

Penerapan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) pada Mesin Produksi untuk Peningkatan Keandalan

Bilqis Nada Nabila¹, Said Salim Dahda², Efta Dhardikasari Priyana³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

Jl. Sumatera No.101, Gn. Malang, Randuagung, Kec. Kebomas, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61121, Jawa Timur, Indonesia

Email: bilqisnadanablaaaaa@gmail.com, said_salim@umg.ac.id, eftadhartikasari@umg.ac.id,

ABSTRAK

PT. XYZ sebagai produsen beton masih menghadapi permasalahan kualitas produk berupa retak, segregasi, kuat tekan tidak sesuai, serta dimensi produk tidak presisi. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi kegagalan yang muncul pada proses produksi beton serta merancang langkah pengendalian menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA). Data terkait cacat produk dihimpun selama periode juli 2024 hingga januari 2025, kemudian dilakukan analisis untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN). Dari hasil perhitungan, diketahui bahwa cacat dengan nilai RPN tertinggi adalah retak pada beton (RPN=288), diikuti segregasi (RPN=168), kuat tekan tidak sesuai (RPN=162), dan dimensi produk tidak presisi (RPN=48). Analisis lanjutan dengan FTA mengungkap bahwa akar penyebab berasal dari faktor manusia, lingkungan, dan mesin. Usulan perbaikan difokuskan pada peningkatan pelatihan operator, perawatan mesin secara berkala, standarisasi prosedur curing dan mixing, serta pengendalian kondisi lingkungan produksi. Temuan ini diharapkan dapat membantu perusahaan dalam meningkatkan kualitas produk beton dan mengurangi tingkat cacat produksi.

Kata kunci: FMEA, FTA, Product quality, RPN.

ABSTRACT

PT. XYZ as a concrete manufacturer still faces product quality problems in the form of cracks, segregation, inappropriate compressive strength, and imprecise product dimensions. This study aims to analyze potential failures in the concrete production process and design control measures using the *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) and *Fault Tree Analysis* (FTA) methods. Data related to product defects were collected from July 2024 to January 2025, then analyzed to calculate the *Risk Priority Number* (RPN) value. From the calculation results, it is known that the defects with the highest RPN value are cracks in concrete (RPN=288), followed by segregation (RPN=168), non-conforming compressive strength (RPN=162), and imprecise product dimensions (RPN=48). Further analysis with FTA revealed that the root causes came from human, environmental, and mechanical factors. The proposed improvements are focused on improving operator training, regular machine maintenance, standardizing curing and mixing procedures, and controlling production ecological conditions. These findings are expected to help companies improve the quality of concrete products and reduce production defects.

Keywords: FMEA, FTA, Product quality, RPN.

Pendahuluan

Sektor manufaktur merupakan salah satu motor utama perekonomian dunia karena memberikan kontribusi besar terhadap penciptaan nilai tambah, lapangan kerja, serta daya saing nasional. Industri manufaktur di Indonesia menyumbangkan lebih dari 18% terhadap produk domestik bruto (PDB) dan berperan sebagai salah satu pilar utama pembangunan infrastruktur [1]. Salah satu subsektor yang memiliki peranan penting adalah industri beton, yang dibutuhkan dalam berbagai proyek konstruksi mulai dari hunian sederhana, jalan raya, hingga pembangunan gedung tinggi. Menurut data [2], permintaan beton pracetak meningkat sebesar 10% setiap tahun, sejalan dengan naiknya kebutuhan pembangunan nasional. Meskipun demikian, kualitas produk beton masih menghadapi tantangan, terutama adanya cacat produksi seperti retak, segregasi, serta ketidaksesuaian kuat tekan yang kerap dijumpai di lapangan. Industri manufaktur saat ini menghadapi tingkat persaingan yang sangat ketat. Perusahaan dituntut untuk mampu menghasilkan produk dengan kualitas tinggi, harga kompetitif, serta memenuhi harapan konsumen [3]. Dalam konteks tersebut, keandalan mesin produksi menjadi faktor penting karena secara langsung memengaruhi efektivitas operasional dan kepuasan pelanggan [4].

Di samping aspek teknis, upaya peningkatan mutu produk pada industri beton juga dipengaruhi secara signifikan oleh manajemen sumber daya manusia [5]. Tenaga operator yang memiliki kompetensi memadai serta pemahaman yang baik mengenai prosedur operasi standar mampu mengurangi kemungkinan kesalahan dalam proses produksi [6]. Oleh karena itu, perusahaan perlu menekankan program pelatihan berkesinambungan terkait pencampuran, curing, dan pengendalian mutu untuk menekan risiko cacat produk. Dengan pendekatan tersebut, peran sumber daya manusia dapat menjadi faktor penunjang utama dalam mewujudkan keandalan mesin serta efektivitas sistem produksi secara keseluruhan [7].

Selain itu, aspek pemeliharaan mesin produksi memiliki peranan penting yang tidak boleh diabaikan. Mesin dengan reliabilitas rendah berisiko menimbulkan downtime signifikan, sehingga menghambat pencapaian target produksi. Penerapan strategi perawatan preventif dan prediktif dapat meminimalkan kemungkinan kerusakan mendadak sekaligus memperpanjang masa pakai peralatan [8]. Langkah ini mendukung konsistensi mutu produk beton serta mendorong peningkatan efisiensi operasional [9]. Penerapan metode analisis seperti FMEA dan FTA memungkinkan perusahaan mengidentifikasi komponen kritis sehingga kegiatan perawatan dapat difokuskan pada bagian dengan risiko tertinggi [10].

Selain itu, kondisi lingkungan produksi memiliki pengaruh signifikan terhadap mutu akhir beton. Variabel seperti temperatur, tingkat kelembapan, dan cara penyimpanan bahan baku dapat memengaruhi konsistensi campuran serta kekuatan tekan yang dihasilkan [11]. Oleh sebab itu, dibutuhkan sistem pengendalian lingkungan yang terencana, misalnya dengan menyediakan area penyimpanan bahan baku yang terlindungi serta mengatur ruang curing sesuai standar. Melalui manajemen lingkungan yang tepat, perusahaan dapat menekan cacat produksi sekaligus meningkatkan daya saing di tengah persaingan industri beton yang semakin kompetitif.

