

Pengukuran Teknik & Metrologi Industri

Revin Andrea Agga E Q
Prof. Dr. Tuwoso, M.P.



Pengukuran Teknik & Metrologi Industri



Revin Andrea Agga E Q
Prof. Dr. Tuwoso, M.P.



PENGUKURAN TEKNIK DAN METROLOGI INDUSTRI

Ditulis oleh:

Revin Andrea Agga E Q
Prof. Dr. Tuwoso, M.P.

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Literasi Nusantara Abadi Grup
Perumahan Puncak Joyo Agung Residence Blok B11 Merjosari
Kecamatan Lowokwaru Kota Malang 65144
Telp : +6285887254603, +6285841411519
Email: literasinusantaraofficial@gmail.com
Web: www.penerbitlitnus.co.id
Anggota IKAPI No. 340/JTI/2022



Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang mengutip atau memperbanyak baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku dengan cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan I, Desember 2025

Perancang sampul: Noufal Fahriza
Penata letak: D Gea Nuansa

ISBN : 978-634-234-938-0

xiv + 226 hlm. ; 15,5x23 cm.

©Desember 2025

Prakata

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan buku dengan judul Pengukuran Teknik dan Metrologi Industri. Buku ini disusun dengan tujuan memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai konsep, prinsip, serta aplikasi pengukuran teknik dan metrologi dalam dunia industri. Metrologi sebagai ilmu tentang pengukuran memiliki peranan penting dalam menjamin kualitas produk, ketepatan proses, serta efisiensi dalam bidang teknik dan manufaktur. Oleh karena itu, penguasaan terhadap teori maupun praktik pengukuran sangat diperlukan, khususnya bagi mahasiswa, pendidik, praktisi industri, maupun pihak-pihak yang bergerak dalam bidang teknik. Dalam penyusunan buku ini, penulis berupaya menyajikan materi secara sistematis mulai dari dasar-dasar pengukuran, peralatan ukur, metode pengukuran, hingga perkembangan teknologi metrologi modern yang digunakan di dunia industri. Diharapkan buku ini dapat menjadi referensi bagi pembaca dalam memahami pentingnya pengukuran sebagai fondasi bagi peningkatan mutu dan daya saing produk industri. Penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan penyempurnaan edisi berikutnya. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan inspirasi sehingga buku ini dapat terselesaikan. Semoga buku ini memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi para pembaca

Daftar Isi

Prakata	iii
Daftar Isi	v

BAB I

Pendahuluan	1
A. Deskripsi singkat	1
B. Pentingnya metrologi industri.....	4
C. Ruang lingkup dan tujuan pembelajaran.....	6
D. Hubungan pengukuran dengan standar mutu.....	6
E. Rangkuman	7
F. Tes formatif.....	8

BAB II

Konsep Dasar Pengukuran	9
A. Deskripsi singkat	9
B. Besaran fisika dan satuan internasional (SI)	10
C. Standar satuan dan kalibrasi	11
D. Akurasi, presisi, dan Reprodusibilitas	12
E. Rangkuman	13
F. Tes formatif.....	13

BAB III

Kesalahan dan Ketidakpastian Pengukuran	15
A. Deskripsi singkat	15
B. Jenis-jenis kesalahan	16
C. Analisis ketidakpastian pengukuran	17
D. Penyajian data pengukuran.....	18
E. Evaluasi hasil pengukuran	20
F. Rangkuman	20
G. Tes formatif.....	21

BAB IV

Alat Ukur Mekanik.....	23
A. Deskripsi singkat	23
B. Jangka sorong (<i>vernier caliper</i>)	24
C. Mikrometer sekrup	28
D. Dial gauge	32
E. Feeler gauge dan dial-thickness gauge	36
F. Rangkuman	39
G. Tes formatif.....	39

BAB V

Alat Ukur Sudut dan Optik	41
A. Deskripsi singkat	41
B. Alat ukur sudut presisi.....	42
C. Busur derajat dan bevel protractor	67
D. Mikroskop pengukur dan proyeksi profi	71
E. Aplikasi optik dalam pengukuran dimensi	75
F. Rangkuman	84
G. Tes formatif.....	85

BAB VI

Alat Ukur Elektronik dan Digital..... 87

A. Deskripsi singkat87

B. Mikrometer89

C. Osiliskop91

D. Sensor Elektronik untuk pengukuran92

E. Coordinate Measuring Machine (CMM) 100

F. Perangkat ukur digital terintegrasi komputer 104

G. Rangkuman 106

H. Tes formatif..... 107

BAB VII

Pengukuran Dimensi dan Bentuk..... 109

A. Deskripsi singkat 109

B. Pengukuran panjang, diameter, dan ketebalan 111

C. Pengukuran kebulatan dan kesilindrisan..... 112

D. Pengukuran kerataan dan kekasaran permukaan 114

E. Pengukuran dengan standar blok ukur (Gauge Block) 115

F. Rangkuman 117

G. Tes formatif..... 118

BAB VIII

Toleransi dan Kualitas Produk..... 119

A. Deskripsi singkat 119

B. Konsep toleransi dalam teknik..... 120

C. Sistem ISO toleransi dan fits 122

D. Interchangeability dalam industri..... 124

E. Hubungan toleransi dengan biaya produksi..... 126

F. Rangkuman 127

G. Tes formatif..... 129

BAB IX

Metrologi Industri dan Pengendalian Mutu.....	131
A. Definisi singkat	131
B. Konsep metrologi industri	132
C. Pengendalian proses statistik (SPC)	134
D. Metode sampling dan inspeksi	136
E. Penerapan metrologi dalam manufaktur	137
F. Rangkuman	139
G. Tes formatif.....	140

BAB X

Kalibrasi dan Standarisasi	141
A. Deskripsi singkat	141
B. Tujuan kalibrasi	143
C. Prosedur kalibrasi alat ukur	146
D. Lembaga Standar Nasional dan Internasional	150
E. Sertifikat Alat Ukur	153
F. Rangkuman	156
G. Tes formatif.....	157

BAB XI

Teknologi Metrologi Modern.....	159
A. Deskripsi singkat	159
B. Metrologi berbasis komputer.....	162
C. Metrologi Non-kontak.....	166
D. Internet of Things (IoT) dalam pengukuran	169
E. Arah perkembangan metrologi masa depan	171
F. Rangkuman	174
G. Tes formatif.....	175

BAB XII

Studi Kasus dan Aplikasi Industri.....177

A. Deskripsi singkat 177

B. Aplikasi pada industri Otomotif 178

C. Aplikasi pada industri Energi dan Konstruksi..... 182

D. Best paractice dalam penerapan Metrologi..... 184

E. Aplikasi pada industri Penerbangan..... 186

F. Rangkuman 188

G. Tes formatif..... 188

Daftar Pustaka..... 191

Glosarium..... 201

Kunci Jawaban 205

Daftar Gambar

Gambar 3.1 garafik percobaan data	19
Gambar 4. 1 jangka sorong mekanik	24
Gambar 4. 2 jangka sorong digital	25
Gambar 4.3 hasil pengukuran	27
Gambar 4.4 mikrometer sekrup	28
Gambar 4.5 bagian utama mikrometer	29
Gambar 4.6 depth micrometer dan outside micrometer	30
Gambar 4.7 mikrometer digital	30
Gambar 4.8 dial gauge	32
Gambar 4.9 plunger-type dial inicator dan dial test indicator	33
Gambar 4.10 dial gauge digital	34
Gambar 4. 11 feeler gauge	36
Gambar 4. 12 ultrasonic thickness gauge dan dial-thickness gauge	37
Gambar 5. 4 sine bar	43
Gambar 5.5 sine bar	46
Gambar 5.6 Compound sine bar	46
Gambar 5.7 sine center	47
Gambar 5. 8 sine table	47
Gambar 5.9 Angle gauge block set	51
Gambar 5.10 Adjustable angle gauge block	51
Gambar 5.11 Visual Autocollimator	55
Gambar 5.12 Digital autocollimator	56
Gambar 5.13 Dual-axis autocollimator	56
Gambar 5. 14 Manual rotary table	58
Gambar 5.15 Motorized/CNC rotary table	59
Gambar 5.16 Optical rotary table	59
Gambar 5.17 Tilting rotary table	60
Gambar 5.18 Inclinometer mekanis	64
Gambar 5.19 Inclinometer optik	65

Gambar 5.20 Inclinometer digital	66
Gambar 5.1 busur derajat baseline dan busur derajat 180 dan 360	69
Gambar 5.2 Bevel protractor standar	69
Gambar 5.3 vernier bevel protractor	70
Gambar 5.21 Mikroskop pengukur.....	72
Gambar 5.2 mikroskop pengukur	77
Gambar 5. 23 Profile projector	78
Gambar 5.24 Autocolimator	79
Gambar 5.25 Laser interferometer	80
Gambar 5. 26 3D optical scanner	81
Gambar 5.27 Optical CMM (Coordinate Measuring Machine)	82
Gambar 5.28 Video measuring system (VMS).....	83
Gambar 6. 1 Multimeter	89
Gambar 6. 2 Osiloskop	91
Gambar 6.3 Termokopel.....	94
Gambar 6.4 RTD (Resistance Temperature Detector)	94
Gambar 6. 5 Thermistor	95
Gambar 6. 6 <i>Ic temprature sensor</i>	95
Gambar 6.7 Strain Gauge Pressure Sensor.....	96
Gambar 6.8 Sel beban	96
Gambar 6. 9 sensor jarak laser.....	97
Gambar 6. 10 Sensor ultrasonik	97
Gambar 6.11 Sensor pengukuran laser 2D	98
Gambar 6. 12 Akselerometer	98
Gambar 6.13 Sensor sinar X dan Gamma.....	99
Gambar 6. 14 Sensor DHT11.....	99
Gambar 6. 15 Bridge Coordinate Measuring Machine	102
Gambar 6. 16 Cantilever CMM.....	102
Gambar 6. 17 Gantry CMM.....	103
Gambar 6. 18 Horizontal arm CMM.....	103

Daftar Tabel

Table 3.1 tabel percobaan data..... 18



BAB I

Pendahuluan

A. Deskripsi singkat

Di era globalisasi dan revolusi industri 4.0, permintaan terhadap produk industri semakin meningkat. Pelanggan dan pengguna menginginkan produk yang berkualitas, tepat, aman serta memiliki daya saing di pasar internasional. Dalam menghadapi tantangan itu, sektor manufaktur diharuskan tidak hanya memproduksi barang dalam jumlah besar, tetapi harus menjamin bahwa setiap produk memiliki akurasi dan kesesuaian ukuran. Setiap langkah dalam proses produksi mulai dari perancangan, pemilihan bahan, perakitan hingga pengendalian kualitas tidak bisa terlepas dari aktivitas pengukuran. Pengukuran memiliki peran krusial dalam menetapkan dimensi produk agar sesuai dengan desain, memeriksa toleransi serta kualitas permukaan yang berdampak pada kinerja produk, menguji kecocokan antar komponen dapat dirakit dengan baik, hingga menjamin keselamatan produk saat digunakan, khususnya di sektor industri.

Pengukuran merupakan aspek fundamental dalam seluruh bidang teknik dan industri. Setiap proses manufaktur, perancangan, maupun pengujian produk memerlukan hasil pengukuran yang akurat dan dapat dipercaya. Tanpa sistem pengukuran yang baik, kualitas, efisiensi, dan keamanan produk tidak akan dapat dijamin. Oleh karena itu, pengukuran tidak sekadar aktivitas teknis, melainkan juga bagian dari sistem mutu industri yang menjamin kesesuaian antara hasil kerja dengan standar yang telah ditetapkan. Dalam konteks modern, pengukuran menjadi dasar bagi pengendalian kualitas, kalibrasi alat, dan inovasi teknologi berbasis data presisi.

Sejarah pengukuran telah dimulai sejak peradaban kuno, ketika manusia menggunakan bagian tubuh seperti jengkal, hasta, dan depa sebagai satuan panjang. Namun, pendekatan tersebut tidak memiliki konsistensi sehingga menimbulkan perbedaan hasil pengukuran antarwilayah. Revolusi besar terjadi ketika sistem satuan internasional (*International System of Units – SI*) mulai diterapkan pada abad ke-18, yang membawa keseragaman dan ketepatan dalam pengukuran di seluruh dunia. Perkembangan ini menandai lahirnya *metrologi*, ilmu yang secara sistematis mempelajari pengukuran dan standar.

Metrologi dalam konteks industri memiliki peranan strategis dalam menjaga mutu produk dan efisiensi proses. Melalui penerapan prinsip-prinsip metrologi, perusahaan mampu memastikan bahwa setiap komponen yang diproduksi sesuai dengan spesifikasi desain. Hal ini sangat penting terutama dalam industri presisi seperti otomotif, penerbangan, dan permesinan. Kegagalan dalam pengendalian dimensi sekecil apa pun dapat mengakibatkan cacat produk, kerugian ekonomi, bahkan risiko keselamatan. Karena itu, penguasaan konsep pengukuran dan metrologi merupakan kompetensi wajib bagi tenaga teknik di era industri modern.

Pengukuran teknik tidak hanya berfokus pada dimensi fisik seperti panjang, lebar, dan diameter, tetapi juga mencakup pengukuran gaya, tekanan, suhu, getaran, dan parameter lainnya. Setiap jenis besaran fisika memiliki metode dan instrumen pengukuran yang berbeda, serta tingkat



BAB II

Konsep Dasar Pengukuran

A. Deskripsi singkat

Pengukuran adalah aktivitas ilmiah dan teknis untuk menetapkan nilai suatu besaran dengan membandingkannya terhadap satuan standar yang telah disetujui. Dalam konteks Teknik dan industri, pengukuran berperan sebagai dasar krusial dalam proses produksi, perancangan, serta pemeriksaan mutu. Tanpa pengukuran yang terencana, pencapaian Teknik tidak dapat dinilai secara objektif, karena tidak tersedia data kuantitatif sebagai referensi. Karena itu, pengukuran tidak hanya sekedar aktivitas teknis, tetapi juga berfungsi sebagai landasan pengendalian mutu dan standar industri.

Prinsip dasar dalam pengukuran mencakup ketepatan (*accuracy*) dan ketelitian (*precision*). Ketepatan mengacu pada seberapa dekat hasil pengukuran dengan nilai yang sebenarnya, sedangkan ketelitian menggambarkan seberapa konsisten hasil pengukuran saat dilakukan berulang. Keduanya perlu diperhatikan bersamaan supaya data yang diperoleh tidak hanya akurat secara rata-rata, tetapi juga konsisten dan

dapat dipercaya. Dalam pelaksanaannya, kesalahan pengukuran bisa timbul akibat faktor perangkat, teknik, maupun faktor manusia, sehingga dibutuhkan system kalibrasi dan prosedur standar untuk memastikan kualitas hasil pengukuran.

Prinsip lain yang juga penting adalah keterlacakan (*traceability*) hasil pengukuran. Artinya, setiap hasil pengukuran wajib dapat dilacak hingga standar nasional maupun internasional untuk diakui keabsahannya. Hal ini krusial dalam industri modern yang terhubung secara global, di mana produk dari suatu negara perlu memenuhi standar internasional agar diterima pasar global. Melalui penerapan prinsip pengukuran yang tepat, cermat, dan dapat ditelusuri, industri dapat mempertahankan kualitas produk, meningkatkan efisiensi produk serta meningkatkan daya saing di skala global.

B. Besaran fisika dan satuan internasional (SI)

(Things & Lengths, 2005) Pengukuran besaran fisika merupakan bagian dasar dari fisika. Besaran yang diukur dalam fisika meliputi panjang, waktu, massa, kecepatan, suhu, gaya, tekanan, usaha, energi, arus listrik, resistansi, dan kapasitansi. Populasi juga bukan sekadar jumlah yang ada, tetapi juga objek dan benda-benda alam lainnya. Artinya, suatu fenomena atau objek fisik bisa disebut besaran jika memiliki nilai kuantitatif yang dapat dibandingkan dengan standar tertentu. Misalnya, Panjang dapat diukur dalam meter, massa dalam kilogram, dan waktu dalam sekon. Dengan adanya besaran fisika/ setiap fenomena alam dapat dijelaskan secara lebih objektif, terukur, serta memungkinkan dilakukan analisis matematis dalam ilmu pengetahuan maupun penerapannya di bidang teknik.

(David B. Newell and Eite Tiesinga, 2019) Sistem Satuan Internasional (SI) adalah sitem pengukuran yang disepakati secara global untuk memastikan keseragaman, konsistensi, dan akurasi dalam sains, teknik, maupun industri. SI terdiri atas besaran pokok seperti Panjang, massa,



BAB III

Kesalahan dan Ketidakpastian Pengukuran

A. Deskripsi singkat

Kesalahan pengukuran merupakan selisih antara nilai yang diukur dengan nilai sebenarnya dari besaran yang di ukur. Dalam praktik teknik, kesalahan tidak dapat dihindari sepenuhnya, tetapi bisa diminimalkan melalui prosedur yang tepat. Kesalahan dalam pengukuran bisa berasal dari alat, metode, atau individu yang melakukan pengukuran. Oleh sebab itu, pemahaman mengenai asal kesalahan menjadi dasar krusial dalam metrologi agar hasil pengukuran dapat diandalkan dan memiliki keterlacakan.

Ketidakpastian dalam pengukuran adalah parameter yang menggambarkan sejauh mana hasil pengukuran dapat dipercaya. Berbeda dengan kesalahan, ketidakpastian tidak bisa dihilangkan sepenuhnya, tetapi hanya dapat diminimalkan dengan penerapan metode, alat, dan standar yang sesuai. Analisis ketidakpastian mencakup penentuan semua sumber variasi, perhitungan kontribusi setiap sumber, dan penyajian hasil

dalam bentuk interval dengan tingkat kepercayaan tertentu menjamin bahwa hasil pengukuran menjadi lebih jelas, dapat dilacak, dan bisa dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Hasil pengukuran harus disajikan dan dianalisis menggunakan metode yang sesuai agar informasi yang disampaikan tepat dan mudah dimengerti. Penyajian data umumnya mencakup table, grafik, atau notasi standar yang menampilkan nilai hasil pengukuran disertai dengan ketidakpastian yang relevan. Evaluasi hasil dikerjakan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap standar, spesifikasi, atau toleransi yang telah ditentukan. Dengan pemahaman yang mendalam tentang kesalahan dan ketidakpastian, kualitas pengukuran dapat dijamin, mendukung kontrol mutu, dan meningkatkan keandalan produk di sektor industri.

B. Jenis-jenis kesalahan

1. Kesalahan sistematis

Kesalahan sistematis merupakan kesalahan yang muncul secara konsisten baik dalam arah maupun besarnya, sehingga dapat diperkirakan. Kesalahan ini umumnya disebabkan oleh faktor alat yang tidak terkalibrasi, metode pengukuran yang salah, atau kondisi lingkungan yang mempengaruhi instrument. Contohnya adalah penggaris yang Panjang tidak memenuhi standar, sehingga setiap pengukuran akan selalu lebih Panjang atau lebih pendek dibandingkan nilai yang sebenarnya. Karena karakteristiknya yang konstan, kesalahan sistematis bisa diminimalkan atau dihapus dengan kalibrasi, koreksi, atau perbaikan prosedur.

2. Kesalahan acak

Kesalahan acak adalah kesalahan yang terjadi akibat variasi kecil yang sulit diprediksi, sering kali disebabkan oleh perubahan lingkungan atau keterbatasan peralatan ukur. Kesalahan ini bisa timbul akibat getaran, variasi suhu, atau Batasan presisi alat ukur. Tidak seperti kesalahan sistematis, kesalahan acak tidak mengikuti pola tertentu, sehingga hasil pengukuran bisa lebih besar atau lebih kecil secara



BAB IV

Alat Ukur Mekanik

A. Deskripsi singkat

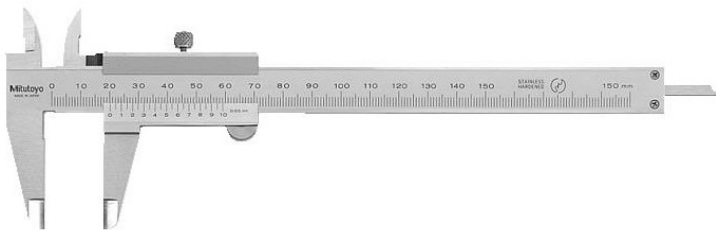
Alat ukur merupakan perangkat dasar yang paling banyak digunakan dalam praktik teknik dan industri karena sifatnya yang sederhana, praktis, serta tidak memerlukan sumber energi listrik. Instrumen mekanik banyak digunakan untuk menentukan sifat dimensi seperti panjang, ketebalan, dan diameter, serta tetap menjadi hal mendasar dalam praktik pengukuran industri dan laboratorium. Keunggulan utama alat ukur mekanik adalah kemudahan penggunaan serta biaya yang relatif rendah dibandingkan instrumen elektronik. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap prinsip kerja serta keterbatasannya sangat penting agar dapat menghasilkan data yang valid.

Beberapa jenis alat ukur mekanik yang umum digunakan antara lain jangka sorong, mikrometer sekrup, dial gauge, dan feeler gauge. Jangka sorong digunakan untuk mengukur panjang, diameter dalam, diameter luar, maupun kedalaman dengan ketelitian hingga 0,02 mm. Mikrometer sekrup lebih presisi dan mampu membaca hingga 0,01 mm.

Sementara itu, dial gauge digunakan untuk memeriksa keselarasan dan penyimpangan kecil pada permukaan, sedangkan feeler gauge digunakan untuk mengukur celah atau ketebalan, pemilihan alat ukur mekanik harus disesuaikan dengan fungsi, tingkat ketelitian, dan kondisi pekerjaan.

Dalam praktik industri, alat ukur mekanik memiliki peran penting sebagai dasar inspeksi kualitas dan kontrol dimensi. Keakuratan hasil ukur sangat bergantung pada kalibrasi alat, kondisi permukaan benda kerja, serta keterampilan operator. Meskipun kini banyak tersedia instrumen digital yang lebih canggih, alat ukur mekanik tetap relevan karena sifatnya yang tahan lama dan mudah dipelihara. Dengan menguasai penggunaan jangka sorong, mikrometer, dial gauge, dan feeler gauge, seorang teknisi dapat memastikan bahwa komponen yang diproduksi sesuai dengan standar toleransi yang ditetapkan.

B. Jangka sorong (*vernier caliper*)



Gambar 4. 1 jangka sorong mekanik
(Ainun, 2023)

Jangka sorong merupakan salah satu alat ukur presisi tertua yang masih digunakan hingga saat ini. Alat sejenis sudah ditemukan sejak peradaban Yunani dan Romawi kuno, tetapi perkembangan penting terjadi pada tahun 1631 ketika Pierre Vernier memperkenalkan skala *vernier* yang memungkinkan pengukuran dengan ketelitian lebih tinggi. Sejak saat itu, jangka sorong mekanik menjadi standar dalam pengukuran dimensi industri maupun penelitian. Perkembangan selanjutnya terjadi pada abad

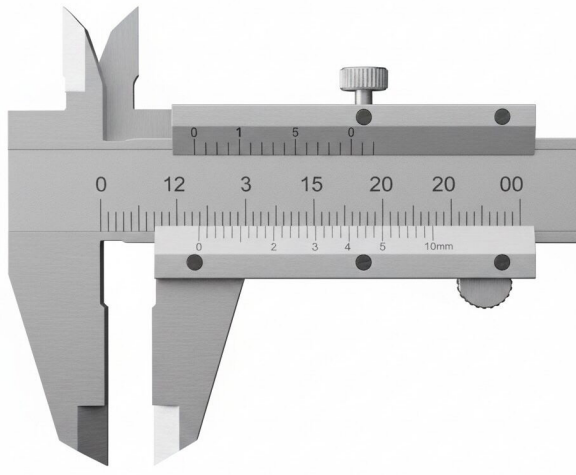
Dalam penggunaannya, operator harus menyesuaikan bagian pengukur dengan jenis dimensi yang hendak diukur. Rahang luar digunakan untuk mengukur diameter atau panjang luar, rahang dalam digunakan untuk mengukur diameter dalam, sedangkan batang pengukur di bagian belakang berfungsi untuk mengukur kedalaman lubang. Benda kerja ditempatkan di antara rahang pengukur, kemudian rahang digerakkan hingga menyentuh permukaan benda tanpa tekanan berlebihan agar hasil yang diperoleh tidak mengalami deformasi. Setelah posisi pengukuran tepat, sekrup pengunci digunakan untuk menjaga agar posisi rahang tidak bergeser selama pembacaan hasil.

