

Evaluasi Strategi Pengendalian Kualitas Permesinan *Brake Drum* dengan Metoda *Attribute Agreement Analysis* dan *Measurement System Analysis*

Edo Suryo Pratomo^{1*}, Muhammad Ibrahim^{1,2}, Invanos Tertiana¹

¹Jurusan Teknik Industri, Universitas Bakrie, Jakarta Selatan

²Bakrie Autoparts, Bekasi – Jawa Barat

*Koresponden email: edo.suryoprato@bakrie.ac.id

Diterima: 30 Oktober 2025

Disetujui: 05 November 2025

Abstract

In the component manufacturing process in the automotive industry, product quality control strategies affect product defect detection and traceability, production costs, and customer delivery times. To support the achievement of quality assurance in production conditions and production delivery schedules, determining the inspection method of the Pitch Circle Diameter (PCD) on brake drum components becomes important if the operational process capability of the machine is low at $C_p = 0.89$ and $C_{pk} = 0.83$, along with the degradation and age of the machine. The strategy for selecting the use of a Coordinate Measuring Machine (CMM) or a limit gauge for a 100% inspection tool based on the OK/NG classification is evaluated from the aspects of effectiveness, accuracy, and time efficiency. From the evaluation method of the Measurement System Analysis attribute type, specifically Attribute Agreement Analysis, a total of 30 samples were tested by three operators with three replications. The evaluation results showed the effectiveness of the limit gauge of 95.18%, a miss rate of 0%, and a false alarm rate of 7.69%. The Fleiss' Kappa value of the use of the limit gauge was 0.90, indicating good and consistent measurement suitability between operators. Limit gauges showed a measurement time that was 97.7% faster than a CMM (Coordinate Measuring Machine) (17 seconds vs. 740 seconds). The study showed that the strategy of making and using limit gauges as the primary inspection was effective for the need to check 100% of components, under production conditions, with a CMM as a periodic sampling inspection.

Keywords: *limit gauge, pcd checker, quality inspection strategy, attribute agreement analysis*

Abstrak

Dalam proses manufaktur komponen di industri manufaktur otomotif, strategi pengendalian kualitas produk akan mempengaruhi kualitas, biaya produksi, dan waktu terkirimnya produk ke pelanggan. Untuk mendukung tercapainya *quality assurance* pada kondisi produksi dan jadwal pengiriman produksi, penentuan metoda inspeksi dari *Pitch Circle Diameter* (PCD) pada komponen *brake drum* menjadi penting jika kapabilitas proses operasional permesinan rendah di $C_p = 0,89$ dan $C_{pk} = 0,83$, seiring degradasi dan umur mesin. Strategi pemilihan penggunaan *Coordinate Measuring Machine* (CMM) atau *limit gauge* untuk alat inspeksi 100% berbasis klasifikasi OK/NG dievaluasi dari aspek efektivitas, akurasi, dan efisiensi waktu. Dari metode evaluasi *Measurement System Analysis* tipe atribut, khususnya *Attribute Agreement Analysis*, sebanyak 30 sampel diuji oleh tiga operator dengan tiga replikasi. Hasil evaluasi menunjukkan efektivitas *limit gauge* sebesar 95,18%, *miss rate* 0%, dan *false alarm rate* 7,69%. Nilai Fleiss' Kappa penggunaan *limit gauge* sebesar 0,90, mengindikasikan kesesuaian pengukuran yang baik dan konsisten antar operator. *Limit gauge* menunjukkan waktu pengukuran yang 97.7% lebih cepat dibanding dengan CMM (*coordinate measuring machine*) (17 detik vs 740 detik/CMM). Studi menunjukkan bahwa strategi pembuatan dan penggunaan *limit gauge* sebagai inspeksi utama efektif untuk kebutuhan pengecekan 100% komponen, pada kondisi produksi dengan CMM sebagai inspeksi sampling berkala.

Kata kunci: *limit gauge, pcd checker, quality inspection strategy, attribute agreement analysis*

1. Pendahuluan

Strategi peningkatan kualitas produk sebagai bagian dari *Quality Assurance (QA)* umumnya bertujuan untuk mengurangi variabilitas dan mencapai produk yang *zero-defect*. Jika suatu produk (*output*) gagal memenuhi standar, maka proses perlu dievaluasi untuk meningkatkan kapabilitas proses nya [1,2]. Adapun, strategi inspeksi perlu mempertimbangkan degradasi sistem produksi [3,4], salah satunya

penurunan performa peralatan permesinan seiring umur operasional penggunaan, demi menekan biaya produksi agar keputusan manajemen pengendalian kualitas bersifat ekonomis [4]. Salah satu solusinya adalah pembangunan sistem inspeksi yang adaptif dalam perancangan kontrol inspeksi antara inspeksi keseluruhan produk di akhir produksi (100%) atau *sampling* statis parsial di lini awal dan tengah produksi [4].

Dalam manajemen pengendalian kualitas produk, strategi penentuan metoda inspeksi kualitas akan menentukan kecepatan (produktivitas) dan ketepatan pengecekan agar sesuai standar spesifikasi produk dan ekspektasi pelanggan [5]. Apabila kualitas produk dan kehandalan pengiriman dapat dipenuhi tepat waktu, akan menjadi indikator keberhasilan di industri manufaktur [6]. Adapun, penentuan metoda dan rancangan inspeksi kualitas produk bergantung pada atribut fitur produk yang diinspeksi, seperti geometri (dimensi), kualitas permukaan, dan fungsi dari produk. Seiring meningkatnya kompleksitas dan fitur dari produk, identifikasi fitur geometri kritis yang perlu diinspeksi serta peralatan ukur yang tepat menjadi penting untuk memastikan proses inspeksi efektif dan efisien.

Statistical quality control (SPC), sebagai instrumen pengendalian kualitas produk, merupakan metode teknis yang efektif dalam mengevaluasi proses produksi, mengestimasi parameter proses, dan menentukan kapabilitas proses [7]. Hal ini memungkinkan adanya tindakan *preventif* maupun korektif ketika ditemukan ketidaksesuaian sehingga dapat mengurangi variabilitas untuk mencapai kualitas produk dan mencapai ekspektasi kebutuhan pelanggan. Sehingga, strategi pengendalian kualitas berbasis diagram kontrol, SPC, sangat penting bagi tim manajerial dan produksi dalam memutuskan tindakan yang efisien dan efektif dalam manajemen *quality assurance (QA)*.