Kualitas merupakan aspek fundamental dalam industri manufaktur, termasuk industri beton. Kualitas produk sangat menentukan kepuasan konsumen dan daya saing perusahaan di tengah persaingan yang semakin ketat [12]. Produk beton yang cacat tidak hanya menurunkan citra perusahaan, tetapi juga berpotensi menimbulkan kerugian finansial serta membahayakan konstruksi [13].

PT XYZ adalah salah satu produsen beton di Indonesia yang memasok kebutuhan berbagai proyek pembangunan. Namun, perusahaan masih menghadapi permasalahan kualitas berupa cacat produk seperti retak, segregasi, dan kuat tekan yang tidak sesuai standar. Faktor penyebab cacat tersebut meliputi kesalahan operator, kurang optimalnya perawatan mesin, hingga kualitas bahan baku yang bervariasi.

Untuk mencapai peningkatan mutu produk, diperlukan pendekatan analitis yang berfungsi mengidentifikasi kemungkinan kegagalan dan menentukan skala prioritas perbaikan [14]. *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengevaluasi risiko setiap potensi kegagalan dengan mempertimbangkan tiga parameter utama, yakni tingkat keparahan (*Severity*), kemungkinan terjadinya (*Occurrence*), serta kemampuan deteksi (*Detection*) [15]. Selanjutnya, Jenis cacat dengan nilai RPN tertinggi diteliti lebih lanjut menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) guna memetakan akar penyebab masalah secara sistematis [16].

Teknik FMEA digunakan untuk mengidentifikasi potensi penyebab kesalahan dalam sistem dan operasi produksi produk, serta kemungkinan bahwa kegagalan tersebut dapat dikelola [17]. Tujuan dari metode ini adalah untuk mengevaluasi tingkat risiko setiap jenis kesalahan dengan mengevaluasi tingkat keparahan, kejadian, dan deteksi [18]. Teknik FTA adalah instrumen yang dirancang untuk menentukan kemungkinan bahaya atau mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan melalui pemecahan masalah sampel [19]. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi mode kegagalan pada produk beton di PT XYZ, menentukan tingkat risiko berdasarkan nilai RPN, serta menyusun usulan perbaikan melalui kombinasi metode FMEA dan FTA.

Sejumlah studi terdahulu pada bidang beton maupun industri manufaktur lainnya telah menerapkan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) maupun Fault Tree Analysis (FTA) secara terpisah [20] [16]. Namun, studi yang mengombinasikan kedua metode tersebut untuk menganalisis kualitas beton di Indonesia masih jarang dilakukan. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan data lama atau difokuskan pada industri selain beton, seperti otomotif dan elektronik. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) pada penerapan kombinasi metode FMEA dan FTA secara terpadu untuk menganalisis potensi kegagalan dalam proses produksi beton di Indonesia. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang menggunakan salah satu metode secara terpisah, studi ini tidak hanya mengidentifikasi risiko melalui nilai RPN, tetapi juga menelusuri akar penyebab kegagalan menggunakan FTA secara visual. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baru dalam pengendalian mutu produk beton secara komprehensif.

Secara ringkas, FMEA digunakan untuk mengevaluasi risiko setiap potensi kegagalan, mengidentifikasi jenis cacat utama pada produk beton PT. XYZ, sedangkan FTA digunakan untuk menelusuri akar penyebab kegagalan, serta merumuskan rekomendasi pengendalian untuk meningkatkan keandalan dan kualitas produk.

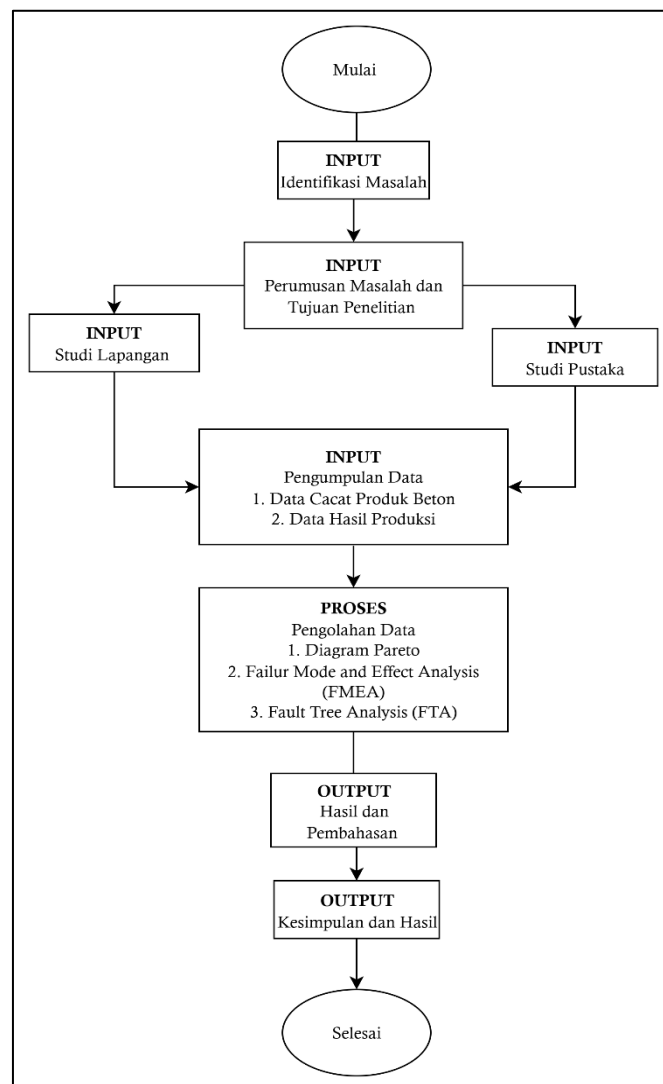
Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Praktis: mendukung PT XYZ dalam mengurangi jumlah produk cacat, meningkatkan efisiensi proses, dan memperkuat daya saing perusahaan.
2. Teoritis: memberikan kontribusi terhadap pengembangan literatur mengenai penggunaan kombinasi metode FMEA dan FTA pada industri beton.