Proses membaca hasil pengukuran jangka sorong dilakukan dengan memperhatikan dua skala, yaitu skala utama dan skala nonius (vernier). Skala utama menunjukkan pembacaan dalam satuan milimeter penuh, sedangkan skala nonius berfungsi memberikan nilai tambahan dalam pecahan milimeter. Pembacaan dimulai dari nilai skala utama yang terletak di sebelah kiri garis nol pada skala nonius. Nilai ini mencerminkan ukuran kasar dari hasil pengukuran, sedangkan nilai pada skala nonius diperoleh dari garis pada nonius yang sejajar sempurna dengan salah satu garis pada skala utama.

Ketelitian alat atau *least count* pada jangka sorong diperoleh dari selisih antara satu skala utama dan satu skala nonius. Secara umum, ketelitian yang sering digunakan adalah 0,1 mm, 0,05 mm, atau 0,02 mm tergantung pada jumlah skala nonius yang terdapat pada alat tersebut. Rumus dasar ketelitian dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Ketelitian} = 1 \text{ skala utama} + 1 \text{ skala nonius}$$

Sebagai contoh, apabila skala utama menunjukkan nilai 12 mm dan garis nonius ke-3 sejajar dengan garis pada skala utama, serta jangka sorong memiliki ketelitian 0,05 mm, maka hasil pengukuran diperoleh dari perhitungan:



Gambar 4.3 hasil pengukuran

$$12 + (3 \times 0,05) = 12,15 \text{ mm}$$

Nilai ini merupakan hasil akhir dari pengukuran dengan tingkat presisi yang tinggi. Setelah selesai digunakan, jangka sorong harus dibersihkan dari debu dan minyak, kemudian disimpan di tempat yang kering dan terlindung dari korosi. Perawatan yang baik akan menjaga ketelitian alat tetap stabil sehingga hasil pengukuran dapat dipercaya dalam jangka waktu lama.

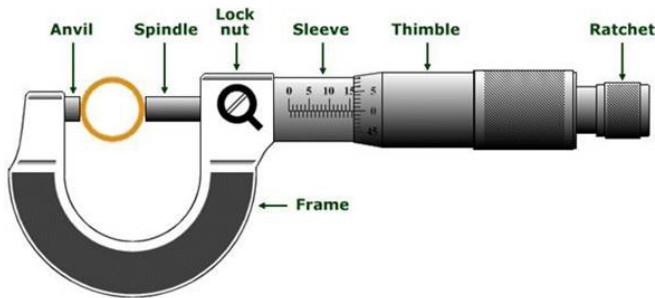
Toleransi pada pengukuran menggunakan jangka sorong ditentukan oleh skala nonius atau skala vernier yang terdapat pada alat tersebut. Proses pembacaan hasil pengukuran dilakukan dengan cara mencari garis pada skala nonius yang paling sejajar dengan garis pada skala utama. Setelah garis sejajar tersebut ditemukan, nilai yang ditunjukkan oleh skala nonius dikalikan dengan tingkat ketelitian jangka sorong untuk memperoleh nilai koreksi. Nilai koreksi ini kemudian ditambahkan atau dikurangkan dari hasil pembacaan skala utama agar diperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat dan sesuai dengan toleransi yang telah ditetapkan.

C. Mikrometer sekrup



Gambar 4.4 mikrometer sekrup
(RS Components Ltd, 2023)

Mikrometer sekrup berasal dari konsep memanfaatkan ulir sekrup untuk mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan linear yang akurat, gagasan yang telah ada sejak alat ukur astronomi awal di abad ke-17. Pada masa revolusi industri abad ke-18/19, kemampuan untuk membuat ulir dan mesin pembagi mengalami kemajuan pesat, sehingga prinsip ini ditetapkan sebagai alat ukur bengkel yang praktis dan akurat. Bentuk mikrometer yang kita kenal saat ini telah mengalami perkembangan pada abad ke-19 ketika teknik pembuatan ulir halus dipadukan dengan skala pembacaan menjadi alat tangan yang dapat mengukur dengan ketelitian jauh lebih tinggi dibandingkan dengan penggaris atau jangka sorong. Di abad ke-20 muncul versi digital yang menunjukkan hasil pengukuran secara elektronik, sehingga memudahkan pembacaan dan pengintegrasian data ke dalam sistem pengolahan.



Gambar 4.5 bagian utama mikrometer
(Yudhistira, 2025)

Secara konstruksi, mikrometer sekrup terdiri dari beberapa bagian utama: *anvil* (bongkahan tetap), *spindle* (batang berulir yang bergerak mendekati *anvil*), *sleeve* (barrel) dengan skala tetap, *thimble* (bagian berputar) dengan skala putar, *lock* (pengunci *spindle*), *ratchet* atau *friction thimble* untuk mengendalikan gaya penjepit. Prinsip kerjanya sederhana tetapi kuat: satu putaran *thimble* menyebabkan *spindle* bergerak sejauh *pitch* ulir (misalnya 0,5 mm), skala *thimble* dibagi menjadi sejumlah bagian sehingga setiap bagian mewakili fraksi kecil dari *pitch*. Ada beberapa jenis mikrometer: *outside micrometer* untuk ukuran diameter dalam, *depth micrometer* untuk kedalaman serta micrometer khusus untuk ulir atau tabung. Varian digital menambahkan pencahayaan layar, fungsi zero, pemilihan satuan mm/inch dan keluaran data.



Gambar 4.6 depth micrometer dan outside micrometer
(Globaltestsupply, 2023)



Gambar 4.7 mikrometer digital
(Grizzly Industrial, 2025)

Ketika digunakan, operator meletakkan benda yang akan diukur di antara anvil dan spindle. Spindle diputar perlahan dengan ratchet knob hingga ujungnya menyentuh permukaan benda. Ratchet memiliki fungsi penting untuk menjaga tekanan pengukuran tetap sama, sehingga hasil yang didapat tidak dipengaruhi oleh tenaga tangan pengguna. Setelah

posisi sudah tepat, sekrup pengunci (lock nut) digunakan untuk menahan spindle agar tidak bergerak saat hasil dibaca. Proses ini membutuhkan kehati-hatian dan kestabilan tangan, karena sedikit pergerakan bisa mengubah hasilnya dalam satuan mikrometer.

Pembacaan hasil mikrometer dilakukan dengan memperhatikan dua skala utama, yaitu skala utama (atau batang) dan skala putar (thimble). Skala utama menunjukkan pembacaan dalam satuan milimeter penuh serta setengah milimeter, sedangkan skala putar memperlihatkan pembacaan tambahan dalam pecahan milimeter. Skala utama terletak pada batang mikrometer, sementara skala putar berada di keliling thimble yang berputar mengikuti pergerakan spindle. Setiap putaran penuh thimble umumnya menghasilkan perpindahan spindle sejauh 0,5 mm, dan thimble sendiri biasanya memiliki 50 atau 100 garis pembagian.

Ketelitian mikrometer diperoleh dari pembagian jarak per putaran penuh dengan jumlah garis pada skala putar. Sebagai contoh, apabila satu putaran penuh menghasilkan perpindahan 0,5 mm dan terdapat 50 garis pada thimble, maka ketelitiannya adalah 0,01 mm. Rumus umum ketelitian dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{ketelitian} = \frac{\text{pitch ulir sekrup}}{\text{jumlah garis pada skala putar}}$$

Dengan demikian, mikrometer dapat digunakan untuk mengukur dimensi dengan presisi hingga seperseratus milimeter. Untuk memperoleh hasil akhir pengukuran, nilai pada skala utama dijumlahkan dengan hasil perkalian antara nilai garis pada skala putar yang sejajar dan nilai ketelitian alat. Misalnya, jika pembacaan skala utama menunjukkan 5,5 mm dan garis ke-23 pada thimble sejajar dengan garis referensi, maka hasil pengukurannya adalah:

$$5,5 + (23 \times 0,01) = 5,73 \text{ mm}$$

Nilai ini mencerminkan ukuran aktual benda kerja dengan ketelitian tinggi. Setelah proses pengukuran selesai, mikrometer harus dikembalikan

ke posisi nol, dibersihkan dengan kain lembut, dan disimpan di dalam kotak pelindung untuk mencegah kerusakan mekanis maupun korosi. Perawatan yang baik akan menjaga presisi alat tetap stabil dan memperpanjang umur pakainya.

Menguasai Teknik pengukuran mikrometer sekrup Adalah keterampilan fundamental yang sangat berharga di bengkel maupun laboratorium Teknik, kemampuan ini memastikan pengukuran yang akurat pada komponen dengan toleransi ketat, menghindari kesalahan perakitan, serta membentuk dasar untuk control kualitas yang efisien untuk siswa dan teknis, Latihan praktis yang dilakukan berulang kali dengan berbagai jenis mikrometer (luar, dalam, kedalaman, digital) akan mengembangkan kepekaan terhadap tekanan penjepit, pembacaan skala, serta pemahaman tentang sumber-sumber kesalahan, sehingga menghasilkan pengukuran yang konsisten dan dapat diandalkan.

D. Dial gauge



Gambar 4.8 dial gauge
(Freida McFadden, 2025)

Alat pengukur yang dikenal sebagai *dial gauge* atau *dial indicator* berkembang dari kebutuhan industri akan alat ukur yang mampu mendeteksi penyimpangan kecil pada permukaan dan poros secara cepat dan visual. Konsep dasar mengubah gerakan linier kecil menjadi pergerakan jarum pada skala berkembang sejak revolusi industri ketika produksi mesin presisi meningkat. Pada awalnya mekanisme ini dibuat secara mekanik sederhana, kemudian pada abad ke-20 desainya disempurnakan dengan pegas, roda gigi halus, dan skala yang tertutup untuk ketahanan. Kemajuan elektronik pada akhir abad ke-20 melahirkan varian digital yang menampilkan pembacaan angka langsung dan keluaran data untuk integrasi ke sistem pengukuran modern.

Dial gauge pada dasarnya terdiri dari badan indikator, poros atau batang penggerak dengan ujung sentuh, mekanisme pengalih gerak (rack pinion atau gear), skala melingkar dan jarum penunjuk. Terdapat beberapa jenis umum: *plunger-type dial indicator* (ujung lurus menekan ke bawah), *dial test indicator* atau *lever-type* (menggunakan tuas kecil untuk ruang terbatas dan pengukuran sudut), serta varian digital (display elektronik, tombol zero, output data). Resolusi dan kemampuan jangkauan bervariasi sesuai model, ada untuk pengukuran mikro pada laboratorium dan ada yang robust untuk kerja bengkel. Ujung kontak juga tersedia dalam berbagai bentuk (bola, kerucut, jarum) untuk menyesuaikan geometri benda kerja.



Gambar 4.9 plunger-type dial indicator dan dial test indicator
(Sexton Laura, 2025)



Gambar 4.10 dial gauge digital
(Morris Donna, 2025)

Dalam penggunaannya, dial gauge biasanya dipasang pada dudukan atau *magnetic stand* agar posisinya stabil selama proses pengukuran berlangsung. Penentuan posisi yang tepat sangat penting, karena kesalahan dalam orientasi alat dapat menyebabkan hasil pengukuran tidak akurat. Spindle dial gauge ditekan ringan terhadap permukaan benda kerja hingga jarum bergerak, kemudian posisi nol diatur pada skala utama. Setelah itu, permukaan benda digerakkan atau diperiksa terhadap standar datar untuk melihat perubahan posisi jarum. Setiap deviasi dari posisi nol menunjukkan adanya penyimpangan atau ketidakteraturan dimensi pada benda yang diperiksa.

Dial gauge memiliki dua jenis skala, yaitu skala utama berbentuk melingkar pada pelat muka (*dial face*) dan skala tambahan berbentuk kecil untuk menunjukkan jumlah putaran jarum utama. Skala utama biasanya memiliki pembagian hingga 100 atau 200 garis yang mewakili ketelitian 0,01 mm atau 0,001 mm per garis. Skala tambahan berfungsi untuk menghitung berapa kali jarum utama telah berputar penuh, sehingga nilai pengukuran dapat dibaca secara kumulatif. Dengan sistem ini, dial gauge mampu mendeteksi perubahan posisi yang sangat kecil dengan keandalan tinggi.

Cara membaca skala dial gauge dimulai dengan memperhatikan posisi jarum utama terhadap skala melingkar. Setiap garis menunjukkan satuan perubahan linear sesuai ketelitian alat, misalnya 0,01 mm per garis. Jika jarum utama bergerak melampaui satu putaran penuh, maka jumlah putaran tersebut dicatat menggunakan jarum kecil pada skala tambahan. Nilai total pengukuran diperoleh dengan menjumlahkan hasil dari skala utama dan skala tambahan, dengan memperhatikan arah gerak jarum (searah atau berlawanan jarum jam). Gerak searah jarum jam biasanya menunjukkan peningkatan penyimpangan positif, sedangkan gerak berlawanan menunjukkan penyimpangan negatif terhadap posisi referensi. Sebagai contoh, jika ketelitian dial gauge adalah 0,01 mm dan jarum utama menunjuk pada garis ke-37 setelah dua putaran penuh, maka hasil pengukuran adalah:

$$(2 \times 1mm) + (37 \times 0,01mm) = 2,37mm$$

Nilai tersebut menunjukkan besarnya penyimpangan dari bidang referensi atau posisi awal pengukuran. Hasil ini penting dalam proses perakitan dan inspeksi komponen, terutama pada industri otomotif, mesin presisi, dan manufaktur mold & die, di mana toleransi dimensi sangat ketat.

Setelah digunakan, dial gauge harus dikembalikan ke posisi nol, dilepas dari dudukannya, dan disimpan dalam kotak pelindung untuk menghindari benturan maupun tekanan berlebih pada spindle. Permukaannya juga perlu dibersihkan dengan kain lembut agar tidak terjadi karat dan akumulasi debu yang dapat mengganggu mekanisme roda gigi di dalamnya. Pemeliharaan yang baik akan menjaga akurasi dan sensitivitas alat, sehingga dial gauge tetap dapat diandalkan sebagai instrumen metrologi dalam jangka panjang.

E. Feeler gauge dan dial-thickness gauge



Gambar 4. 11 feeler gauge
(Sexton laura, 2025c)

Feeler gauge memiliki latar belakang historis yang sederhana, tuntutan untuk mengukur celah dan jarak yang sangat kecil dalam proses permesinan mendorong inovasi pengukuran tipis yang diproduksi secara massal sejak masa industri. Sebelumnya, pengukuran celah dilakukan dengan menggunakan lembaran logam tiruan dan pegangan sederhana, seiring perkembangan manufaktur, bilah-bilah presisi dengan ketebalan terstandar diproduksi dan disusun pada engsel sehingga mudah disimpan dan dikombinasikan. Sejarah singkat ini paralel dengan evolusi pengukur ketebalan lain yang lahir dari tuntutan akurasi yang lebih tinggi, kemudian meluas ke alat elektronik seperti pengukur ketebalan ultrasonik untuk aplikasi non-destruktif pada pipa dan plat tipis.

Secara konstruksi dan fungsi, *feeler gauge* adalah kumpulan bilah logam tipis bertanda ketebalan masing-masing yang digabungkan pada satu engsel/pivot. Set standar biasanya meliputi banyak nilai dalam rentan kecil sehingga untuk mendapatkan ketebalan tertentu pengguna dapat memakai satu atau beberapa bilah tumpukan. Sebagai pembanding, *dial-thickness gauge* memiliki dua permukaan pengukur (anvil dan spindle)

dan mekanisme dial untuk menampilkan ketebalan lembaran atau karet secara langsung. Di level lebih lanjut ada *ultrasonic thickness gauge* yang mengukur ketebalan material berongga atau berlapis tanpa memotong, prinsipnya mengukur waktu tempuh pulsa ultasonik dan mengkonversinya ke ketebalan menggunakan kecepatan rambat gelombang pada materi tersebut.



Gambar 4. 12 ultrasonic thickness gauge dan dial-thickness gauge
(bussinessmachinefala, 2025)

Sebelum digunakan, operator harus memastikan bahwa bilah-bilah feeler gauge dalam keadaan bersih, tidak berkarat, dan tidak tertekuk. Kotoran atau minyak yang menempel dapat memengaruhi akurasi pengukuran karena mengubah ketebalan aktual bilah. Pemilihan bilah dilakukan dengan cara menyesuaikan nilai nominal celah yang ingin diperiksa. Apabila satu bilah tidak sesuai, beberapa bilah dapat digabung untuk memperoleh ketebalan total tertentu. Penggabungan bilah harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak menimbulkan gaya lentur yang berlebihan yang dapat menyebabkan pembacaan salah.

Proses pengukuran dilakukan dengan memasukkan bilah feeler gauge di antara dua permukaan benda yang diukur. Bila bilah dapat digerakkan dengan sedikit hambatan, maka ketebalan bilah tersebut dianggap sama dengan lebar celah yang diukur. Jika bilah terlalu longgar atau terlalu

ketat, maka pengguna harus mengganti atau menambah kombinasi bilah sampai mendapatkan gaya geser yang ideal. Prinsip ini memungkinkan pengukuran dilakukan dengan cepat dan akurat tanpa memerlukan pembacaan skala visual seperti pada jangka sorong atau mikrometer.

Feeler gauge tidak memiliki skala putar atau garis ukur seperti alat ukur presisi lainnya, sehingga pembacaan nilai dilakukan langsung berdasarkan angka ketebalan yang tertera pada setiap bilah. Ketebalan ini merupakan hasil pengukuran pabrikan dengan akurasi tinggi. Bila beberapa bilah digunakan bersamaan, maka hasil pengukuran diperoleh dengan menjumlahkan nilai ketebalan masing-masing bilah. Dengan demikian, pengguna dapat menentukan celah aktual secara langsung melalui perhitungan sederhana.

Sebagai contoh, jika dilakukan pengukuran celah katup mesin dan didapatkan bahwa kombinasi bilah 0,10 mm + 0,05 mm + 0,03 mm dapat dimasukkan dengan sedikit hambatan, maka total ketebalan feeler gauge tersebut adalah:

$$0,10 + 0,05 + 0,03 = 0,18mm$$

Artinya, celah katup mesin tersebut memiliki jarak sebesar 0,18 mm. Jika spesifikasi pabrikan mensyaratkan celah antara 0,15 mm hingga 0,20 mm, maka hasil pengukuran ini masih berada dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Sebaliknya, jika hasilnya melebihi 0,20 mm atau kurang dari 0,15 mm, maka perlu dilakukan penyetelan ulang untuk menjaga efisiensi pembakaran dan umur komponen.

Selain untuk pengukuran celah, feeler gauge juga sering digunakan untuk memeriksa kerataan dua bidang yang dirakit, misalnya pada pemasangan blok silinder, pelat dasar, atau komponen presisi lainnya. Nilai penyimpangan dapat ditentukan dengan mencoba berbagai kombinasi bilah hingga ditemukan ketebalan maksimum yang dapat masuk di antara celah tersebut. Hal ini menjadikan feeler gauge alat penting dalam pengujian kesesuaian komponen mekanik.

Setelah digunakan, bilah feeler gauge harus dibersihkan dari minyak mesin atau kotoran menggunakan kain lembut, kemudian dilapisi sedikit

oli tipis untuk mencegah korosi. Alat ini sebaiknya disimpan dalam wadah tertutup untuk menjaga kelurusan dan mencegah kerusakan fisik. Pemeliharaan yang baik akan mempertahankan keakuratan ketebalan setiap bilah, sehingga feeler gauge tetap dapat digunakan secara andal dalam pemeriksaan presisi jangka panjang.

F. Rangkuman

1. Alat ukur mekanik dasar seperti jangka sorong, mikrometer sekrup, dial gauge, dan feeler gauge memiliki peran penting dalam pengukuran dimensi, ketebalan, celah, maupun ketepatan posisi. Masing-masing alat dikembangkan dari kebutuhan industri akan akurasi tinggi dan telah berevolusi dari bentuk mekanik sederhana menuju varian digital yang lebih praktis.
2. Prinsip kerja alat ukur mekanik didasarkan pada konversi gerakan linier atau ulirsekrup menjadi skala terukur yang dapat dibaca dengan presisi. Ketelitian pengukuran ditentukan oleh konstruksi alat (skala vernier, ulir halus, mekanisme jarum, dan bilah standar) serta keterampilan operator dalam membaca hasil ukur dan menjaga konsistensi gaya pengukuran.
3. Ketelitian dan keandalan hasil pengukuran sangat berpengaruh pada prosedur penggunaan, kebersihan permukaan, kalibrasi alat, serta perawatan rutin. Pemahaman yang baik tentang cara kerja, batas toleransi, dan sumber kesalahan tiap alat akan meningkatkan kualitas hasil ukur serta mendukung proses kontrol mutu di industri manufaktur maupun laboratorium teknik.

G. Tes formatif

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara jangka sorong mekanik dan jangka sorong digital!
2. Mengapa Pierre Vernier dianggap berperan penting dalam sejarah perkembangan jangka sorong?



BAB V

Alat Ukur Sudut dan Optik

A. Deskripsi singkat

Alat ukur sudut dan optik merupakan instrumen penting dalam dunia teknik yang berfungsi untuk mengukur sudut, kemiringan, serta bentuk geometris suatu benda kerja. Pengukuran sudut diperlukan dalam proses perancangan maupun perakitan, karena kesalahan sudut dapat mengakibatkan ketidaksesuaian dimensi dan menurunkan kualitas produk. Mulai dari alat sederhana seperti busur derajat hingga bevel protractor, semuanya memiliki peran dalam memberikan hasil pengukuran dengan tingkatan akurasi yang berbeda sesuai kebutuhan.

Dengan kemajuan teknologi, kebutuhan akan alat ukur sudut presisi semakin meningkat, terutama dalam sektor manufaktur dan industri modern. Alat optik seperti mikroskop pengukur dan proyektor profil merupakan solusi untuk meraih ketelitian tinggi pada objek berukuran kecil atau dengan bentuk yang rumit. Keunggulan utama peralatan optik terletak pada kemampuan mengukur tanpa kontak langsung dengan objek,

membuatnya sangat efektif untuk digunakan pada material yang rapuh, halus atau memiliki permukaan sensitif.

Dalam dunia industri, penggunaan alat ukur sudut dan optik sangat beragam, mencakup kalibrasi bagian mesin, pemeriksaan profil gigi roda, hingga penilaian kualitas produk presisi. Melalui penguasaan penggunaan alat-alat ini, teknisi dapat memastikan bahwa setiap produk sesuai dengan standar internasional dan toleransi yang ditentukan. Oleh sebab itu, pemahaman yang mendalam mengenai prinsip operasional, kelebihan, serta batasan dari alat ukur sudut dan optik menjadi landasan penting bagi siapa saja yang berprofesi di bidang teknik dan metrologi.

B. Alat ukur sudut presisi

Alat ukur sudut presisi berkembang sejalan dengan kebutuhan manufaktur dan ilmu ukur yang menuntut akurasi sudut jauh melampaui kemampuan busur derajat sederhana. Pada masa Revolusi industri hingga abad ke-19, teknik pembuatan ulir dan cara pembagian skala memungkinkan pembuatan instrumen sudut yang semakin halus, selanjutnya kemajuan optik dan elektronik melahirkan alat-alat presisi seperti sine bar dengan gauge block, autocollimator optik, dan rotary table dengan enkoder digital. Perkembangan ini mengubah pengukuran sudut dari pekerjaan tata letak kasar menjadi aktivitas metrologi yang dapat ditelusuri ke standar nasional dan internasional, sehingga dipakai untuk kalibrasi jig, inspeksi sudut komponen, dan verifikasi fixture. Jenis alat ukur sudut presisi yang sering digunakan meliputi:

hingga mencapai nilai tertentu. Kemudian, nilai dibagi dengan jarak antara dua rol untuk mendapatkan nilai sinus sudut, yang selanjutnya dikonversikan ke dalam satuan derajat menggunakan tabel trigonometri atau kalkulator ilmiah. Hasil ini menunjukkan besar sudut benda kerja yang diukur atau dibentuk.

Sebagai contoh, misalkan digunakan sine bar dengan jarak antar rol $L = 200$ mm, dan tinggi blok ukur yang digunakan adalah $h = 50$ mm.. Maka sudut kemiringan dapat dihitung dengan rumus:

$$\sin(\theta) = \frac{50}{200} = 0,25$$

Selanjutnya, nilai sinus tersebut dikonversikan menjadi sudut:

$$\theta = \arcsin(0,25) = 14,48^\circ$$

Dengan demikian, kemiringan permukaan benda kerja terhadap bidang horizontal adalah 14,48 derajat. Nilai ini dapat dikatakan sangat akurat, karena sine bar mampu memberikan hasil hingga ketelitian $0,01^\circ$ jika dikombinasikan dengan slip gauge presisi tinggi.

Sebaliknya, jika sudut θ yang diinginkan telah diketahui dan ingin dicari ketinggian blok ukur yang harus digunakan, maka rumusnya diturunkan menjadi:

$$h = L \times \sin(\theta)$$

Sebagai contoh, untuk membuat sudut sebesar menggunakan sine bar dengan panjang , maka tinggi blok ukur yang diperlukan adalah:

$$h = 100 \times \sin(30^\circ) = 100 \times 0,5 = 50 \text{ mm}$$

Artinya, blok ukur dengan total ketinggian 50 mm harus ditempatkan di bawah salah satu rol agar sine bar membentuk sudut 30° .