Coordinate measuring machine (CMM), sebagai salah satu instrumen inspeksi kualitas produk, biasa digunakan untuk mengukur geometri yang kompleks karena kemampuannya mengukur dengan presisi berbagai bentuk benda kerja [8] dan lebih cepat dari pengukuran manual tradisional seperti *vernier caliper* [9]. Sehingga alat ukur berbasis titik (*probe*) ini, banyak digunakan dalam *Statistical quality control (SPC)* sebuah produk. Namun, dalam kondisi berkurangnya kualitas peralatan di lini produksi, dan volume produksi besar, strategi inspeksi pengecekan 100% menjadi tidak handal apabila pengukuran dilakukan penuh dengan CMM, meskipun. Hal ini disebabkan potensi terjadinya penumpukan produk yang menunggu pengukuran, adanya waktu pemindahan benda kerja ke ruang inspeksi CMM, sehingga menimbulkan *bottleneck* dan keterlambatan pengiriman, meskipun telah menggunakan mode pengukuran otomatis. Kalaupun dilakukan pengukuran dengan metoda *sampling* acak, peluang bahwa barang *defect* lolos inspeksi tetap ada, terutama apabila kapabilitas proses menunjukkan variabilitas tinggi [10]. Permasalahan kompleksitas geometri produk serta durasi pengukuran lama ini dalam mengecek 100% produk dapat diselesaikan dengan alternatif pembuatan dan perancangan *gauge* konvensional yang tepat (*limit gauge/form gauge*) sebagai metoda inspeksi alternatif, dengan melakukan penilaian kompleksitas geometri produksi tersebut secara *in-line inspection*.

Studi ini mengevaluasi ditemukannya variabilitas *capability process* yang tinggi di *line* permesinan mesin CNC *milling (drilling dan tapping)* pada *line* produksi *brake drum* truk di industri otomotif. Pengukuran dilakukan terhadap diameter internal lubang dan *pitch circle diameter (PCD)* melalui komparasi penggunaan *in-house* alat inspeksi *limit gauge (PCD checker)* dibandingkan dengan CMM (*Coordinate Measuring Machine*). Pengecekan kualitas komponen dilakukan dengan bantuan *tool statistical quality control (SPC)* yang dilakukan secara *sampling* untuk mengavaluasi *capability process* dari proses manufaktur tersebut.

2. Strategi Inspeksi

2.1. Metoda inspeksi dan evaluasinya

Dari berbagai dimensi pengecekan kualitas produksi *brake drum* seperti ditampilkan **Gambar 1**, khususnya untuk PCD (*pitch circle diameter*) *inspection* (poin 3, 4, 9, 10, 13, dan 14), dilakukan setelah proses permesinan (OP2, *drilling* dan *tapping*) pada mesin CNC *vertical milling*. PCD *inspection* pada studi ini dievaluasi dengan komparasi penggunaan peralatan inspeksi CMM dan *limit gauge (PCD Checker)*. Data dari inspeksi CMM dievaluasi dengan *Statistical Process Control (SPC)* dan data *limit gauge* menggunakan instrumen statistik *Measurement System Analysis (MSA)* [11] untuk evaluasi *capability process* mesin CNC *milling*. Data penilaian pengukuran *limit gauge* (OK atau NG) dianalisa via *attribute agreement analysis*, menggunakan perangkat lunak Minitab. Selain ini, dilakukan pengukuran waktu proses via *stopwatch*.

Sumber: Hasil perencanaan (2025)

16388

Attribute Agreement Analysis pada studi ini dibagi menjadi lima aspek utama, sesuai disampaikan oleh Automotive Industry Action Group (AIAG) [11]:

1. *Within Appraiser* (Konsistensi Internal Penilai)

Aspek ini mengevaluasi *repeatability* atau konsistensi penilaian yang dilakukan oleh *appraiser* yang sama pada produk yang sama dalam beberapa kali pengulangan. Nilai ini menunjukkan seberapa stabil keputusan penilai dalam pengukuran berulang terhadap item yang sama. Berikut rumus perhitungannya di *Equation 1*:

$$\text{Within Appraiser} = \frac{n_{\text{repeat agree}}}{n_{\text{repeat total}}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana :

- $n_{\text{repeat agree}}$: jumlah keputusan yang konsisten oleh penilai
- $n_{\text{repeat total}}$: Total item yang diinspeksi

2. *Between Appraiser*

Aspek ini menilai *reproducibility*, yaitu konsistensi antar *appraiser* dalam memberikan klasifikasi terhadap item yang sama. Nilai ini menunjukkan stabilitas sistem pengukuran lintas personel. Rumus perhitungannya di *Equation 2*:

$$\text{Between Appraiser} = \frac{n_{\text{inter-operator agree}}}{n_{\text{item}}} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana :

- $n_{\text{inter-operator agree}}$: jumlah keputusan yang konsisten oleh penilai
- n_{item} : total item yang dinilai oleh semua penilai

3. *Each Appraiser vs Standard* (Kesesuaian dengan Referensi)

Aspek ini mengukur kesesuaian antara masing-masing *appraiser* terhadap referensi atau nilai standar. Nilai ini menggambarkan akurasi masing-masing *appraiser*. Berikut rumus perhitungannya di *Equation 3*:

$$\text{Agreement with standard (per Appraiser)} = \frac{n_{\text{match}}}{n_{\text{compare}}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana :

- n_{match} : jumlah hasil penilaian yang sesuai dengan referensi
- n_{compared} : total item yang dibandingkan dengan referensi

4. *All Appraiser vs Standard*

Aspek ini menunjukkan persentase seluruh klasifikasi oleh semua *appraiser* terhadap semua produk yang sesuai dengan standar referensi. Berikut rumus perhitungannya di *Equation 4*:

$$\text{All Appraiser vs Standard} = \frac{n_{\text{total agree}}}{n_{\text{total observation}}} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana :

- $n_{\text{total agree}}$: Total klasifikasi yang konsisten untuk item yang sama.
- $n_{\text{total observation}}$: seluruh jumlah inspeksi (produk \times penilaian \times pengulangan)

5. Statistik Kappa

Untuk mengevaluasi kesepakatan antar operator dengan lebih objektif, *Attribute Agreement Analysis* juga menggunakan statistik Kappa, yang berfungsi mengukur kesepakatan aktual antar penilai dibandingkan dengan kesepakatan yang mungkin terjadi secara kebetulan. Dalam praktiknya, dua jenis statistik Kappa[13] digunakan:

- Cohen's Kappa [13]

Digunakan jika hanya ada dua penilai atau metode. Berikut rumus perhitungannya di *Equation 5*:

$$k = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana :

P_0 : Proporsi kesepakatan aktual

P_e : proporsi kesepakatan yang diharapkan karena kebetulan

- Fleiss' Kappa [13]

Fleiss' Kappa digunakan untuk jumlah *appraiser* lebih dari dua. Statistik ini mengukur tingkat kesepakatan antar-penilai terhadap klasifikasi kategori, dengan mempertimbangkan kemungkinan kesepakatan terjadi secara acak. Persamaan yang diperhitungkan dalam Fleis Kappa tertulis dalam *Equation* (6), (7), (8), dan (9), seperti dijelaskan dibawah:

Persamaan proporsi kesepakatan untuk masing-masing *item* P_i di *Equation* 6 [13]:

$$P_i = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^k n_{ij}(n_{ij} - 1) \quad (6)$$

Dimana :

P_i : proporsi kesepakatan untuk item ke-i

n : jumlah penilai

k : jumlah kategori (misalnya OK dan NG $\rightarrow k = 2$)

n_{ij} : jumlah penilai yang memilih kategori ke-j untuk item ke-i

Persamaan rata-rata proporsi kesepakatan seluruh *item* di *Equation* 7 [13]:

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (7)$$

Dimana :

\bar{P} : rata-rata proporsi kesepakatan aktual

N : total item

Persamaan peluang kesepakatan karena *kebetulan* di *Equation* 8 [13].

$$p_j = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N n_{ij}$$

$$\bar{P}_e = \sum_{j=1}^k p_j^2 \quad (8)$$

Dimana :

p_j : proporsi total klasifikasi untuk kategori ke-j

P_e : proporsi kesepakatan yang diharapkan secara acak

Persamaan nilai Fleiss' Kappa di *Equation* 9 [13].

$$k = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \times 100\% \quad (9)$$

Dimana :

P_0 : Proporsi kesepakatan aktual

P_e : proporsi kesepakatan yang diharapkan karena kebetulan

Berikut klasifikasi nilai statistik kappa [13] seperti ditampilkan pada **Tabel 2**:

Tabel 2. Klasifikasi Statistik Kappa

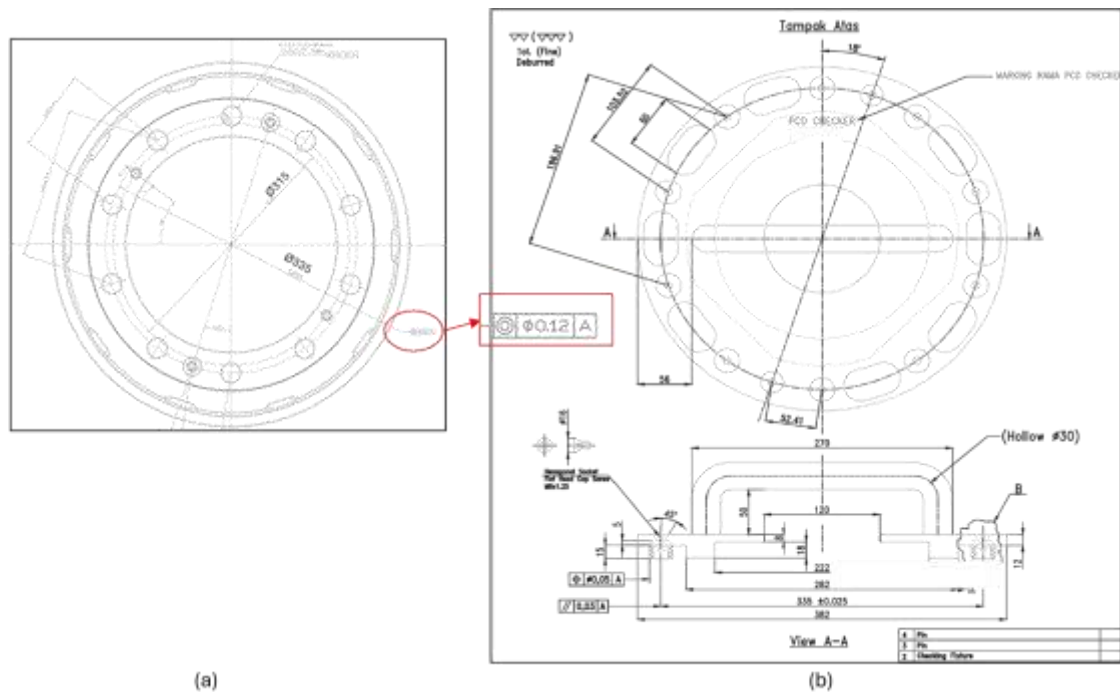
Kappa	Agreement
< 0,00	Buruk
0,00 – 0,20	Kurang
0,21 – 0,40	Cukup
0,41 – 0,60	Sedang
0,61 – 0,80	Bagus
0,81 – 1,00	Mendekati Sempurna

Sumber: Klasifikasi nilai Statistic Kappa [13]

2.2. Peralatan Yang Digunakan

2.2.1 Limit Gauge (PCD Checker)

Limit Gauge berbasis *Go-NoGo* dirancang secara khusus untuk inspeksi PCD (*pitch circle diameter*) pada *brake drum* seperti ditunjukkan pada **Gambar 2 b**). Dasar perancangan alat ini mengacu pada gambar teknik *brake drum* dengan nilai PCD Ø335 mm sebagai acuan utama. Standar dimensi PCD ini sudah merujuk pada standar teknis internasional ISO atau JIS. Sementara itu, batas toleransi ditetapkan oleh sebesar +0,120 mm, yang menjadi landasan, mengikuti *Taylor's principle* [14], dalam menentukan batas *Go/No-Go*. Konsep *Go/No-Go* ini dibuat dengan prinsip bahwa sisi *Go* memastikan produk dengan $PCD \leq 335,120$ mm dapat lolos, sedangkan sisi *No-Go* menolak produk yang melebihi batas toleransi tersebut. PCD *Checker* digunakan oleh 3 operator (A,B,C) dengan masing-masing melakukan 3 replikasi. Hasil berupa OK atau NG, tanpa nilai numerik.

