

## Perbaikan Kualitas Cetakan Poros Kam (*Camshaft*) Menggunakan *FMEA* dan *2 Sample T test*

Solihin<sup>\*1</sup>, Rifki Muhendra<sup>2</sup>, Murwan Widyanoro<sup>3</sup>, Rifda Ilahy Rosihan<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universitas Bhayangkara Jakarta Raya; Jalan Raya Perjuangan Bekasi  
e-mail: <sup>\*1</sup>solihin@dsn.ubharajaya.ac.id

### Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan mengurangi tingkat kecacatan dalam proses pembuatan cetakan camshaft melalui pendekatan terintegrasi antara Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan 2-Sample T-test. Latar belakang penelitian ini berangkat dari tingginya rasio cacat total sebesar 1,00%, melebihi target perusahaan sebesar 0,5%. Analisis kualitatif diawali dengan Fishbone diagram untuk mengidentifikasi akar penyebab cacat, yang kemudian divalidasi menggunakan FMEA. Hasil analisis FMEA menunjukkan empat macam kegagalan utama dengan nilai prioritas risiko (RPN) tertinggi, yaitu operator tidak memahami instruksi, pola cetakan berkarat, pola cetakan kotor, serta instruksi kerja yang tidak jelas. Rekomendasi perbaikan difokuskan pada revisi instruksi kerja, penerapan prosedur pembersihan pola cetakan, dan pelatihan operator. Selanjutnya, uji 2-Sample T-Test digunakan untuk mengevaluasi efektivitas perbaikan dengan membandingkan data sebelum dan sesudah intervensi. Uji normalitas menggunakan Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk) memastikan validitas uji parametrik. Hasil pengujian terdapat perbedaan signifikan dengan P-value < 0,05, dimana total rasio kecacatan cetakan poros kam menurun dari 1,00% menjadi 0,51%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi metode FMEA dan 2-Sample T-Test tidak hanya mampu mengidentifikasi akar penyebab dan prioritas perbaikan secara sistematis, tetapi juga memverifikasi efektivitas intervensi secara kuantitatif. Pendekatan ini dapat diadaptasi pada berbagai proses manufaktur lain guna meningkatkan kualitas produk dan daya saing industri.

**Kata kunci**— Perbaikan kualitas, Cetakan camshaft, FMEA, Uji 2-Sample T.

### Abstract

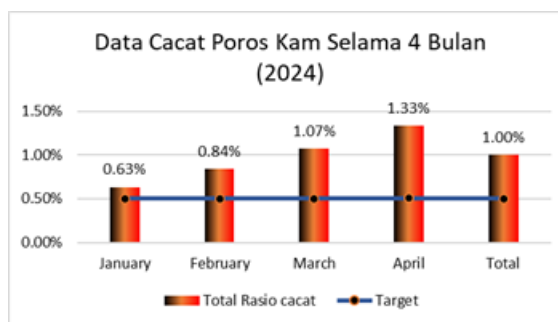
The purpose of this study was to evaluate and reduce the defect rate in the camshaft mold manufacturing process through an integrated approach of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and a 2-Sample T-test. The background to this study was a high total defect rate of 1.00%, exceeding the company's target of 0.5%. Qualitative analysis began with a Fishbone diagram to identify the root causes of defects, which was then validated using FMEA. The FMEA analysis results identified four main failure types with the highest risk priority (RPN): operator incomprehension of instructions, rusty mold patterns, dirty mold patterns, and unclear work instructions. Recommendations for improvement focused on revising work instructions, implementing mold pattern cleaning procedures, and training operators. Furthermore, a 2-Sample T-test was used to evaluate the effectiveness of the improvements by comparing pre- and post-intervention data. Normality testing using the Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk) method ensured the validity of the parametric test. The test results showed a significant difference with a P-value < 0.05, where the total cam shaft mold defect ratio decreased from 1.00% to 0.51%. This study concluded that the combination of FMEA and 2-Sample T-Test methods was not only able to systematically identify root causes and improvement priorities, but also quantitatively verify the effectiveness of interventions. This approach can be adapted to various other manufacturing processes to improve product quality and industrial competitiveness.

**Keywords**— Quality improvement, Camshaft casting, FMEA, Two-Sample T-test.

## 1. PENDAHULUAN

Dalam produksi komponen otomotif, kualitas produk merupakan salah satu faktor kunci yang menentukan daya saing perusahaan. Salah satu komponen penting dalam sistem mesin kendaraan bermotor adalah poros kam (*camshaft*), yang berfungsi mengatur bukaan dan penutupan katup pada mesin pembakaran dalam. Karena fungsinya yang vital, *camshaft* harus diproduksi dengan tingkat presisi dan kualitas yang tinggi agar performa mesin tetap optimal serta memenuhi standar keselamatan dan keandalan [1].