3. Sosial-ekonomi: mendukung penyediaan beton yang lebih berkualitas sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan mutu pembangunan nasional.
Penelitian ini memiliki sejumlah batasan, antara lain:
 1. Data penelitian hanya mencakup periode juli 2024 hingga januari 2025.
 2. Objek yang dianalisis difokuskan pada produk beton pracetak di PT XYZ.
 3. Metode analisis yang digunakan terbatas pada FMEA untuk menentukan prioritas risiko dan FTA untuk menguraikan akar penyebab, tanpa menggunakan metode pendukung lainnya seperti Six Sigma atau RCM.

Metode Penelitian

Dengan menggunakan metodologi studi kasus yang didasarkan pada deskripsi kuantitatif, penelitian ini mengkaji industri produksi beton. Data yang digunakan diambil dari jumlah produk cacat perusahaan selama periode 7 bulan yaitu Juli 2024 sampai Januari 2025 sebagai data primer. Sumber data sekunder meliputi tinjauan penelitian terdahulu. Observasi lapangan dan percakapan dengan staff produksi digunakan untuk mengumpulkan data. Data tersebut dianalisis menggunakan metode FTA dan FMEA untuk mengetahui potensi modus kegagalan dalam proses produksi, dampak kegagalan tersebut, penyebab kegagalan tersebut, cara deteksi dalam proses produksi, serta menentukan tingkat keparahan, kejadian, deteksi, dan sifat akar penyebab penilaian kegagalan. RPN adalah angka yang mengurutkan potensi kegagalan proses yang tidak memiliki signifikansi atau nilai yang melekat [21]. Seluruh perhitungan dan pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel 2021, sedangkan flowchart dan FTA disusun dengan bantuan Draw.io. Berikut diagram penelitiannya.



Gambar 1 diagram flowchart penelitian

Mengidentifikasi suatu masalah, mengumpulkan informasi yang relevan, mengolahnya, menganalisisnya, dan menghasilkan kesimpulan merupakan langkah-langkah dalam proses penelitian.

- a) Identifikasi awal
Pada awalnya, peneliti melakukan tinjauan literatur dan lapangan, membuat isu, menetapkan tujuan dan manfaat penelitian, dan menentukan ruang lingkup masalah.
- b) Tahap pengumpulan dan pemrosesan data
Dari Juli 2024 hingga Januari 2025, permintaan statistik produksi dan data produk cacat merupakan bagian dari prosedur pengumpulan data. Peneliti juga berbicara dengan pemilik PT.XYZ dan sejumlah staf. Langkah selanjutnya dalam menganalisis data adalah membuat diagram Pareto yang akan menunjukkan jenis kesalahan mana yang lebih umum terjadi. Langkah selanjutnya adalah menggunakan data yang dikumpulkan untuk menghitung nilai RPN menggunakan pendekatan FMEA. Setelah itu, peneliti akan menyiapkan FTA untuk kesalahan dengan tingkat risiko tinggi.
- c) Tahap hasil dan pembahasan
Setelah data diolah, masuk ke bagian hasil dan pembahasan untuk diteliti lebih lanjut. Identifikasi masalah utama yang memerlukan prioritas penanganan dilakukan melalui diagram Pareto berdasarkan jumlah cacat yang ada. Setelah itu, metode FMEA digunakan untuk menentukan kategori kesalahan produk dengan risiko terbesar, kemudian dilanjutkan dengan penerapan Fault Tree Analysis (FTA) agar PT. XYZ dapat mengetahui akar penyebab dari kesalahan yang paling berbahaya.
- d) Tahap kesimpulan dan saran
Ini adalah fase terakhir dari proses penelitian, yang merangkum temuan dan menawarkan saran perbaikan guna mengatasi kegagalan produk.

Penentuan tingkat keparahan, nilai kejadian, dan temuan didasarkan pada kriteria penilaian yang telah ditentukan. Kriteria berikut adalah tingkat keparahan, kejadian dan nilai deteksi.

Tabel 1 Nilai Severity

Tingkat terjadi	Jumlah kejadian	Tingkat
Frekuensi kejadian yang sangat tinggi membuat kerusakan tidak dapat dicegah	Nyaris setiap kali muncul ketika pelaksanaan operasi berlangsung satu sampai dua kali.	10
Sering sekali terjadi	frekuensi tinggi muncul dalam rentang kurang dari 3 sampai 4 kali proses operasi.	9
Terjadi dengan frekuensi tinggi	Sering terjadi dalam rentang kurang dari lima sampai delapan siklus operasi.	8
Sering terjadi	Relatif sering muncul dalam rentang 9 hingga 20 kali siklus operasi.	7
Terjadi dengan frekuensi rendah	Frekuensi sedang terjadi dalam rentang antara 21 sampai 80 kali proses operasi.	6
Terjadi dengan frekuensi rendah	Frekuensi rendah muncul dalam kisaran kurang dari 81 hingga 400 kali siklus operasi.	5
Terjadi dengan frekuensi rendah	Keadaan sangat jarang muncul dalam rentang 401 hingga 2000 kali siklus operasi.	4
Terjadi dengan frekuensi yang sangat rendah	Keadaan sangat jarang terjadi dalam rentang kurang dari 2001 hingga 15.000 kali siklus operasi.	3
Terjadi dengan frekuensi yang sangat rendah	Hampir tidak pernah terjadi lebih dari 15.001 kali siklus operasi dalam periode yang sama.	2
Tidak pernah terjadi	Tidak pernah terjadi	1

Sumber : Dimodifikasi dari [20]

Tabel 2 Nilai Occurrence

Kemungkinan kegagalan	Skala probabilitas kegagalan	Peringkat
Tinggi sekali	1 in 2	10
	1 in 3	9
	1 in 8	8
Tinggi	1 in 20	7
	1 in 80	6
Sedang	1 in 400	5
	1 in 2000	4
Rendah	1 in 15000	3
Rendah sekali	1 in 150000	2
Remote	1 in 1500000	1