Dalam praktik industri, pembacaan hasil sine bar sering dilakukan bersamaan dengan penggunaan *dial indicator* untuk memastikan

permukaan benda kerja benar-benar sejajar dengan batang sine bar saat pengukuran. Kombinasi alat ini memungkinkan evaluasi sudut dilakukan secara simultan dengan ketelitian tinggi. Setelah selesai digunakan, sine bar harus dibersihkan dan disimpan di tempat yang kering, karena permukaan presisinya sangat sensitif terhadap karat dan benturan. Pemeliharaan yang baik akan menjaga linearitas jarak antar rol dan mempertahankan akurasi trigonometri alat dalam jangka panjang.

Komponen utama pada sine bar adalah batang utama (bar body) terbuat dari baja keras yang digiling dengan presisi tinggi dan dilapisi bahan anti karat untuk menjaga ketahanan serta akurasi pengukuran. Pada kedua ujung batang ini terpasang dua silinder (rollers) secara permanen dengan jarak pusat ke pusat (L) yang telah diketahui dan memiliki ketelitian tinggi. Selain itu, terdapat lubang atau tanda referensi yang berfungsi untuk memastikan posisi dan orientasi alat saat digunakan, sehingga pengukuran sudut dapat dilakukan dengan tepat.

Cara penggunaannya:

- Letakkan *sine bar* di atas *surface plate* datar.
- Salah satu roller diletakkan langsung di permukaan, sedangkan roller lainnya ditopang oleh *gauge block* dengan ketinggian .
- Tempatkan benda kerja di atas bar dan pastikan tidak bergeser.
- Gunakan *dial indicator* atau *autocollimator* untuk memastikan posisi benda sejajar dan mencapai sudut yang diinginkan.
- Untuk mengukur sudut tak diketahui, atur tinggi *gauge block* sampai permukaan benda sejajar (*dial indicator* menunjukkan nol), lalu hitung sudut menggunakan rumus $\theta = \arcsin(\frac{h}{L})$.
- Untuk membentuk sudut tertentu, hitung dulu tinggi *gauge block* , lalu atur kombinasi *gauge block* $h=L \times \sin(\theta)$, sesuai nilai tersebut.

Sine bar digunakan untuk berbagai keperluan pengukuran dan penyetelan presisi. Alat ini berfungsi untuk mengukur sudut pada benda kerja dengan tingkat ketelitian tinggi, serta membantu dalam menyetel sudut tertentu pada mesin, seperti meja miling atau surface grinder. Selain itu, sine bar juga digunakan untuk mengkalibrasi alat ukur sudut lainnya, seperti bevel protractor atau angle gauge. Alat ini berperan penting dalam memeriksa ketepatan alat maupun benda yang memiliki permukaan bersudut agar sesuai dengan standar geometrik yang diinginkan.

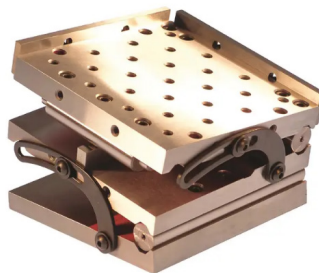
Jeni-jenis *sine bar*

1. *Plain sine bar*, tipe deluxe tiga silinder tetap.



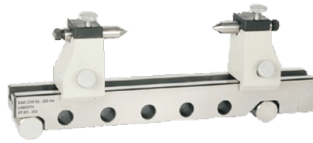
Gambar 5.5 sine bar
(Orbit6881, 2025)

2. *Compound sine bar*, terdiri dari dua sine bar yang digabungkan untuk mengukur sudut kompleks.



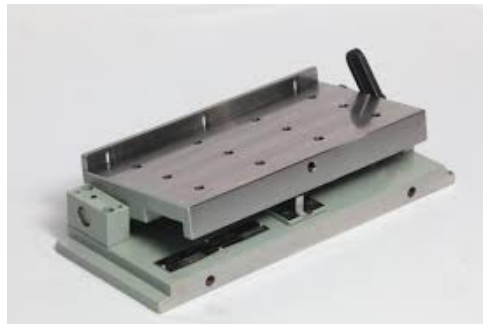
Gambar 5.6 Compound sine bar
(higherprecision, 2025)

3. *Sine center*, memiliki dudukan berbentuk V untuk memegang benda silindris.



Gambar 5.7 sine center
(ISO 9001, 2015)

4. *Sine table*, versi besar berbentuk meja datar dengan engsel dan pengatur ketinggian untuk pekerjaan berat atau pengukuran di mesin.



Gambar 5. 8 sine table
(Measuring Yuzuki, 2024)

Untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat dengan *sine bar*, penting untuk memperhatikan berbagai sumber kesalahan dan menerapkan langkah langkah pencegahan. Pastikan *surface plate* dalam kondisi bersih dan rata agar tidak mempengaruhi kestabilan alat. Hindari adanya debu atau serpihan logam di antara blok ukur dan *roller*, karena dapat menyebabkan kesalahan pembacaan sudut. Gunakan *gauge block* yang telah terkalibrasi untuk menjamin ketepatan

dimensi. Selain itu, jaga suhu ruangan tetap konstan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi termal yang memengaruhi hasil pengukuran. *Roller* juga perlu diperiksa kesejajaran dan kebersiannya sebelum digunakan. Untuk pengukuran sudut dengan tingkat akurasi tinggi disarankan menggunakan autocolimator sebagai alat bantu tambahan.

Angle gauge block

Angle gauge block adalah alat ukur presisi berbentuk balok logam yang dibuat dengan sudut tertentu dan akurasi tinggi, digunakan untuk menetapkan atau memverifikasi sudut dalam pekerjaan metrologi, permesinan, dan kalibrasi. Prinsipnya mirip dengan *gauge block*, namun bukan berdasarkan panjang linear, melainkan besar sudut. Angle gauge block memungkinkan pengguna untuk membentuk berbagai sudut kombinasi secara presisi dengan cara menumpuk (*wringing*) beberapa blok sesuai kebutuhan, sehingga bisa menghasilkan sudut akurat dalam hitungan menit bahkan detik busur.

Angle gauge block terbuat dari bahan baja keras (*hardened steel*) atau karbida dengan dua bidang datar yang membentuk sudut presisi tertentu, misalnya 1° , 3° , 5° , 15° , 30° , dan sebagainya. Permukaannya digiling serta dilap hingga mencapai tingkat kerataan dan kehalusan yang sangat tinggi, sehingga dua blok dapat direkatkan satu sama lain melalui proses *wringing* seperti pada *gauge block*. Setiap blok dilengkapi dengan ukiran nilai sudut nominal pada permukaannya untuk memudahkan identifikasi. Beberapa set angle gauge block juga dilengkapi dengan blok menit dan detik busur, yang memungkinkan pembentukan sudut kecil dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Angle gauge block memiliki nilai sudut tertentu (misalnya 1° , 3° , 9° , 27° , dst.). Dengan menggabungkan beberapa blok secara seri (menghadap berlawanan arah), pengguna dapat membentuk berbagai kombinasi sudut sesuai kebutuhan. Sistem kombinasi umumnya mengikuti deret biner (1° ,

3°, 9°, 27°...) sehingga total kombinasi bisa mencakup hampir semua nilai sudut dari 0° hingga 90° dengan langkah sangat kecil.

Sebelum digunakan, angle gauge block harus diperiksa kebersihannya dan dipastikan permukaannya bebas dari debu atau minyak. Setiap balok memiliki dua permukaan datar yang sangat halus dan presisi, sehingga dapat saling menempel secara rapat dengan metode *wringing* (penggosokan ringan antarpermukaan hingga menempel akibat gaya molekuler). Proses ini penting untuk menghindari kesalahan akibat adanya celah udara di antara blok. Setelah dipastikan menempel sempurna, kombinasi blok dapat digunakan untuk mengatur posisi meja sudut, mengkalibrasi sudut pada mesin, atau memeriksa keakuratan alat ukur optik seperti *sine bar* dan *autocollimator*.

Pembacaan hasil perhitungan pada angle gauge block dilakukan dengan menjumlahkan nilai sudut dari setiap blok yang digunakan dalam kombinasi. Nilai total sudut diperoleh dari penjumlahan derajat, menit, dan detik busur sesuai standar pengukuran sudut. Untuk menghindari kesalahan, setiap blok yang digunakan harus memiliki orientasi yang benar (arah positif atau negatif) sesuai rancangan pengaturan sudut. Perhitungan ini bersifat linear, sehingga total sudut merupakan hasil aritmetika dari seluruh blok yang disusun.

Sebagai contoh, misalkan digunakan tiga blok sudut dengan nilai sebagai berikut:

- Blok A = 1° 30' 00"
- Blok B = 0° 20' 15"
- Blok C = 0° 10' 45"

Maka total sudut yang diperoleh dari kombinasi ketiganya adalah:

$$1^{\circ}30'00'' + 0^{\circ}20'15'' + 0^{\circ}10'45'' = 2^{\circ}01'00''$$

Langkah perhitungannya dilakukan secara sistematis dengan menjumlahkan satuan detik terlebih dahulu:

$$00 + 15 + 45 = 60 = 1'$$

Kemudian, hasil 1 menit dari konversi detik ditambahkan ke jumlah menit:

$$30' + 20' + 10' + 1' = 61' = 1^{\circ} 01'$$

Terakhir, jumlah derajat dihitung dengan memasukkan tambahan 1° dari konversi menit:

$$1^{\circ} + 0^{\circ} + 0^{\circ} + 1^{\circ} = 2^{\circ}$$

Maka total sudut akhir dari kombinasi ketiga blok tersebut adalah $2^{\circ} 01' 00''$.

Dalam praktik industri, hasil ini digunakan untuk mengatur sudut meja kerja atau memverifikasi keakuratan pengukuran sudut pada alat inspeksi. Misalnya, bila ingin mengatur *sine bar* dengan panjang 100 mm untuk menghasilkan sudut $2^{\circ} 01' 00''$, maka tinggi blok pengganjal (*height block*) dapat dihitung dengan rumus:

$$h = L \times \sin(\theta)$$

$$L = 100\text{mm} \quad \theta = 2^{\circ} 01' = 2,0167^{\circ}$$

$$h = 100 \times \sin(2,0167^{\circ}) = 100 \times 0,03518 = 3,518\text{mm}$$

Artinya, untuk menghasilkan sudut $2^{\circ} 01' 00''$ menggunakan *sine bar* sepanjang 100 mm, diperlukan blok pengganjal setinggi 3,518 mm.

Setelah pengukuran selesai, setiap angle gauge block harus dibersihkan dari minyak dan debu, kemudian disimpan dalam wadah berlapis lembut agar permukaannya tidak tergores. Perawatan yang baik sangat penting karena goresan sekecil apa pun dapat mengubah nilai sudut yang sebenarnya. Dengan prosedur penggunaan dan pembacaan yang benar, angle gauge block mampu memberikan ketepatan pengukuran yang tinggi, menjadikannya alat penting dalam kalibrasi, metrologi sudut, dan pengujian akurasi alat ukur presisi.

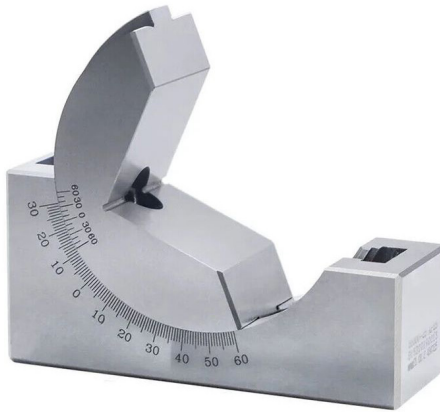
Jenis-jenis angle gauge blocks

1. Angle gauge block set, blok-blok dengan sudut tetap (misal 1° , 3° , 9° , 27°).



Gambar 5.9 Angle gauge block set
(McFadden Freida, 2024a)

2. Adjustable angle gauge block, memiliki dua pelat datar yang bisa diatur dengan sekrup hingga sudut tertentu, dilengkapi skala dan *vernier* untuk pembacaan. Umumnya digunakan untuk pekerjaan cepat yang tidak memerlukan akurasi tinggi.



Gambar 5.10 Adjustable angle gauge block
(Honest factory, 2024)

Angle gauge block memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi, umumnya mencapai 1 detik busur untuk blok standar laboratorium.

Agar presisi tetap terjaga, blok ini harus disimpan dalam wadah berlapis beludru guna mencegah goresan, diperhatikan kebersiannya, serta disimpan pada kondisi kelembapan rendah dengan lapisan minyak pelindung tipis untuk mencegah korosi. Pengguna juga perlu menghindari benturan atau jatuhnya blok karena dapat merusak bidang presisinya.

Dari sisi keunggulan, angle gauge block tidak memerlukan perhitungan trigonometri seperti sine bar, memungkinkan pembentukan sudut presisi secara cepat dan langsung, serta dapat berfungsi sebagai standar kalibrasi sudut. Selain itu, alat ini memiliki stabilitas tinggi dan tidak mudah terpengaruh oleh perubahan suhu maupun getaran kecil. Selain keunggulan, Angle gauge block memiliki beberapa keterbatasan, antara lain hanya mampu menghasilkan sudut-sudut diskrit sesuai kombinasi blok yang tersedia, harganya relatif mahal terutama untuk set dengan presisi tinggi, dan memerlukan perawatan serta penanganan yang sangat hati-hati agar tidak rusak atau tergores.

Autocollimator

Autocollimator merupakan instrumen optik presisi tinggi yang digunakan untuk mengukur sudut kecil (*angular displacement*) dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi hingga sekon busur (*arc second*). Alat ini bekerja berdasarkan prinsip pantulan sinar cahaya (refleksi), di mana perubahan sudut pada cermin pantul akan menyebabkan pergeseran posisi bayangan (refleksi balik) di bidang pengamat atau detektor. Autocollimator banyak digunakan di laboratorium metrologi optik, industri permesinan presisi, dan kalibrasi alat ukur untuk mengukur kerataan, kesikuan, paralelisme, serta penyimpangan sudut pada komponen atau sistem mekanik.

Prinsip kerja *autocollimator* didasarkan pada fenomena refleksi baik dari sinar kolimasi. Prosesnya dimulai dari sumber cahaya, biasanya berupa LED atau lampu tungsten, yaitu dipancarkan dan difokuskan melalui *reticle* berupa *grating* atau *crosshair*. Cahaya ini kemudian melewati

lensa kolimator untuk membentuk berkas cahaya sejajar (*collimated beam*) yang diarahkan menuju cermin pantul. Ketika cermin berada tegak lurus terhadap sumbu optik, berkas cahaya akan berimpit. Namun, jika cermin berputar sedikit membentuk sudut kecil (θ), maka berkas pantul akan mengalami deviasi sebesar dua kali sudut tersebut (2θ), sehingga bayangan reticle bergeser pada bidang pengamatan. Pergeseran ini kemudian diukur menggunakan mikrometer optik atau dektor elektronik, dan hasilnya dikonversi menjadi besaran sudut menggunakan rumus geometris.

Sebelum dilakukan pengukuran, autocollimator harus dikalibrasi terlebih dahulu dengan menempatkan cermin standar sejajar terhadap sumbu optik alat hingga berkas pantul tepat kembali ke titik nol pada skala pengamatan. Setelah posisi nol ditetapkan, cermin pengukur atau benda kerja diposisikan sedemikian rupa sehingga permukaannya menerima berkas cahaya dari alat. Bila permukaan tersebut miring terhadap sumbu optik, maka berkas pantul akan bergeser dan menyebabkan jarum atau skala mikrometer menunjukkan penyimpangan dari posisi nol. Besarnya penyimpangan ini sebanding dengan besarnya sudut kemiringan permukaan yang diukur.

Autocollimator dapat dilengkapi dengan dua jenis sistem pembacaan, yaitu skala mikrometer optik analog dan pembacaan digital. Pada versi analog, pergeseran bayangan skala diamati melalui okuler, kemudian jarak perpindahan bayangan dihitung menggunakan pembagian skala dengan nilai *least count* yang sudah diketahui. Sedangkan pada versi digital, alat secara otomatis mengubah pergeseran optik menjadi nilai sudut dalam satuan menit atau detik busur. Umumnya, hubungan antara perpindahan bayangan linear (d) dan sudut deviasi (θ) dapat dinyatakan dengan rumus:

$$\theta = \frac{d}{2f}$$

dimana f adalah panjang fokus sistem optik autocollimator. Faktor 2 muncul karena sudut pantulan cahaya dua kali lipat dari sudut kemiringan cermin terhadap sumbu datang.

Sebagai contoh, jika hasil pengamatan menunjukkan bahwa bayangan skala bergeser sejauh 0,50 mm, dan panjang fokus lensa autocollimator adalah 500 mm, maka sudut kemiringan permukaan dapat dihitung sebagai:

$$\theta = \frac{0,50}{2 \times 500} = \frac{0,50}{1000} = 0,0005 \text{ radian}$$

Untuk merubah ke satuan derajat:

$$0,0005 \times \frac{180}{\pi} = 0,0286^\circ$$

Dan dalam satuan menit busur (arcminute)

$$0,0286^\circ \times 60 = 1,72'$$

atau sekitar 1 menit 43 detik busur (1'43"). Artinya, permukaan yang diukur memiliki kemiringan sebesar 1,72 menit terhadap posisi referensi datar.

Pembacaan hasil seperti ini penting dalam verifikasi kerataan *surface plate*, penyetelan meja mesin presisi, serta pengujian kesikuan pada sistem mekanik. Semakin kecil nilai sudut yang terdeteksi, semakin tinggi pula kualitas perataan atau keselarasan sistem yang diuji. Oleh karena itu, pengoperasian autocollimator memerlukan lingkungan stabil tanpa getaran dan fluktuasi suhu, karena gangguan sekecil apa pun dapat memengaruhi jalur optik dan menghasilkan kesalahan pembacaan.

Setelah proses pengukuran selesai, autocollimator harus dikembalikan ke posisi nol dan lensa ditutup dengan pelindung untuk mencegah debu atau kelembapan masuk ke dalam sistem optik. Perawatan secara berkala, seperti kalibrasi ulang dan pemeriksaan keselarasan optik, perlu dilakukan agar alat tetap memberikan hasil yang konsisten dan akurat. Dengan demikian, autocollimator menjadi instrumen penting dalam metrologi sudut dan kontrol kualitas pada berbagai industri presisi seperti manufaktur optik, kedirgantaraan, dan instrumentasi ilmiah.

Autocollimator terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu untuk menghasilkan pengukuran sudut dengan presisi tinggi. Sumber cahaya berfungsi menghasilkan sinar yang kemudian difokuskan melalui *reticle* sebagai pola referensi untuk menentukan posisi nol. Cahaya tersebut diteruskan melalui lensa kolimator yang membentuk berkas cahaya sejajar (*collimated beam*) sebelum diarahkan ke cermin pantul yang dipasang pada objek atau benda kerja yang sudutnya akan diukur. Pantulan cahaya dari cermin kemudian diterima oleh *okuler* atau sistem pembaca, seperti *eyepiece* atau kamera CCD, untuk menampilkan pergeseran bayangan. Pergeseran ini diukur menggunakan skala mikrometer atau detektor digital guna menghitung nilai sudut yang terbentuk. Pada versi digital, autocollimator dilengkapi dengan sensor CCD atau CMOS yang menangkap bayangan secara otomatis, sementara perangkat lunak internal menghitung nilai sudut dengan resolusi sangat tinggi, bahkan mencapai 0,01 detik busur.

Jenis-jenis autocollimator:

1. *Visual Autocollimator*, pembacaan dilakukan secara manual melalui eyepiece dengan mikrometer optik. Umumnya digunakan di laboratorium metrologi klasik



Gambar 5.11 Visual Autocollimator
(Hobson taylor, 2023c)

2. *Digital autocollimator*, menggunakan detektor elektronik (CCD/CMOS) untuk mendeteksi posisi pantulan dan menghitung sudut otomatis. Dilengkapi antar muka komputer untuk dokumentasi dan analisis data.



Gambar 5.12 Digital autocollimator
(Hobson taylor, 2023)

3. *Dual-axis autocollimator*, mampu mengukur dua komponen secara bersamaan. Cocok untuk pengukuran kesikuan, paralelisme, atau kerataan permukaan.



Gambar 5.13 Dual-axis autocollimator
(Hobson taylor, 2023)

Autocollimator berfungsi sebagai alat ukur optik presisi yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur sudut-sudut kecil dengan tingkat ketelitian sangat tinggi. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur rotasi

cermin, kemiringan bidang, maupun deviasi pada sistem optik. Dalam bidang kalibrasi, autocollimator berperan penting untuk memverifikasi ketepatan alat ukur sudut lainnya seperti sine bar, angle block, dan surface plate. Selain itu, alat ini juga digunakan untuk menilai kerataan (*flatness*) permukaan meja atau pelat referensi, memeriksa kesikuan (*squareness*) antar permukaan atau komponen mesin, serta menguji paralelisme antara dua bidang atau dua sumbu. Di bidang optika, autocollimator sering dimanfaatkan untuk pengujian kualitas sistem optik seperti lensa, prisma, dan cermin guna memastikan kesesuaian sudut serta keselarasan optik sesuai standar presisi.

Rotary table

Rotary table atau meja putar merupakan alat mekanik presisi yang berfungsi untuk memutar benda kerja atau instrumen ukur secara terkendali pada suatu sumbu tertentu, umumnya dalam bidang datar, horizontal, dan vertikal. Alat ini berperan dalam pengaturan dan pengukuran sudut rotasi dengan tingkat ketelitian tinggi, baik secara manual maupun otomatis, sehingga banyak digunakan dalam proses pemotongan, pengukuran sudut, pembagian lingkaran, serta kalibrasi peralatan ukur.

Rotary table banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang teknik dan metrologi. Dalam proses permesinan, alat ini digunakan pada mesin frais (*milling*) dan mesin boring untuk menghasilkan pemotongan berbentuk melingkar atau berpola sudut tertentu. Di bidang pengukuran, *rotary table* diterapkan pada optical comparator atau profile projector untuk membantu pengukuran sudut secara presisi. Selain itu, di laboratorium metrologi, alat ini berfungsi dalam kalibrasi sudut dengan tingkat akurasi tinggi. *Rotary table* juga digunakan dalam pengujian instrumen optik seperti autocollimator dan theodolite guna memastikan ketepatan pengukuran sudut dan rotasi.

Komponen utama pada *rotary table* terdiri dari beberapa bagian penting yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan rotasi presisi. Bagian utama adalah meja putar (*rotary plate*), yaitu permukaan datar

berbentuk bundar yang dilengkapi dengan alur T (*T-slots*) untuk menjepit benda kerja atau perlengkapan tambahan. Poros pusat (*spindle*) berfungsi sebagai sumbu rotasi meja, dipasang pada bantalan presisi agar putaran halus dan bebas getaran. Sistem *gearbox* dan *worm gear* menjadi mekanisme penggerak reduksi yang memungkinkan rotasi terkendali dengan rasio umum seperti 1;40, 1;72, atau 1;90, di mana satu putaran penuh pada *crank* menghasilkan putaran kecil pada meja. *Crank handle* (engkol) digunakan untuk memutar meja secara manual, dengan pembacaan sudut melalui *graduated scale* dan *vernier* yang menunjukkan besar sudut putar dalam satuan derajat, menit, dan detik. Untuk menjaga posisi meja agar tidak bergerak selama proses permesinan atau pengukuran, digunakan *lock clamp* (kunci pengunci). Seluruh komponen tersebut ditopang oleh *base* (dudukan) yang memastikan kestabilan serta memungkinkan pemasangan dalam orientasi horizontal maupun vertikal sesuai kebutuhan aplikasi.

Jenis-jenis *rotary table*:

1. *Manual rotary table*, dioperasikan secara mekanik dengan *crank* dan *vernier scale*, umum pada mesin konvesional atau pengukuran sederhana



Gambar 5. 14 Manual rotary table
(sherline, 2022)

2. *Motorized/CNC rotary table*, digerakan oleh motor servo dan dikontrol komputer, memungkinkan rotasi otomatis dan pembagian sudut yang sangat presisi



Gambar 5.15 Motorized/CNC rotary table
(sherline, 2024)

3. *Optical rotary table*, digunakan dalam laboratorium metrologi, dilengkapi sistem pembacaan optik untuk kalibrasi sudut dengan akurasi hingga detik busur.



Gambar 5.16 Optical rotary table
(McFadden Freida, 2024)

4. *Tilting rotary table*, dapat ditempatkan dalam posisi vertikal pada sumbu tambahan sehingga menghasilkan kombinasi antar gerakan rotasi dan kemiringan, berguna untuk proses pemesinan 3D atau kalibrasi multi-sumbu.