PT XYZ adalah produsen komponen kendaraan roda empat. Salah satu produknya adalah poros kam (*camshaft*). Namun, permasalahan kualitas seringkali muncul dalam proses produksi, khususnya pada tahap pengecoran *camshaft*. Berdasarkan data produksi, tingkat kecacatan cetakan *camshaft* masih relatif tinggi dengan kecacatan total 1.00%, sedangkan target perusahaan adalah menekan kecacatan hingga 0,50% (Gambar 1). Kondisi ini menunjukkan adanya gap kualitas yang signifikan, sehingga diperlukan analisis mendalam terhadap sumber permasalahan serta upaya perbaikan yang terstruktur. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa cacat pada *camshaft* dapat berupa retak (*hot-tearing*), porositas, maupun terdapat benjolan pada produk coran akibat erosi cetakan [2].



Gambar 1. Rasio Cacat Cetakan Poros Kam

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) adalah salah satu teknik yang banyak digunakan dalam mengidentifikasi risiko dan penyebab kegagalan proses. *FMEA* membantu dalam menentukan mode kegagalan yang mungkin terjadi, mengevaluasi level keparahan, frekuensi kejadian, dan kapabilitas deteksi, sehingga tindakan perbaikan dapat diprioritaskan pada aspek yang paling penting. Studi kasus *PFMEA* pada sub-assembly *camshaft* juga menunjukkan efektivitas metode ini dalam mengidentifikasi mode kegagalan serta menyusun prioritas tindakan perbaikan [3]. Dengan penerapan *FMEA*, perusahaan diharapkan dapat menemukan akar permasalahan penyebab kecacatan *camshaft* secara sistematis [4].

Selain itu, untuk mengukur efektivitas perbaikan yang dilakukan, diperlukan pendekatan statistik yang dapat membandingkan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan. Salah satu metode yang relevan adalah uji dua sampel (*2-sample T test*). Uji ini digunakan untuk meyakinkan adanya perbedaan yang berarti antara tingkat kecacatan dalam proses produksi sebelum dan sesudah tindakan perbaikan [5], [6]. Dengan kombinasi *FMEA* sebagai alat identifikasi masalah dan *2-sample T test* sebagai alat verifikasi perbaikan, diharapkan tercapai pengendalian kualitas yang lebih baik dan berkelanjutan. Perumusan masalah yang dapat ditarik dari latar belakang di atas adalah sebagai berikut:

- Apa saja mode kegagalan dan penyebab utama kecacatan pada proses pembuatan cetakan *camshaft* yang dapat diidentifikasi menggunakan metode *FMEA*?
- Bagaimana prioritas tindakan perbaikan yang harus dilakukan berdasarkan hasil analisis

FMEA?

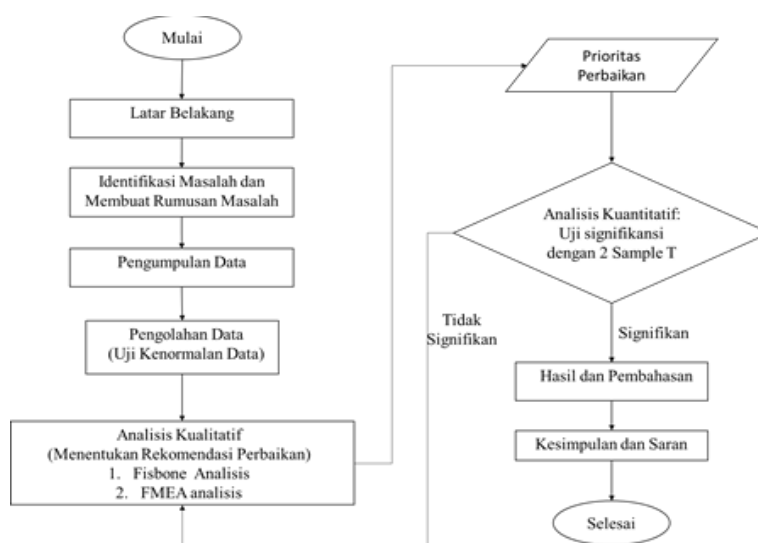
- c. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara tingkat kecacatan cetakan camshaft sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan berdasarkan uji statistik *2-sample T test*?

## 2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian digunakan untuk mencapai tujuan penelitian secara terukur, terstruktur, dan secara ilmiah dapat dipertanggungjawabkan. Metodologi penelitian merupakan kerangka sistematis yang digunakan untuk mencapai tujuan penelitian secara terukur, terstruktur, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Pemilihan metodologi yang tepat akan memastikan bahwa permasalahan penelitian dapat diidentifikasi, dianalisis, dan diselesaikan dengan pendekatan yang sesuai (Gambar 2).