Sumber : Dimodifikasi dari [20]

Tabel 3 Nilai Detection

Deteksi	Kriteria	Tingkat
Hampir tidak mungkin terdeteksi	Sumber potensi kegagalan dan kerusakan berikutnya tidak dapat diidentifikasi atau dikontrol.	10
Hampir mustahil untuk terdeteksi	Kesulitan dalam mengendalikan perubahan membuat identifikasi penyebab potensial dan kegagalan berikutnya menjadi sulit.	9
Tidak mudah untuk terdeteksi	Pengendalian perubahan yang tidak mudah mengakibatkan penyebab potensial serta jenis kegagalan berikutnya sulit dikenali.	8
Kemungkinan terdeteksi sangat kecil	Sangat rumit untuk mengidentifikasi faktor penyebab potensial beserta bentuk kegagalan yang berkaitan.	7
Tingkat deteksi yang rendah	Sangat mudah mengenali faktor penyebab potensial serta kegagalan berikutnya.	6
Tingkat deteksi berada pada level sedang	Penyebab potensial dan jenis kegagalan hampir tidak dapat dideteksi.	5
Tingkat deteksi berada pada kategori menengah ke atas	Hampir tidak mungkin untuk mengidentifikasi penyebab potensial serta jenis kegagalan selanjutnya.	4
Dapat dengan mudah terdeteksi	Sangat mudah mengenali faktor penyebab potensial dan bentuk kegagalan yang mungkin terjadi selanjutnya.	3
Deteksi dapat dilakukan dengan sangat mudah	Penyebab potensial dan kegagalan lanjutan dapat dikenali dengan sangat mudah.	2
Deteksi dapat dilakukan dengan gampang atau secara visual	Diduga akan sering terjadi, memungkinkan identifikasi penyebab potensial dan kejadian	1

Sumber : Dimodifikasi dari [20]

Hasil Dan Pembahasan

Jenis Defect Produk

Dari Juli 2024 hingga Januari 2025, peneliti mengumpulkan data evaluasi kualitas produk dan menyusun daftar berbagai jenis kecacatan produk. Data cacat produk periode Dari Juli 2024 hingga Januari 2025 dirangkum di bawah ini.

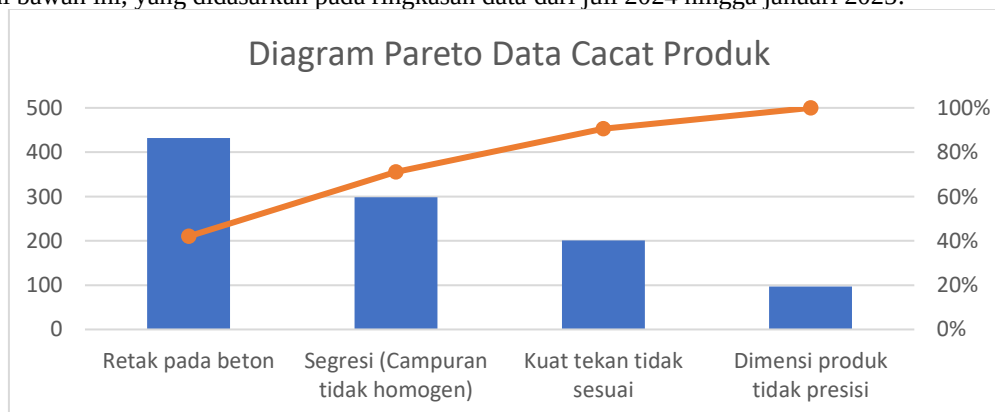
Tabel 4 Rekapitulasi Data Cacat Produk

Jenis Cacat	Total Cacat	Presentase	Kumulatif
Retak pada beton	432	42	42,0
Segregasi (Campuran tidak homogen)	298	29	71,0
Kuat tekan tidak sesuai	201	19,5	90,5
Dimensi produk tidak presisi	97	9,5	100
Total Cacat	1028	100	-

Sumber: Internal Perusahaan

Analisa Diagram Pareto

Untuk memusatkan upaya dalam memperbaiki masalah, diagram pareto dapat digunakan untuk mengatur kesalahan atau kekurangan [22]. Pembuatan diagram Pareto dan jenis persentase kesalahan dimaksudkan untuk mengidentifikasi jenis kesalahan yang paling umum terjadi pada level PT.XYZ. Dapat dilihat diagram pareto cacat produk di bawah ini, yang didasarkan pada ringkasan data dari juli 2024 hingga januari 2025.



Gambar 2 Diagram Pareto

Ditemukan yang paling dominan adalah cacat akibat retak pada beton dengan tingkat kecacatan 42 % dengan jumlah 432 pcs, segregasi (campuran tidak homogen) dengan tingkat kecacatan 29 % sebanyak 298 pcs, kuat tekan tidak sesuai dengan tingkat cacat sebesar 19,6% dengan total 201 pcs, dimensi produk tidak presisi dengan tingkat cacat sebesar 9,4 % dengan total 97 pcs.

Perhitungan nilai RPN dengan metode FMEA

RPN merupakan penanda kekritisitas yang digunakan untuk mengevaluasi tindakan perbaikan atau upaya mitigasi kegagalan sistem berdasarkan mode kegagalan [23]. RPN pada metode FMEA ditentukan dengan mengalikan skor severity, occurrence, dan detection. Cacat dengan RPN paling tinggi dianggap paling kritis. Data selanjutnya bersumber dari penilaian para responden [24], Penilaian faktor severity, occurrence, dan detection pada metode FMEA dilakukan oleh tiga orang evaluator, yaitu satu teknisi mesin, satu supervisor QC, dan satu manajer produksi. Nilai yang digunakan merupakan rata-rata dari ketiga evaluator berdasarkan hasil diskusi konsensus, Setiap mode kegagalan dievaluasi dengan skala 1–10 untuk masing-masing kriteria severity (S), occurrence (O), dan detection (D). Nilai Risk Priority Number (RPN) diperoleh dari hasil perkalian ketiga parameter tersebut ($RPN = S \times O \times D$). Penilaian dilakukan secara gabungan berdasarkan rata-rata skor dari para evaluator agar hasilnya lebih objektif..