Gambar 5.17 Tilting rotary table
(Supplier industrial, 2025)

Prinsip kerja *rotary table* didasarkan pada mekanisme rotasi presisi yang dihasilkan oleh sistem *worm gear*. Ketika crank handle diputar, *worm gear* akan menggerakkan meja putar sesuai dengan rasio perbandingan tertentu, misalnya 1;90, sehingga setiap satu putaran penuh engkol menghasilkan rotasi kecil namun sangat akurat pada meja. Besarnya sudut rotasi ditunjukkan melalui skala derajat dan *vernier* yang tertera pada alat. Untuk keperluan pembagian sudut tertentu, seperti pembuatan 12 lubang dengan jarak yang sama pada satu lingkaran, engkol diputar sejumlah putaran dan pecahan putaran sesuai hasil perhitungan indexing. Pada jenis *rotary table* modern, terutama versi optik/digital, sudut rotasi dapat terbaca langsung melalui sensor sudut atau encoder resolusi tinggi, sehingga meningkatkan ketelitian dan kemudahan pengoperasian.

Cara penggunaan:

- Pasang *rotary table* di atas meja mesin atau surface plate yang datar.
- Pastikan permukaan meja datar dan sejajar dengan sumbu referensi.
- Kencangkan benda kerja atau alat ukur di atas meja melalui *T-slot*.
- Setel posisi nol pada skala sudut atau encoder.

- Putar *crank* (pada model manual) atau masukkan nilai sudut (pada model digital/CNC) untuk mencapai posisi yang diinginkan.
- Kunci meja (*lock clamp*) setelah posisi tercapai.
- Lakukan pemotongan, pengukuran, atau kalibrasi sesuai kebutuhan.
- Untuk verifikasi, gunakan *autocollimator* atau *dial indicator* untuk memastikan posisi sudut akurat.

Pembacaan hasil pengaturan sudut pada rotary table dilakukan melalui dua komponen utama, yaitu skala utama (*main scale*) dan skala vernier (*nonius scale*). Skala utama menunjukkan pembacaan dalam satuan derajat penuh, sedangkan skala vernier digunakan untuk membaca pecahan derajat dengan ketelitian hingga 1 menit atau bahkan 20 detik, tergantung pada jenis alat. Jarum penunjuk atau garis indeks pada badan rotary table menjadi acuan dalam menentukan posisi bacaan. Setiap kali meja diputar, posisi garis indeks akan berpindah terhadap skala utama dan vernier, menunjukkan sudut rotasi yang telah dicapai.

Ketelitian atau *least count* dari rotary table tergantung pada jumlah pembagian pada skala vernier. Rumus umum untuk menentukan ketelitian adalah:

$$\text{ketelitian} = \frac{1 \text{ pembagian skala utama}}{\text{jumlah pembagian skala vernier}}$$

Sebagai contoh, apabila satu pembagian skala utama mewakili 1° , dan terdapat 60 pembagian pada skala vernier, maka ketelitiannya adalah:

$$\frac{1^\circ}{60} = 1' (\text{satu menit sudut})$$

Artinya, rotary table tersebut mampu mengatur rotasi dengan ketelitian hingga 1 menit busur.

Prosedur membaca hasil rotasi dilakukan dengan langkah-langkah berikut. Pertama, amati nilai sudut pada skala utama yang tepat berada di sebelah kiri garis indeks. Nilai tersebut menunjukkan jumlah derajat penuh yang telah dicapai. Kedua, temukan garis pada skala vernier yang sejajar sempurna dengan salah satu garis pada skala utama. Angka pada garis sejajar tersebut dikalikan dengan nilai ketelitian alat untuk memperoleh pembacaan tambahan dalam satuan menit atau detik. Nilai akhir rotasi merupakan penjumlahan antara pembacaan skala utama dan hasil perhitungan dari skala vernier.

Sebagai contoh, misalkan skala utama menunjukkan nilai 48° , dan garis vernier ke-17 sejajar dengan garis pada skala utama. Jika ketelitian rotary table adalah $1'$ (satu menit), maka hasil rotasinya dapat dihitung sebagai:

$$48^\circ + (17 \times 1') = 48^\circ 17'$$

Dengan demikian, meja telah berputar sejauh 48 derajat 17 menit dari posisi nol. Jika digunakan rotary table dengan ketelitian $2'$, maka hasil perhitungannya menjadi:

$$48^\circ + (17 \times 2') = 48^\circ 34'$$

Hasil ini menunjukkan tingkat presisi rotasi yang tinggi dan sangat berguna untuk pekerjaan seperti pembuatan roda gigi dengan jumlah gigi tertentu atau pembagian lubang simetris dalam bidang melingkar.

Selain pengaturan manual, beberapa rotary table modern dilengkapi dengan *digital readout (DRO)* yang secara otomatis menampilkan sudut rotasi hingga satuan detik busur. Namun, prinsip pembacaan dan perhitungan dasarnya tetap sama, yaitu kombinasi antara pembacaan derajat penuh dan pecahan derajat. Setelah proses selesai, rotary table harus dikembalikan ke posisi awal, dikunci menggunakan *clamping bolt*, serta dibersihkan dari serpihan logam dan oli. Pemeliharaan rutin penting untuk menjaga kehalusan gerak dan keakuratan pembacaan sudut agar alat tetap andal digunakan dalam proses pemesinan presisi.

Inclinometer

Inclinometer, yang juga dikenal sebagai *tilt meter*, *clinometer*, atau *level gauge*, merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur sudut kemiringan (*inclination angle*) suatu objek terhadap bidang horizontal maupun vertikal. Secara sederhana, alat ini berfungsi untuk menentukan besar kemiringan, elevasi, atau penurunan suatu permukaan atau benda terhadap garis datar bumi (bidang horizontal) ataupun arah gravitasi (garis vertikal).

Inclinometer banyak digunakan dalam berbagai bidang teknik dan industri. Dalam teknik sipil, alat ini berfungsi untuk memantau kemiringan lereng, kestabilan dinding penahan tanah, serta pergerakan atau penurunan fondasi bangunan. Pada bidang geoteknik, *inclinometer* digunakan untuk mengukur pergeseran tanah (*ground movement*) guna mendeteksi potensi longsor atau deformasi bawah permukaan. Di sektor industri mesin dan metrologi, alat ini membantu dalam pemeriksaan dan penyetelan sudut kemiringan pada benda kerja, mesin, maupun meja ukur dengan tingkat presisi tinggi. Sementara itu, dalam navigasi dan aviasi, *inclinometer* berperan penting untuk menentukan sikap (*attitude*) atau sudut kemiringan kapal, kendaraan, maupun pesawat agar tetap stabil dan aman selama beroperasi.

Fungsi utama *inclinometer* adalah untuk mengukur sudut kemiringan atau elevasi suatu objek terhadap bidang horizontal dengan tingkat ketelitian tinggi. Selain itu, alat ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan sudut atau deformasi yang terjadi dari waktu ke waktu, sehingga sangat berguna dalam pemantauan stabilitas struktur. Dalam bidang industri dan metrologi, *inclinometer* berperan dalam mengontrol posisi sudut saat proses pemasangan atau penyetelan mesin agar sejajar dan presisi. Alat ini juga berfungsi sebagai sensor posisi pada sistem navigasi, robotika, serta perangkat ukur otomatis yang memerlukan deteksi orientasi. Sementara dalam geoteknik, *inclinometer* digunakan untuk memantau stabilitas lereng, pergerakan tanah, dan kondisi struktur bawah permukaan guna mendeteksi potensi kegagalan atau deformasi dini.

Prinsip kerja *inclinometer* didasarkan pada deteksi gaya gravitasi bumi untuk menentukan sudut kemiringan suatu objek. Secara umum, terdapat dua prinsip utama dalam penggunaannya. Pertama, prinsip mekanis, yang memanfaatkan bandul (pendulum) atau gelembung cair (spirit level); saat alat dimiringkan, bandul atau gelembung akan bergeser, dan pergeseran ini dikalibrasi dalam satuan sudut seperti derajat ($^{\circ}$) atau menit busur ($'$). Kedua, prinsip elektronik atau sensorik, menggunakan sensor seperti *akselerometer*, *elektrolitik*, atau MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) untuk mendeteksi arah gaya gravitasi dan menghitung sudut kemiringan secara digital. Hasil pengukuran dari sensor ini kemudian ditampilkan langsung dalam bentuk angka digital atau dikirim ke sistem data logger untuk pemantauan dan analisis lebih lanjut.

Jenis-jenis

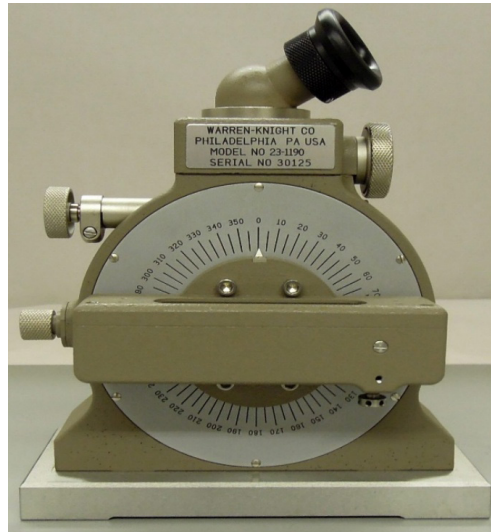
1. *Inclinometer* mekanis, beroperasi dengan memanfaatkan bandul atau gelembung cair sebagai komponen utama untuk mendeteksi kemiringan. Mekanismenya tergolong sederhana dan tidak membutuhkan sumber daya listrik, sehingga praktis digunakan baik di lapangan maupun di laboratorium.



Gambar 5.18 Inclinometer mekanis
(RS Components Ltd, 2023)

2. *Inclinometer optic*, menggunakan teleskop yang dilengkapi skala optik untuk mengukur sudut kemiringan suatu objek terhadap bidang horizontal. Sistem ini memberikan kemampuan pengukuran dengan presisi tinggi, karena proses pembacaan dilakukan melalui mekanisme

optik yang sangat halus dan akurat. Alat ini banyak diaplikasikan dalam bidang survei dan geodesi.



Gambar 5.19 Inclinometer optik
(Warren Knight Instrument Company, 2021)

3. *Inclinometer* digital, beroperasi dengan memanfaatkan sensor *akselerometer* atau MEMS (*Micro elektro mechanical system*) untuk mengukur sudut kemiringan secara elektronik dengan akurasi tinggi. Nilai pengukuran ditampilkan secara langsung pada layar digital beresolusi tinggi, sehingga pembacaan menjadi lebih mudah dan presisi. Selain itu, alat ini dapat dikoneksikan ke komputer atau sistem data logger, sehingga proses pencatatan dan pemantauan data dapat dilakukan secara otomatis untuk keperluan analisis maupun pengawasan jangka panjang.



Gambar 5.20 Inclinometer digital
(McFadden Freida, 2024)

Cara penggunaan:

- Letakkan inclinometer di atas permukaan yang akan diukur.
- Pastikan alat stabil dan tidak bergeser.
- Baca nilai sudut pada skala (mekanik) atau display (digital).
- Untuk akurasi tinggi, ukur dua arah (bolak-balik) dan ambil nilai rata-rata.
- Bandingkan dengan sudut referensi atau target kemiringan yang diinginkan.

Inclinometer memiliki dua jenis tampilan pembacaan, yaitu analog dan digital. Pada jenis analog, pembacaan dilakukan melalui jarum penunjuk yang bergerak di sepanjang skala berbentuk busur derajat ($^{\circ}$). Sedangkan pada tipe digital, hasil pengukuran langsung ditampilkan dalam bentuk angka digital, baik dalam satuan derajat ($^{\circ}$), menit ($'$), detik ($''$) maupun persen (%). Pembacaan dilakukan dengan menempatkan alat pada permukaan yang akan diukur, kemudian memastikan bahwa inclinometer stabil dan tidak terguncang. Nilai

yang ditunjukkan jarum atau tampilan digital merupakan besar sudut kemiringan terhadap bidang horizontal.

Untuk memperoleh hasil yang akurat, inclinometer harus dikalibrasi sebelum digunakan dengan menempatkannya pada bidang datar yang diketahui memiliki kemiringan nol. Setelah dikalibrasi, alat dapat ditempatkan pada permukaan benda kerja atau bidang yang diukur. Pembacaan dilakukan ketika jarum penunjuk atau nilai digital stabil. Pada inclinometer analog, posisi jarum menunjukkan besar sudut pada skala busur, sedangkan pada versi digital, pembacaan langsung menunjukkan nilai numerik tanpa interpretasi tambahan.

Beberapa inclinometer modern juga menampilkan hasil dalam bentuk *slope percentage* (% kemiringan) selain dalam derajat. Hubungan antara kedua satuan tersebut dinyatakan dalam rumus:

$$Slope (\%) = \tan(\theta) \times 100$$

di mana θ adalah sudut kemiringan dalam derajat. Rumus ini memungkinkan konversi hasil pengukuran dari derajat menjadi persen, yang sering digunakan pada bidang geoteknik dan sipil untuk menilai kestabilan lereng atau kemiringan jalan.

Sebagai contoh, jika hasil pengukuran inclinometer menunjukkan sudut kemiringan sebesar 12° , maka besar kemiringannya dalam persen dapat dihitung dengan rumus:

$$Slope (\%) = \tan(12^\circ) \times 100 = 0,2126 \times 100 = 21,26\%$$

Artinya, permukaan tersebut memiliki kemiringan sebesar 21,26%, atau dengan kata lain, setiap 100 cm jarak horizontal terdapat kenaikan atau penurunan vertikal sebesar 21,26 cm. Nilai ini menggambarkan tingkat kecuraman bidang yang diukur dan sangat penting dalam menentukan desain serta keamanan struktur teknik seperti tangga, jalan, atau lereng tanah.

Pada pengukuran lain, inclinometer digital kadang digunakan untuk menentukan selisih kemiringan dua bidang. Misalnya, bidang

pertama terbaca $5,5^\circ$, sedangkan bidang kedua $1,0^\circ$, maka perbedaan kemiringannya adalah:

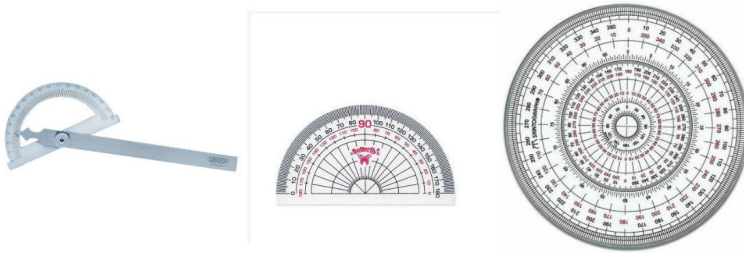
$$5,5^\circ - 1,0^\circ = 4,5^\circ$$

Selisih sudut ini menunjukkan deviasi atau ketidaksejajaran antar dua bidang yang diperiksa, yang sangat penting dalam perakitan komponen mesin atau kalibrasi peralatan industri presisi.

Setelah pengukuran selesai, inclinometer sebaiknya dikembalikan ke posisi nol dan dibersihkan dari debu serta minyak agar sensor dan permukaan pengukur tetap akurat. Alat juga perlu disimpan di tempat datar dan stabil untuk mencegah kerusakan mekanis pada komponen pengindera. Pemeliharaan yang baik akan memastikan inclinometer tetap memberikan hasil pengukuran yang akurat dan konsisten dalam jangka panjang.

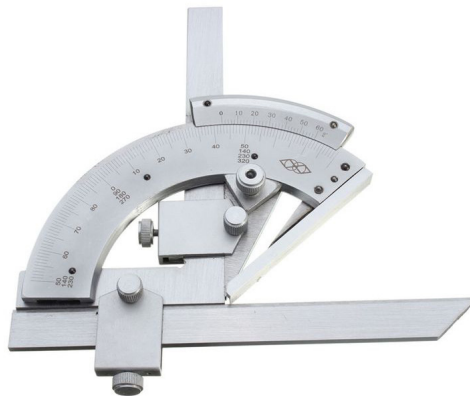
C. Busur derajat dan bevel protractor

Sejak peradaban awal, manusia telah menggunakan alat ukur sederhana berupa busur derajat untuk kebutuhan navigasi, arsitektur, hingga konstruksi. Seiring perkembangan ilmu ukur dan teknik manufaktur, alat ini mengalami transformasi dari sekadar lembaran setengah lingkaran dengan skala derajat menjadi instrumen bengkel yang lebih kokoh serta presisi. Dalam dunia industri dan *workshop* yang menuntut ketelitian tinggi, kemudian hadir bevel protractor yang tidak hanya mampu mengukur tetapi juga mentransfer sudut dengan lebih akurat. Memasuki abad ke-19 hingga ke-20, inovasi berupa skala vernier dan selanjutnya teknologi pembacaan digital semakin meningkatkan ketelitian bevel protractor, sehingga alat ini menjadi penting dalam pekerjaan permesinan maupun kontrol kualitas pada manufaktur presisi.



Gambar 5.1 busur derajat baseline dan busur derajat 180 dan 360
(Sexton laura, 2025)

Busur derajat (*protractor*) pada hakikatnya merupakan alat ukur sudut sederhana berbentuk setengah lingkaran atau lingkaran penuh yang dilengkapi dengan skala derajat dari 0° – 180° atau 0° – 360° . Umumnya, alat ini dibuat dari plastik untuk keperluan pendidikan, sedangkan untuk penggunaan teknis sering menggunakan logam agar lebih tahan lama. Beberapa tipe yang lebih lengkap disertai penggaris lurus (*baseline*) serta celah khusus yang memudahkan penempatan sudut terhadap tepi benda kerja. Keunggulan utama busur derajat adalah praktis digunakan dan biayanya rendah, namun kelemahannya terletak pada tingkat ketelitian yang terbatas.



Gambar 5.2 Bevel protractor standar

Bevel protractor adalah alat ukur yang dirancang khusus untuk memperoleh sudut dengan tingkat ketelitian tinggi. Bagian utamanya meliputi badan (*stock*), *blade* atau pisau yang dapat diputar terhadap badan, limb (skala utama), serta skala vernier atau dial pada versi mekanik yang berfungsi membaca pecahan derajat. Secara umum, terdapat tiga tipe utama yaitu bevel protractor standar (tanpa vernier), vernier bevel protractor (menampilkan sudut langsung pada layar dengan resolusi tinggi). Dengan konstruksi yang kokoh serta dilengkapi sistem pengunci atau penjepit, alat ini sangat ideal digunakan untuk mentransfer sudut dari satu benda ke benda lain maupun memeriksa ketepatan sudut pada komponen mesin.



Gambar 5.3 vernier bevel protractor
(Sexton laura, 2025)

Penggunaan busur derajat tergolong mudah, yaitu dengan menempatkan garis dasar (*baseline*) busur sejajar dengan salah satu sisi acuan bendah kerja, kemudian mambaca posisi garis penunjuk pada skala derajat di titik pertemuan dengan sisi bendah yang lain. Agar hasil lebih akurat, permukaan harus rata, busur tidak boleh bergeser saat pembacaan, dan pandangan mata harus tegak lurus terhadap skala untuk menghindari kesalahan paralaks. Ketelitian pengukuran dapat ditingkatkan dengan menggunakan busur derajat logam presisi serta bantuan penggaris atau

square sebagai garis acuan. Berbeda dengan itu, bevel protractor memiliki prosedur penggunaan yang lebih terstruktur. Pada tahapan persiapan, permukaan kontak perlu dibersihkan agar blade dan stock bebas kotoran; untuk tipe digital, alat harus dinyalakan dan diatur ke posisi nol (0°) sebagai referensi awal. Selanjutnya, body (stock) diposisikan tegak lurus pada salah satu bidang acuan, kemudian blade diputar hingga sejajar dengan bidang kedua atau dengan bantuan alat lain seperti edge plate atau square. Setelah posisi sesuai, blade dikunci menggunakan sekrup pengunci, lalu hasil pembacaan dilakukan melalui skala utama dan vernier pada tipe mekanis, atau langsung pada layar untuk tipe digital. Demi menjaga akurasi, pengukuran sebaiknya diulang beberapa kali, kemudian diambil nilai rata-ratanya serta diverifikasi dengan standar sudut seperti angle block atau sine bar. Selain untuk mengukur, bevel protractor juga berfungsi dalam mentransfer sudut ke benda lain, yaitu dengan mengatur sudut sesuai kebutuhan, mengunci posisinya, lalu menggunakan blade sebagai panduan untuk membuat tanda atau melakukan pemotongan pada sudut tersebut.

Ketepatan pengukuran sangat dipengaruhi oleh kekokohan pemasangan alat, kebersihan permukaan, serta ketelitian operator dalam menghindari parallax maupun kesalahan pembacaan. Beberapa kesalahan yang sering terjadi antara lain pemasangan yang tidak rapat, pembacaan skala dari posisi miring, dan penggunaan bidang referensi yang tidak rata. Untuk menjaga keakuratan hasil, alat sebaiknya disimpan dalam kotak pelindung, dihindarkan dari benturan, dilakukan pengecekan posisi nol sebelum digunakan, serta kalibrasi secara berkala di laboratorium metrologi atau menggunakan standar sudut. Dalam dunia industri, bevel protractor umumnya digunakan pada proses layout, pemeriksaan fixture, serta pengujian sudut komponen mesin di mana ketelitian sudut sangat berpengaruh terhadap kualitas dan kelayakan perakitan.

D. Mikroskop pengukur dan proyeksi profi



Gambar 5.21 Mikroskop pengukur
(pixel raw, 2024)

Instrumen optik untuk inspeksi bentuk dan dimensi berkembang dari kebutuhan industri untuk mengamati detail kecil serta membandingkannya dengan pola atau standar. Awal mula perkembangannya dapat ditelusuri dari mikroskop optik dasar dan perangkat proyeksi sederhana. Seiring meningkatnya tuntutan manufaktur presisi pada akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20, lahirlah mikroskop pengukur yang dilengkapi meja gerak terukur, reticle pembaca, serta optical comparator atau profile projector yang mampu memproyeksikan siluet benda ke layar besar untuk perbandingan visual. Perkembangan teknologi optik, sumber cahaya yang stabil, serta hadirnya detektor CCD dan perangkat lunak pengolahan citra pada akhir abad ke-20 menjadikan alat-alat ini berevolusi menjadi sistem

pengukuran yang lebih cepat, terdokumentasi, dan terintegrasi dengan sistem kualitas modern.

Mikroskop pengukur merupakan mikroskop khusus yang dirancang untuk pengukuran dimensi dua sumbu. Komponennya terdiri atas lensa objektif dengan berbagai perbesaran, eyepiece atau kamera CCD, meja kerja X-Y dengan mikrometer atau pemindah digital, sistem iluminasi coaxial maupun oblique, serta perangkat pembaca optik, vernier, atau digital. Prinsip kerjanya didasarkan pada pembesaran citra objek yang kemudian ditransmisikan ke reticle atau sensor; posisi fitur diatur relatif terhadap reticle atau stage, dan perpindahan yang terbaca pada mikrometer atau encoder dikonversi menjadi nilai dimensi nyata melalui faktor kalibrasi. Varian modern menggunakan kamera digital dan perangkat lunak yang mampu melakukan edge detection, fitting garis atau busur, serta otomatisasi pengukuran untuk mempercepat proses dan mengurangi subjektivitas operator.

Profile projector bekerja dengan memproyeksikan bayangan atau siluet benda kerja ke layar translusen berukuran besar menggunakan lensa dengan perbesaran tetap atau variabel. Alat ini terdiri dari sumber cahaya (backlight atau diaphragm), lensa proyeksi, layar dengan grid atau reticle, meja kerja X-Y yang sering dilengkapi rotary table, serta sistem pembaca posisi. Dalam penggunaannya, benda ditempatkan pada stage dan siluetnya diperbesar lalu diproyeksikan ke layar. Operator kemudian membandingkan siluet tersebut dengan templet master atau menggunakan reticle untuk mengukur jarak, diameter, dan sudut. Versi modern telah menggantikan layar optik dengan kamera serta monitor digital, dilengkapi perangkat lunak analisis profil yang mampu menghitung dimensi, runout, dan deviasi terhadap toleransi.

