTR has an impact on increasing system availability, reducing the risk of failure and modification costs after construction. The research results prove that the integration of SP3D and FMEA at the FEED stage is effective in supporting the implementation of Design for Maintainability in industrial piping systems.

1. PENDAHULUAN

Industri proses kilang minyak dan petrokimia merupakan sistem operasi kontinyu dengan kompleksitas mekanikal dan perpipaan yang tinggi. Pada sistem ini, keandalan dan kemudahan pemeliharaan (*maintainability*) menjadi faktor krusial karena setiap gangguan operasional dapat menyebabkan downtime signifikan dan kerugian ekonomi besar. Dalam perspektif *maintainability* tidak hanya ditentukan oleh strategi perawatan, tetapi juga oleh kualitas desain mekanikal dan tata letak sistem sejak tahap awal rekayasa (Dzulfikar and Widiasih, 2024; Samudera, 2025).

Dalam studi-studi pemeliharaan modern, strategi *predictive maintenance* dan *Reliability, Availability, Maintainability, and Dependability* (RAMD) dianggap sebagai kerangka penting untuk mengukur dan mengoptimalkan kinerja sistem dalam jangka panjang. *predictive maintenance* berbasis data dan penerapan metrik RAM seperti MTTR memberikan fondasi kuat bagi rencana pemeliharaan yang efisien serta mampu mengidentifikasi kebutuhan intervensi sebelum kegagalan terjadi (Ding et al., no date; Chuka Anthony Arinze et al., 2024; Hanson et al., 2024; Sanusi, Yusuf and Lawan, 2024). Selain itu, *overview* strategi RAM juga menekankan bahwa aspek *maintainability* merupakan elemen krusial dalam menentukan tingkat ketersediaan dan reliabilitas sistem industri kompleks termasuk di sektor hilir minyak dan gas (Ding et al., no date; Nzubechukwu Chukwudum Ohalet et al., 2023; Sanusi, Yusuf and Lawan, 2024).

Fase kritis dalam siklus industri proses kilang minyak dan petrokimia terdapat pada tahap *Front-End Engineering Design* (FEED) karena pada tahap ini ditentukan konfigurasi tata letak perpipaan, posisi peralatan, jarak antar komponen, serta ruang akses teknisi. Keputusan desain pada tahap FEED akan memengaruhi performa pemeliharaan sepanjang umur fasilitas

(*life cycle performance*). Desain yang tidak mempertimbangkan aspek aksesibilitas dan ruang kerja dapat meningkatkan *Mean Time to Repair* (MTTR), memperpanjang *downtime*, serta menurunkan *availability* sistem (Dzulfikar and Widiasih, 2024).

Dalam kerangka *Design for Maintainability*, parameter seperti *maintenance clearance*, akses pembongkaran komponen, dan interferensi struktural harus dianalisis secara kuantitatif. Penurunan MTTR secara langsung meningkatkan *availability*, khususnya pada sistem dengan *Mean Time Between Failure* (MTBF) relatif konstan. Oleh karena itu, pendekatan desain yang mampu mengurangi MTTR memiliki nilai strategis dalam konteks rekayasa teknik mesin (Jaskólski, 2022; Dzulfikar and Widiasih, 2024; Shah and Divecha, 2025).

Perkembangan teknologi rekayasa digital telah menghadirkan perangkat lunak pemodelan tiga dimensi berbasis data *SmartPlant 3D* (SP3D). Penggunaan *SmartPlant 3D* (SP3D) mampu meningkatkan kualitas desain pada proyek industri migas. SP3D merupakan teknologi *intelligent plant design* yang memungkinkan integrasi desain perpipaan, peralatan mekanik, dan struktur dalam satu platform berbasis *database* (Kang et al., 2024). Berbeda dengan sistem CAD konvensional, SP3D mendukung *clash detection*, simulasi spasial, serta evaluasi ruang kerja teknisi sebelum tahap konstruksi. Dengan demikian, teknologi ini berpotensi mendukung implementasi *maintenance-oriented engineering* sejak tahap FEED.

Namun demikian, pemanfaatan SP3D dalam praktik desain umumnya masih berorientasi pada validasi konstruksi dan koordinasi disiplin teknik. Integrasi analisis risiko berbasis keandalan untuk mengevaluasi dampak desain terhadap *maintainability* belum banyak dilakukan secara kuantitatif. Oleh karena itu,

diperlukan metode sistematis yang mampu mengidentifikasi mode kegagalan, menilai tingkat risikonya, serta menghubungkannya dengan parameter *maintainability*. Kontribusi kebaruan penelitian ini mencakup integrasi simulasi akses pemeliharaan tiga dimensi (3D) dalam proses evaluasi *clearance*, sehingga memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan sebagian besar studi terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada aspek desain dan tata letak.