### 2.1 Metodologi Penelitian

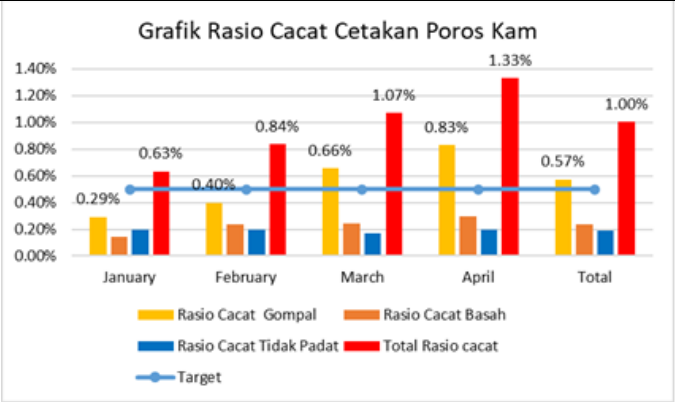
Dalam penelitian mengenai Analisis Perbaikan Kualitas Cetakan Poros kam (*Camshaft*) menggunakan Metode FMEA dan 2 Sample T-Test, metodologi yang digunakan dirancang untuk menggabungkan dua pendekatan utama, yaitu analisis kualitatif berbasis risiko melalui *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* [3] dan analisis secara kuantitatif berbasis statistik melalui uji *2 Sample T* [5]. Kombinasi kedua pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk tidak hanya mengidentifikasi penyebab kegagalan potensial tetapi juga menguji signifikansi perbaikan secara statistik. Metodologi penelitian ini diuraikan dalam empat tahapan utama, yaitu: (1) identifikasi masalah dan menentukan rumusan masalah, (2) pengumpulan data, (3) analisis *FMEA*, dan (4) analisis kuantitatif dengan uji signifikansi *2 Sample T-test*.



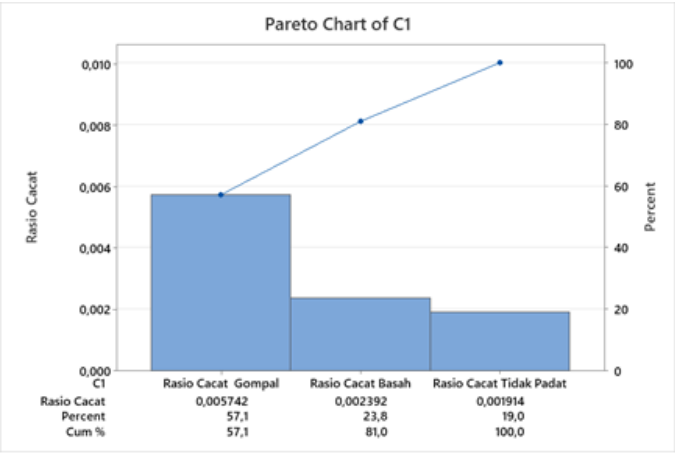
Gambar 2. Alur Penelitian

### 2.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data kualitatif dan kuantitatif dilakukan untuk mendapatkan informasi lengkap tentang tingkat kecacatan cetakan poros kam (*camshaft*). Data kuantitatif dikumpulkan dari catatan produksi historis selama periode baseline empat bulan sebelum intervensi (Gambar 3).

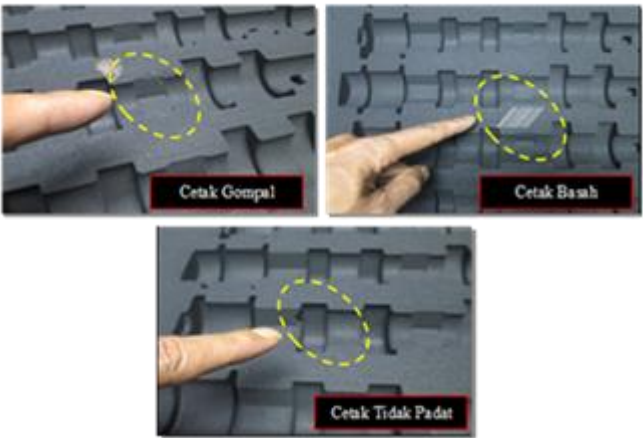


Gambar 3 Grafik Rasio Cacat Poros Kam (2024)



Gambar 4 Pareto Rasio Cacat Poros Kam

Berdasarkan data dari Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa cacat cetakan poros kam yang paling dominan adalah cacat cetakan gompal 57,1% disusul oleh cacat cetakan basah dan tidak padat masing masing sebesar 23,8% dan 19%. Ilustrasi cacat dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Jenis Cacat Cetakan Poros Kam