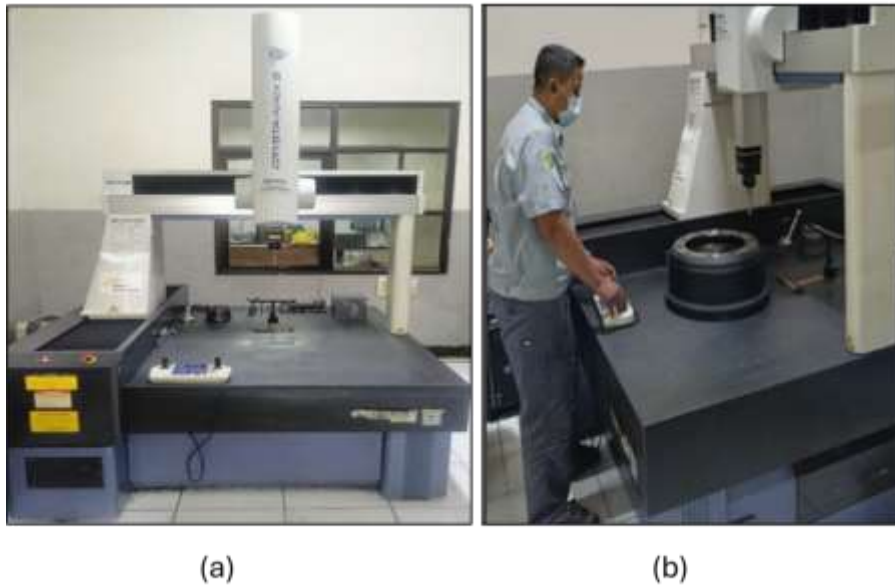


Gambar 2. (a) *Brake Drum* (b) *Limit Gauge* PCD (*Pitch Circle Diameter*) checker

Sumber: Hasil perencanaan (2025)

2.2.2 CMM (*Coordinate Measuring Machine*)

Coordinate Measuring Machine (CMM) yang digunakan adalah Mitutoyo Crysta Apex S seperti pada **Gambar 3**. Alat ukur presisi ini digunakan untuk mengukur dimensi PCD dengan *error* maksimum di 0.9-1.7 μm untuk pengukuran dimensi 1000 mm. Diameter PCD *brake drum* didapat dari pengukuran dengan *stylus probe* di 8 titik di diameter besar dan 4 titik di diameter kecil (refer ke Gambar 2a). Dari tiap titik akan keluar data koordinat (x, y, dan z) kemudian dimensi dikalkulasi dengan perhitungan *best fit circle*. Hasil dari pengukuran CMM berupa nilai numerik dalam satuan mm, kemudian dikategorikan sebagai OK atau NG berdasarkan spesifikasi.

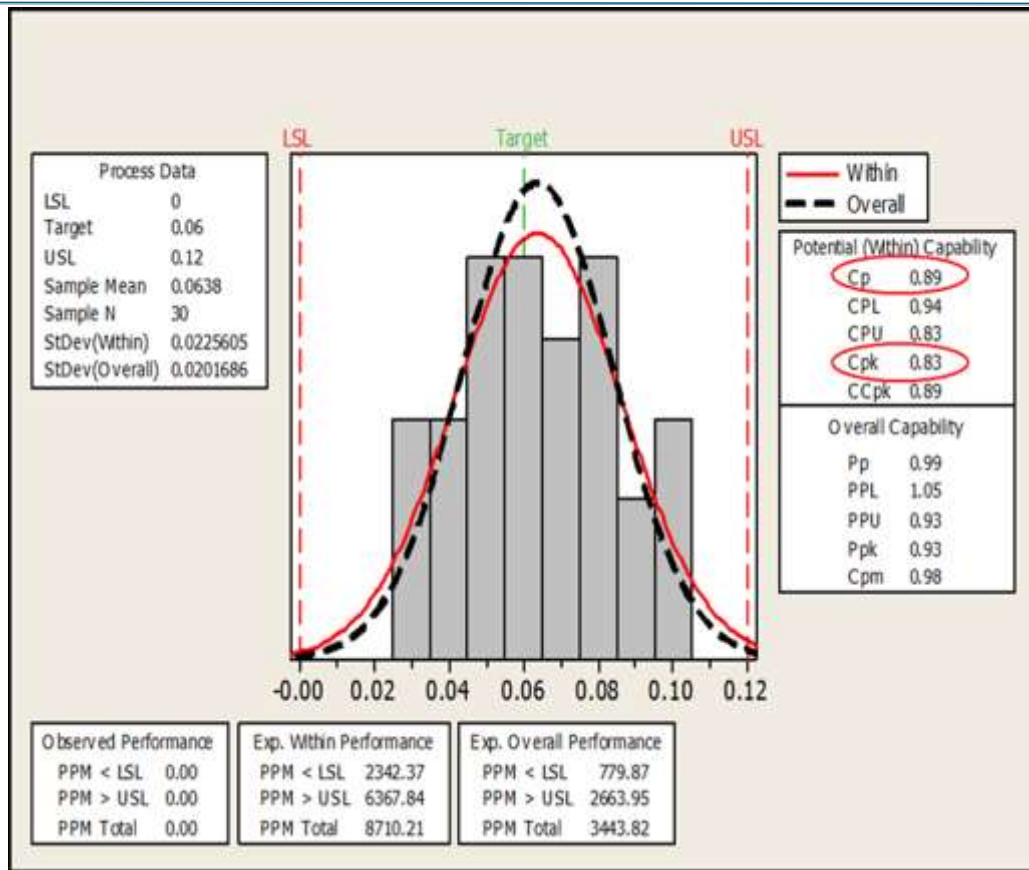


Gambar 3. (a) CMM (b) Pengukuran PCD dari brake drum dengan CMM
Sumber : Penulis (2025)