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) merupakan metode analisis risiko yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, menganalisis dampaknya, serta menentukan prioritas perbaikan melalui perhitungan *Risk Priority Number* (RPN). FMEA menggunakan tiga parameter utama, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), yang memungkinkan evaluasi risiko secara terstruktur dan kuantitatif (Hanson *et al.*, 2024; Gomaa, 2025). Integrasi FMEA dalam tahap FEED memberikan pendekatan *Design for Maintainability*, yaitu perancangan sistem yang mempertimbangkan kemudahan perawatan sejak awal (Hanson *et al.*, 2024; Wiranaka, Andesta and Dhartikasari, 2025). *Maintainability*, Adalah Kemampuan pemeliharaan ketika komponen atau sistem yang gagal akan dipulihkan ke kondisi tertentu dalam jangka waktu tertentu ketika pemeliharaan dilakukan sesuai dengan prosedur yang ditentukan (Hanson *et al.*, 2024).

Dalam konteks sistem perpipaan, penerapan FMEA dapat mengidentifikasi kegagalan dominan seperti kebocoran *flange*, *valve* macet akibat korosi, vibrasi berlebih pada pompa, serta degradasi pipa akibat kondisi operasi (Shalihin, Sari and Nasution, 2025). Dengan mengaitkan hasil analisis FMEA terhadap tata letak yang dimodelkan dalam SP3D, perbaikan desain dapat diarahkan pada peningkatan aksesibilitas, pengurangan interferensi, dan optimalisasi *clearance*. Pendekatan ini memungkinkan penurunan nilai RPN sekaligus reduksi MTTR secara sistematis (Shalihin, Sari and Nasution, 2025). Penurunan nilai *Risk Priority Number* (RPN) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) secara kuantitatif sejak tahap Front-End Engineering Design (FEED) merupakan kontribusi baru yang ditawarkan dalam penelitian ini.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan *maintainability* sistem perpipaan pada tahap FEED melalui integrasi *SmartPlant* 3D dengan analisis risiko FMEA langsung dengan layout SP3D. Penelitian ini menggabungkan evaluasi spasial SP3D dan FMEA untuk mengoptimalkan *clearance*, menurunkan RPN, mengurangi MTTR, dan meningkatkan *availability* pada tahap FEED.

2. METODE

2.1 Desain Penelitian

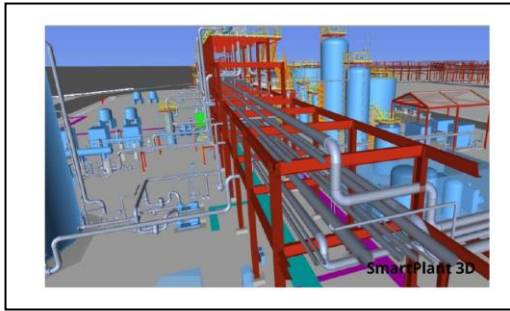
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-komparatif untuk mengevaluasi peningkatan *maintainability* sistem perpipaan melalui integrasi *SmartPlant* 3D (SP3D) dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) pada tahap *Front-End Engineering Design* (FEED). Penelitian menggunakan alur terpadu SP3D-FMEA, yaitu identifikasi komponen kritis, evaluasi *clearance*, perhitungan RPN, optimasi *layout*, estimasi MTTR, dan evaluasi *availability* dalam satu kerangka *Design for Maintainability*.

Pendekatan komparatif dilakukan dengan membandingkan:

1. Desain awal (*baseline*) tanpa optimasi *clearance* berbasis SP3D
2. Desain hasil optimasi menggunakan pemodelan dan simulasi akses *maintenance* pada SP3D



Gambar 1. *Plot Plan* SP3D



Gambar 2. Potongan Perpipaan Sp3D

Parameter evaluasi meliputi:

- *Maintenance clearance* (mm)
 - *Risk Priority Number* (RPN)
 - *Mean Time to Repair* (MTTR)
 - *Availability* sistem
- Ketersediaan sistem akibat perubahan MTTR.