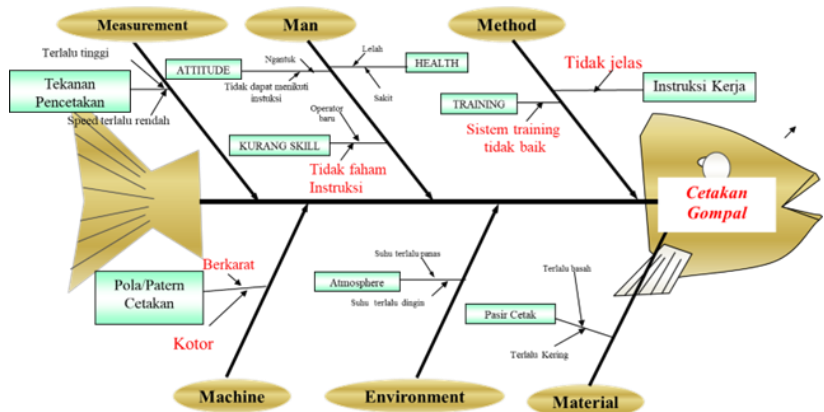
2.3 Pengolahan Data

Data yang dikumpulkan kemudian diolah agar siap dianalisis. Pengolahan data mencakup penyusunan sampel statistik sebelum dan sesudah intervensi dengan periode pengamatan yang sebanding. Langkah ini dilakukan untuk memastikan validitas perbandingan dalam uji *2-sample T test*. Selain itu, dilakukan uji kenormalan data menggunakan metode Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk) dengan menyajikan grafik *run chart* dan *boxplot* untuk melihat tren dan distribusi tingkat kecacatan. Visualisasi ini membantu memberikan gambaran awal tentang kondisi proses sebelum dilakukan analisis lebih mendalam.

2.4 Analisis Data

1. Analisis Kualitatif dengan *Fishbone Diagram* dan *FMEA*

Analisis kualitatif dilakukan untuk mengidentifikasi akar penyebab kecacatan pada proses cetakan camshaft secara sistematis. Metode pertama yang digunakan adalah *Fishbone Diagram* atau diagram Ishikawa, yang mengelompokkan potensi penyebab cacat ke dalam kategori utama seperti *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Measurement*, dan *Environment* (Gambar 6).



Gambar 6 *Fisbone Diagram* Cacat Gompal Pada Cetakan Poros Kam

Tabel 1 FMEA Cacat Cetakan Poros Kam

| Key Process Input              | Potential Failure Mode                    | Potential Failure Effects                                                                        | S E V                                     | Potential Causes                                    | O C C                             | Current Controls                                                                                                                                     | D E T                                | R P N |
|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|
| What is the Key Process Input? | In what ways does the Key Input go wrong? | What is the impact on the Key Output Variables (Customer Requirements) or internal requirements? | How Severe is the effect to the customer? | What causes the Key input to go wrong?              | How often does cause or FM occur? | What are the existing controls and procedures (inspection and test) that prevent either the cause or the Failure Mode? Should include an SOP number. | How well can you detect cause or FM? |       |
| Man                            | Tidak disiplin                            | Cetakan rusak                                                                                    | 9                                         | Kurang pengawasan                                   | 2                                 | Monitoring lapangan                                                                                                                                  | 2                                    | 36    |
|                                | Tidak faham instruksi                     | Cetakan rusak                                                                                    | 9                                         | Pelatihan kurang memadai                            | 8                                 | Pelatihan bila diperlukan                                                                                                                            | 8                                    | 576   |
| Machine                        | Pola/ Pattern Berkarat                    | Cetakan gompal                                                                                   | 9                                         | Operator tidak mengerti penggunaan pola             | 8                                 | Instruksi kerja                                                                                                                                      | 8                                    | 576   |
|                                | Pola/ Pattern Kotor                       | Cetakan gompal                                                                                   | 9                                         | Operator tidak mengerti penggunaan pola             | 8                                 | Instruksi kerja                                                                                                                                      | 8                                    | 576   |
| Material                       | Pasir Cetak Terlalu Basah                 | Hasil cetakan berongga                                                                           | 4                                         | terlalu banyak air                                  | 4                                 | Standar Solder Pot Setting                                                                                                                           | 2                                    | 32    |
|                                | Pasir Cetak Terlalu Kering                | Cetakan mudah pecah                                                                              | 4                                         | Kurang air                                          | 4                                 | Standard Solder Pot Setting                                                                                                                          | 2                                    | 32    |
| Method                         | Instruksi tidak jelas                     | Cetakan rusak                                                                                    | 9                                         | Instruksi pembersihan pola tidak tersedia           | 8                                 | Tidak Ada                                                                                                                                            | 8                                    | 576   |
|                                | Sistem pelatihan tidak baik               | Skill operator tidak baik                                                                        | 7                                         | Tidak ada skema pelatihan secara reguler            | 7                                 | Pelatihan bila diperlukan                                                                                                                            | 2                                    | 98    |
| Mesurement                     | Tekanan terlalu tinggi                    | Cetakan kurang pori-pori                                                                         | 7                                         | Menggunakan tekanan berlebihan saat pemadatan pasir | 3                                 | Instruksi kerja                                                                                                                                      | 2                                    | 42    |
|                                | Tekanan terlalu rendah                    | Cetakan mudah pecah                                                                              | 9                                         | Tekanan kurang saat pemadatan pasir.                | 3                                 | Instruksi kerja                                                                                                                                      | 2                                    | 54    |
| Environment                    | Suhu terlalu panas                        | Cetakan mudah kering                                                                             | 5                                         | Kurang sirkulasi udara                              | 2                                 | Instruksi penggunaan exhaustfan                                                                                                                      | 2                                    | 20    |
|                                | Suhu terlalu dingin                       | Cetakan lembab                                                                                   | 5                                         | Cuaca lingkungan dingin                             | 2                                 | Instruksi penggunaan exhaustfan                                                                                                                      | 2                                    | 1     |

Melalui brainstorming dengan tim lintas fungsi yang terdiri dari operator, teknisi, dan staf quality control, faktor-faktor penyebab seperti skill operator, kondisi pola/ *pattern* cetakan, kualitas pasir cetak, serta kelembaban lingkungan diidentifikasi dan dipetakan. *Fishbone diagram* memberikan gambaran visual yang jelas mengenai hubungan antara penyebab dan dampak kecacatan, sehingga memudahkan penentuan area yang perlu mendapat perhatian perbaikan.