3. Hasil *Quality Inspection* dan Pembahasan

3.1. Evaluasi kapabilitas proses permesinan *Vertical Milling* dengan CMM

Kapabilitas proses permesinan dievaluasi dengan melakukan uji *Process Capability* (C_p dan C_{pk}) terhadap 30 sampel *brake drum* yang diukur menggunakan *Coordinate Measuring Machine (CMM)*. Hasil perhitungan C_p dan C_{pk} yang ditampilkan pada **Gambar 4** menunjukkan bahwa $C_p = 0.89$ dan $C_{pk} = 0.83$. Seperti disampaikan oleh Montgomery [7], nilai $C_p < 1.33$ mengindikasikan variasi proses masih terlalu besar dibandingkan toleransi yang diizinkan, sedangkan $C_{pk} < 1.33$ menunjukkan bahwa rata-rata proses tidak berada di tengah batas spesifikasi, sehingga terdapat risiko tinggi bahwa produk yang dihasilkan tidak memenuhi standar yang ditetapkan. Dengan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa mesin *Vertical Milling* (VM) belum memiliki kapabilitas yang cukup untuk menghasilkan dimensi PCD yang konsisten [6], sehingga butuh pengendalian kualitas produk atau perbaikan korektif dari mesin tersebut.



Gambar 4. Cp Cpk Machining (Vertical Milling) dengan pengukuran CMM
Sumber:Hasil penelitian (2025)

3.2. Evaluasi pengendalian kualitas *brake drum* dengan *limit gauge (PCD Checker)*

Tabel 33 dibawah merupakan data hasil pengukuran dari produk menggunakan CMM sebagai referensi dan menggunakan *limit gauge (PCD Checker)* oleh operator A,B,C dengan masing-masing replikasi 3 kali per produknya. **Tabel** merupakan data hasil waktu pengukuran dari masing-masing produk dengan menggunakan CMM dan *limit gauge*.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Dimensi PCD dengan CMM dan *limit gauge (PCD Checker)*

NO PRODUK	NILAI PCD (CMM)	KATEGORI CMM (MASTER)	PENGECEKAN DENGAN PCD CHECKER								
			OPERATOR A			OPERATOR B			OPERATOR C		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	335.070	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	335.096	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
3**	335.129	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
4*	335.113	OK	OK	NG	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	335.251	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
6	335.301	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
7	335.098	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8*	335.117	OK	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
9	335.071	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
10	335.176	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
11	335.616	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
12	335.020	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
13	335.096	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
14**	335.130	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
15	335.204	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
16	335.057	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
17*	335.110	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
18	335.166	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
19**	335.125	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
20**	335.124	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
21	335.053	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
22	335.137	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
23	335.303	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
24*	335.115	OK	OK	OK	NG	OK	NG	NG	OK	OK	OK
25	335.053	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
26	335.045	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
27	335.236	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NG
28	335.073	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
29	335.015	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Note : * : Nilai PCD mendekati NG

** : Nilai PCD mendekati OK

Tabel 4. Hasil Waktu Pengukuran Dimensi PCD dengan CMM dan *limit gauge* (PCD Checker (detik))

No Produk	CMM	Limit gauge	No Produk	CMM	Limit gauge	No Produk	CMM	Limit gauge
1	741	12	11	752	18	21	721	18
2	726	14	12	751	13	22	744	18
3	756	16	13	721	19	23	725	18
4	741	18	14	733	14	24	727	15
5	722	19	15	742	12	25	757	15
6	760	16	16	733	15	26	730	14
7	756	18	17	747	18	27	747	19
8	725	19	18	755	17	28	755	17
9	745	16	19	742	18	29	722	19
10	731	14	20	760	16	30	725	20
Rata – Rata Waktu Pengukuran							740	17

Berdasarkan data **Tabel 34**, ditemukan adanya perbedaan hasil *judgement* operator pada beberapa produk, seperti nomor 4, 8, dan 24. Hasil pengukuran menggunakan CMM menunjukkan kategori OK, namun sebagian hasil pengecekan dengan *limit gauge* (PCD checker) oleh operator dinyatakan NG. Hal ini terjadi karena berkaitan dengan perbedaan prinsip pengukuran antara CMM dan *limit gauge* (PCD checker). Dari perspektif *Quality Assurance* (QA), PCD Ø335 mm dengan toleransi +0,120 mm merupakan parameter kritis yang sangat memengaruhi kesesuaian *brake drum* dan *wheel hub* saat proses perakitan. Oleh sebab itu, meskipun CMM digunakan sebagai alat referensi dengan hasil berupa nilai numerik presisi, *limit gauge* (PCD Checker) tetap berfungsi sebagai *guaranteed QA tool* di lini produksi untuk memastikan *brake drum* memenuhi *requirement* spesifikasi dan siap untuk perakitan di langkah berikutnya.