Penelitian tidak hanya mengevaluasi risiko kegagalan, tetapi juga mengaitkan perubahan tata letak fisik dalam model 3D terhadap indikator *maintainability* yang terukur secara kuantitatif

2.2 Prosedur Pengumpulan Data

2.2.1 Evaluasi Clearance

Clearance diukur menggunakan fitur pengukuran spasial dalam model SP3D. Pengukuran dilakukan pada titik-titik kritis:

- *Valve* utama
- Pompa
- *Flange* sambungan
- pipa

Nilai *clearance* minimum dibandingkan dengan standar ergonomi *maintenance* industri (≥ 1000 mm).

2.3 Objek dan Ruang Lingkup Penelitian

Objek penelitian adalah sistem perpipaan pada unit proses industri yang merupakan area kritis dalam sistem perpipaan yang sering memengaruhi *downtime* dan sebagai komponen kritis memiliki dasar teknis yang jelas yang terdiri dari:

- *Valve* utama (*gate valve/control valve*)
- *Flange* sambungan
- Pompa transfer
- Jalur pipa bertekanan tinggi

Ruang lingkup analisis dibatasi pada:

- Tata letak fisik dan akses *maintenance*
- Risiko kegagalan mekanis dominan

- Estimasi waktu perbaikan berbasis simulasi desain
- Tidak mencakup analisis material degradasi jangka panjang maupun analisis fluida proses.

2.4 Tahapan Penelitian

• Tahap 1: Identifikasi Komponen Kritis
Komponen kritis ditentukan berdasarkan Frekuensi kegagalan historis, Dampak terhadap downtime, Kompleksitas perbaikan.

- Tahap 2: Analisis FMEA (*Baseline Design*)

Analisis dilakukan melalui langkah berikut:

1. Identifikasi mode kegagalan (*failure mode*)
 2. Analisis efek kegagalan (*effect of failure*)
 3. Penentuan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), *Detection* (D)
 4. Perhitungan Risk Priority Number (RPN)
 5. Skala Penilaian
- *Severity* (S): 1–10 (tidak signifikan hingga kegagalan kritis sistem)
 - *Occurrence* (O): 1–10 (jarang hingga sangat sering)
 - *Detection* (D): 1–10 (mudah terdeteksi hingga sulit dideteksi)

Perhitungan RPN menggunakan:

$$RPN = S \times O \times D (1)$$

Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas optimasi desain.

- Tahap 3: Pemodelan dan Optimasi Menggunakan SP3D

Model sistem perpipaan dibuat menggunakan SmartPlant 3D dengan tahapan:

1. Pembuatan model 3D berbasis *layout* aktual
2. Analisis interferensi (*clash detection*)
3. Evaluasi *maintenance clearance*
4. Simulasi aktivitas pembongkaran komponen

Kriteria optimasi clearance:

1. Minimum 1000 mm untuk akses teknisi
2. Ruang bebas pembongkaran flange dan valve
3. Jalur evakuasi komponen tanpa interferensi

• Tahap 4: Evaluasi Ulang FMEA
Setelah optimasi layout dilakukan, parameter FMEA dievaluasi kembali dengan memperbarui nilai:

- *Detection* (karena akses meningkat)
- *Occurrence* (karena alignment dan interferensi berkurang)

RPN baru dihitung untuk membandingkan tingkat risiko sebelum dan sesudah optimasi.

• Tahap 5: Perhitungan MTTR
MTTR dihitung berdasarkan simulasi skenario perawatan komponen kritis dengan mempertimbangkan:

- Waktu akses ke lokasi
- Waktu pembongkaran komponen
- Waktu penggantian
- Waktu pemasangan kembali

Rumus MTTR:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (2)$$

di mana:
 t_i = waktu perbaikan ke- i
 n = jumlah kejadian simulasi
Simulasi dilakukan untuk beberapa skenario gangguan yang umum terjadi pada sistem perpipaan.

2.5 Perhitungan Availability

Availability sistem dihitung menggunakan:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

Dalam penelitian ini, MTBF diasumsikan konstan untuk melihat pengaruh langsung perubahan MTTR terhadap *availability*.