Selanjutnya, hasil analisis *Fishbone* digunakan sebagai masukan dalam penerapan *FMEA* (Tabel 1). Melalui *FMEA*, setiap potensi mode kegagalan diidentifikasi, dinilai tingkat keparahan (S), peluang kejadian (O), dan kemampuan deteksi (D). Nilai-nilai ini kemudian dikalkulasi menjadi *Risk Priority Number (RPN)*. *RPN* merupakan nilai prioritas tindakan perbaikan yang harus dilakukan. Perhitungan  $RPN = S \times O \times D$ . Fokus utama intervensi adalah mode kegagalan dengan *RPN* tertinggi [3][7].

Hasil analisis *FMEA* pada cacat cetakan poros kam menunjukkan bahwa terdapat beberapa mode kegagalan utama yang berkontribusi terhadap tingginya tingkat cacat setakan poros kam. Dari perhitungan *Risk Priority Number (RPN)*, terdapat empat kegagalan dengan skor tertinggi sebesar 576 yaitu operator tidak faham instruksi, pola atau *pattern* cetakan berkarat atau kotor dan mode kegagalan instruksi tidak jelas.

| No. | Instruksi                                                                                                                                                   | Gambar                                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Letakan Pola/ <i>Patern</i> pada tray pembersih kemudian semprot pola <i>pattern</i> dengan cairan pembersih menggunakan spray gun                          |   |
| 2   | Setelah dibersihkan menggunakan cairan pembersih, semprot pola/ <i>pattern</i> menggunakan penyemprot udara untuk mengeringkan pola/ <i>pattern</i> cetakan |  |
| 3   | Sapu pola/ <i>pattern</i> menggunakan kuas untuk menghilangkan debu atau partikel kotoran yang masih menempel pada pola/ <i>pattern</i>                     |  |

Gambar 7 Instruksi Pembersihan Pola/ Pattern Cetakan Poros Kam

Mode kegagalan pertama operator tidak faham instruksi mengakibatkan pembuatan cetakan tidak baik dan rusak kedua kegagalan ini muncul akibat pelatihan yang dilakukan kurang memadai. Mode kegagalan ke dua dan ketiga *pattern* atau pola cetakan berkarat atau kotor mengakibatkan cetakan gompal saat mengeluarkan pola dari cetakan hal ini pembersihan pola/ *patern* cetakan kurang diperhatikan karena tidak terdapat pada instruksi kerja. Mode kegagalan yang keempat cetakan rusak diakibatkan instruksi yang tidak jelas yang tidak menyediakan cara-cara pembersihan pola/ *pattern* catakan

Berdasarkan hasil *FMEA*, prioritas utama tindakan perbaikan diarahkan pada perbaikan instruksi kerja dengan menyertakan cara-cara pembersihan pola/ *pattern* cetakan dan memberikan pelatihan berdasarkan instruksi kerja yang telah diperbaiki tersebut. Adapun cara cara pembersihan pola/ *pattern* cerakan seperti terlihat pada Gambar 7.

## 2. Analisis Kuantitatif dengan 2-Sample T test

Sebelum tindakan perbaikan diimplementasikan secara permanen berdasarkan hasil analisis *FMEA*, evaluasi kuantitatif dilakukan untuk menguji efektivitas perbaikan dengan menggunakan uji 2-sample T test [6]. Uji ini membandingkan rata-rata tingkat kecacatan camshaft sebelum dan sesudah perbaikan dengan asumsi bahwa kedua sampel bersifat independen. Sebelum uji dilakukan, data diuji asumsi normalitas menggunakan metode Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk) untuk memastikan validitas penggunaan uji parametrik [7].

Setelah mendapatkan faktor (X's) dari hasil akhir penyaringan melalui analisa *FMEA*, maka faktor-daktor yang paling berpotensi tersebut di analisa dengan menggunakan uji hipotesis dengan menggunakan pengujian hipotesis perbedaan 2 mean bertujuan untuk meyakinkan adanya perbedaan yang signifikan antara dua nilai rerata. Langkah uji hipotesis pada 2 Sample T [8];

### a. Menentukan Hipotesis Ho dan Ha

$$H_o : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \text{ (Pengujian 2 sisi)} \quad (1)$$

$$H_o : \mu_1 - \mu_2 > 0$$

$$H_a : \mu_1 - \mu_2 < 0 \text{ (Pengujian satu sisi kanan)} \quad (2)$$

$$H_o : \mu_1 - \mu_2 < 0$$

$$H_a : \mu_1 - \mu_2 > 0 \text{ (Pengujian satu sisi kiri)} \quad (3)$$

### b. Menentukan Tingkat Signifikan

Nilai tingkat signifikan ditunjukkan oleh nilai *coeficient confidence* dan tingkat kesalahan ( $\alpha$ ), dengan taraf signifikan 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Menentukan tingkat signifikan didasarkan pada nilai *p-value* < 0,05