Tabel 5 Nilai Rpn Retak Pada Beton

Jenis kegagalan	Dampak potensi kegagalan	Faktor Potensi Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN
Retak pada beton	Beton tidak dapat digunakan, menurunkan kekuatan struktur	Campuran kurang tepat, proses curing tidak sesuai	9	8	4	288

Tabel 6 Nilai Rpn Segregasi (Campuran Tidak Homogen)

Jenis kegagalan	Dampak potensi kegagalan	Faktor Potensi Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN
Segregasi (Campuran tidak homogen)	Beton rapuh, kualitas permukaan buruk	Perbandingan air-semen tidak seimbang, pengadukan kurang	8	7	3	168

Tabel 7 Nilai Rpn Kuat Tekan Tidak Sesuai

Jenis kegagalan	Dampak potensi kegagalan	Faktor Potensi Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN
Kuat tekan tidak sesuai	Produk gagal memenuhi standar teknis, berisiko ditolak	Campuran material salah, kualitas semen rendah	9	6	3	162

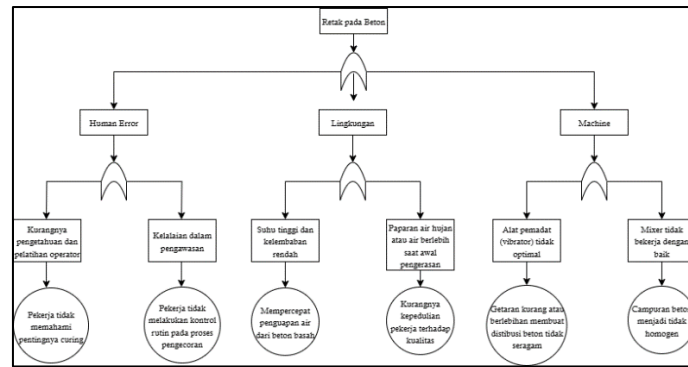
Tabel 8 Nilai Rpn Dimensi Produk Tidak Presisi

Jenis kegagalan	Dampak potensi kegagalan	Faktor Potensi Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN
Dimensi produk tidak presisi	Produk tidak sesuai cetakan, berisiko tidak terpasang baik	Kesalahan cetakan, getaran pada proses pengecoran	6	4	2	48

Dari tabel tersebut terlihat bahwa error dengan RPN tertinggi dan resiko paling besar terjadi akibat retak pada beton dengan nilai RPN 228, hasil perhitungan nilai RPN dapat dilihat pada tabel 5. Error selanjutnya adalah Segregasi (Campuran tidak homogen) dengan nilai RPN 168 ,kemudian Kuat tekan tidak sesuai nilai RPN 162 dan yang terakhir yaitu Dimensi produk tidak presisi dengan nilai RPN 48. Cacat dengan Nilai RPN yang tertinggi sebaiknya dikendalikan terlebih dahulu untuk mengatasi dampak yang mungkin terjadi, sehingga operasional bisnis dan keuangan tidak terpengaruh.

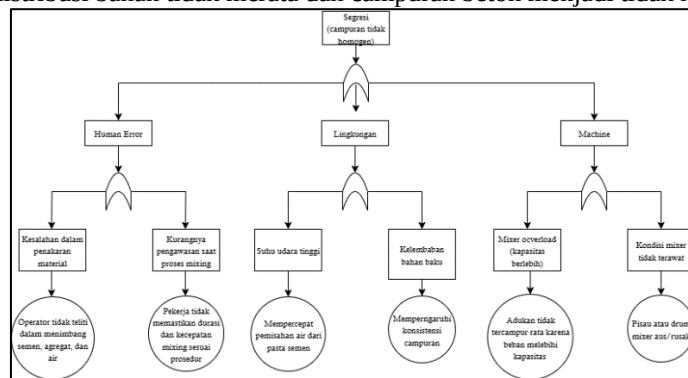
Metode FTA

Metodologi FTA menggunakan diagram pohon untuk mengetahui bagaimana suatu masalah tertentu muncul [25]. Peneliti di PT. XYZ dapat meminimalkan kemungkinan ditemukannya kesalahan produk dengan menggunakan pendekatan FTA untuk menentukan sumber utama masalah dan segera memperbaikinya. Berikut hasil pemeriksaan berbasis FTA terhadap tiga kegagalan tersebut.



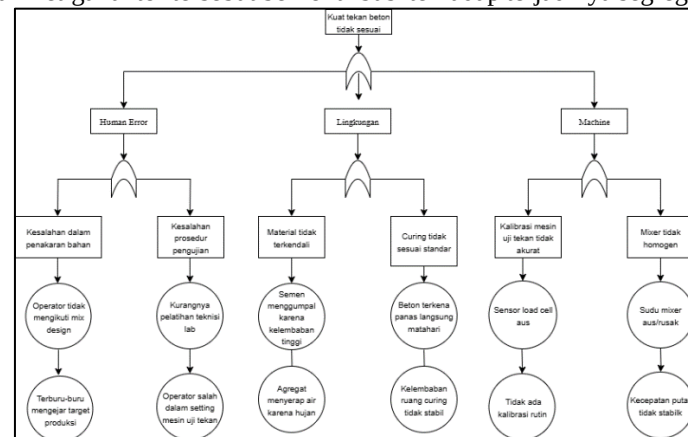
Gambar 3 Diagram Fault Tree Analysis (FTA) untuk jenis defect beton pecah

Gambar diagram FTA untuk jenis defect beton pecah menggambarkan analisis dari jenis kerusakan akibat terjadinya retak pada beton. Penyebab kerusakan retak pada beton berasal dari faktor manusia, faktor lingkungan, dan faktor mesin. Dari sisi manusia, kurangnya pengetahuan dan pengalaman operator menyebabkan pekerja tidak memahami pentingnya curing serta tidak melakukan kontrol rutin pada proses pengecoran. Dari faktor lingkungan, suhu tinggi dan kelembaban rendah mempercepat penguapan air pada beton basah, ditambah paparan air hujan atau air berlebih saat pengecoran serta kurangnya kepedulian pekerja terhadap kualitas. Sementara itu, dari faktor mesin, kerusakan terjadi karena alat pemadat (elevator) tidak berfungsi optimal dan mixer tidak bekerja dengan baik sehingga distribusi bahan tidak merata dan campuran beton menjadi tidak homogen.