Perbedaan hasil ini terutama terjadi pada produk dengan nilai PCD yang mendekati batas toleransi atas, yaitu sekitar 335.113–335.117 mm. Dalam kondisi tersebut, operator cenderung memberikan keputusan NG meskipun secara numerik CMM menunjukkan produk masih dalam batas toleransi. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, sensitivitas *limit gauge* (PCD Checker) cenderung lebih ketat dibandingkan hasil pengukuran numerik CMM, karena PCD Checker bekerja berdasarkan prinsip *Go / NoGo* pada produk sehingga sedikit deviasi dimensi atau posisi lubang dapat menyebabkan produk dianggap tidak lolos. Kedua, variasi dalam teknik penanganan antar operator, seperti cara memasukkan PCD Checker, tekanan yang diberikan, maupun sudut pengecekan, dapat meningkatkan kemungkinan keputusan NG. Selain itu, persepsi risiko kualitas juga memengaruhi keputusan operator, di mana mereka lebih memilih menyatakan NG jika terdapat keraguan untuk mencegah kemungkinan kegagalan pada saat perakitan di sisi pelanggan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai PCD di kisaran 335.115–335.117 mm menjadi zona transisi, di mana perbedaan keputusan antara CMM dan PCD Checker lebih sering muncul. Apabila nilai PCD kurang dari 335.110 mm, mayoritas hasil pengukuran oleh kedua metode konsisten menunjukkan kategori OK, sementara pada nilai PCD lebih besar dari 335.120 mm hasilnya konsisten NG. Namun, pada nilai sekitar 335.113–335.117 mm, beberapa produk terdeteksi OK oleh CMM, tetapi NG oleh PCD Checker. Hal ini terjadi karena CMM memberikan hasil numerik dengan tingkat presisi hingga 0,001 mm, sedangkan PCD Checker menguji produk secara fungsional berdasarkan *Go/No Go* terhadap produk. Pada nilai yang mendekati batas toleransi, sedikit variasi geometri lubang, seperti ovalitas, pergeseran posisi, atau akumulasi kesalahan pemesinan, dapat menyebabkan PCD Checker tidak masuk dengan sempurna sehingga operator mengategorikan produk sebagai NG. Dengan demikian, nilai sekitar 335.115 mm dapat dikatakan sebagai zona kritis di mana perbedaan keputusan inspeksi paling mungkin terjadi.

Kondisi perbedaan *judgement* ini menegaskan pentingnya penggunaan PCD Checker sebagai alat inspeksi yang berfungsi sebagai *quality gate* untuk menjamin bahwa produk benar-benar dapat dirakit dengan baik di sisi *customer*. Walaupun CMM menunjukkan bahwa produk masih berada dalam batas

toleransi, keputusan inspeksi dengan menggunakan PCD *Checker* memberikan perlindungan tambahan berupa *margin toleransi*, sehingga risiko produk lolos ke pelanggan dapat diminimalkan.

3.4 Analisis Data *Attribute Agreement Analysis*

Analisis data dilakukan menggunakan metode *Attribute Agreement Analysis* dengan bantuan software Minitab.

3.4.1 *Within Appraiser*

Berdasarkan hasil evaluasi *Within Appraisers* pada **Gambar 5**, konsistensi masing-masing operator dalam melakukan inspeksi dengan PCD *Checker* dapat dikategorikan sangat baik. Operator A menunjukkan tingkat kesesuaian antar replikasi sebesar 93,33%, dengan interval kepercayaan 95% berada di rentang 77,93% hingga 99,18%. Operator B bahkan memiliki konsistensi yang lebih tinggi, yaitu 96,67%, dengan interval kepercayaan 82,78% hingga 99,92%. Sementara itu, Operator C mencapai tingkat kesesuaian 100%, yang menunjukkan bahwa tidak terdapat ketidakkonsistenan dalam hasil penilaiannya, dengan interval kepercayaan 90,50% hingga 100%.

Tingginya persentase kesesuaian ini menandakan bahwa masing-masing operator memiliki kemampuan yang baik dalam mengoperasikan PCD *Checker* secara berulang, sehingga reliabilitas intra-operator terjaga. Hal ini juga menunjukkan bahwa instruksi kerja yang telah disusun dapat diikuti dengan baik dan menghasilkan hasil yang stabil antar pengulangan, yang menjadi salah satu indikator penting dalam kelayakan penerapan PCD *Checker* sebagai alat inspeksi utama.

Within Appraisers					
Assessment Agreement					
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
A	30	28	93.33	(77.93,	99.18)
B	30	29	96.67	(82.78,	99.92)
C	30	30	100.00	(90.50,	100.00)
# Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.					

Gambar 5. Output Minitab Within Appraiser

3.4.2 *Each Appraiser vs Standard*

Berdasarkan hasil evaluasi *Each Appraiser vs Standard* pada **Gambar 6**, dapat disimpulkan bahwa seluruh operator menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap hasil referensi atau standar master dari pengukuran CMM. Operator A memiliki tingkat kesesuaian sebesar 90,00% (27 dari 30 inspeksi sesuai dengan standar), dengan interval kepercayaan 95% antara 73,47% hingga 97,89%. Operator B menunjukkan tingkat kesesuaian 93,33% (28 dari 30 inspeksi sesuai), dengan rentang interval kepercayaan 77,93% hingga 99,18%. Operator C mencatat nilai tertinggi, yaitu 96,67% (29 dari 30 inspeksi sesuai), dengan rentang 82,78% hingga 99,92%.

Hasil ini menunjukkan bahwa setiap operator mampu melakukan penilaian yang akurat dan konsisten terhadap standar pengukuran PCD menggunakan PCD *Checker*. Persentase kesesuaian di atas 90% mengindikasikan bahwa sistem inspeksi PCD *Checker* memiliki akurasi tinggi ketika dioperasikan oleh masing-masing personel, yang juga memperkuat validitas alat ukur ini dalam lingkungan inspeksi 100% di industri. Selain itu, interval kepercayaan yang sempit dan tinggi memperlihatkan bahwa hasil ini stabil dan dapat diandalkan, mendukung kelayakan implementasi PCD *Checker* sebagai pengganti inspeksi berbasis CMM dalam aplikasi tertentu.

Each Appraiser vs Standard				
Assessment Agreement				
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
A	30	27	90.00	(73.47, 97.89)
B	30	28	93.33	(77.93, 99.18)
C	30	29	96.67	(82.78, 99.92)
# Matched: Appraiser's assessment across trials agrees with the known standard.				

Gambar 6. Output Minitab Each Appraiser vs Standard

3.4.3 Between Appraiser

Berdasarkan hasil evaluasi *Between Appraisers* pada **Gambar 7**, diperoleh tingkat kesesuaian antar penilai sebesar 93,33%, di mana dari 30 item yang diinspeksi, sebanyak 28 item dinilai sama oleh ketiga operator. Interval kepercayaan (Confidence Interval) 95% berkisar antara 77,93% hingga 99,18%, yang menunjukkan tingkat kepastian yang cukup tinggi atas konsistensi hasil ini.