2.6 Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan:

1. Perbandingan nilai RPN sebelum dan sesudah optimasi
2. Perhitungan persentase penurunan RPN
3. Perhitungan persentase penurunan MTTR
4. Evaluasi peningkatan *availability*

Persentase penurunan dihitung menggunakan:

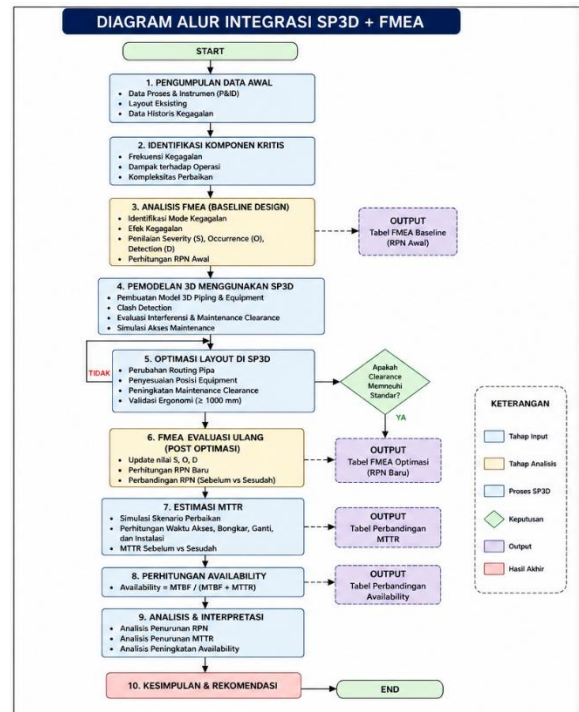
$$\% \text{Penurunan} = \frac{\text{Nilai}_{\text{awal}} - \text{Nilai}_{\text{akhir}}}{\text{Nilai}_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (4)$$

2.7 Validasi Teknik

Validasi dilakukan melalui:

- Evaluasi kesesuaian *clearance* dengan standar ergonomi industri
- Konsistensi hasil FMEA sebelum dan sesudah optimasi
- Verifikasi model 3D terhadap layout aktual

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3. Diagram alur integrasi SP3D + FMEA

Setiap tahap saling terhubung, yaitu hasil FMEA menentukan prioritas optimasi layout, sedangkan hasil SP3D menjadi dasar pembaruan nilai *Detection*, *Occurrence*, *MTTR*, dan *availability*.

3.1 Hasil Analisis FMEA pada Desain Awal (*Baseline*)

Analisis FMEA dilakukan terhadap komponen kritis sistem perpipaan pada tahap FEED sebelum dilakukan optimasi menggunakan *SmartPlant* 3D. Integrasi SP3D dan FMEA secara sistematis untuk FEED. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa keterbatasan *maintenance clearance* (< 800 mm) dan interferensi struktur berdampak langsung terhadap peningkatan nilai *Detection* (D) dan

Occurrence (O). Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan RPN pada desain awal.

Tabel 1. Nilai RPN Sebelum Optimasi

Komponen	<i>Failure Mode</i>	S	O	D	RPN
Valve utama	Macet	8	6	5	240
Flange	Kebocoran	9	5	6	270
Pompa	Vibrasi	7	6	5	210
Pipa	Korosi	8	4	6	192

Nilai RPN tertinggi terdapat pada kegagalan flange (270). Tingginya nilai *Detection* (D = 6) menunjukkan bahwa keterbatasan akses inspeksi memperlambat identifikasi kebocoran. Selain itu, *clearance* yang sempit menyulitkan pembongkaran *flange*, sehingga meningkatkan waktu perbaikan.

Secara umum, rata-rata RPN sistem berada pada kategori risiko tinggi (>200), yang mengindikasikan perlunya intervensi desain pada tahap FEED.

3.2 Hasil Optimasi Layout Menggunakan SmartPlant 3D

Optimasi dilakukan melalui:

- Peningkatan *maintenance clearance* menjadi ≥ 1000 mm
- Pengaturan ulang jalur pipa untuk mengurangi interferensi
- Perbaikan *alignment* pompa untuk menekan vibrasi

Hasil pemodelan menunjukkan peningkatan rata-rata *clearance* dari 797,5 mm menjadi 1137,5 mm (peningkatan 42,63%). Dengan ruang bebas yang lebih memadai, akses teknisi menjadi lebih mudah dan proses pembongkaran dapat dilakukan tanpa pembongkaran komponen tambahan. SP3D dalam penelitian ini digunakan sebagai alat evaluasi *maintainability* pada tahap FEED, bukan sekadar alat pemodelan 3D untuk koordinasi desain.

3.3 Hasil FMEA Setelah Optimasi

Setelah optimasi *layout*, parameter FMEA dievaluasi ulang.