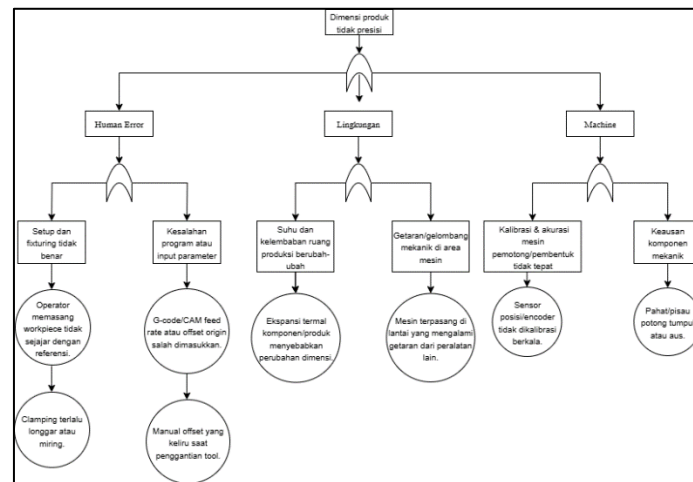
Gambar 4 Diagram Fault Tree Analysis (FTA) untuk jenis defect segregasi (campuran tidak homogen)

Gambar diagram FTA untuk jenis defect segregasi (campuran tidak homogen) menggambarkan analisis dari jenis kerusakan akibat terjadinya segregasi atau campuran beton tidak homogeny. Penyebab kerusakan ini berasal dari faktor manusia, faktor lingkungan, dan faktor mesin. Dari sisi manusia, kesalahan dalam penakaran material terjadi karena operator tidak teliti dalam memperhitungkan semen, agregat, dan air, serta kurangnya pengawasan saat proses mixing menyebabkan pekerja tidak mematuhi durasi dan ketentuan mixing sesuai prosedur. Faktor lingkungan seperti suhu yang panas dapat menyebabkan air pada pasta semen lebih cepat menguap, sedangkan kelembaban bahan baku berpengaruh terhadap konsistensi campuran. Sementara itu, dari faktor mesin, kondisi mixer yang tidak dirawat serta pisau atau daun mixer yang tumpul dapat menurunkan kinerja, ditambah kondisi *mixer overloaded* (kapasitas berlebih) yang membuat adukan tidak tercampur rata karena bahan melebihi kapasitas. Kombinasi dari ketiga faktor tersebut berkontribusi terhadap terjadinya segregasi pada campuran beton.



Gambar 5 Diagram Fault Tree Analysis (FTA) untuk jenis defect kuat tekan beton tidak sesuai

Gambar diagram FTA untuk jenis defect kuat beton tidak sesuai menggambarkan analisis dari jenis kerusakan akibat kuat tekan beton tidak sesuai. Penyebab kerusakan ini berasal dari faktor manusia, faktor lingkungan, dan faktor mesin. Dari sisi manusia, kesalahan dalam penakaran bahan terjadi karena operator tidak mengikuti *mix design* serta terburu-buru mengejar target produksi, ditambah kesalahan prosedur pengujian akibat kurangnya pelatihan teknisi lab yang menyebabkan operator salah dalam setting mesin uji tekan. Dari faktor lingkungan, material yang tidak terkendali seperti semen yang menggumpal karena kelembaban tinggi dan agregat menyerap air karena hujan menurunkan kualitas, sedangkan curing yang tidak sesuai standar seperti beton terkena paparan langsung sinar matahari dan kelembaban ruang curing yang tidak ideal juga memengaruhi hasil uji kuat tekan. Sementara itu, dari faktor mesin, kalibrasi mesin uji tekan yang tidak akurat karena sensor load cell aus dan tidak adanya kalibrasi rutin, serta mixer yang tidak homogen akibat sudu mixer aus atau rusak dan kecepatan putar tidak stabil, turut menjadi penyebab utama. Kombinasi dari ketiga faktor tersebut berkontribusi terhadap ketidaksesuaian kuat tekan beton.



Gambar 6 Diagram Fault Tree Analysis (FTA) untuk jenis defect dimensi produk tidak presisi

Gambar diagram FTA untuk jenis defect dimensi produk tidak presisi menggambarkan analisis dari jenis kerusakan akibat dimensi produk tidak presisi. Penyebab kerusakan ini berasal dari faktor manusia, faktor lingkungan, dan faktor mesin. Dari sisi manusia, kesalahan terjadi pada setup dan fixturing yang tidak benar karena operator memasang *workpiece* tidak sejajar dengan referensi serta clamping terlalu longgar atau miring, ditambah kesalahan program atau input parameter berupa *G-code* atau *CAM feed rate* yang salah dimasukkan serta manual offset yang keliru saat penggantian *tool*. Dari faktor lingkungan, suhu dan kelembaban ruang produksi yang berubah-ubah menyebabkan ekspansi termal komponen/produk sehingga dimensinya berubah, sedangkan getaran atau gelombang mekanik di area mesin karena mesin terpasang di lantai yang menerima getaran dari peralatan lain turut memperburuk akurasi. Sementara itu, dari faktor mesin, kalibrasi dan akurasi mesin pemotong yang tidak tepat akibat sensor posisi/encoder tidak dikalibrasi secara berkala, serta keausan komponen mekanik seperti pahat atau pisau potong yang tumpul maupun aus, menjadi penyebab utama terjadinya ketidaksesuaian dimensi. Kombinasi dari ketiga faktor tersebut mengakibatkan dimensi produk tidak presisi.