Sebelum melakukan pengukuran, sistem harus dikalibrasi menggunakan standar terverifikasi seperti stage micrometer, gauge block, atau artefak kalibrasi untuk menentukan faktor skala pada tiap perbesaran. Pada mikroskop pengukur, dilakukan kalibrasi X-Y dan verifikasi linearitas; sementara pada profile projector, kalibrasi meliputi

faktor perbesaran dan pemeriksaan distorsi optik di seluruh bidang pandang. Teknik pengukuran melibatkan fokus yang tepat pada tepi fitur dengan pencahayaan optimal, penentuan titik referensi, serta pengambilan beberapa pembacaan di lokasi berbeda guna menilai presisi. Edge detection dan perangkat lunak pengukuran digunakan untuk memperoleh hasil numerik yang lebih konsisten. Untuk fitur melengkung diterapkan metode fitting (circle fit), dan untuk sudut digunakan indeks rotasi yang telah diatur nol-nya. Langkah pengoperasian mikroskop pengukur umumnya meliputi:

1. membersihkan optik dan meja kerja, menyalakan sistem, serta menunggu stabilisasi lampu,
2. memasang benda kerja pada meja X-Y dan mengencangkannya,
3. memilih perbesaran rendah untuk orientasi awal, kemudian meningkatkan perbesaran untuk detail,
4. memfokuskan citra dan menyelaraskan tepi menggunakan reticle atau software,
5. menggerakkan meja hingga tepi fitur sejajar dengan referensi reticle, lalu mencatat koordinat X dan Y,
6. mengulangi pengukuran pada titik lain, menghitung dimensi sebagai selisih koordinat dikalikan faktor kalibrasi, serta melaporkan hasil beserta ketidakpastian pengukurannya.

Pada sistem digital, citra dapat disimpan, dianalisis dengan algoritma edge detection, dan hasilnya diekspor secara otomatis.

Langkah Praktik Profile Projector:

1. membersihkan layar dan sumber cahaya, lalu memasang benda kerja pada stage,
2. memilih jenis pencahayaan backlight untuk siluet tegas atau oblique untuk detail permukaan dan mengatur perbesaran,
3. memfokuskan proyeksi hingga siluet tampak tajam dengan kontras optimal,

4. memposisikan siluet terhadap templet atau garis referensi,
5. menggunakan micrometer stage untuk mengukur jarak antar fitur atau membaca langsung pada reticle atau monitor digital,
6. untuk pengukuran sudut, memanfaatkan rotary table yang telah dikalibrasi,
7. mendokumentasikan hasil serta menyimpan citra proyeksi sebagai bukti inspeksi.

Kesalahan umum pada pengukuran optik berasal dari distorsi lensa, kesalahan kalibrasi perbesaran, fokus yang tidak tepat, parallax pada pembacaan manual, getaran, serta pengaruh suhu lingkungan. Untuk meminimalkan hal tersebut, disarankan penggunaan lensa telecentrik pada aplikasi presisi tinggi, kalibrasi berkala oleh laboratorium terakreditasi, pengendalian suhu dan getaran di area kerja, serta pembersihan optik dengan kain mikro-fiber dan cairan khusus. Lampu harus diganti bila intensitasnya berfluktuasi, dan prosedur pengukuran sebaiknya dilakukan berulang guna menilai presisi. Sistem digital menambah keuntungan melalui koreksi distorsi berbasis kalibrasi citra, automasi proses pengukuran, serta penyimpanan data yang meningkatkan traceability.

Mikroskop pengukur sangat sesuai untuk pengukuran fitur kecil, analisis topografi permukaan, serta riset laboratorium. Sementara itu, profile projector lebih cocok untuk inspeksi cepat di lini produksi dan perbandingan visual terhadap templet pada komponen datar atau berprofil. Untuk kebutuhan modern yang menuntut kecepatan, akurasi, dan dokumentasi digital, sistem berbasis kamera dan perangkat lunak (*video measuring systems*) menjadi pilihan ideal karena mampu menyeimbangkan performa dan efisiensi. Pemilihan alat sebaiknya mempertimbangkan geometri benda, resolusi yang dibutuhkan, serta tuntutan *traceability*, dengan memastikan operator terlatih dan prosedur kalibrasi dijalankan secara konsisten.

E. Aplikasi optik dalam pengukuran dimensi

Aplikasi optik dalam pengukuran dimensi merujuk pada penggunaan prinsip dan komponen optik (seperti cahaya, lensa, cermin, dan sensor) untuk mengukur fisik suatu objek, termasuk panjang, lebar, diameter, sudut, bentuk permukaan, maupun profil geometrinya. Berbeda dengan metode mekanik yang memerlukan kontak langsung dengan benda kerja, pengukuran optik bersifat non-kontak (*non-contact measurement*) sehingga sangat cocok untuk benda kecil, rapuh, halus, atau bergerak cepat. Teknologi ini banyak diterapkan di bidang metrologi industri, manufaktur presisi, kontrol kualitas, dan penelitian ilmiah.

Metode optik bekerja dengan memanfaatkan interaksi antar cahaya dan objek, baik berupa pantulan, pembiasan, interferensi, atau proyeksi bayangan. Hasil interaksi ini ditangkap oleh detektor optik dan diolah untuk menentukan dimensi geometris objek. Beberapa prinsi utama yang digunakan antara lain:

1. Geometri optik, mengukur jarak atau sudut berdasarkan posisi bayangan, proyeksi, atau fokus.
2. Interferometri, memanfaatkan pola interferensi cahaya untuk mengukur perbedaan panjang dengan resolusi sangat tinggi
3. Triangulasi optik, menghitung jarak menggunakan sudut dan posisi titik cahaya yang dipantulkan dari objek.
4. Fotogrametri, menentukan ukuran dan bentuk dari citra yang diambil dari beberapa sudut pandang.
5. Speckle dan laser scanning, menganalisis pola hamburan atau pantulan cahaya untuk membangun model 3D objek.

Contoh instrumen optik untuk pengukuran dimensi:

1. Mikroskop pengukur (*measuring microscope*),
Mengukur dimensi mikro (jarak, diameter, sudut) dengan pembesaran tinggi dan pembacaan digital.

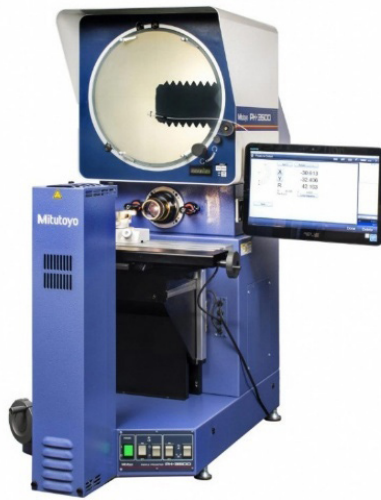


Gambar 5.2 mikroskop pengukur
(monotaro, 2025)

Cara penggunaannya :

- a. Posisikan objek yang akan diukur pada meja mikroskop.
- b. Fokuskan mikroskop pada objek tersebut.
- c. Gerakkan meja mikroskop (atau komponen ukur lainnya) dari satu titik referensi ke titik lainnya pada objek untuk mengukur jarak, sambil memantau pergerakan pada dial atau skala.
- d. Perhatikan posisi tepi skala nonius pada skala utama.
- e. Baca nilai terakhir pada skala utama yang terlihat tepat sebelum garis nol (atau tepi awal) skala nonius. Nilai ini adalah bagian bilangan bulat dan desimal kasar dari pengukuran (misalnya, 5,5 mm).
- f. Cari garis pada skala nonius (dial putar) yang tepat sejajar atau berhimpit dengan salah satu garis pada skala utama.
- g. Catat angka pada garis nonius yang berhimpit tersebut.
- h. Kalikan angka ini dengan nilai ketelitian (resolusi) alat (misalnya, 0,01 mm atau 0,001 mm).
- i. Jumlahkan hasil pembacaan skala utama dengan hasil perhitungan skala nonius.

- j. Contoh: Jika skala utama terbaca 8 mm, dan garis ke-16 pada skala nonius berhimpit (dengan ketelitian 0,01 mm), maka hasilnya adalah $8 \text{ mm} + (16 * 0,01 \text{ mm}) = \mathbf{8,16 \text{ mm}}$
2. Profile projector (*optical comparator*)
Memproyeksikan siluet benda kerja ke layar untuk membandingkan atau mengukur profil dan dimensi.



Gambar 5. 23 Profile projector
(Tool judge, 2024)

- Persiapan Objek: Tempatkan objek yang akan diukur di atas meja (*stage*) instrumen.
- Fokus dan Pencahayaan: Sesuaikan fokus dan pencahayaan (baik *diascopic* untuk profil/siluet, atau *episcopic* untuk permukaan) untuk mendapatkan bayangan yang jelas dan tajam pada layar.
- Pilih Pembesaran: Pilih lensa pembesar yang sesuai dengan dimensi objek dan tingkat detail yang diperlukan.
- Posisikan Objek: Gerakkan meja XY (atau meja putar) untuk memposisikan bagian objek yang ingin diukur di area pandang layar.

- e. Pembacaan Digital: Baca jarak pergerakan pada tampilan digital unit XY. Nilai yang ditampilkan adalah dimensi objek yang diukur (misalnya, panjang, lebar, atau diameter).
3. Autocolimator
- Mengukur dan menyetel sudut sangat kecil berdasarkan pantulan berkas cahaya dari cermin reflektif.

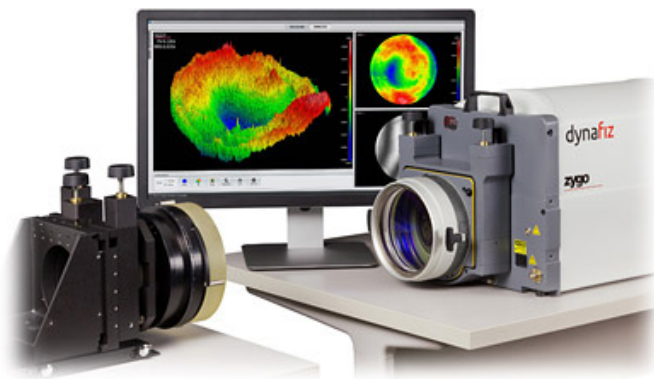


Gambar 5.24 Autocolimator
(Wikipedia, 2023)

- a. Persiapan: Pastikan autocollimator terpasang dengan stabil pada kedudukan yang dapat disesuaikan dan diarahkan ke permukaan target yang memiliki cermin reflektif.
- b. Fokuskan Lensa Okuler: Sesuaikan fokus lensa okuler hingga citra pantulan dari target terlihat jelas pada retikel (skala internal) di dalam lensa okuler.
- c. Amati Citra Pantulan: Di dalam lensa okuler, Anda akan melihat skala utama dan citra silang (crosshair) atau pola skala dari sinar pantulan. Citra ini mungkin bergeser dari posisi nol akibat adanya sedikit kemiringan sudut pada permukaan target.
- d. Baca Skala Utama: Identifikasi posisi citra pantulan pada skala utama. Skala ini biasanya menunjukkan nilai integer (misalnya, dalam menit busur atau derajat parsial).
- e. Baca Skala Nonius/Vernier (jika ada): Beberapa autocollimator visual memiliki skala nonius atau mikrometer untuk pembacaan

yang lebih halus. Cari garis pada skala nonius yang sejajar sempurna dengan salah satu garis pada skala utama. Nilai ini memberikan bagian desimal atau pecahan dari pengukuran utama (misalnya, dalam busur detik).

- f. Hitung Total Pengukuran: Jumlahkan pembacaan dari skala utama dan skala nonius untuk mendapatkan total deviasi sudut. Hasil ini menunjukkan seberapa jauh permukaan target menyimpang dari posisi yang sejajar sempurna (tegak lurus terhadap sumbu optik autocollimator).
 - g. Interpretasikan Hasil: Deviasi sudut yang terbaca digunakan untuk menilai kerataan, kelurusan, atau kesejajaran permukaan yang diuji. Nilai nol menunjukkan keselarasan yang sempurna
4. Laser interferometer
- Mengukur panjang, ketebalan, atau deviasi bentuk dengan resolusi hingga nanometer.



Gambar 5.25 Laser interferometer
(Zygo, 2025)

- a. Perhitungan Pergeseran “Fringe”: Ketika cermin bergerak, pola interferensi bergeser. Setiap pergeseran satu siklus penuh dari terang ke gelap dan kembali ke terang menunjukkan perubahan panjang lintasan sebesar satu panjang gelombang laser.

- b. Konversi ke Satuan Panjang: Perangkat lunak atau prosesor internal alat akan menghitung jumlah total pergeseran *fringe* dan mengkonversinya menjadi satuan panjang (misalnya, nanometer, mikrometer, atau milimeter) menggunakan panjang gelombang laser yang diketahui sebagai standar pengukuran.
 - c. Tampilan Hasil: Hasil akhir, yang merupakan pengukuran perpindahan atau jarak objek, akan ditampilkan dalam format digital yang mudah dibaca di layar unit kontrol atau komputer yang terhubung
5. 3D optical scanner
- Menghasilkan model 3D permukaan benda secara cepat tanpa kontak.



Gambar 5. 26 3D optical scanner
(Leica, 2025)

- a. Awan Titik (Point Cloud): Ini adalah data mentah yang terdiri dari kumpulan titik-titik koordinat. Anda dapat melihatnya di perangkat lunak pemrosesan 3D untuk memvisualisasikan bentuk objek secara kasar.
- b. Model Permukaan (Mesh Model): Perangkat lunak akan memproses awan titik menjadi model permukaan yang terhubung (disebut “mesh”, seringkali dalam format file .STL, .OBJ, atau .PLY), yang lebih halus dan dapat digunakan untuk pencetakan 3D atau desain digital.

- c. Analisis dan Pengukuran: Dalam aplikasi industri, hasil pemindaian dapat digunakan untuk inspeksi atau pengukuran yang akurat, membandingkan model digital dengan desain asli untuk mendeteksi perbedaan.
 - d. Visualisasi: Hasil akhir dapat berupa model 3D yang sangat detail, sering kali dengan informasi tekstur atau warna, untuk digunakan dalam hiburan (film, videogame) atau realitas virtual.
6. Optical CMM (Coordinate Measuring Machine)
Menggunakan kamera dan sensor cahaya untuk pengukuran koordinat 3D presisi tinggi.



Gambar 5.27 Optical CMM (Coordinate Measuring Machine)
(Eleyet metrology, 2025)

- a. Penempatan Objek: Objek yang akan diukur diletakkan di area pengukuran mesin.
- b. Pemindaian Otomatis: Operator biasanya menggunakan perangkat lunak komputer untuk memulai proses pemindaian. Mesin akan secara otomatis menggerakkan pemindai optik di sekitar objek atau sebaliknya, tergantung jenis CMM optik (misalnya, jenis *bridge* atau *portable scanner*).
- c. Akuisisi Data: Selama pemindaian, perangkat lunak secara *real-time* mengumpulkan dan memproses awan titik.

- d. Analisis Perangkat Lunak: Data awan titik ini kemudian diimpor ke dalam perangkat lunak metrologi khusus (seperti CATIA, Geomagic, atau perangkat lunak CMM bawaan) untuk analisis lebih lanjut.
7. Video measuring system (VMS)
- Sistem berbasis kamera dan software untuk pengukuran otomatis fitur geometrik (jarak, diameter, sudut).



Gambar 5.28 Video measuring system (VMS)
(Indiamart, 2025)

- a. Data Identifikasi Produk: Nama bagian, nomor seri, tanggal pengukuran, dan operator.
- b. Parameter Terukur: Daftar dimensi spesifik (panjang, diameter, sudut, dll.) yang telah diukur.
- c. Nilai Nominal (Target): Dimensi yang diharapkan sesuai dengan desain atau spesifikasi teknik.
- d. Nilai Terukur (Actual): Dimensi aktual yang diukur oleh VMS.
- e. Penyimpangan (Deviation): Perbedaan antara nilai terukur dan nilai nominal.
- f. Toleransi (Tolerance): Batas yang diizinkan untuk penyimpangan (batas atas dan batas bawah).

- g. Status Lulus/Gagal (Pass/Fail): Indikasi visual atau tekstual apakah dimensi yang diukur berada dalam rentang toleransi yang dapat diterima.

Pengukuran teknologi optik dalam pengukuran dimensi memiliki peranan penting di berbagai bidang industri dan penelitian. Pada metrologi industri, sistem optik dimanfaatkan untuk melakukan inspeksi dimensi komponen presisi seperti *gear*, *bearing*, dan lensa optik, sekaligus untuk kalibrasi alat ukur panjang seta verifikasi standar dimensi. Teknologi ini juga digunakan dalam pengukuran profil, kelurusan, dan tingkat kekasaran permukaan secara akurat. Dalam manufaktur dan kontrol kualitas, metode pengukuran optik memungkinkan pemeriksaan komponen berukuran kecil tanpa merusaknya (*non-destructive inspection*), verifikasi otomatis dimensi produk massal menggunakan kamera industri, serta deteksi penyimpangan atau cacat secara *real-time* melalui sistem *in-line optical measurement*. Di bidang mikro dan nanoteknologi, pengukuran dilakukan terhadap dimensi mikrostruktur, lapisan tipis, dan pola semikonduktor, dengan bantuan interferometri yang mampu mengukur ketebalan hingga skala nanometer. Sementara itu, dalam analisis geometri permukaan dan topografi, instrumen seperti interferometer dan *white light scanner* digunakan untuk menilai bentuk permukaan dan mengevaluasi kualitas optik pada lensa, cermin, serta permukaan presisi. Adapun dalam penelitian dan kalibrasi, sistem pengukuran optik digunakan untuk mengkalibrasi jarak dan skala pada alat lain seperti mikrometer, CMM atau sensor laser, serta untuk menganalisis deformasi materi akibat perubahan beban atau suhu melalui sistem *optical strain measurement*.

Metode pengukuran optik menawarkan beberapa keunggulan yang membuatnya banyak digunakan dalam dunia metrologi modern. Salah satu kelebihanannya adalah bersifat non-kontak, sehingga tidak menimbulkan gaya atau tekanan pada objek yang diukur. Sistem ini juga memiliki tingkat akurasi dan resolusi yang sangat tinggi, mencapai skala mikron hingga nanometer. Selain itu, proses pengukuran berlangsung cepat dan efisien memudahkan untuk kebutuhan inspeksi massal serta dapat diintegrasikan

secara otomatis dengan komputer dan sistem kontrol kualitas digital. Hasil pengukuran dapat disimpan dalam bentuk citra atau data digital. Namun, teknologi ini juga memiliki sejumlah tantangan, seperti sensitivitas terhadap getaran, cahaya sekitar, dan kondisi lingkungan. Permukaan yang terlalu reflektif dapat menimbulkan kesalahan pembacaan akibat pantulan, sementara sistem optik memerlukan kalibrasi dan penyelarasan (*alignment*) yang presisi dan memerlukan biaya investasi awal yang relatif mahal. Dalam penggunaannya, terdapat beberapa contoh penerapan pengukuran optik, seperti *optical comparator*, yang memproyeksikan bayangan benda ke layar untuk pengukuran panjang atau sudut, *Laser interferometer*, menggabungkan dua berkas cahaya untuk mendeteksi perubahan posisi dengan ketelitian hingga $\pm 0.001 \mu\text{m}$, *video measuring system*, menggunakan kamera dan perangkat lunak pendeteksi tepi (*edge detection*) untuk menghitung dimensi 2D atau 3D secara otomatis.

F. Rangkuman

1. Alat untuk mengukur sudut dan perangkat optik sangat penting untuk memastikan bentuk dan posisi komponen teknik tetap tepat. Dengan menggunakan perangkat seperti busur derajat, bevel protractor, inclinometer, serta alat ukur sudut presisi seperti sine bar, sineplate, dan autocollimator, dapat digunakan untuk mengukur sudut dengan tingkat keakuratan sesuai dengan kebutuhan. Alat-alat ini dapat memastikan setiap bagian mesin memenuhi standar desain dan toleransi yang ditentukan.
2. Pertumbuhan populasi teknik optik meningkatkan kemampuan inspeksi dan pengukuran dimensi secara non-kontak dengan akurasi yang tinggi. Mikroskop pengukur dan proyektor profil menjadi alat utama dalam memeriksa detail kecil, tepi, dan bentuk benda kerja yang sulit diukur secara mekanik. Prinsip kerja berbasis pembesaran dan proyeksi optik memungkinkan analisis bentuk, sudut, dan dimensi dengan hasil visual yang presisi dan dapat direkam atau diolah secara digital.



BAB VI

Alat Ukur Elektronik dan Digital

A. Deskripsi singkat

Perkembangan teknologi dalam bidang pengukuran mendorong transformasi besar dari sistem mekanik menuju sistem berbasis elektronik an digital. Alat ukur elektronik dan digital berfungsi dengan mengonversi besaran fisik seperti tegangan, arus, tekanan, suhu, atau panjang menjadi sinyal listrik yang dapat diolah dan dianalisis secara otomatis. Hasil pengukuran kemudian ditampilkan dalam bentuk angka melalui layar digital dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Menurut Sutopo (2021) dalam Metrologi dan instrumentasi modern, keunggulan utama alat ukur elektronik terletak pada respons yang cepat, kestabilan hasil, serta kemampuan merekam dan menyimpan data secara langsung. Perkembangan ini menjadikan proses pengukuran lebih efisien dan kompeten, sekaligus meminimalkan kesalahan manusia (*human error*) dalam interpretasi hasil pengukuran manual.

Jenis-jenis alat ukur elektronik yang banyak digunakan di industri antara lain multimeter, osiloskop, sensor elektronik, dan *Coordinate*

Measuring Machine (CMM), alat-alat tersebut memiliki fungsi yang berbeda, namun bertujuan sama menghasilkan data pengukuran dengan tingkat presisi tinggi. Penerapan alat ukur digital juga mendukung proses pengendalian mutu (quality control) di industri, karena hasil pengukuran dapat direkam dan diolah secara otomatis menggunakan sistem komputer. Menurut Groover (2020) dalam *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, penggunaan CMM mampu meningkatkan efisiensi pengukuran 3 dimensi secara cepat dan akurat melalui integrasi sistem komputer dan sensor sentuh.

Dalam perkembangan terkini, alat ukur elektronik dan digital telah terintegrasi dengan teknologi komputer, sistem otomatisasi dan *Internet of Things* (IoT). Integrasi ini memungkinkan hasil pengukuran dikirim secara langsung ke sistem basis data, sehingga analisis dan pengendalian kualitas dapat dilakukan secara real-time. Menurut (ISO 10012, 2003) tentang *Measurement Management Systems*, sistem pengukuran modern mampu menjamin keandalan data serta keterlacakan hasil pengukuran terhadap standar internasional. Dengan dukungan teknologi digital, proses kalibrasi, pencatatan, dan pemantauan alat ukur dapat dilakukan secara terpusat dan otomatis. Hal ini menjadikan metrologi industri lebih efisien, transparan, serta siap menghadapi tantangan era industri 4.0, di mana presisi dan kecepatan menjadi faktor utama dalam menjaga daya saing industri manufaktur global.



BAB VII

Pengukuran Dimensi dan Bentuk

A. Deskripsi singkat

Pengukuran dimensi dan bentuk merupakan elemen inti dalam teknik dan metrologi industri, yang menjamin agar komponen sesuai dengan persyaratan desain dan norma teknis. Pengukuran ini mencakup aspek seperti panjang, lebar, ketebalan, diameter, serta jarak antar titik atau permukaan pada suatu bagian. Ketepatan dalam penilaian dimensi sangat esensial, karena penyimpangan kecil dapat menimbulkan ketidakwajaran dalam perakitan, penurunan efisiensi pada pengaturan mekanis, dan kemungkinan kerusakan produk. Sebagaimana dicatat oleh Doebelin (2017) dalam *Measurement Systems: Application and Design*, evaluasi dimensi yang presisi menjadi fondasi utama untuk interoperabilitas antar bagian dan mempertahankan standar produk yang tinggi. Dalam aplikasi nyata, alat pengukuran bervariasi luas, mulai dari perangkat sederhana seperti jangka sorong dan mikrometer untuk pemeriksaan linear yang rinci, hingga mesin pengukur koordinat (CMM) canggih yang menggunakan sensor digital untuk menentukan lokasi koordinat tiga

dimensi. Akurasi dan tujuan setiap instrumen berbeda-beda, tergantung pada karakteristik benda kerja dan tingkat ketelitian yang diinginkan.

Selain pemeriksaan dimenasi dasar, penilaian fitur geometris seperti kebulatan, silindrisitas, kekakuan datar, dan kekasaran permukaan memainkan peran penting dalam menjaga kualitas produk. Parameter geometrik ini secara mendalam memengaruhi keandalan mekanis dan umur pakai suatu komponen. Misalnya, poros pada mesin yang tidak memiliki kebulatan sempurna dapat menimbulkan getaran berlebih, sehingga mempercepat keausan pada bantalan. Demikian pula, permukaan yang terlalu kasar dapat mengganggu pelumasan, meningkatkan tingkat gesekan, dan menurunkan efektivitas mekanis secara keseluruhan. Peralatan khusus digunakan untuk mengukur sifat-sifat ini, termasuk penguji kebulatan untuk menilai sirkularitas, penguji bentuk untuk silindrisitas, serta profilimeter atau analyzer kekasaran permukaan untuk evaluasi tekstur. Sebagaimana diuraikan oleh (Whitehouse, 2011) dalam *Handbook of Surface Metrology*, pemeriksaan kontur dan topografi permukaan sangat esensial, karena hal itu tidak hanya melampaui akurasi dimensi semata, melainkan juga mengevaluasi kinerja permukaan dalam lingkungan operasional nyata. Oleh karena itu, penguasaan teknik pengukuran bentuk merupakan komponen kunci dalam jaminan kualitas industri kontemporer.