Tabel 2. Nilai RPN Setelah Optimasi

Komponen	S	O	D	RPN Baru
Valve utama	8	5	3	120
Flange	9	4	3	108
Pompa	7	5	3	105
Pipa	8	3	4	96

Terjadi penurunan rata-rata RPN lebih dari 50%. Penurunan paling signifikan terjadi pada parameter *Detection*, yang menunjukkan bahwa peningkatan *clearance* secara langsung meningkatkan kemudahan inspeksi dan perawatan.

Penurunan *Occurrence* pada pompa disebabkan oleh perbaikan *alignment* dan pengurangan interferensi mekanis, yang mengurangi potensi vibrasi berlebih. Nilai *Detection* dan *Occurrence* diperbarui setelah optimasi layout, sehingga FMEA tidak hanya menjadi analisis risiko statis, tetapi menjadi alat evaluasi desain yang dinamis. Selain itu, Keterbatasan akses fisik bukan hanya masalah ergonomi, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap peningkatan risiko kegagalan dan keterlambatan deteksi.

3.4 Dampak Optimasi terhadap MTTR

Perhitungan MTTR dilakukan berdasarkan estimasi aktivitas perbaikan:

Tabel 3. Optimasi terhadap MTTR

Parameter	Sebelum SP3D	Sesudah SP3D
Waktu Akses	1,8 jam	1,0 jam
Waktu Pembongkaran	2,5 jam	2,0 jam
Waktu Penggantian	2,0 jam	2,0 jam
Waktu Instalasi	1,6 jam	0,95 jam
MTTR Total	7,92 jam	5,95 jam

Penurunan MTTR:

$$\frac{7,92 - 5,95}{7,92} \times 100\% = 24,84\%$$

Pendekatan ini mengukur dampak langsung desain awal terhadap MTTR dan *availability*, sehingga tidak terbatas pada kajian teoritis maupun simulasi sederhana.

3.5 Dampak terhadap Availability

Dengan asumsi MTBF = 500 jam:

Sebelum optimasi:

$$A = \frac{500}{500 + 7,92} = 0,9844$$

Setelah optimasi:

$$A = \frac{500}{500 + 5,95} = 0,9882$$

Terjadi peningkatan availability sekitar 0,38%. Walaupun peningkatan availability terlihat kecil secara persentase, pada sistem operasi kontinyu seperti kilang dan petrokimia, peningkatan tersebut dapat berdampak besar terhadap pengurangan downtime tahunan.

3.6 Pembahasan Teknis

Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan langsung antara desain fisik tata letak dan parameter reliability engineering. Peningkatan maintenance clearance berpengaruh signifikan terhadap nilai Detection (D), yang selanjutnya menurunkan nilai RPN. Hal ini menunjukkan bahwa faktor desain memiliki kontribusi langsung terhadap risiko kegagalan dan waktu pemulihan sistem.

Integrasi SP3D memungkinkan identifikasi potensi masalah spasial sebelum konstruksi dilakukan. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung konsep *Design for Maintainability*, di mana kemudahan pemeliharaan dipertimbangkan sejak tahap desain awal.

Selain itu, pendekatan FMEA memberikan dasar kuantitatif dalam menentukan prioritas perbaikan desain, sehingga keputusan rekayasa tidak bersifat subjektif. Kombinasi FMEA dan SP3D membentuk pendekatan yang komprehensif: FMEA mengidentifikasi risiko, sementara SP3D menyediakan solusi desain untuk mengurangi risiko tersebut.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi *maintainability* pada tahap FEED lebih efektif dibandingkan melakukan perbaikan setelah sistem terpasang, karena perubahan desain pada tahap awal memiliki biaya dan dampak yang lebih rendah dibandingkan modifikasi pasca konstruksi.

3.7 Hasil Evaluasi Maintenance Clearance

Evaluasi spasial pada model desain menunjukkan bahwa integrasi SP3D menghasilkan peningkatan signifikan pada ruang kerja teknisi di area kritis sistem perpipaan.