Nilai ini mengindikasikan bahwa seluruh penilai atau operator memiliki tingkat konsistensi antar individu yang sangat baik dalam menentukan klasifikasi OK atau NG dengan menggunakan *PCD Checker*. Tingkat kesepakatan yang tinggi antar penilai merupakan indikator bahwa prosedur pengecekan telah dilakukan dengan standar kerja yang seragam dan kemungkinan bias individu atau interpretasi personal terhadap hasil ukur kecil. Dengan kata lain, alat ukur *PCD Checker* mampu menghasilkan hasil yang *reproducible*, artinya hasil pengukuran tetap sama meskipun dilakukan oleh operator yang berbeda. Hal ini memperkuat validitas *PCD Checker* sebagai alat inspeksi massal yang andal dan dapat digunakan dalam sistem inspeksi 100%.

Between Appraisers				
Assessment Agreement				
# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI	
30	28	93.33	(77.93, 99.18)	
# Matched: All appraisers' assessments agree with each other.				

Gambar 7. Output Minitab Between Appraiser

3.4.4 All Appraisers vs Standard

Berdasarkan hasil evaluasi *All Appraisers vs Standard* pada **Gambar 8**, diperoleh bahwa dari 30 produk yang diuji, sebanyak 27 produk (90,00%) hasil pengukurannya oleh seluruh operator sesuai dengan standar referensi, yaitu hasil pengukuran dari alat CMM yang digunakan sebagai master. Rentang confidence interval (CI) 95% adalah 73,47% hingga 97,89%, yang menunjukkan tingkat kepastian statistik yang baik terhadap hasil kesesuaian ini.

Persentase kesesuaian sebesar 90% ini menunjukkan bahwa secara umum, hasil pengukuran oleh semua operator menggunakan *PCD Checker* telah sesuai dengan standar referensi, sehingga *PCD Checker* dapat dikategorikan "*acceptable*" sesuai dengan kriteria AIAG MSA (*Measurement System Analysis*) untuk efektivitas $\geq 90\%$.

Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pengukuran menggunakan *PCD Checker* dapat diandalkan untuk penilaian massal, selama operator mengikuti prosedur kerja yang telah distandarkan. Dengan kata lain, secara kolektif, para penilai telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam menilai komponen secara konsisten terhadap acuan standar. Ini memperkuat validitas sistem inspeksi berbasis *PCD Checker* sebagai alat ukur alternatif yang layak digunakan untuk mendukung inspeksi 100%.

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement

# Inspected	# Matched	Percent	95 % CI
30	27	90.00	(73.47, 97.89)

Matched: All appraisers' assessments agree with the known standard.

Gambar 8. Output Minitab All Appraisers vs Standard

3.4.5 Statistik Kappa

Berdasarkan hasil statistik Fleiss' Kappa yang ditampilkan pada **Gambar 9**, nilai Kappa sebesar 0,903 baik untuk kategori NG maupun OK menunjukkan bahwa terdapat tingkat kesepakatan yang sangat tinggi di antara para penilai (operator) dalam melakukan inspeksi menggunakan PCD *Checker*. Nilai Kappa yang mendekati 1 mencerminkan bahwa kesepakatan yang terjadi tidak disebabkan oleh kebetulan semata, melainkan mencerminkan konsistensi yang kuat antar penilai terhadap standar.

Nilai standard error (SE Kappa) sebesar 0,06, menunjukkan bahwa variasi dari estimasi Kappa relatif kecil, yang memperkuat keyakinan terhadap nilai Kappa yang tinggi tersebut. Sementara itu, nilai Z = 14,84 yang sangat tinggi, serta nilai p-value = 0,00001, menunjukkan bahwa hasil pengukuran memiliki signifikansi statistik yang sangat kuat (karena p-value jauh di bawah 0,05). Ini berarti hipotesis nol (H_0) bahwa tidak ada kesepakatan antar penilai dapat ditolak, dan kita menerima bahwa terdapat kesepakatan signifikan antar penilai dalam melakukan inspeksi terhadap item yang sama.

Secara keseluruhan, nilai Fleiss' Kappa 0,903 dikategorikan sebagai "mendekati sempurna" menurut interpretasi standar statistik. Maka dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran menggunakan PCD *Checker* memiliki reliabilitas yang sangat tinggi dalam mengklasifikasikan produk sebagai OK atau NG di antara tiga operator yang terlibat. Hal ini mendukung kelayakan implementasi PCD *Checker* sebagai alat ukur dalam sistem inspeksi 100% pada proses produksi *brake drum*.

Fleiss' Kappa Statistics

Response	Kappa	SE Kappa	Z	P(vs > 0)
NG	0.903663	0.0608581	14.8487	0.0000
OK	0.903663	0.0608581	14.8487	0.0000

Gambar 9. Output Minitab Statistik Kappa

3.5 Analisis Efektivitas, Miss Rate, dan False Alarm Rate

Perhitungan :

$$\text{Efektivitas} = \frac{\text{Jumlah klasifikasi benar (OK jadi OK + NG jadi NG)}}{\text{Total Pengukuran}} \times 100\% = \frac{257}{270} \times 100\% = 95.18\%$$

$$\text{Miss Rate} = \frac{\text{Jumlah NG yang salah diklasifikasikan jadi OK}}{\text{Total Pengukuran NG}} \times 100\% = \frac{0}{135} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{False Alarm Rate} = \frac{\text{Jumlah OK yang salah diklasifikasikan jadi NG}}{\text{Total Pengukuran OK}} \times 100\% = \frac{13}{135} \times 100\% = 7.69\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran menggunakan PCD *Checker* memiliki tingkat efektivitas yang sangat tinggi, yakni sebesar 95,18%. Artinya, dari 270 pengukuran yang dilakukan, sebanyak 257 hasil klasifikasi oleh PCD *Checker* sesuai dengan kategori standar dari CMM, baik dalam mengidentifikasi produk yang OK maupun NG.

Nilai *Miss Rate* sebesar 0% menunjukkan bahwa tidak ada produk NG yang salah diklasifikasikan sebagai OK, yang berarti sistem pengukuran ini sangat andal dalam mencegah produk cacat lolos ke proses selanjutnya. Ini sangat penting dalam konteks jaminan kualitas dan keamanan produk.

Namun demikian, terdapat *False Alarm Rate* sebesar 7,69%, yang berarti terdapat produk yang sebenarnya OK menurut CMM, tetapi diklasifikasikan sebagai NG oleh PCD *Checker*. Meskipun tingkat kesalahan ini masih tergolong rendah, kesalahan jenis ini dapat menimbulkan pemborosan karena produk yang layak digunakan dianggap tidak memenuhi spesifikasi.