Di sektor manufaktur, pengukuran dimensi dan bentuk tidak hanya digunakan untuk pemeriksaan akhir produk, perangkat ini berfungsi sebagai instrumen utama untuk jaminan kualitas dan pengawasan proses yang berkelanjutan. Data yang diperoleh dari penilaian ini membantu mengukur kestabilan operasional, mengidentifikasi ketidakkonsistenan dimensi, serta memverifikasi kepatuhan terhadap batas toleransi yang diuraikan dalam produk. Metrologi industri kontemporer mengintegrasikan kerangka Statistical Process Control (SPC), yang memungkinkan pemeriksaan statistik secara real-time terhadap hasil pengukuran untuk mendeteksi fluktuasi proses. Melalui penggabungan perangkat pengukur digital dan sistem berbasis komputer, hasil pengukuran dapat diarsipkandengan



BAB VIII

Toleransi dan Kualitas Produk

A. Deskripsi singkat

Dalam dunia teknik manufaktur, toleransi didefinisikan sebagai rentang deviasi terbesar dan terkecil yang masih dapat diterima dari dimensi ideal suatu bagian komponen. Karena setiap proses produksi memiliki keterbatasan alat, mesin, dan bahan, tidak mungkin menghasilkan dimensi yang benar-benar identik dengan rancangan teoritis. Oleh sebab itu, toleransi berfungsi sebagai pedoman agar komponen tetap dapat dirakit dan berfungsi sesuai desain walaupun terdapat sedikit penyimpangan. Toleransi diatur dalam satuan mikrometer (μm) atau milimeter (mm) dan menjadi bagian integral dari gambar teknik (*engineering drawing*). Dengan penerapan toleransi yang tepat, industri dapat menjaga keseimbangan antara presisi, biaya, dan efisiensi produksi, memastikan produk memiliki mutu tinggi tanpa pemborosan sumber daya.

Sistem ISO 286 memperkenalkan dua pendekatan utama dalam pengendalian toleransi, yaitu *hole basis system* dan *shaft basis system*. Pada sistem hole basis, ukuran lubang dibuat tetap, sementara ukuran

poros disesuaikan agar diperoleh jenis sambungan yang diinginkan; sebaliknya, sistem shaft basis menggunakan poros sebagai acuan tetap. Kombinasi kedua sistem ini menghasilkan tiga jenis sambungan, yaitu *clearance fit* (longgar), *transition fit* (pas), dan *interference fit* (rapat). Misalnya, pada mesin berputar cepat seperti motor listrik, *interference fit* digunakan untuk mencegah slip antara poros dan bantalan. Dalam implementasinya, industri juga menggunakan simbol toleransi H7/g6, H8/f7, dan H6/p6 yang mengacu pada standar ISO untuk menentukan batas penyimpangan aktual dari dimensi nominal. Dengan demikian, sistem toleransi dan fits memungkinkan terciptanya komponen yang dapat saling dipertukarkan (*interchangeable*) secara global tanpa menurunkan kualitas kinerja mekanik.

Hubungan antara toleransi dan kualitas produk bersifat langsung dan sangat signifikan. Semakin ketat toleransi yang diterapkan, maka semakin tinggi pula tingkat presisi dan kualitas hasil akhir, namun konsekuensinya adalah meningkatnya biaya produksi, waktu pemrosesan, dan kebutuhan kalibrasi alat ukur. Sebaliknya, toleransi yang terlalu longgar dapat menurunkan performa produk karena menyebabkan getaran, kebocoran, atau keausan dini pada sambungan mekanik. Oleh karena itu, dalam proses rekayasa, perancang harus menentukan tingkat toleransi yang ekonomis (*economical tolerance*), yaitu batas toleransi yang cukup ketat untuk menjamin fungsi tanpa membebani biaya produksi secara berlebihan. Penerapan toleransi yang proporsional mendukung terciptanya kualitas produk yang konsisten, mengurangi produk cacat (*reject*), serta meningkatkan daya saing industri di pasar global.

B. Konsep toleransi dalam teknik

Konsep toleransi lahir dari praktik tukang dan pengrajin yang bekerja secara manual, mereka secara intuitif memahami bahwa ukuran benda tidak harus presisi sama untuk dapat dipakai bersama-sama, tetapi perlu ada batasan agar bagian dapat saling bekerja. Peralihan dari produksi kerajinan ke produksi massal pada masa revolusi industri menempatkan



BAB IX

Metrologi Industri dan Pengendalian Mutu

A. Definisi singkat

Metrologi industri adalah aplikasi sains pengukuran dalam proses produksi dan pengendalian kualitas di lingkungan industri. Bidang ini mencakup semua elemen yang terkait dengan pengukuran, mulai dari kalibrasi instrumen ukur, verifikasi hasil pengukuran, hingga penerapan sistem standar yang menjamin konsistensi produk. Sasaran utamanya adalah memastikan bahwa setiap hasil pengukuran memiliki tingkat keakuratan, ketertelusuran, dan kepatuhan terhadap standar internasional. Dalam konteks manufaktur kontemporer, metrologi tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu, tetapi juga sebagai bagian penting dari strategi untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi.

Pengendalian mutu (*quality control*) tidak dapat dilepaskan dari metrologi industri karena seluruh proses pemeriksaan kualitas produk bergantung pada data pengukuran yang akurat dan sah. Melalui penerapan *Statistical Process Control* (SPC), perusahaan dapat memantau variasi

dalam produksi serta mendeteksi penyimpangan dari standar secara cepat. Di samping itu, metrologi memainkan peran penting dalam kegiatan inspeksi, pengujian, dan penilaian kelayakan produk. Dengan adanya sistem pengukuran yang tepat, perusahaan mampu mengidentifikasi asal-usul kesalahan, mengurangi tingkat kerusakan, serta meningkatkan kepuasan pelanggan melalui produk yang stabil dan terpercaya.

Bersamaan dengan kemajuan teknologi digital dan otomasi, metrologi industri mengalami pertumbuhan yang pesat. Penerapan sistem pengukuran berbasis komputer, seperti *Coordinate Measuring Machine* (CMM), serta penggabungan *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI), memungkinkan pengendalian mutu dilakukan secara real-time dan terintegrasi langsung dengan proses produksi. Namun, tantangan utama dalam metrologi era modern adalah mempertahankan ketertelusuran pengukuran, keamanan data, serta kemampuan teknisi dalam mengelola sistem yang semakin rumit. Oleh sebab itu, penguasaan metrologi industri menjadi faktor kunci untuk mempertahankan daya saing dan kualitas produk di era manufaktur cerdas (*smart manufacturing*).

B. Konsep metrologi industri

Metrologi industri merupakan bagian dari ilmu metrologi yang menekankan penerapan prinsip-prinsip pengukuran dalam proses produksi dan sistem pengelolaan mutu di lingkungan industri. Tujuannya adalah memastikan bahwa setiap hasil pengukuran dalam kegiatan manufaktur memiliki tingkat keakuratan, ketertelusuran (*traceability*), dan konsistensi yang selaras dengan standar internasional. Dalam konteks ini, metrologi tidak hanya berfungsi di tahap pengujian produk akhir, tetapi juga di setiap tahap proses mulai dari desain, pemesinan, perakitan, hingga inspeksi kualitas. Melalui penerapan metrologi industri yang efektif, efisiensi produksi dapat ditingkatkan dan risiko munculnya kesalahan atau cacat pada produk dapat dikurangi.



BAB X

Kalibrasi dan Standarisasi

A. Deskripsi singkat

Kalibrasi adalah proses membandingkan hasil pengukuran dari sebuah instrumen dengan standar referensi yang telah terbukti keakuratannya, guna memastikan instrumen tersebut menghasilkan data yang tepat dan andal. Di bidang metrologi industri, kalibrasi merupakan aktivitas yang harus dilakukan karena ketepatan alat pengukur langsung berdampak pada mutu produk dan kestabilan proses produksi. Setiap perangkat pengukur, entah itu mekanis, elektronik, atau digital, perlu dikalibrasi secara rutin supaya sesuai dengan norma pengukuran baik nasional maupun global. Jika kalibrasi tidak dilakukan dengan baik, hasil pengukuran bisa melenceng dari nilai aktual, yang mungkin mengakibatkan kerusakan produk dan penurunan kualitas.

Tujuan pokok kalibrasi adalah mengidentifikasi besarnya perbedaan (deviasi) antara perangkat pengukur dan standar referensinya, serta memverifikasi bahwa data pengukuran tetap dalam ambang toleransi yang diperbolehkan. Di samping memastikan ketepatan, kalibrasi juga

bertujuan untuk meningkatkan kepercayaan alat ukur, memperluas umur pemakaiannya, dan mendukung implementasi sistem manajemen kualitas seperti ISO 9001 serta ISO/IEC 17025. Di lingkungan industri saat ini, informasi dari kalibrasi berperan sebagai fondasi untuk pemeriksaan kualitas, pengendalian proses statistik (SPC), dan pengesahan produk. Oleh karena itu, kalibrasi bukan sekadar aspek teknis, melainkan komponen integral dari kerangka manajemen kualitas yang menyeluruh.

Proses kalibrasi dilakukan melalui beberapa tahap yang terstruktur, dimulai dari pemeriksaan kondisi alat ukur, penentuan standar acuan yang sesuai, pengambilan data hasil pengukuran, hingga perhitungan ketidakpastian pengukuran. Jenis standar yang digunakan dapat berupa *primary standard*, *secondary standard*, atau *working standard*, tergantung pada tingkat ketelitian yang dibutuhkan. Setelah data diperoleh, hasil pengukuran tersebut kemudian dibandingkan dengan standar referensi untuk menentukan nilai koreksi atau faktor kompensasi dari alat yang dikalibrasi. Seluruh proses ini wajib didokumentasikan dalam sertifikat kalibrasi yang mencantumkan hasil pengukuran, nilai deviasi, estimasi ketidakpastian, serta identitas lembaga kalibrasi yang melakukan verifikasi alat tersebut.

Di Indonesia, tanggung jawab pelaksanaan dan pengawasan kalibrasi berada pada Badan Standardisasi Nasional (BSN) dan Kementerian Perindustrian, yang bekerja sama dengan KIM-LIPI, kini berintegrasi dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pada tingkat internasional, kegiatan kalibrasi mengacu pada pedoman dari *International Organization for Standardization* (ISO), *International Electrotechnical Commission* (IEC), serta *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). Sinkronisasi antara standar nasional dan internasional ini sangat penting untuk memastikan ketertelusuran (*traceability*) hasil pengukuran sehingga diakui secara global, mendukung kelancaran perdagangan internasional, serta meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap kualitas produk industri.

Standarisasi adalah proses penetapan spesifikasi serta prosedur teknis yang disepakati bersama untuk menjamin konsistensi kualitas



BAB XI

Teknologi Metrologi Modern

A. Deskripsi singkat

Perkembangan metrologi modern telah membawa industri memasuki era baru pengukuran. Sistem pengukuran kini tidak lagi mengandalkan cara manual, melainkan mengintegrasikan komputerisasi, sensor digital, dan analisis berbasis data. Sinergi antara teknologi informasi dan metrologi ini memungkinkan pengukuran dilakukan lebih cepat, lebih akurat, dan memiliki ketertelusuran digital yang tinggi. Transformasi ini sangat penting dalam mendukung pelaksanaan Industri 4.0 dan pergeseran menuju Industri 5.0, di mana fokus utama diletakkan pada keberlanjutan dan efisiensi yang optimal.

Coordinate Measuring Machine (CMM) merupakan salah satu pilar utama metrologi modern karena telah berevolusi menjadi sistem pengukuran otomatis yang sangat presisi. CMM generasi terbaru dilengkapi dengan kombinasi sensor optik, probe taktil, dan perangkat lunak canggih yang memungkinkannya memproses data pengukuran tiga dimensi secara *real-time* (seketika). Teknologi ini tidak hanya berkontribusi

pada peningkatan akurasi pengukuran komponen rumit, tetapi juga secara signifikan mempercepat proses inspeksi pada bagian-bagian vital industri, seperti *mold*, blok mesin, dan komponen pesawat.

Selain CMM, teknologi metrologi non-kontak seperti (*laser scanning* dan *structured light 3D scanning*) telah menjadi terobosan signifikan dalam pengukuran industri. Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuannya mengukur bentuk dan dimensi objek tanpa menyentuh permukaannya. Hal ini menjadikannya solusi ideal untuk material yang sensitif atau komponen yang memiliki geometri sangat rumit. Karena teknologi ini mampu memindai jutaan titik koordinat dalam waktu singkat, data hasilnya dapat segera digunakan untuk analisis melalui *software* CAD/CAM, mendukung proses rekayasa balik (*reverse engineering*) dan pengendalian mutu produk.

Teknologi metrologi optik mengalami kemajuan pesat, memanfaatkan kamera beresolusi tinggi, interferometer, dan sensor fotonik. Sistem canggih ini dirancang untuk mengukur topografi permukaan, kekasaran mikro, dan perubahan bentuk (deformasi) material. Dalam industri yang sangat presisi, seperti manufaktur dan semikonduktor, *optical metrology* memegang peranan krusial untuk menjamin keseragaman dan kehalusan permukaan hingga mencapai tingkat nanometer. Selain itu, integrasi antara sensor optik dengan algoritma kecerdasan buatan (AI) kini mampu meningkatkan kecepatan dan akurasi deteksi kesalahan.

Metrologi modern semakin mengandalkan integrasi Internet of Things (IoT), sebuah teknologi yang berfungsi menghubungkan seluruh alat ukur ke dalam sebuah jaringan terpusat. Melalui sistem ini, data pengukuran dapat dikumpulkan, dikirim ke *cloud* atau *server*, dan dianalisis secara otomatis dan simultan. Kehadiran IoT memungkinkan pengawasan jarak jauh terhadap status kalibrasi, kondisi alat, dan hasil pengukuran yang sedang berlangsung. Dampaknya sangat besar, yaitu meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mendukung transparansi serta keterlacakan data dalam lingkungan produksi yang serba digital.



BAB XII

Studi Kasus dan Aplikasi Industri

A. Deskripsi singkat

Bab ini menyajikan penerapan nyata prinsip-prinsip pengukuran teknik dan metrologi di beragam sektor industri. Tujuannya adalah menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik, dengan menunjukkan bagaimana konsep pengukuran, kalibrasi, dan pengendalian mutu secara langsung digunakan dalam proses produksi, perakitan, dan perawatan mesin di lapangan. Melalui studi kasus dan contoh-contoh industri, pembaca akan mendapatkan pemahaman praktis yang memungkinkan mereka mengaitkan konsep akademik dengan kondisi operasional sesungguhnya. Pemahaman mendalam ini diharapkan dapat meningkatkan kompetensi teknis dan profesionalisme pembaca di bidang metrologi.

Setiap kegiatan produksi dalam industri modern sangat bergantung pada ketepatan dan keandalan pengukuran. Baik dalam proses permesinan, perakitan, maupun pengujian kualitas, hasil pengukuran menentukan apakah produk memenuhi standar yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, penguasaan teknik pengukuran menjadi faktor kunci dalam menjaga

efisiensi, keselamatan kerja, dan daya saing perusahaan. Bab ini menyoroti bahwa metrologi bukan hanya kegiatan laboratorium, tetapi merupakan sistem pengendali kualitas yang terintegrasi dalam seluruh rantai produksi industri.

Meskipun kemajuan teknologi telah mempermudah kegiatan pengukuran industri, tantangan tetap muncul dalam hal kalibrasi, pemeliharaan alat, serta kompetensi sumber daya manusia. Kesalahan manusia, kondisi lingkungan, dan degradasi peralatan dapat menyebabkan penyimpangan hasil pengukuran. Oleh karena itu, setiap industri perlu menerapkan sistem manajemen metrologi yang terstandar, seperti ISO/IEC 17025, yang mengatur proses kalibrasi, dokumentasi, serta validasi alat ukur untuk menjamin ketertelusuran hasil pengukuran.

B. Aplikasi pada industri Otomotif



Industri otomotif merupakan salah satu sektor manufaktur dengan tingkat kebutuhan pengukuran presisi tertinggi. Dalam proses produksi kendaraan bermotor, setiap komponen harus memenuhi standar geometri dan dimensi yang sangat ketat agar kendaraan dapat berfungsi dengan aman, efisien, dan tahan lama. Pengukuran presisi menjadi dasar dalam

Daftar Pustaka

- Acuritylaser. (2023). *Sensor Jarak Laser AR1000–Sensor Jangkauan–Laser Ketajaman*. Acuitylaser-Com. https://www-acuitylaser-com.translate.goog/product/laser-sensors/long-range-sensors/ar1000-laser-distance-sensor/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs
- Ainun. (2023). *Cara Membaca Jangka Sorong Lengkap beserta Contohnya*. Detiksulsel. <https://www.detik.com/sulsel/berita/d-6892018/cara-membaca-jangka-sorong-lengkap-beserta-contohnya>
- Amptek. (2025). *CdTe X-Ray and Gamma Ray Detectors*. <https://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/cdte-x-ray-and-gamma-ray-detectors>
- Aris elga. (2023). *Review Sensor Suhu DHT11: Cara Kerja dan Aplikasinya dengan Arduino–Arduino Indonesia | Tutorial Lengkap Arduino Bahasa Indonesia*. <https://www.arduinoindonesia.id/2024/06/review-sensor-suhu-dht11-cara-kerja-dan-aplikasinya-dengan-arduino.html>
- Aris elga. (2024). *Cara Mengakses dan Pemrograman Sensor Ultrasonic HC-SR04 Menggunakan Arduino Uno–Program Versi 1–Arduino Indonesia | Tutorial Lengkap Arduino Bahasa Indonesia*. <https://www.arduinoindonesia.id/2020/09/cara-mengakses-dan-pemrograman-sensor.html>
- Askgitek. (2024). *Accelerometer: Pengertian, Fungsi, dan Manfaat di Berbagai Industri*. <https://giteknindo.id/>

id/accelerometer-pengertian-fungsi-dan-manfaat-di-berbagai-industri/

- Barry, T. and. (2008). Guide for the Use of the International System of Units (SI). *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(1), 198–205. <https://doi.org/10.1097/00005768-199901000-00046>
- bussinessmachinefala. (2025). *Ultrasonic Thickness Gauge UM6500 UM6700 Metal Steel Plate Thickness Table | eBay*. https://www.ebay.com/itm/356045887703?_trkparms=amclksrc%3DITM%26aid%3D1110006%26algo%3DHOMESPLICE.SIM%26ao%3D1%26asc%3D293619%26meid%3D3e59b572231a43cd8c24368f6e7dd33e%26pid%3D101224%26rk%3D1%26rkt%3D4%26sd%3D176730345646%26itm%3D356045887703%26pmt%3D1%26noa%3D1%26pg%3D2332490%26algv%3DDefaultOrganicWebV9BertRefreshRankerWithCassiniEmbRecall%26brand%3DUnbranded&_trksid=p2332490.c101224.m-1
- Cmmcompas. (2024). *GLOBAL Series (Bridge-Type) Features & Use Cases | CMM COMPASS | CMM COMPASS*. <https://Cmm-Compass.Com/>. <https://cmm-compass.com/cmm-list/global.html>
- David B. Newell and Eite Tiesinga. (2019). The International System of Units (SI Units). *British Journal of Applied Physics*, 15(10), 1243–1246. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/15/10/312>
- Doebelin, E. O., & Terry, T. A. (2017). Measurement Systems, Application and Design, Revised Edition. In *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* (Vol. 98, Issue 2, pp. 204–205). <https://doi.org/10.1115/1.3427014>
- edukasielektronika. (2024). *Penjelasan tentang RTD (Resistance Temperature Detector)–Edukasi Elektronika | Electronics Engineering Solution and Education*. <https://www.edukasielektronika.com/2023/06/penjelasan-tentang-rtd-resistance-temperature-detector.html>
- Electric gmp. (2025). *Thermocouple TCK J kabel 2 mtr*. <https://www.gmp-electric.com/>

products/thermocouple-tck-j-kabel-2-mtr?srsltid=AfmBOoqL_
cFnrCkxG52_p5idSKwtAue7i7Y9mZ5jd01CbbxC2-zo7vA3

Eleymet metrology. (2025). *DeMeet Optical CMM Measuring Equipment* | Eley Metrology. <https://Eleymet.Com/>. <https://eleymet.com/coordinate-measuring-machines/demeet-optical-cmm/>

Forbes, I. (2015). *Measurement Science and Technology quantification : the experimental database*. 1–8.

Freida McFadden. (2025). Mitutoyo “2416S” Dial Indicator, #4-48 UNF Thread, 0.375” Stem Dia., “Lug Back,” White Dial, 0-100 Reading, 2.244” Dial Dia., 0-1” Range, 0.001” Graduation, +/-0.002” Accuracy: Amazon.com: Industrial & Scientific. Amazon.Com. https://www.amazon.com/Mitutoyo-2416S-Indicator-Graduation-Accuracy/dp/B001C0ZOPS/ref=pd_rhf_se_s_cp_1_4?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B001C0ZOPS&pd_rd_r=51C6JNBJKTFFM21EJ0AS&pd_rd_w=68pil&pd_rd_wg=15o52&refRID=51C6JNBJKTFFM21EJ0AS&th=1

Globaltestsupply. (2023). *Mitutoyo 129-153 Mechanical Depth Micrometer with Interchangeable Rods, 0 to 300 mm, 0.01 mm*. Mitutoyo.Com. <https://www.globaltestsupply.com/product/mitutoyo-129-153-mechanical-depth-micrometer-with-interchangeable-rods?epik=dj0yJnU9d3ZUYWJJdUF2TkRHTnRNcUxOdXEyS3daX3NtWkExS2QmcD0wJm49c0pxeXotcnJ3TTM1WEtlQmFvZjNmZyZ0PUFBQUFBR2pqMGRr>

Grizzly Industrial. (2025). *Grizzly G9598–Digital Outside Micrometer 0”–1”–Grizzly Industrial, Inc*. <https://Www.Grizzly.Com/>. <https://www.grizzly.com/products/grizzly-digital-outside-micrometer-0-1/g9598?epik=dj0yJnU9M3FZMDVHNWcwRUtkdXJOWWcxVZLS3prVEhzcFQxYkcmD0wJm49Vk5USmppVENHMD6bDhWYmN0T1U2ZyZ0PUFBQUFBR2pqMHY0>

higherprecision. (2025). *SPC-44-S0 Suburban Tool Sine Plate: S0–Call 800-469-0132 or Buy Online*. <https://Www.Higherprecision.Com/>.