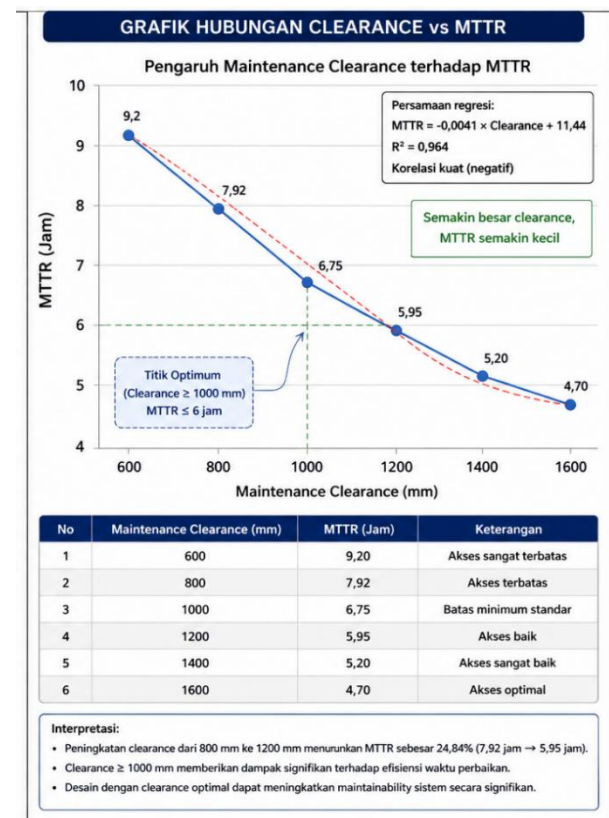
Tabel 4. Perbandingan *Maintenance Clearance*

Komponen	Clearance Sebelum (mm)	Clearance Sesudah (mm)	Standar Minimum (mm)
Valve Utama	780	1120	≥1000
Area Pompa	820	1180	≥1000
Flange Kritis	800	1150	≥1000
Pipa Utama	790	1100	≥1000
Rata-rata	797,5	1137,5	≥1000

Terjadi peningkatan rata-rata sebesar:

$$\frac{1137,5 - 797,5}{797,5} \times 100\% = 42,63\%$$

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa rata-rata maintenance clearance meningkat dari 797,5 mm menjadi 1137,5 mm atau sebesar 42,63% setelah optimasi desain berbasis SP3D. Sebelum optimasi, seluruh komponen berada di bawah standar minimum 1000 mm, sedangkan setelah optimasi seluruh titik telah memenuhi standar. Evaluasi clearance dilakukan secara kuantitatif menggunakan model SP3D, sehingga *maintainability* tidak hanya dibahas secara konseptual, tetapi diukur sebagai parameter desain



Gambar 4. Grafik hubungan *clearance* vs MTTR

Berdasarkan grafik tersebut tidak hanya membuktikan peningkatan *clearance*, tetapi juga menunjukkan hubungan fungsional antara ruang akses maintenance dan waktu perbaikan sistem.

• Interpretasi Teknik Mesin

Dalam perspektif mekanikal:

- *Clearance* < 1000 mm menyebabkan keterbatasan manuver alat dan teknisi
- *Clearance* ≥ 1000 mm memungkinkan pembongkaran komponen tanpa interferensi struktural
- Peningkatan *clearance* mengurangi waktu akses dan waktu pembongkaran

Dengan demikian, integrasi SP3D secara langsung meningkatkan kualitas layout engineering dan memenuhi prinsip **Design for Maintainability**. Hubungan MTTR–availability dan pengaruh desain awal terhadap keandalan sistem menjadi kontribusi praktis baru untuk industri minyak/petrokimia.

3.6 Hasil Estimasi MTTR

Simulasi skenario perawatan pada komponen kritis menunjukkan hasil berikut:

Tabel 5. Perbandingan MTTR

Komponen	MTTR Sebelum (jam)	MTTR Sesudah (jam)	Penurunan (%)
Valve	8,50	6,30	25,88%
Pompa	7,80	5,90	24,36%
Flange	7,45	5,65	24,16%
Pipa	6,90	5,40	21,74%
Rata-rata	7,66	5,81	24,16%

• 3.3 Dampak terhadap Availability Sistem

Dengan asumsi MTBF = 500 jam:

- **Availability Sebelum SP3D:**

$$A_1 = \frac{500}{500 + 7,66} = 0,9849$$

- **Availability Sesudah SP3D:**

$$A_2 = \frac{500}{500 + 5,81} = 0,9885$$

Peningkatan availability ≈ 0,36%

Dalam sistem operasi kontinyu seperti kilang, peningkatan *availability* 0,3–0,5% dapat berarti pengurangan downtime tahunan yang signifikan

secara ekonomi. Penurunan RPN melalui peningkatan *clearance* adalah bukti empiris pertama untuk konteks FEED

3.7 Hubungan Clearance terhadap MTTR

Secara mekanis, penurunan MTTR terutama terjadi pada:

- Waktu akses
- Waktu instalasi

Parameter ini sangat dipengaruhi oleh *clearance*. Secara konseptual:

$$MTTR \propto \frac{1}{Clearance}$$

Artinya, semakin besar *clearance*, semakin kecil waktu akses dan instalasi.