Secara keseluruhan, PCD *Checker* menunjukkan performa pengukuran yang sangat baik dalam hal akurasi klasifikasi, terutama karena tidak menghasilkan kesalahan fatal berupa produk cacat yang tidak terdeteksi. Evaluasi ini mendukung keputusan untuk menerapkan PCD *Checker* sebagai alat bantu inspeksi dalam proses produksi *brake drum*.

3.6 Analisis Waktu Pengukuran

Berdasarkan data pengukuran waktu terhadap 30 produk pada Tabel , terlihat bahwa terdapat penurunan signifikan waktu inspeksi mesin *Coordinate Measuring Machine* (CMM) ke *limit gauge* (PCD *Checker*). Rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh CMM untuk menyelesaikan satu pengukuran adalah 740 detik, sedangkan rata-rata waktu pengukuran menggunakan *limit gauge* (PCD *Checker*) hanya 17 detik per produk. Meskipun inovasi dan percepatan dapat dilakukan untuk mengefisieni waktu inspeksi CMM [15], pemotongan waktu tidak akan menyaingi waktu inspeksi dengan *limit gauge*. Hal ini menunjukkan bahwa *limit gauge* (PCD *Checker*) memiliki efisiensi waktu yang sangat tinggi, dengan waktu pengukuran yang sekitar 97,7% lebih cepat dibandingkan dengan CMM.

Efisiensi waktu ini menjadi keuntungan signifikan dalam konteks inspeksi massal atau inspeksi 100%, di mana kecepatan proses sangat penting untuk menjaga kelancaran *delivery* ke pelanggan tanpa pengiriman barang *defect*. Dengan demikian, meskipun CMM unggul dalam fleksibilitas dan akurasi multigeometri, penggunaan PCD *Checker* dapat menjadi solusi yang lebih efisien untuk kebutuhan inspeksi dimensi spesifik seperti PCD, terutama dalam proses produksi yang membutuhkan waktu cepat dan throughput tinggi.

4. Kesimpulan

Evaluasi implementasi *limit gauge* untuk pengecekan 100% produk untuk volume produksi tinggi sebagai strategi inspeksi kualitas dimensi PCD *brake drum* menunjukkan efektivitas tinggi 95,18% sesuai dan dapat menggantikan CMM. Data 270 pengukuran menunjukkan konsistensi replikasi pengukuran tiap operator di 93,33-100%, antar operator di 93%, dan kesesuaian dengan pengukuran CMM di 90-96,7%. Hanya 7,69% *false alarm rate* yang mengindikasikan produk OK diklasifikasikan sebagai NG. Disamping itu, durasi pengukuran per produk berkurang 97,7% dari 740 detik dengan CMM menjadi 17 detik dengan *limit gauge*. Namun, penerapan strategi ini perlu didampingi verifikasi *sampling* periodik dengan CMM untuk menjaga validitas pengukuran dan persiapan rencana perbaikan korektif dan preventif dari proses *machining* untuk mencegah penyimpangan kualitas PCD.

5. Referensi

- [1] R.S. Peruchi, P.P. Balestrassi, A.P. de Paiva, J.R. Ferreira, M. de Santana Carmelossi, A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics, *Int. J. Prod. Econ.* 144 (2013) 301–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.018>.
- [2] C.W. Wu, W.L. Pearn, S. Kotz, An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance, *Int. J. Prod. Econ.* 117 (2009) 338–359. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.008>.
- [3] T.P. Khanh, New methodology for improving the inspection policies for degradation model selection according to prognostic measures, 67 (2018).
- [4] A. Ait-El-Cadi, A. Gharbi, K. Dhouib, A. Artiba, Integrated production, maintenance and quality control policy for unreliable manufacturing systems under dynamic inspection, *Int. J. Prod. Econ.* 236 (2021) 108140. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108140>.

- [5] M.A. Filz, J.P. Bosse, C. Herrmann, Systematic Planning of Quality Inspection Strategies in Manufacturing Systems, *Procedia CIRP*. 104 (2021) 1101–1106. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.185>.
- [6] M. Colledani, T. Tolio, A. Fischer, B. Iung, G. Lanza, R. Schmitt, *CIRP Annals - Manufacturing Technology Design and management of manufacturing systems for production quality*, 63 (2014) 773–796.
- [7] D.C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 7th ed., John Wiley & Sons, 2012.
- [8] A. Mohammad, F. Aljamaan, S. Bin Shuqayr, K.M. Ahmed, Coordinate measuring machine (CMM) performance verification using standard step gauges with new measurement model and modified uncertainty analysis, *Meas. Sensors*. 38 (2025). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101658>.
- [9] G. Sahrul, Komarudin, Optimalisasi kualitas pengukuran dimensi Coordinate Measuring Machine Mitutoyo Crysta-Apex V 7106 di PT. Toyota Gosei Indonesia, *J. Pendidik. Dan Teknol. Pembelajaran*. 6 (2025). <https://ejournals.com/ojs/index.php/jptp/article/view/3134>.
- [10] D. Peña-gonzález, N.E. Caicedo-solano, R. Torres-peña, Enhancing Quality Control in Lot Reception : A Comparative Analysis of Innovative Attribute Acceptance Sampling Plans, 17 (2024) 681–697.
- [11] A.I.A. Group, *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual*, 4th Editio, Michigan, 2010.
- [12] C. Marques, N. Lopes, G. Santos, I. Delgado, P. Delgado, Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 119 (2018) 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.034>.
- [13] M.L. McHugh, Interrater reliability: the kappa statistic., *Biochem. Medica*. 22 (2012) 276–282.
- [14] D. Tonev, B. Sotirov, Extending The Production Tolerance Of A Gauge And Determining Its Trueness, in: *Int. Conf. Knowledge-Based Organ.*, Nicolae Balcescu Land Forces Academy, 2024.
- [15] S.H. Mian, A. Al-ahmari, Enhance performance of inspection process on Coordinate Measuring Machine, *Measurement*. 47 (2014) 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.045>.