Validasi Hasil

Untuk memastikan validitas hasil analisis, dilakukan konfirmasi dengan pihak PT. XYZ melalui wawancara dan observasi lapangan pada area produksi beton. Hasil validasi menunjukkan bahwa faktor-faktor penyebab kegagalan yang diidentifikasi melalui FMEA dan FTA konsisten dengan kondisi aktual di lapangan, khususnya pada area mixing dan curing. Selain itu, perusahaan telah melakukan uji implementasi awal berupa pelatihan operator dan pengetatan prosedur curing yang terbukti mampu menurunkan tingkat cacat retak sebesar 15% selama bulan Februari 2025. Hal ini mengindikasikan bahwa rekomendasi penelitian dapat diterapkan secara praktis dan efektif.

Usulan Pengendalian

Pada langkah ini, diusulkan perbaikan untuk seluruh jenis kegagalan yang mungkin terjadi. Tetapi, pada implementasinya disarankan agar PT.XYZ memberikan prioritas kepada pengendalian jenis kegagalan. Upaya perbaikan difokuskan pada aspek yang memiliki skor RPN tertinggi agar dampak yang ditimbulkan dapat ditekan. Rekomendasi bagi PT. XYZ dapat dilihat pada uraian berikut.

Tabel 9 usulan pengendalian

Jenis kegagalan	Dampak potensi kegagalan	Faktor potensial yang menyebabkan kegagalan	Proses pengendalian	Jenis Tindakan (Preventif/Korektif)
Retak pada beton	Beton tidak dapat digunakan, menurunkan kekuatan struktur	- Curing tidak sesuai - Campuran material kurang tepat - Suhu & kelembaban lingkungan tidak terkontrol - Alat pemadat (elevator) tidak berfungsi optimal	- Memberikan pelatihan curing & mix design kepada operator - Menyediakan area curing terlindungi dari panas dan hujan - Membuat SOP pengawasan curing & campuran beton - Melakukan perawatan rutin pada mixer dan alat pemadat	Preventif & Korektif
Segregasi (Campuran tidak homogen)	Beton rapuh, kualitas permukaan buruk	- Perbandingan air-semen tidak seimbang - Proses mixing tidak sesuai durasi - Pisau/daun mixer aus - Agregat lembab akibat penyimpanan terbuka	- Kalibrasi rutin timbangan & flowmeter air - Menetapkan standar durasi mixing - Perawatan pisau/daun mixer secara berkala - Menyimpan agregat pada gudang tertutup dan kering	Preventif
Kuat tekan tidak sesuai	Produk gagal memenuhi standar teknis, berisiko ditolak	- Kesalahan penakaran bahan - Kualitas semen rendah atau menggumpal - Agregat menyerap air berlebih - Mesin uji tekan tidak terkalibrasi	- Menyusun jadwal kalibrasi mesin uji tekan - Melatih teknisi lab dalam prosedur uji kuat tekan - Menyimpan semen di gudang kering - Verifikasi mix design sebelum produksi massal - Melakukan pelatihan operator tentang fixturing & program input	Preventif & Korektif
Dimensi produk tidak presisi	Produk tidak sesuai cetakan, berisiko tidak terpasang baik	- Setup dan fixturing salah - Kesalahan input parameter program - Getaran lantai produksi - Pisau potong tumpul, mesin pemotong tidak dikalibrasi	- Melakukan inspeksi berkala pada jig/fixture - Memasang mesin di lantai dengan peredam getaran - Melakukan perawatan pisau potong & kalibrasi mesin pemotong secara berkala	Preventif

Simpulan

Dari hasil analisis menggunakan diagram Pareto diketahui terdapat empat jenis cacat utama pada produk beton PT. XYZ, yaitu retak pada beton (42% atau 432 unit), segregasi/campuran tidak homogen (29% atau 298 unit), kuat tekan tidak sesuai (19,6% atau 201 unit), dan dimensi produk tidak presisi (9,4% atau 97 unit). Hasil perhitungan FMEA menunjukkan nilai RPN tertinggi terdapat pada cacat retak pada beton dengan RPN 288, diikuti segregasi dengan RPN 168, kuat tekan tidak sesuai dengan RPN 162, dan dimensi produk tidak presisi dengan RPN 48. Analisis lebih lanjut dengan FTA mengidentifikasi bahwa faktor manusia, faktor mesin, dan faktor lingkungan merupakan penyebab utama terjadinya kegagalan. Oleh karena itu, upaya pengendalian perlu difokuskan pada faktor-faktor tersebut agar kualitas produk beton dapat ditingkatkan.