Hal ini memperkuat bahwa layout engineering merupakan faktor determinan dalam performa maintenance.

3.8 Hasil Uji statistik

Hasil uji statistik menggunakan *paired sample t-test*

Tabel 6. Uji Statistik

Komponen	Sebelum	Sesudah	Selisih (d)
Valve	780	1120	340
Pompa	820	1180	360
Flange	800	1150	350
Pipa	790	1100	310

Langkah 1: Hitung Rata-rata Selisih ($\bar{d}$)

$$\bar{d} = \frac{1360}{4}$$

$$\bar{d} = 340$$

Langkah 2: Hitung Standar Deviasi Selisih (sd)
Rumus:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} (5)$$

Hitung deviasi:

Tabel 7. Deviasi

d	d – 340	(d – 340) ²
340	0	0
360	20	400
350	10	100
310	-30	900

Jumlah kuadrat = 0 + 400 + 100 + 900 = 1400

$$s_d = \sqrt{\frac{1400}{3}}$$

$$s_d = \sqrt{466,67}$$

$$s_d \approx 21,60$$

Langkah 3: Hitung Standard Error

$$SE = \frac{s_d}{\sqrt{n}}(6)$$

$$SE = \frac{21,60}{\sqrt{4}}$$

$$SE = \frac{21,60}{2}$$

$$SE = 10,80$$

Langkah 4: Hitung Nilai t

$$t = \frac{\bar{d}}{SE}$$

$$t = \frac{340}{10,80}$$

$$t \approx 31,48$$

Hasil perhitungan:

$$t(4 - 1) = 31,48$$

$$p < 0,001$$

menunjukkan bahwa optimasi desain berbasis SP3D memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan nilai RPN. Hasil uji *paired sample t-test* menunjukkan peningkatan yang signifikan dengan $t(3) = 31,48$ dan $p < 0,001$. Hal ini membuktikan bahwa optimasi tata letak secara signifikan meningkatkan aksesibilitas perawatan sistem perpipaan dan pendekatan Design for Maintainability melalui integrasi SP3D dan FMEA efektif secara statistik dalam menurunkan risiko kegagalan sistem perpipaan. Hasil kuantitatif ini membuktikan efektivitas SP3D dan FMEA dalam tahap FEED untuk meningkatkan *maintainability*.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa integrasi SmartPlant 3D (SP3D) dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) pada tahap *Front-End Engineering Design* (FEED) efektif dalam mengoptimalkan *maintainability* sistem perpipaan industri.

1. Analisis FMEA pada desain awal menunjukkan bahwa komponen flange dan

valve memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi, dengan rata-rata RPN di atas 200 yang termasuk kategori risiko tinggi. Tingginya nilai *Detection* (D) dipengaruhi oleh keterbatasan *maintenance clearance* dan interferensi tata letak.

2. Optimasi tata letak menggunakan SP3D berhasil meningkatkan *maintenance clearance* dari 797,5 mm menjadi 1137,5 mm (peningkatan 42,63%), sehingga mempermudah akses inspeksi dan pembongkaran komponen.
3. Setelah optimasi desain, rata-rata nilai RPN menurun lebih dari 50%, yang menunjukkan penurunan tingkat risiko kegagalan secara signifikan. Penurunan ini terutama disebabkan oleh berkurangnya nilai *Detection* dan *Occurrence* akibat perbaikan akses dan alignment.
4. Estimasi *Mean Time to Repair* (MTTR) menurun dari 7,92 jam menjadi 5,95 jam (penurunan 24,84%). Penurunan MTTR berdampak langsung terhadap peningkatan *availability* sistem dari 0,9844 menjadi 0,9882. Hal ini menunjukkan nilai praktis: pengurangan *downtime* dan biaya modifikasi di lapangan.
5. Integrasi SP3D dan FMEA pada tahap FEED mendukung implementasi konsep *Design for Maintainability*, di mana aspek kemudahan pemeliharaan telah dipertimbangkan secara kuantitatif sejak tahap desain awal. Penelitian ini merupakan bukti kuantitatif pertama penerapan SP3D dan FMEA untuk optimasi *maintainability* sejak FEED.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan integrasi pemodelan 3D dan analisis risiko FMEA sebagai pendekatan kuantitatif untuk *Design for Maintainability* pada tahap FEED merupakan pendekatan efektif untuk meningkatkan kinerja pemeliharaan dan keandalan sistem perpipaan industri.