### c. Persyaratan untuk pengujian

*Jika  $n_1 + n_2 - 2 > 30$ , menggunakan tabel Z*

*Jika  $n_1 + n_2 - 2 < 30$ , menggunakan tabel T*

Untuk mempermudah dalam proses pengujian hipotesis 2 mean dapat menggunakan bantuan program minitab dengan ketentuan sebagai berikut ;

$$\text{Hipotesis : } H_o : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\text{Terima } H_o \text{ jika } P_{value} > \alpha(0.05)$$

$$\text{Tolak } H_o \text{ jika } P_{value} < \alpha(0.05) \text{ atau jika menggunakan T - value, maka;}$$

Ho diterima jika;

$$-t\left(\frac{\alpha}{2}; df(n_1 + n_2 - 2)\right) \leq T_{value} \leq +t\left(\frac{\alpha}{2}; df(n_1 + n_2 - 2)\right) \quad (4)$$

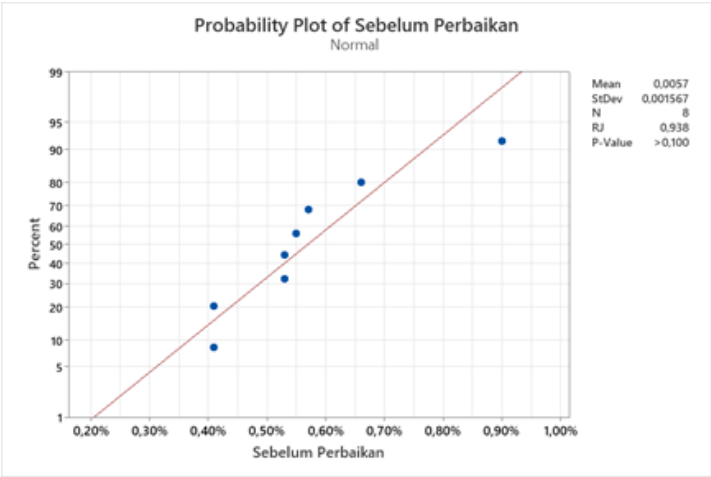
Ho di tolak jika,

$$T_{value} < -t\left(\frac{\alpha}{2}; df(n_1 + n_2 - 2)\right) \text{ atau } T_{value} > +t\left(\frac{\alpha}{2}; df(n_1 + n_2 - 2)\right) \quad (5)$$

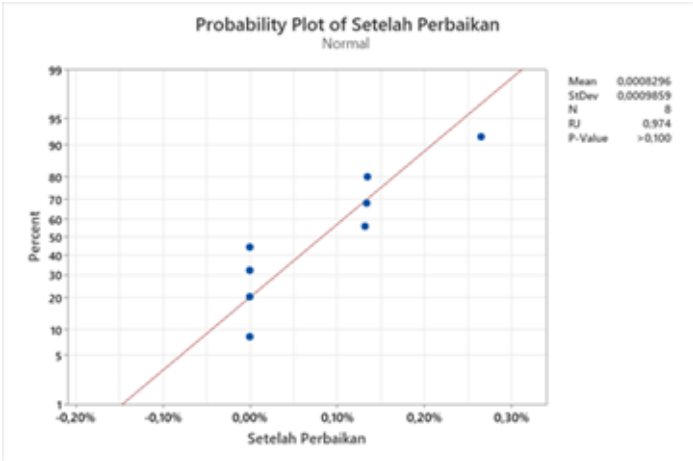
Untuk pengujian hasil analisis *FMEA* yang merekomendasikan empat mode kegagalan yang harus diperbaiki. Dari empat mode kegagalan tersebut terdapat dua rekomendasi tindakan yaitu perbaikan instruksi yang melibatkan pembersihan pola/ pattern cetakan sebelum digunakan dan pelatihan operator yang melakukan proses pembuatan cetakan.

Tabel 2 Data Simulasi Pengujian 2 Sample t

| WK        | Sebelum Perbaikan | Setelah Perbaikan |
|-----------|-------------------|-------------------|
| WK-1      | 0.41%             | 0.13%             |
| WK-2      | 0.57%             | 0.00%             |
| WK-3      | 0.41%             | 0.13%             |
| WK-4      | 0.66%             | 0.13%             |
| WK-5      | 0.55%             | 0.00%             |
| WK-6      | 0.53%             | 0.26%             |
| WK-7      | 0.90%             | 0.00%             |
| WK-8      | 0.53%             | 0.00%             |
| Rata-Rata | 0.57%             | 0.08%             |



Gambar 8 Hasil Pengujian Normalitas Data Sebelum Perbaikan



Gambar 9 Hasil Pengujian Normalitas Data Setelah Perbaikan

Sebelum dilakukan pengujian menggunakan uji 2 Sample T test, terlebih dahulu data yang diperoleh sebelum dan setelah perbaikan diuji kenormalannya menggunakan pengujian kenormalan Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk). Hasil pengujian kenormalan data nilai  $P_{value} > 0,05$ . Nilai  $P_{value}$  tersebut mengindikasikan data terdistribusi normal (Gambar 8 dan 9). Data yang diuji sebelum dan sesudah perbaikan masing-masing sebanyak 8 data (Tabel 2).