- <https://www.higherprecision.com/products/sine-plates/suburban-tool-spc-44-s0-compound-sine-plate-set-series-s0>
- Hobson taylor. (2023a). *Digital Autocollimators | Straightness Measurement Instrument*. <https://Www.Taylor-Hobson.Com/>. <https://www.taylor-hobson.com/products/alignment-level/autocollimators/ultra-dual-axis-digital-autocollimator>
- Hobson taylor. (2023b). *TA51 Microptic Dual Axis Autocollimator with UKAS*. <https://Store.Ametek.In/>. <https://store.ametek.in/ta51-microptic-dual-axis-autocollimator-with-ukas/>
- Hobson taylor. (2023c). *VA900 Visual Autocollimator*. <https://Www.Taylor-Hobson.Com/>. <https://www.taylor-hobson.com/products/alignment-level/autocollimators/va900-visual-autocollimator>
- Hocken, R. J., & Pereira, P. H. (2016). Coordinate measuring machines and systems: Second edition. In *Coordinate Measuring Machines and Systems: Second Edition*.
- Honest factory. (2024). *Adjustable Angle GaugeHigh Precision Angle Pad GaugeAngle Block Ruler Tool | eBay*. <https://Www.Ebay.Com/>. <https://www.ebay.com/itm/286592619126?norover=1&siteid=1&mkevt=1&mkcid=16&chn=psoc>
- Indiamart. (2025). *Video Measuring System, QMS3D at ₹ 480000 in Chennai | ID: 12520965491*. <https://Www.Indiamart.Com/>. <https://www.indiamart.com/proddetail/video-measuring-system-12520965491.html?srsId=AfmBOoqZcQwJfDzS9TSUrdif5BoEojZ6uZxPU71s5KpPkaEJUET0x-oE>
- ISO/IEC 17025. (2017). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. *International Organization for Standardization, 2017*, 1–38. <https://www.iso.org/fr/standard/39883.html>
- ISO 9001. (2015). *Sine Centres – Keys & Clamps*. <https://Www.Keytechno.Com/>. <https://www.keytechno.com/industrial-tool/sine-centres/>

- jec. (2022). *How to Read the Parameters of a Thermistor*. <https://www.jec1988.com/>. <https://www.jec1988.com/news/how-to-read-the-parameters-of-a-thermistor/>
- Jual *Pride Jangka Sorong Digital 8inch P1002-200 Absolute Digital Caliper* | *Shopee Indonesia*. (2023). Shoppe. <https://shopee.co.id/product/143517698/3558251749>
- Kacker, R. N. (2021). Towards correction of the JCGM international vocabulary of metrology. *Measurement: Sensors*, 18, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100063>
- Keyence. (2025). *Sensor Pengukuran Laser 2D Akurasi Tinggi–Seri LJ-G5000* | *KEYENCE Indonesia*. <https://www.keyence.co.id/>. <https://www.keyence.co.id/products/measure/laser-2d/lj-g/>
- Leica. (2025). *Scanners* | *Leica Geosystems*. <https://leica-geosystems.com/>. <https://leica-geosystems.com/id-id/products/laser-scanners/scanners>
- Magaero. (2025). *Guideway material reduces cost of large-volume gantry CMMs*. <https://www.aero-mag.com/>. <https://www.aero-mag.com/guideway-material-reduces-cost-of-large-volume-gantry-cmms>
- McFadden Freida. (2024a). *Anytime Tools Angle Block Set 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° Precision +/- 20 Seconds, Machinist Tool, 10 Piece Set* : *Amazon.co.uk: Business, Industry & Science*. <https://www.amazon.co.uk/>. <https://www.amazon.co.uk/Anytime-Tools-Precision-Seconds-Machinist/dp/B00RR0KZRO>
- McFadden Freida. (2024b). *Magnetic Digital Angle Finder Protractor Inclinator- Digital Inclinator -Fast & Stable Measurement Tool with Magnetic Base and Backlit Display–Amazon.com*. <https://www.amazon.com/>. <https://www.amazon.com/Magnetic-Protractor-Inclinometer-Inclinometer-Measurement/dp/B0BRXH3M3Y>
- McFadden Freida. (2024c). *Rotating Platform 360° Motorized Rotation Stage Optical Rotary Table Electric Optical Rotation Platform for Industrial*

Production HT03RA100 Worm Gear Transmission: Amazon.com: Industrial & Scientific. <https://Www.Amazon.Com/>. <https://www.amazon.com/Motorized-Industrial-Production-HT03RA100-Transmission/dp/B0DHPD8V7C>

Measuring Yuzuki. (2024). *Buy Crystal Sine Table–Precision Angle Measuring Tool.* <https://Www.Yuzuki.Co.In/>. <https://www.yuzuki.co.in/product/sine-table/>

monotaro. (2025). *Beli WSDCAM Mikroskop Digital WS1600 Endoscope Magnifier 1600x Black 1pc | monotaro.id.* <https://Www.Monotaro.Id/>. https://www.monotaro.id/items/s044914097.html?utm_source=google&utm_medium=pla&utm_campaign=22608577675&utm_content=180145020197&utm_term=others_cat_group_2_pricebrand_group_1&gad_source=1&gad_campaignid=22608577675&gbraid=0AAAAADJU9-9vLaZnKAZnMfbVsERSnMETu&gclid=Cj0KCQjw9JLHBhC-ARIsAK4PhcrqWswLA5ik1zinRi-Um4t9ytmvfTJthDgJv2KpExK1J72TSu4_Of4aAqqYEALw_wcB

Morris Donna. (2025). *KONTONTY Digital Dial Indicator Digital Probe Indicator Dial Test Gauge Range 0-12.7mm Dial Test Indicators Electronic Indicator Gauge–Walmart.com.* <https://Www.Walmart.Com/>. <https://www.walmart.com/ip/KONTONTY-Digital-Dial-Indicator-Digital-Probe-Indicator-Dial-Test-Gauge-Range-0-12-7mm-Dial-Test-Indicators-Electronic-Indicator-Gauge/16325815450?wmlspartner=wlp&selectedSellerId=102621060>

Orbit6881. (2025). *DELUXE 5” SINE BAR | eBay.* <https://Www.Ebay.Com/>. <https://www.ebay.com/itm/166622671364>

pixel raw. (2024). *Microscope white background biotechnology magnification | Free Photo–rawpixel.* <https://Www.Rawpixel.Com/>. <https://www.rawpixel.com/image/14382560/microscope-white-background-biotechnology-magnification>

- Potentiallabs. (2023). *DS18B20 1-Wire Digital Temperature Sensor Online In India. Hyderabad.* <https://Potentiallabs.Com/>. <https://potentiallabs.com/cart/ds18b20-temperature-sensor?srsltid=AfmBOoqnYHF4dp4lRWx33PfBkzn8dXOR7k0UBWqi2HS9wOihuBZ0f9Q9>
- RS Components Ltd. (2023). *A Complete Guide to Micrometers.* <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/micrometers-guide>
- Rscmmpany. (2024). *RS PRO Load Cell, 500kg Range, Compression Measure | RS.* <https://Nz.Rs-Online.Com/>. <https://nz.rs-online.com/web/p/strain-gauges/2042764?srsltid=AfmBOorW8vE5Oh4RU29f-wcSqxwbhQMEdYQbU6CqWEhaoKZlhynG8Hrr>
- sensorsone. (2024). *TM Silicon Strain Gauge Pressure Transducer.* <https://Www.Sensorsone.Com/>. <https://www.sensorsone.com/tm-silicon-strain-gauge-pressure-transducer/#rel-docs>
- Sexton laura. (2025a). *Empire Level Stainless Steel Protractor 27912 | Zoro.* <https://Www.Zoro.Com/>. <https://www.zoro.com/empire-level-stainless-steel-protractor-27912/i/G4875145/>
- Sexton laura. (2025b). *Fowler Universal Bevel Dial Protractor 524406120 | Zoro.* <https://Www.Zoro.Com/>. <https://www.zoro.com/fowler-universal-bevel-dial-protractor-524406120/i/G5811384/>
- Sexton laura. (2025c). *Starrett Feeler Gauge Set, Dimension Type 66 | Zoro.* <https://Www.Zoro.Com/>. <https://www.zoro.com/starrett-feeler-gauge-set-dimension-type-66/i/G005259509/>
- Sexton laura. (2025d). *Suburban Sine Bar, 6-1/2inL, 1inW, 1-21/32inH SB-111 | Zoro.* <https://Www.Zoro.Com/>. <https://www.zoro.com/suburban-sine-bar-6-12inl-1inw-1-2132inh-sb-111/i/G3364560/?epik=dj0yJnU9SlINbUpiT2g4UF9PQjJEczlrR0dQVU1IbnJuWVFE MnAmcD0wJm49UjRfai1qUkNEdHRUaUQ2TURhazVsZyZ0PU FBQUFBR2pqNUNN>
- Sexton Laura. (2025). *Insize Dial Indicator, AGD 1, 0.0010" Graduations 2320-02 | Zoro.* <https://Www.Zoro.Com/>. <https://www.zoro.com/>

insize-dial-indicator-agd-1-00010-graduations-2320-02/i/G2551810/?epik=dj0yJnU9dEJxWjFrLWYybm9PbnRkZEFxRXFCQnd1NGVKZW8xTmcmcD0wJm49Zm43RzJsOV9iOVhHZEYVWbjUyWlVNZyZ0PUFBQUFBR2pqMXZZ

sherline. (2022). *Manual Rotary Table–Sherline Products*. <https://www.sherline.com/>. <https://www.sherline.com/product/3700-4-rotary-table/?srsltid=AfmBOopdO8CEs5fYY4jv7XJG3Ep-iFQ9OZwAMGjd2I94vtBpTBNpLxSK#description>

sherline. (2024). *CNC Rotary Table with Stepper Motor–Sherline Products*. Sherline.Com. https://www.sherline.com/product/8730-cnc-rotary-table-with-stepper-motor/?srsltid=AfmBOopQG56gFkGKcN-JhcRT_50QnLi36ovjr54g4VxGyvQtaQjt7qYf#description

Sino. (2024). *Single or Double Series Cantilever Coordinate Measuring Machine–Coordinate Measuring Machine and Cantilever Coordinate Measuring Machine*. <https://sino-printing-consum.en.made-in-china.com/product/tQzrNPFEJMYb/China-Single-or-Double-Series-Cantilever-Coordinate-Measuring-Machine.html>

Sugeng, R. (2006). Iso/Iec 17025 2005 Id. Iso, 1–38. [papers3://publication/uuid/24BE9782-5E0A-4D38-ABDB-ECCECD24E8BC](https://publication/uuid/24BE9782-5E0A-4D38-ABDB-ECCECD24E8BC)

Supplier industrial. (2025). *Jual VERTEX Tilting Rotary Tables VUT-10–Jakarta Barat–Industrial Supplier | Tokopedia*. <https://www.tokopedia.com/indsupplier/vertex-tilting-rotary-tables-vut-10>

Things, S. M., & Lengths, I. (2005). *Chapter 1 . Measurement*. 1–5.

Tool judge. (2024). *Mitutoyo–PH-3515F-14” Optical Comparator–w/ M2 Touch Screen Geometric Display & Optical Edge Detection–172-868-11A-M2-EDGE | Judge Tool & Gage*. <https://www.judgetool.com/>. https://www.judgetool.com/products/mitutoyo-ph-3515f-14-optical-comparator-w-m2-touch-screen-geometric-display-opt/?srsltid=AfmBOooEPe_8uOGtHLJK8a0nVP0TBnWgpVy-D3wuGILNb_HnnYfYmkML#pid=1

- Warren Knight Instrument Company. (2021). *Optical Clinometer, Precision Inclinator, Clinometer Forestry, Agriculture, Aviation, WK-23-1190*. <https://Warrenknight.Com/>. <https://warrenknight.com/optical-clinometer/>
- Whitehouse, D. J. (2011). Handbook of Surface and Nanometrology, SECOND EDITION. In *Handbook of Surface and Nanometrology, Second Edition*. <https://doi.org/10.1201/b10415>
- Wikipedia. (2023). *Autocollimator–Wikipedia*. <https://En.Wikipedia.Org/>. <https://en.wikipedia.org/wiki/Autocollimator>
- Yudhistira. (2025). *Fungsi Mikrometer Sekrup, Bagian, dan Cara Membacanya*. Bhinneka Update. <https://www.bhinneka.com/blog/fungsi-mikrometer-sekrup/>
- Zeiss. (2025). *ZEISS CALENO horizontal arm machine | ZEISS*. <https://Www.Zeiss.Com/>. <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/cmms/horizontal-arm-cmms/caleno.html>
- Zygo. (2025). *Laser Interferometers | Form & Transmitted Wavefront | ZYGO*. <https://Www.Zygo.Com/>. <https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers>

Glosarium

Istilah	Arti
Akurasi	Tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya dari besaran yang diukur.
Analisis Ketidakpastian	Proses menentukan seberapa besar penyimpangan yang mungkin terjadi dari hasil pengukuran.
Automated Grinding System	istem penggerindaan otomatis berbasis AI dan IoT yang digunakan untuk efisiensi dan presisi tinggi pada proses industri manufaktur.
Bevel Protractor	Alat ukur sudut presisi dengan skala vernier yang digunakan untuk mengukur atau memeriksa sudut kompleks.
BIM (Building Information Modeling)	Representasi digital dari karakteristik fisik dan fungsional bangunan yang digunakan dalam perencanaan dan konstruksi.
Blok Ukur (Gauge Block)	Standar panjang berbentuk blok logam presisi tinggi yang digunakan untuk kalibrasi alat ukur dimensi.
Calibration (Kalibrasi)	Proses membandingkan alat ukur dengan standar acuan untuk memastikan keakuratan hasil pengukurannya.
CMM (Coordinate Measuring Machine)	Mesin pengukur koordinat yang digunakan untuk mengukur geometri tiga dimensi komponen industri dengan presisi tinggi.
CAD/CAM (Computer-Aided Design/Manufacturing)	Sistem berbasis komputer yang digunakan untuk merancang dan memproduksi komponen secara otomatis dan terintegrasi.
Dial Gauge	Alat ukur presisi yang digunakan untuk mengukur penyimpangan kecil pada permukaan atau gerakan linier suatu benda kerja.
Digital Twin	Replika virtual dari sistem fisik yang digunakan untuk memantau dan menganalisis kinerja melalui data real-time.
Dimensi	Ukuran panjang, lebar, tinggi, diameter, atau bentuk geometrik suatu benda yang dapat diukur secara kuantitatif.
Error (Kesalahan Pengukuran)	Selisih antara nilai hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya dari besaran yang diukur.

Istilah	Arti
Evaluasi Hasil Pengukuran	Proses analisis terhadap data pengukuran untuk menentukan validitas dan konsistensi hasil.
Energi dan Konstruksi (Metrologi Industri)	Bidang penerapan pengukuran presisi pada pembangkit listrik, pipa tekanan tinggi, serta struktur infrastruktur.
Feeler Gauge	Alat ukur berupa lembaran logam tipis dengan ketebalan tertentu, digunakan untuk mengukur celah atau <i>clearance</i> antara dua permukaan.
Fits (Kecocokan)	Hubungan antara ukuran lubang dan poros dalam sistem toleransi teknik, menentukan apakah sambungan <i>loose</i> , <i>transition</i> , atau <i>interference</i> .
Gauge (Alat Ukur)	Alat yang digunakan untuk memeriksa ukuran, bentuk, atau posisi benda kerja tanpa memberikan pembacaan numerik.
Gauge Block	Standar panjang presisi tinggi yang digunakan untuk kalibrasi alat ukur panjang lainnya.
Grinding Precision	Proses penggerindaan dengan tingkat kehalusan tinggi untuk menghasilkan permukaan komponen dengan toleransi mikro.
Hubungan Pengukuran dan Standar Mutu	Keterkaitan antara hasil pengukuran yang akurat dengan penerapan sistem kualitas industri yang memenuhi standar ISO.
Human-Oriented Manufacturing (Industri 5.0)	Konsep manufaktur yang menggabungkan kecerdasan buatan dengan keahlian manusia untuk menciptakan sistem kerja adaptif.
Inclinometer	Alat ukur sudut kemiringan atau elevasi terhadap bidang horizontal.
IoT (Internet of Things)	Sistem yang menghubungkan alat ukur ke jaringan digital untuk pertukaran data secara otomatis dan real-time.
ISO (International Organization for Standardization)	Badan internasional yang menetapkan standar untuk sistem mutu dan pengukuran industri.
Jangka Sorong (Vernier Caliper)	Alat ukur mekanik atau digital yang digunakan untuk mengukur panjang, diameter, dan kedalaman dengan presisi tinggi.
Kalibrasi	Penyesuaian alat ukur terhadap standar acuan untuk menjaga akurasi dan ketertelusuran hasil pengukuran.

Istilah	Arti
Kesalahan Sistematis	Kesalahan yang terjadi secara teratur akibat ketidaksempurnaan alat atau metode pengukuran.
Kesalahan Acak	Penyimpangan hasil pengukuran yang tidak dapat diprediksi, biasanya disebabkan oleh faktor lingkungan atau keterbatasan manusia.
Laser Scanning 3D	Teknologi non-kontak yang digunakan untuk memindai bentuk permukaan objek secara tiga dimensi dengan presisi tinggi.
Leveling	Proses menentukan ketinggian relatif suatu titik terhadap permukaan referensi horizontal.
Metrologi	Ilmu yang mempelajari pengukuran, termasuk metode, standar, ketidakpastian, dan kalibrasi alat ukur.
Mikrometer Sekrup	Alat ukur presisi untuk mengukur ketebalan atau diameter benda kecil dengan resolusi hingga 0,01 mm.
Multimeter	Alat elektronik yang digunakan untuk mengukur besaran listrik seperti tegangan, arus, dan resistansi.
Non-Contact Measurement	Metode pengukuran tanpa kontak langsung antara alat dan objek, seperti dengan laser atau sensor optik.
NIST (National Institute of Standards and Technology)	Lembaga standar metrologi nasional Amerika Serikat yang mengatur kalibrasi dan pengukuran industri.
Osiloskop (Oscilloscope)	Alat ukur elektronik yang digunakan untuk menampilkan bentuk gelombang listrik terhadap waktu secara visual.
Optik Pengukuran	Sistem pengukuran berbasis cahaya yang digunakan untuk mendeteksi dimensi, bentuk, atau deviasi pada objek.
Presisi	Derajat keseragaman atau konsistensi hasil pengukuran yang dilakukan berulang-ulang.
Profil Proyeksi (Profile Projector)	Alat optik yang digunakan untuk membesarkan bayangan objek sehingga dimensi dapat diukur secara visual.
Quality Control (QC)	Proses pemeriksaan hasil produksi untuk memastikan kesesuaian dengan standar kualitas yang ditetapkan.
Quality Assurance (QA)	Sistem yang menjamin seluruh proses produksi telah direncanakan dan dilaksanakan sesuai dengan standar mutu.
Reprodusibilitas	Kemampuan hasil pengukuran untuk tetap sama meskipun dilakukan oleh operator, waktu, dan kondisi yang berbeda.

Istilah	Arti
Roughness (Kekasaran Permukaan)	Derajat ketidakteraturan mikro pada permukaan benda kerja yang diukur menggunakan alat seperti <i>surface roughness tester</i> .
Sensor Elektronik	Komponen yang mengubah besaran fisik (seperti suhu, tekanan, atau posisi) menjadi sinyal listrik untuk tujuan pengukuran.
Standar Satuan Internasional (SI)	Sistem satuan yang diakui secara global, mencakup meter, kilogram, sekon, ampere, kelvin, mol, dan candela.
SPC (Statistical Process Control)	Metode pengendalian mutu berbasis statistik untuk memantau dan mengontrol variasi proses produksi.
Toleransi	Batas penyimpangan yang masih diperbolehkan dari ukuran nominal suatu komponen teknik.
Traceability (Ketertelusuran)	Kemampuan untuk menelusuri hasil pengukuran hingga ke standar acuan nasional atau internasional.
Total Station	Alat ukur kombinasi teodolit dan EDM (Electronic Distance Measurement) untuk pengukuran jarak, sudut, dan koordinat posisi.
Uncertainty (Ketidakpastian Pengukuran)	Nilai yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan deviasi hasil pengukuran dari nilai sebenarnya.
Vernier Scale (Skala Nonius)	Skala tambahan pada alat ukur seperti jangka sorong dan bevel protractor yang memungkinkan pembacaan lebih presisi.
VIM (International Vocabulary of Metrology)	Dokumen acuan internasional yang mendefinisikan istilah dan konsep dalam ilmu metrologi.
Workpiece	Benda kerja yang sedang diukur, diuji, atau dikerjakan dalam proses manufaktur.

Kunci Jawaban

BAB I

1. Pengukuran dianggap sebagai dasar karena semua kegiatan teknik mulai dari desain, produksi, hingga inspeksi memerlukan data ukur yang akurat untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi.
2. Hubungannya adalah pengukuran yang tepat membantu mengurangi kesalahan, menghemat waktu, dan menekan biaya sehingga meningkatkan efisiensi kerja teknik.
3. Ketelitian penting karena hasil pengukuran yang tidak teliti dapat menimbulkan produk cacat, menurunkan mutu, dan meningkatkan angka reject dalam industri.
4. Penting karena metrologi industri memastikan bahwa produk memenuhi standar mutu, dapat dipertukarkan (interchangeable), dan sesuai kebutuhan pasar global.
5. Pengukuran biasa hanya menghasilkan data, sedangkan metrologi industri memastikan data tersebut valid, terkalibrasi, dan dapat ditelusuri (traceable) ke standar nasional/internasional.
6. Ruang lingkupnya mencakup teori dasar pengukuran, alat ukur mekanik, optik, digital, analisis kesalahan, toleransi, kalibrasi, serta aplikasi dalam industri.
7. Penguasaan toleransi dan kalibrasi penting karena menentukan batas penyimpangan produk yang masih dapat diterima dan menjamin ketertelusuran hasil ukur.
8. Pengukuran penting karena menjadi dasar penilaian kualitas. Tanpa data ukur yang akurat, mutu produk tidak bisa dibandingkan dengan spesifikasi.

9. Standar mutu internasional menuntut sistem pengukuran yang terkalibrasi dan dapat ditelusuri, sehingga hasil pengukuran diakui secara global dan mendukung sertifikasi mutu.
10. Traceability penting agar hasil ukur dapat diverifikasi ke standar internasional, menjamin keabsahan, serta memungkinkan integrasi dalam rantai pasok global.

BAB II

1. Pengukuran adalah proses membandingkan suatu besaran fisika dengan satuan baku untuk memperoleh nilai kuantitatif. Proses ini melibatkan instrumen, prosedur, dan acuan (standar) sehingga hasilnya dapat dinyatakan dalam angka dan direproduksi.
2. (a) Menggunakan alat yang terkalibrasi terhadap standar; (b) Metode pengukuran yang jelas dan terdokumentasi; (c) Kondisi lingkungan dikontrol; (d) Pengulangan untuk menilai presisi; (e) Pelaporan ketidakpastian pengukuran.
3. Karena tanpa standar, nilai pengukuran tidak memiliki acuan yang konsisten sehingga hasil dari tempat/alat yang berbeda tidak dapat dibandingkan. Standar memastikan keseragaman, keterlacakan, dan validitas hasil ukur.
4. Besaran pokok adalah besaran dasar yang tidak diturunkan dari besaran lain dalam SI. Contoh: panjang (meter, m), massa (kilogram, kg), waktu (sekon, s).
5. Karena SI ditetapkan dan disepakati secara internasional (BIPM), memiliki definisi baku untuk setiap satuan pokok, memungkinkan konsistensi dan keterbandingan hasil ilmiah, teknis, dan perdagangan di seluruh negara.
6. Standar primer : realisasi tertinggi dari satuan yang memiliki nilai paling mutlak dan dilestarikan oleh lembaga internasional, standar sekunder: diturunkan dari standar primer dan dipelihara oleh laboratorium nasional atau regional, standar kerja: alat referensi yang digunakan sehari-hari di laboratorium untuk kalibrasi rutin.

7. Karena alat ukur dapat mengalami drift (perubahan karakteristik) akibat pemakaian, keausan, kondisi lingkungan, atau kerusakan. Kalibrasi berkala mendeteksi dan memperbaiki deviasi sehingga kualitas produk, keselamatan, dan kepatuhan terhadap standar terjaga serta mencegah produk cacat atau biaya perbaikan.
8. Akurasi merupakan hasil pengukuran yang mendekati nilai benar atau nilai referensi sedangkan presisi merupakan pengukuran berulang yang konsisten satu sama lain, tanpa memandang kedekatannya terhadap nilai benar.
9. Pada inspeksi dimensi suku cadang yang diproduksi di beberapa pabrik (lokasi berbeda) atau diukur oleh beberapa laboratorium, reproduktibilitas penting agar semua pihak mendapatkan hasil yang serupa; misalnya pengukuran diameter poros pada rantai pasokan global agar komponen tetap saling pas (*interchangeability*).
10. Alat tersebut presisi tetapi tidak akurat. Karena presisi mengukur konsistensi hasil berulang (terpenuhi), sedangkan akurasi mengukur kedekatan ke nilai benar (tidak terpenuhi).

BAB III

1. Evaluasi hasil pengukuran adalah proses menganalisis data pengukuran untuk menilai akurasi, presisi, dan ketelitian hasil sehingga dapat dipercaya dan sesuai standar.
2. Akurasi dan presisi.
3. Rata-rata digunakan untuk mewakili nilai tengah dari sekumpulan data pengukuran dan menunjukkan nilai yang paling mendekati kebenaran.
4. Karena simpangan baku menunjukkan tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata, sehingga mencerminkan tingkat konsistensi pengukuran.
5. Kesalahan sistematis terjadi secara konsisten dan dapat dikoreksi, sedangkan kesalahan acak muncul secara tidak teratur akibat faktor luar atau ketidakpastian alat.

6. $(50.00 + 50.02 + 50.01 + 50.03 + 50.01) / 5 = 50.014 \text{ mm}$.
7. Untuk memastikan kualitas produk, meminimalkan kesalahan produksi, menjaga standar mutu, dan meningkatkan efisiensi proses.
8. Presisi adalah ukuran kedekatan antar hasil pengukuran yang dilakukan berulang kali pada objek yang sama.
9. Data pengukuran memiliki penyebaran yang sempit, menunjukkan hasil yang konsisten dan presisi tinggi.
10. Dengan melakukan kalibrasi alat secara rutin, menggunakan metode pengukuran yang tepat, serta mengurangi faktor kesalahan sistematis dan acak.