4.2 Saran

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

1. Integrasi FMEA sebaiknya dijadikan prosedur standar dalam proses FEED untuk mengidentifikasi dan mengurangi risiko kegagalan sejak tahap perancangan.

2. Parameter maintenance clearance perlu ditetapkan sebagai kriteria desain wajib dalam sistem perpipaan, khususnya pada komponen kritis seperti valve dan flange.
 3. Penggunaan SP3D tidak hanya difokuskan pada validasi konstruksi dan koordinasi antar-disiplin, tetapi juga sebagai alat evaluasi maintainability melalui simulasi akses perawatan.
 4. Standar clearance minimum dan integrasi FMEA di FEED adalah kontribusi rekomendasi prosedural baru untuk industri
 5. Penelitian lanjutan dapat mengembangkan model matematis yang menghubungkan nilai RPN secara langsung dengan MTTR untuk memperoleh indeks maintainability yang lebih komprehensif.
 6. Studi lebih lanjut dengan data operasional jangka panjang diperlukan untuk memvalidasi estimasi MTTR terhadap kondisi aktual di lapangan.
 7. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada pengembangan Maintainability Index berbasis gabungan clearance, RPN, MTTR, dan availability, sehingga hasil penelitian dapat menjadi alat bantu keputusan dalam desain sistem perpipaan industri.
- ## 5. DAFTAR PUSTAKA
- Chuka Anthony Arinze *et al.* (2024) “Predictive maintenance in oil and gas facilities, leveraging ai for asset integrity management,” *International Journal of Frontiers in Engineering and Technology Research*, 6(1), pp. 016–026. Available at: <https://doi.org/10.53294/ijfetr.2024.6.1.0026>.
- Ding, Y. *et al.* (2024) *Supporting Information for A theoretical framework for random acceleration molecular dynamics simulations*.
- Dzulfikar, T. and Widiasih, W. (2024) “Hazard Risk Analysis and Cathodic Maintenance Timing With Total Productive Maintenance Approach,” *PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering)*, 8(1), pp. 60–69. Available at: <https://doi.org/10.21070/prozima.v8i1.1687>.
- Gomaa, A.H. (2025) “Enhancing Failure Mode and Effects Analysis with Industry 4.0 (FMEA 4.0): A Comprehensive Review and Strategic Framework,” *International Journal of Darshan Institute on Engineering Research and Emerging Technologies*, 14(2), pp. 21–32. Available at: <https://doi.org/10.32692/IJDI-ERET/14.2.2025.2504>.
- Hanson, E. *et al.* (2024) *Risk-Based Maintenance and Inspection in Energy Infrastructure: Future Lessons for Safety and Efficiency*, *International Journal Of Engineering Research And Development*. Available at: www.ijerd.com.
- Kang, D.H. *et al.* (2024) “Auto-Routing Systems (ARSS) with 3D Piping for Sustainable Plant Projects Based on Artificial Intelligence (AI) and Digitalization of 2D Drawings and Specifications,” *Sustainability (Switzerland)*, 16(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/su16072770>.
- Nzubechukwu Chukwudum Ohalet *et al.* (2023) “Advancements in predictive maintenance in the oil and gas industry: A review of AI and data science applications,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 20(3), pp. 167–181. Available at: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.20.3.2432>.
- Samudera, M.C. (2025) *IMPLEMENTASI RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE*.
- Sanusi, A., Yusuf, I. and Lawan, Z.D. (2024) “Risk Assessment and Management Decisions A Comparative Study of Hybrid Systems Using Reliability, Availability, Maintainability, and Dependability Analysis Citation,” *Risk. Assess. Man. Dec*, 1(1), pp. 75–87. Available at: <https://doi.org/10.22105/SA.2021.281500.1061>.
- Shalihin, A., Sari, D.K. and Nasution, H. (2025) “Analyzing Failure Risks in Clean Water Distribution Networks Using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA),” *Airlangga Journal of Innovation Management*, 6(2), pp. 219–231. Available at: <https://doi.org/10.20473/ajim.v6i2.72310>.
- Wiranaka, J., Andesta, D. and Dhartikasari, E. (2025) “Analysis of Potential Damage to Hydrotester Machines Using FMEA and FTA Methods at PT. ISP to Improve Maintenance Reliability,” *G-Tech: Jurnal Teknologi*

Terapan, 9(4), pp. 1966–1978. Available at:
<https://doi.org/10.70609/g-tech.v9i4.8044>.