Hasil pengujian *Two-Sample T-test* Sebelum Perbaikan; Setelah Perbaikan menggunakan Minitab [9].



Gambar 10 Boxplot Hasil Pengujian 2 Sample T

#### Metode

$\mu_1$ : rerata populasi Sebelum Perbaikan

$\mu_2$ : rerata populasi Setelah Perbaikan

Perbedaan :  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances* diasumsikan dalam penelitian ini.

#### Descriptive Statistics

| Sample            | N | Mean     | StDev    | SE Mean |
|-------------------|---|----------|----------|---------|
| Sebelum Perbaikan | 8 | 0,00570  | 0,00157  | 0,00055 |
| Setelah Perbaikan | 8 | 0,000830 | 0,000986 | 0,00035 |

#### Estimation for Difference

| Difference | Pooled StDev | 95% CI for Difference |
|------------|--------------|-----------------------|
| 0,004870   | 0,001309     | (0,003467; 0,006274)  |

#### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

| T-Value | DF | P-Value |
|---------|----|---------|
| 7,44    | 14 | 0,000   |

Pengujian 2 Sample T, menghasilkan nilai  $P_{value} = 0,000 < \alpha (0,05)$  dan T-value sebesar 7,44. Untuk nilai toleransi kesalahan sebesar  $\alpha / 2 (0,025)$  dan derajat kebebasan 14, maka nilai t tabel adalah sebesar 2.14479 artinya nilai rata-rata antara terdapat perbedaan yang sangat berarti. Nilai rata-rata rasio cacat gompal dari sample data selama 8 minggu terakhir sebelum perbaikan sebesar 5,7% dan setelah perbaikan 0,08% (Gambar 10).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini melakukan pendekatan analisis *FMEA* yang bersifat analisis kualitatif. Hal ini dapat menimbulkan hasil penelitian kurang akurat. Untuk memperbaiki itu metode *FMEA* diintegrasikan dengan model uji statistik 2 sample t test untuk meningkatkan akurasi hasil penelitian. Pendekatan ini sejalan dengan tren penelitian terkini di bidang teknik industri dan manajemen kualitas, dimana metodologi penelitian tidak lagi terbatas pada satu jenis analisis melainkan menggunakan metode kombinasi untuk memberikan hasil yang lebih komprehensif [7].

Hasil analisis kualitatif melalui *Fishbone diagram* menunjukkan bahwa kecacatan pada

cetakan *camshaft* terutama dipengaruhi oleh faktor method (cara pembersihan pola/ *pattern*). Faktor manusia (keterampilan operator) dan pelatihan berkontribusi timbulnya kecacatan cetakan poros kam. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa keterampilan operator dan metode yang digunakan menjadi penyebab utama kecacatan gompal pada cetakan poros kam. Penemuan ini konsisten dengan temuan sebelumnya. Melalui analisis *FMEA*, diidentifikasi beberapa *failure mode* utama dengan nilai *RPN* tertinggi. Mode kegagalan utama yang berkontribusi terhadap tingginya tingkat cacat cetakan poros kam. Dari perhitungan *Risk Priority Number (RPN)*, terdapat empat kegagalan dengan skor tertinggi sebesar 576 yaitu operator tidak faham instruksi, pola atau *pattern* cetakan berkarat atau kotor dan mode kegagalan Instruksi tidak jelas. Berdasarkan perhitungan *RPN*, tindakan perbaikan difokuskan pada perbaikan instruksi kerja dengan menambahkan prosedur pembersihan pola/ *pattern* cetakan dan pelatihan bagi operator untuk mengimplementasikan perbaikan prosedur tersebut. Strategi ini sejalan dengan temuan Kumar et.al. [3] yang menyatakan bahwa penerapan *FMEA* dalam proses *sub-assembly camshaft* mampu memprioritaskan perbaikan pada faktor risiko tertinggi, sehingga defect rate dapat ditekan secara signifikan.