Sebagai rekomendasi bagi PT. XYZ, prioritas utama perbaikan sebaiknya difokuskan pada cacat retak pada beton karena memiliki nilai risiko tertinggi. Perusahaan perlu melakukan pelatihan operator secara berkelanjutan, penerapan SOP curing dan mixing, serta meningkatkan pengawasan dalam proses produksi. Selain itu, perawatan dan kalibrasi mesin secara rutin harus dilaksanakan agar keandalan peralatan tetap terjaga. Lingkungan produksi juga perlu dikendalikan, khususnya terkait suhu dan kelembaban, serta penyimpanan material agar tetap sesuai standar. Untuk penelitian berikutnya, disarankan mengombinasikan metode FMEA dan FTA dengan metode lain seperti RCM atau Six Sigma untuk memperluas analisis dan menghasilkan perbaikan yang lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- [1] A. R. Nurdifa, "Kontribusi Industri Pengolahan ke PDB Susut Jadi 18,67% Kuartal II/2025," *Bisnis.com*, 2025, [Online]. Available: <https://ekonomi.bisnis.com/read/20250805/257/1899423/kontribusi-industri-manufaktur-ke-pdb-susut-jadi-1867-kuartal-ii2025>
- [2] H. M. / AP3I, "AP3I: Produksi beton pracetak naik 10% tiap tahun," *Kontan.co.id*, 2018, [Online]. Available: <https://industri.kontan.co.id/news/ap3i-produksi-beton-pracetak-naik-10-tiap-tahun>
- [3] M. R. Ejaz, "Smart Manufacturing as a Management Strategy to Achieve Sustainable Competitiveness," *Journal of the Knowledge Economy*, vol. 15, no. 1, pp. 682–705, 2024, doi: 10.1007/s13132-023-01097-z.
- [4] M. Kastalani, M. Basjir, C. Yazirin, and N. Robbi, "Analysis Keandalan untuk Meningkatkan Efektivitas Penggunaan Forklift dengan Metode Reliability Analysis dan Machine's Effectiveness," *Jurnal Rekayasa Teknologi*, vol. 20, no. 1, pp. 1051–1062, 2024, [Online]. Available: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/jrt/article/view/1051>
- [5] R. Romo, F. Orozco, E. Forcael, and F. Moreno, "Towards a Model That Sees Human Resources as a Key Element for Competitiveness in Construction Management," *Buildings*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/buildings13030774.
- [6] N. A. Saputra and H. C. Palit, "Upaya Peningkatan Skill dan Knowledge Operator untuk Handling Defects pada PT. X," *Jurnal Titra: Teknik Industri*, vol. 9, no. 2, p. —, 2022, [Online]. Available: <https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-industri/article/view/13008>
- [7] S. Di Luozzo, F. Starnoni, and M. M. Schiraldi, "On the relationship between human factor and overall equipment effectiveness (OEE): An analysis through the adoption of analytic hierarchy process and ISO 22400," *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 15, p. 18479790231188548, 2023, doi: 10.1177/18479790231188548.
- [8] A. Maierhofer, S. Trojahn, and F. Ryll, "Dynamic Scheduling and Preventive Maintenance in Small-Batch Production: A Flexible Control Approach for Maximising Machine Reliability and Minimising Delays," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 8, 2025, doi: 10.3390/app15084287.
- [9] A. Newman and C. Strack, "Supporting Production Consistency for Cement," Sep. 2025, *150th anniversary of the Metre Convention and the BIPM with a poster on a metrology challenge*. [Online]. Available: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=959790
- [10] "@article{Prastyabudi2022,".
- [11] "citations-20250923T150707".
- [12] S. Emir and N. Sulistyowati, "The effect of supply chain management and total quality management on operational performance through competitive advantage," *International Journal of Research in Business and Social Science (2147- 4478)*, vol. 13, no. 1, pp. 27–37, Feb. 2024, doi: 10.20525/ijrbs.v13i1.3087.
- [13] S. Uthaman and V. Vishwakarma, "Assessment of causes and consequences of concrete deterioration and its remediation," *Journal of Building Engineering*, vol. 79, p. 107790, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107790>.
- [14] I. S. Firmansyah and Suparno, "Improvement of Overhaul Maintenance Management System Based on Failure Mode Operation Failure Analysis Using The FMEA Method," in *IPTEK Journal of Proceedings*

- Series, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), 2024. [Online]. Available: <https://iptek.its.ac.id/index.php/jps/article/view/11224>
- [15] H. Hidayat, D. Andesta, and M. F. Baad, "Enhancing Quality Control in the Indonesian Automotive Parts Industry: A Defect Reduction Approach Through the Integration of FMEA and MSA," *Instrumentation Measure Métrologie*, vol. 23, no. 1, pp. 57–64, 2022, doi: 10.18280/i2m.230104.
- [16] S. Lestari, D. Septiyana, and W. Yuniawati, "Analisis Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) Untuk Identifikasi Penurunan Kualitas Produk Toyota Hi-Ace (Studi Kasus di PT. EDS Manufacturing Indonesia)," *UNISTEK: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 8, no. 2, pp. 1456–1465, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.unis.ac.id/index.php/UNISTEK/article/view/1456>
- [17] M. Mokhtarzadeh, J. Rodríguez-Echeverría, I. Semanjski, and S. Gautama, "Hybrid intelligence failure analysis for industry 4.0: a literature review and future prospective," *J Intell Manuf*, vol. 36, no. 4, pp. 2309–2334, 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02376-5.
- [18] J. J. Cardiel-Ortega and R. Baeza-Serrato, "Failure Mode and Effect Analysis with a Fuzzy Logic Approach," *Systems*, vol. 11, no. 7, 2023, doi: 10.3390/systems11070348.
- [19] F. Ehiagwina, O. Kehinde, L. Afolabi, and I. S. Olatinwo, "Fault Tree Analysis and its Modifications as Tools for Reliability and Risk Analysis of Engineering Systems -An Overview," vol. 3, pp. 383–396, Sep. 2022.
- [20] M. D. Farrizqi and D. Andesta, "Quality Control Analysis Using the Failure Mode Method and Effect Analysis and Fault Tree Analysis on Songkok UD.XYZ Products," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 2, pp. 835–846, Apr. 2024, doi: 10.33379/gtech.v8i2.4052.
- [21] K.-H. Chang, T.-Y. Fang, and Z.-S. Li, "Using a Flexible Risk Priority Number Method to Reinforce Abilities of Imprecise Data Assessments of Risk Assessment Problems," *Electronics (Basel)*, vol. 14, no. 3, 2025, doi: 10.3390/electronics14030518.
- [22] A. Setiawan and others, "Studi Kasus Analisis Defect Pada Komponen Otomotif Disertai Pemecahan Masalah Menggunakan Diagram Pareto dan Fishbone," *Jurnal Ilmiah Riset dan Sains*, vol. 7, no. 2, pp. 4748–4756, 2023, [Online]. Available: <https://ejurnal.kampusakademik.co.id/index.php/jirs/article/view/4748>
- [23] B. D. Rahmawati and N. N. B. Maharani, "Assessing Cause of Defect Using Failure Mode and Effect Analysis," *Spektrum Industri*, vol. 21, no. 1, pp. 1–7, May 2023, doi: 10.12928/si.v21i1.91.
- [24] M. N. B. Simbolon, P. D. Saputra, and M. Ragil, "Risk Priority Number Measurement for Construction Safety Risks in Upper Structure Projects of Military Airbase Hangars Based on Activity," *Engineering Proceedings*, vol. 84, no. 1, 2025, doi: 10.3390/engproc2025084036.
- [25] K. Pan *et al.*, "Towards a Systematic Description of Fault Tree Analysis Studies Using Informetric Mapping," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, 2022, doi: 10.3390/su141811430.