Setelah perbaikan diterapkan, dilakukan evaluasi kuantitatif menggunakan uji *2-sample T test* terhadap data rasio cacat gompal sebelum dan sesudah perbaikan. Pengujian ini dilakukan karena data yang digunakan mempunyai masa yang berbeda [6]. Hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa rata-rata rasio cacat gompal turun dari 0,57% pada periode baseline menjadi 0,08% setelah perbaikan. *2-sample T test* menghasilkan *p-value* < 0,05, menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi metode *FMEA* dan uji statistik *2-Sample T-test* efektif dalam menganalisis serta menurunkan tingkat kecacatan gompal dalam proses cetakan poros kam. Melalui analisis *Fishbone* dan *FMEA*, teridentifikasi empat mode kegagalan utama dengan nilai *Risk Priority Number (RPN)* tertinggi, yaitu operator tidak memahami instruksi, pola cetakan berkarat, pola cetakan kotor, serta instruksi kerja yang tidak jelas. Faktor-faktor tersebut terbukti berkontribusi signifikan terhadap tingginya tingkat kecacatan cetakan, khususnya cacat gompal. Rekomendasi perbaikan diarahkan pada penyusunan instruksi kerja yang lebih jelas, prosedur pembersihan pola cetakan, serta peningkatan program pelatihan operator.

Evaluasi kuantitatif menggunakan uji *2-Sample T-test* memperlihatkan terdapat perbedaan yang signifikan antara tingkat kecacatan sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan. Total rasio cacat untuk cacat gompal menurun dari 0,57% pada periode baseline menjadi 0,08% setelah intervensi, dengan *p-value* < 0,05 yang menegaskan efektivitas tindakan perbaikan. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan terintegrasi antara analisis risiko kualitatif dan verifikasi statistik kuantitatif mampu memberikan hasil yang lebih komprehensif. Perbaikan pada penelitian ini hanya berfokus pada cacat dominan yaitu cacat gompal, sedang dua kecacatan lainnya yaitu cetakan basah dan cetakan tidak padat, belum dilakukan perbaikan sehingga diasumsikan total rasio cacat setelah perbaikan adalah 0,51% terjadi penurunan sebesar 0,49% dari total rasio kecacatan sebelum perbaikan sebesar 1.00%.

#### 5. SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar penerapan *FMEA* dilengkapi dengan metode pendukung berbasis data seperti pengendalian *pengendalian proses statistik* atau *rancangan percobaan* guna memvalidasi faktor-faktor penyebab secara lebih mendalam. Selain itu, perusahaan sebaiknya mengintegrasikan prosedur pembersihan pola cetakan dan pelatihan operator

ke dalam *Standard Operating Procedure (SOP)* resmi agar konsistensi perbaikan dapat terjaga. Implementasi sistem monitoring digital berbasis sensor atau *IoT* juga dapat dipertimbangkan untuk memantau parameter lingkungan dan proses secara real-time, sehingga potensi kegagalan dapat dideteksi lebih cepat. Dengan langkah-langkah ini, efektivitas pengendalian kualitas akan semakin meningkat dan hasil perbaikan lebih berkelanjutan. Hasil perbaikan pada penelitian ini baru mencapai rasio kecacatan 0,51% masih lebih tinggi dari target sebesar 0,50%. Oleh karena itu perlu dilakukan tindakan perbaikan untuk kedua cacat yang lainnya yaitu cetakan basah dan cetakan tidak padat agar target rasio kecacatan dapat terpenuhi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. C. García, A. C. Ramírez, G. R. Castellanos, J. T. Ramírez, and A. M. Hernández, "Microstructural and mechanical assessment of camshafts produced by ductile cast iron low alloyed with vanadium," *Metals (Basel)*., vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2021, doi: 10.3390/met11010146.
- [2] J. Sertucha and J. Lacaze, "Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons—An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons," *Metals (Basel)*., vol. 12, no. 3, pp. 1–80, 2022, doi: 10.3390/met12030504.
- [3] A. Kumar, K. K. Sahu, and R. K. Malviya, "Risk Prioritization Using PFMEA Approach: A Case Study of Camshaft Sub Assembly," *Ind. Eng. J.*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: 10.26488/iej.11.8.1135.
- [4] S. V. P. Sheikh Damanab, S.S. Alizadeh, Y. Rasoulzadeh, P. Moshashaie, "Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Technique: A Literature Review," *Sci. J. Rev.*, vol. 6, no. January, pp. 1–6, 2015, doi: 10.14196/sjr.v4i1.1805.
- [5] M. M. Al-Kassab and A. H. Majeed, "The Use of Two-Sample t-Test in The Real Data," *Adv. Appl. Stat.*, vol. 81, no. July, pp. 13–22, 2022, doi: 10.17654/0972361722071.
- [6] M. Xu, D. Fralick, J. Z. Zheng, B. Wang, X. M. Tu, and C. Feng, "The differences and similarities between two-sample t-test and paired t-test," *Shanghai Arch. Psychiatry*, vol. 29, no. 3, pp. 184–188, 2017, doi: 10.11919/j.issn.1002-0829.217070.
- [7] A. Ghasemi and S. Zahediasl, "Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians," *Int. J. Endocrinol. Metab.*, vol. 10, no. 2, pp. 486–489, 2012, doi: 10.5812/ijem.3505.
- [8] A. Rinaldi, Novalia, and M. Syazali, "Statistika Inferensial," in *IPB Press*, 2020.
- [9] Minitab, "2-sample t-test method Classical 2-sample t versus Welch's t-test," *Minitab Inc.*, 2010.