BAB IV

1. Jangka sorong mekanik menggunakan skala utama dan skala vernier untuk membaca hasil pengukuran secara manual, sehingga membutuhkan ketelitian dalam membaca skala. Sedangkan jangka sorong digital menggunakan sensor elektronik dan menampilkan hasil pengukuran langsung pada layar digital, sehingga lebih cepat, akurat, dan minim kesalahan baca.
2. Pierre Vernier adalah ilmuwan Perancis yang menemukan skala vernier pada tahun 1631, yaitu sistem skala tambahan yang memungkinkan pengukuran lebih teliti hingga ketelitian 0,02 mm. Penemuan ini menjadi dasar dari berbagai alat ukur presisi hingga saat ini.
3. *Frame*: rangka utama untuk menopang alat. *Anvil*: bagian tetap tempat benda diletakkan. *Spindle*: bagian bergerak untuk menjepit benda. *Sleeve*: skala utama. *Thimble*: skala putar untuk membaca ketelitian. *Ratchet*: memastikan tekanan pengukuran konstan
4. Mikrometer sekrup bekerja berdasarkan prinsip ulir sekrup. Gerakan rotasi dari thimble diterjemahkan menjadi gerakan linier pada spindle. Dengan ulir halus, satu putaran penuh menghasilkan perpindahan linier kecil yang dapat diukur secara teliti, biasanya dengan ketelitian 0,01 mm.

5. Dial gauge dipasang padaudukan (magnetic stand). Ujung kontak ditempelkan pada titik permukaan yang akan diukur, kemudian jarum dial gauge diatur ke nol. Permukaan digerakkan atau dial gauge digeser ke beberapa titik. Jika jarum bergerak, maka menunjukkan adanya ketidakrataan permukaan.
6. Fungsi utama feeler gauge adalah untuk mengukur celah kecil antar komponen mesin, khususnya pada katup dan rocker arm. Dengan feeler gauge, mekanik dapat menyesuaikan celah sesuai spesifikasi pabrikan agar katup membuka dan menutup dengan tepat, sehingga kinerja mesin optimal.
7. Nalkan jangka sorong dengan menutup rahang pengukur, jepit benda kerja di antara rahang tetap dan rahang geser, pastikan benda sejajar dengan rahang, baca hasil pengukuran pada skala utama dan skala vernier, catat hasil pengukuran dengan ketelitian yang sesuai.
8. Karena dial gauge tidak menunjukkan nilai absolut suatu dimensi, tetapi hanya menunjukkan selisih atau penyimpangan dari nilai acuan (nol). Alat ini digunakan untuk membandingkan kondisi benda dengan standar atau posisi awal, sehingga disebut komparator.
9. Mikrometer luar digunakan untuk mengukur ketebalan atau diameter luar suatu benda, mikrometer dalam digunakan untuk mengukur diameter lubang atau rongga, mikrometer kedalaman digunakan untuk mengukur kedalaman alur, celah atau lubang.
10. Karena alat ukur mekanik merupakan dasar dalam pengukuran presisi. Penguasaan ini membantu teknisi memahami spesifikasi produk, menjamin ketepatan dimensi, mendukung proses perakitan, serta memastikan kualitas produk sesuai standar industri. Tanpa keterampilan ini, risiko kesalahan pengukuran dan kegagalan produksi akan meningkat.

BAB V

1. Fungsi utama alat ukur sudut adalah untuk mengukur, memeriksa, dan memastikan ketepatan kemiringan atau sudut antar bidang pada suatu komponen teknik. Pengukuran sudut penting agar komponen dapat dirakit dengan presisi sesuai desain, menghindari kesalahan posisi, serta menjaga kualitas dan kesesuaian fungsi dalam sistem mekanik.
2. Busur derajat digunakan untuk mengukur sudut dengan ketelitian rendah hingga sedang (biasanya $\pm 1^\circ$), sedangkan bevel protractor memiliki vernier scale yang memungkinkan pembacaan sudut hingga 5 menit busur. Bevel protractor juga dapat digunakan untuk memeriksa dan menyalin sudut pada benda kerja, sedangkan busur derajat lebih umum digunakan dalam pengukuran geometri dasar.
3. Sine bar bekerja berdasarkan prinsip trigonometri, di mana nilai sinus sudut ditentukan oleh rasio antara tinggi tumpukan gauge block (h) dan jarak antar silinder penyangga (L). Dengan mengatur tinggi tumpukan, operator dapat memperoleh atau mengukur sudut dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi.
4. Sine Bar / Sine Plate → Mengukur dan membentuk sudut secara presisi menggunakan prinsip sinus.
Autocollimator → Mengukur deviasi sudut kecil menggunakan prinsip pantulan cahaya.
Angle Gauge Block → Digunakan sebagai standar sudut untuk kalibrasi atau pembandingan.
Rotary Table → Mengatur rotasi benda kerja dengan sudut presisi pada mesin atau inspeksi optik.
5. Inclinatorimeter ditempatkan pada permukaan yang akan diukur, kemudian alat membaca deviasi sudut terhadap bidang horizontal menggunakan prinsip gravitasi. Pada versi digital, alat dikalibrasi pada posisi nol terlebih dahulu, lalu hasil pengukuran ditampilkan dalam

derajat ($^{\circ}$) atau persen (%). Alat harus diletakkan pada permukaan yang bersih, datar, dan bebas getaran untuk hasil akurat.

6. Mikroskop pengukur digunakan untuk mengukur dimensi kecil dan detail halus pada benda kerja seperti diameter lubang, ketebalan, jarak antar titik, dan sudut mikro. Alat ini memberikan pembesaran optik tinggi dan presisi hingga mikrometer, serta dapat dikombinasikan dengan sistem digital untuk dokumentasi dan analisis data pengukuran.
7. Profile projector bekerja dengan memproyeksikan bayangan benda kerja ke layar besar melalui sistem optik dan sumber cahaya belakang. Siluet atau profil bayangan dibandingkan dengan gambar standar, templet, atau grid untuk mengukur dimensi, sudut, dan bentuk. Prinsip dasarnya adalah pembesaran optik yang memungkinkan pengukuran non-kontak secara akurat.
8. Karena alat optik dapat melakukan pengukuran tanpa kontak fisik dengan benda kerja, sehingga tidak menimbulkan deformasi atau goresan. Selain itu, alat optik seperti mikroskop pengukur dan proyektor profil memiliki resolusi tinggi dan dapat digunakan untuk objek berukuran sangat kecil atau kompleks, yang sulit diukur secara mekanik.
9. Faktor-faktor yang mempengaruhi keakuratan meliputi:
 - Kebersihan permukaan benda dan lensa optik,
 - Suhu lingkungan (pengaruh ekspansi termal),
 - Getaran atau goyangan selama pengukuran,
 - Kesalahan kalibrasi alat,
 - Fokus dan pencahayaan yang tidak optimal.
10. Alat ukur sudut dan optik berperan penting dalam memastikan komponen yang diproduksi memenuhi spesifikasi geometris dan toleransi desain. Dengan pengukuran presisi menggunakan sine bar, autocollimator, atau profile projector, kualitas produk dapat dijaga secara konsisten, mencegah produk cacat, serta meningkatkan

efisiensi dan keandalan proses produksi di industri manufaktur modern.

BAB VI

1. Alat ukur elektronik adalah alat yang bekerja menggunakan prinsip kelistrikan dan rangkaian elektronik untuk mendeteksi, mengukur, dan menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk sinyal listrik atau digital. Contohnya antara lain multimeter, osiloskop, sensor suhu digital, dan Coordinate Measuring Machine (CMM).
2. Perbedaan utamanya terletak pada sistem pembacaan dan sumber daya. Alat ukur mekanik menggunakan skala analog dan tenaga manual, sedangkan alat ukur digital menggunakan rangkaian elektronik dan menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk angka digital dengan ketelitian lebih tinggi.
3. Multimeter berfungsi untuk mengukur besaran listrik seperti tegangan (volt), arus (ampere), dan hambatan (ohm). Selain itu, multimeter digital modern dapat digunakan untuk mengukur frekuensi, suhu, dan kontinuitas rangkaian listrik.
4. Osiloskop bekerja dengan menampilkan sinyal listrik dalam bentuk grafik gelombang terhadap waktu pada layar. Keunggulannya adalah mampu memperlihatkan bentuk gelombang, amplitudo, frekuensi, dan noise secara visual sehingga sangat berguna dalam analisis rangkaian elektronik.
5. (1) Sensor suhu (Thermocouple / RTD) mendeteksi perubahan suhu dan mengubahnya menjadi sinyal Listrik. (2) Sensor tekanan (Pressure sensor) mengubah tekanan mekanik menjadi sinyal listrik untuk memantau sistem hidrolik dan pneumatik.
6. CMM berfungsi untuk mengukur dimensi geometris komponen dengan tingkat presisi tinggi menggunakan probe yang bergerak pada tiga sumbu (X, Y, Z). Hasil pengukuran dapat dikirim ke komputer untuk analisis kualitas produk.

7. Kalibrasi penting untuk memastikan akurasi alat ukur tetap sesuai standar. Proses ini membandingkan hasil pengukuran alat dengan standar acuan agar kesalahan pengukuran dapat dikoreksi dan alat dapat digunakan dengan hasil yang valid.
8.
 - (1) Putar selektor multimeter ke skala " Ω " (ohm).
 - (2) Pastikan rangkaian tidak dialiri listrik.
 - (3) Tempelkan probe merah dan hitam pada kedua ujung resistor.
 - (4) Baca nilai resistansi pada layar digital atau jarum analog.
9. Pengukuran digital terintegrasi komputer adalah sistem di mana alat ukur digital dihubungkan dengan komputer untuk pencatatan, analisis, dan penyimpanan data secara otomatis. Sistem ini meningkatkan efisiensi, akurasi, dan memungkinkan pemantauan secara real-time.
10. Perkembangan teknologi digital menjadikan proses pengukuran lebih cepat, akurat, dan otomatis. Data pengukuran dapat dianalisis langsung melalui komputer, diintegrasikan ke sistem produksi, dan mendukung konsep *smart manufacturing* serta *Industry 4.0*.

BAB VII

1. Pengukuran dimensi dan bentuk adalah proses menentukan ukuran geometris seperti panjang, diameter, ketebalan, kebulatan, kesilindrisan, dan kerataan suatu benda kerja untuk memastikan kesesuaiannya terhadap spesifikasi teknik. Dalam metrologi industri, pengukuran ini berperan penting untuk menjamin mutu produk, kesesuaian antar komponen, serta efisiensi proses manufaktur.
2. Toleransi dan penyimpangan geometrik menetapkan batas variasi yang masih dapat diterima pada komponen. Hal ini penting untuk memastikan setiap bagian dapat dirakit tanpa cacat atau gangguan fungsi. Penerapan toleransi yang tepat juga mencegah pemborosan bahan dan waktu, serta menjamin produktivitas dan keandalan sistem manufaktur secara keseluruhan.
 - Pengukuran langsung dilakukan dengan membaca hasil langsung dari alat ukur seperti jangka sorong atau mikrometer.

- Pengukuran tidak langsung melibatkan perhitungan atau perbandingan menggunakan alat bantu, seperti menggunakan dial gauge atau CMM untuk menentukan deviasi dari standar.

Contoh: mengukur panjang benda dengan jangka sorong (langsung), sedangkan menentukan kesilindrisan dengan CMM (tidak langsung).

3. CMM bekerja dengan prinsip deteksi koordinat titik pada permukaan benda menggunakan probe (sensor). Mesin membaca posisi titik-titik dalam sistem koordinat X, Y, dan Z. Data koordinat ini kemudian diolah oleh komputer untuk menghitung dimensi, bentuk, dan toleransi geometrik objek. Keunggulan CMM adalah akurasi tinggi, fleksibilitas, serta kemampuan mengukur bentuk kompleks dengan cepat.
4. Profilometer digunakan untuk mengukur kekasaran (roughness), gelombang (waviness), dan bentuk profil permukaan benda. Alat ini bekerja dengan menggerakkan stylus halus di sepanjang permukaan benda dan mendeteksi perubahan ketinggian mikro. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menjadi parameter seperti R_a (*average roughness*), R_z (*mean peak-to-valley height*), dan R_t (*total roughness height*).
5. Kesilindrisan adalah ukuran deviasi bentuk benda terhadap silinder ideal sepanjang sumbu utamanya. Pengukurannya dapat dilakukan menggunakan CMM, roundness tester, atau alat pengukur permukaan rotasi. Hasil pengukuran digunakan untuk mengetahui apakah permukaan silinder memenuhi batas toleransi kesilindrisan sesuai dengan standar ISO 1101.
6. Kebulatan menunjukkan kesempurnaan bentuk lingkaran suatu penampang, sedangkan kesejajaran sumbu (*concentricity*) menunjukkan kesamaan pusat antara dua atau lebih lingkaran (misalnya poros dan lubang). Keduanya berhubungan erat karena deviasi kebulatan dapat memengaruhi nilai kesejajaran. Dalam

industri presisi, kedua parameter ini krusial untuk mencegah getaran dan aus dini pada komponen berputar.

7. Kerataan menunjukkan sejauh mana permukaan benda mendekati bidang datar ideal tanpa mempertimbangkan orientasinya terhadap sistem referensi. Pengukurannya dilakukan menggunakan surface plate dan dial indicator atau autocollimator. Nilai kerataan yang baik diperlukan untuk menjamin distribusi beban merata, terutama pada sambungan mesin dan landasan pengukuran.
8. Sistem pengukuran digital meningkatkan efektivitas melalui kecepatan, akurasi, dan kemampuan dokumentasi otomatis. Data hasil pengukuran dapat langsung dianalisis oleh perangkat lunak metrologi, dikonversi ke bentuk laporan, serta diintegrasikan ke sistem *Quality Management System* (QMS). Hal ini mengurangi kesalahan manusia dan mempercepat pengambilan keputusan dalam kontrol mutu.
9. Ketepatan pengukuran dimensi dan bentuk menentukan kualitas akhir produk. Jika hasil pengukuran menunjukkan deviasi di luar toleransi, produk dapat mengalami cacat fungsi atau gagal rakit. Oleh karena itu, kegiatan pengukuran menjadi bagian integral dari *Quality Assurance* (QA) dan *Continuous Improvement* (CI) dalam siklus produksi. Akurasi pengukuran yang konsisten memastikan mutu produk tetap tinggi dan sesuai standar internasional.

BAB VIII

1. Toleransi adalah batas penyimpangan yang diizinkan dari ukuran nominal suatu komponen tanpa mengganggu fungsi dan kesesuaian antar bagian. Konsep ini penting karena tidak ada proses produksi yang dapat menghasilkan dimensi yang benar-benar sempurna. Dengan adanya toleransi, perakitan komponen tetap dapat dilakukan dengan lancar, menghemat biaya produksi, serta menjaga keandalan dan kualitas produk akhir.

2. Konsep toleransi berkembang seiring dengan revolusi industri pada abad ke-18 dan 19 ketika produksi massal menuntut keseragaman dimensi komponen. Sebelumnya, setiap bagian dibuat secara manual dan hanya cocok dengan pasangannya. Dengan munculnya mesin perkakas presisi dan sistem standar seperti ISO dan ANSI, toleransi menjadi dasar penting dalam desain teknik dan sistem pertukaran komponen (*interchangeability*).
3. Akurasi menunjukkan kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya, sedangkan presisi menggambarkan konsistensi hasil pengukuran. Toleransi menentukan batas penyimpangan yang masih dapat diterima. Hubungannya adalah: semakin kecil toleransi, semakin tinggi tingkat akurasi dan presisi yang dibutuhkan dari alat ukur dan proses manufaktur.
4. Sistem toleransi ISO adalah standar internasional yang menetapkan batas penyimpangan dimensi dan jenis sambungan antar komponen (*fit*). Sistem ini menggunakan simbol huruf dan angka seperti H7/g6 untuk menentukan kombinasi lubang dan poros. Dalam industri, sistem ini diterapkan pada proses desain dan inspeksi agar komponen dari berbagai produsen dapat dirakit tanpa masalah dimensi.
5. Clearance Fit – terdapat celah antara dua komponen (misal poros dan lubang), memungkinkan gerakan bebas.
6. Transition Fit – terdapat kemungkinan celah kecil atau tekanan ringan, digunakan untuk pemasangan semi-presisi.
7. Interference Fit – terdapat tekanan antara dua bagian, menghasilkan sambungan kuat permanen.
8. *Interchangeability* adalah kemampuan komponen dari berbagai sumber untuk saling dipertukarkan tanpa perlu penyesuaian ulang. Toleransi menjamin bahwa dimensi setiap komponen masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga tetap cocok satu sama lain, memungkinkan perakitan cepat dan efisiensi produksi massal.
9. Semakin ketat toleransi, semakin tinggi biaya karena membutuhkan mesin presisi tinggi, waktu pemesinan lebih lama, dan pengujian

ketat. Namun, toleransi yang terlalu longgar dapat menurunkan kualitas dan keandalan produk. Oleh karena itu, keseimbangan antara toleransi, biaya, dan fungsi produk harus dioptimalkan untuk efisiensi industri.

10. Toleransi geometrik mengatur bentuk, orientasi, dan posisi suatu komponen, bukan hanya ukuran liniernya. Misalnya, *flatness tolerance* mengontrol kerataan permukaan, *cylindricity* mengontrol kesilindrisan poros, dan *position tolerance* mengontrol lokasi lubang terhadap referensi tertentu. Hal ini sangat penting untuk memastikan kesesuaian fungsional antar bagian mekanik.
11. Teknologi CAD/CAM (*Computer-Aided Design and Manufacturing*) memungkinkan perancangan toleransi secara digital dan otomatisasi proses produksi berdasarkan data presisi tinggi. Dengan simulasi komputer, toleransi dapat dioptimalkan sebelum produksi, sehingga mengurangi kesalahan, mempercepat waktu pembuatan, dan memastikan kesesuaian antar komponen dengan standar ISO.
12. Pemahaman tentang toleransi membantu teknisi dan insinyur merancang produk yang fungsional, efisien, dan ekonomis. Mereka dapat menentukan batas dimensi yang realistis berdasarkan kemampuan mesin dan kebutuhan fungsi. Tanpa pemahaman toleransi yang baik, produk dapat gagal dalam perakitan atau tidak memenuhi standar mutu industri.

BAB IX

1. Metrologi industri adalah penerapan ilmu pengukuran dalam proses produksi untuk menjamin ketertelusuran, akurasi, dan konsistensi hasil produk. Bidang ini penting karena memastikan semua komponen diproduksi sesuai spesifikasi, mendukung pengendalian mutu, mengurangi kesalahan, dan meningkatkan efisiensi proses manufaktur secara keseluruhan.
2. Tujuan utama metrologi adalah menjamin keandalan data pengukuran yang menjadi dasar pengambilan keputusan mutu, memastikan

kesesuaian produk terhadap standar, serta meningkatkan kepercayaan pelanggan terhadap konsistensi kualitas hasil produksi.

3. Variasi umum terjadi secara alami dalam sistem produksi karena faktor normal seperti kondisi mesin dan material. Sedangkan variasi khusus disebabkan oleh faktor tertentu yang tidak diinginkan seperti kerusakan alat, kesalahan operator, atau bahan yang tidak sesuai. Variasi khusus harus segera diidentifikasi dan dikoreksi agar proses tetap stabil.
4. *Control chart* adalah grafik statistik yang digunakan untuk memantau kestabilan proses dari waktu ke waktu dengan menampilkan nilai rata-rata dan batas kendali. Alat ini membantu mendeteksi penyimpangan proses sejak dini sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum menghasilkan produk cacat.
5. AQL adalah tingkat kualitas maksimum yang masih dapat diterima dalam suatu lot produk. Dalam industri, nilai AQL digunakan sebagai dasar untuk menentukan jumlah sampel dan kriteria penerimaan atau penolakan suatu batch dalam inspeksi mutu berdasarkan standar ISO 2859-1.
6. Incoming inspection, pemeriksaan bahan baku atau komponen yang datang dari pemasok.
in-process inspection, pemeriksaan produk selama proses produksi berlangsung.
final inspection, pemeriksaan akhir untuk memastikan produk sesuai spesifikasi sebelum dikirim ke pelanggan.
7. Metrologi memungkinkan pengukuran cepat dan akurat, sehingga variasi proses dapat dikendalikan secara real-time. Hal ini mengurangi waktu inspeksi, meminimalkan rework, mempercepat deteksi kesalahan, dan memastikan hasil produksi lebih konsisten serta efisien.
8. Teknologi digital dan IoT memungkinkan alat ukur terhubung secara otomatis untuk mengirim data ke sistem pusat. Data tersebut

dianalisis secara real-time untuk memantau kualitas produk dan kinerja mesin. Integrasi ini menciptakan sistem pengukuran cerdas (*smart metrology*) yang mampu melakukan koreksi otomatis pada proses produksi.

9. SPC membantu menjaga stabilitas proses produksi dan mendeteksi penyimpangan sejak awal, sehingga produk cacat dapat diminimalkan. Dengan berkurangnya cacat dan rework, biaya produksi menjadi lebih efisien, sementara kualitas produk meningkat secara konsisten.
10. Karena keberhasilan metrologi dan SPC tidak hanya bergantung pada alat ukur, tetapi juga pada kemampuan operator dan teknisi dalam membaca data, menganalisis variasi, serta menerapkan.

BAB X

1. Kalibrasi adalah proses perbandingan hasil pengukuran suatu alat ukur terhadap standar acuan yang diketahui nilai ketelitiannya, dengan tujuan menentukan penyimpangan alat tersebut. Dalam metrologi industri, kalibrasi penting untuk menjamin akurasi, konsistensi, dan keterlacakan hasil pengukuran. Tanpa kalibrasi yang benar, data produksi dan mutu produk dapat menyimpang dari standar yang diharapkan.
2. Menentukan tingkat penyimpangan alat ukur terhadap standar acuan, Memastikan alat ukur masih bekerja dalam batas toleransi yang dapat diterima,
Menjamin validitas hasil pengukuran sebagai dasar dalam proses kontrol mutu, audit kualitas, dan sertifikasi produk industri.
3. Kalibrasi merupakan proses teknis membandingkan hasil alat ukur dengan standar acuan untuk mengetahui penyimpangannya, sedangkan sertifikasi adalah pengakuan resmi bahwa alat ukur telah dikalibrasi sesuai prosedur dan memenuhi standar yang berlaku. Sertifikasi memberikan legalitas dan jaminan keabsahan hasil pengukuran.

4. BSN berfungsi menetapkan dan mengelola Standar Nasional Indonesia (SNI), termasuk dalam bidang kalibrasi dan pengukuran. BSN mengoordinasikan penerapan standar dengan lembaga internasional seperti ISO dan BIPM, serta bekerja sama dengan Komite Akreditasi Nasional (KAN) untuk memastikan laboratorium kalibrasi di Indonesia memenuhi standar ISO/IEC 17025.
5. Keterlacakan (traceability) adalah kemampuan menelusuri hasil pengukuran hingga ke standar nasional atau internasional melalui rantai kalibrasi yang terdokumentasi dan berkelanjutan. Artinya, setiap hasil pengukuran dapat dikaitkan dengan standar acuan tertinggi seperti BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) untuk menjamin keabsahannya.
6. BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), mengelola Sistem Satuan Internasional (SI).
OIML (International Organization of Legal Metrology): menetapkan standar metrologi legal.
ISO dan IEC, menyusun standar teknis internasional dalam bidang manajemen mutu dan sistem pengujian.
Lembaga-lembaga ini memastikan keseragaman standar pengukuran global.
7. Sertifikasi alat ukur menjamin bahwa alat tersebut bekerja dengan akurat dan hasilnya dapat dipercaya. Hal ini penting untuk menjaga kualitas produk, meminimalkan kesalahan pengukuran, serta memastikan kepatuhan terhadap standar internasional seperti ISO 9001 dan ISO/IEC 17025. Sertifikasi juga meningkatkan kepercayaan konsumen dan memperkuat daya saing industri.
8. Langkah-langkahnya meliputi:
 - (1) Pengajuan permohonan ke lembaga sertifikasi;
 - (2) Pemeriksaan administratif dan teknis alat ukur;
 - (3) Kalibrasi dengan standar acuan;
 - (4) Analisis hasil pengukuran dan evaluasi ketidakpastian;

- (5)Penerbitan sertifikat jika alat memenuhi standar;
 - (6)Pemeliharaan berkala dan resertifikasi sesuai masa berlaku sertifikat.
9. Sertifikat kalibrasi mencakup: identitas alat ukur, nomor seri, hasil pengukuran, nilai koreksi, ketidakpastian, standar referensi yang digunakan, tanggal kalibrasi, tanda tangan pejabat berwenang, serta logo lembaga akreditasi (misalnya KAN atau ILAC). Dokumen ini menjadi bukti legal keterlacakan hasil pengukuran.
 10. Digitalisasi memungkinkan proses kalibrasi dan sertifikasi dilakukan secara otomatis, cepat, dan transparan. Dengan teknologi seperti IoT, cloud computing, dan blockchain metrology, data kalibrasi dapat diakses secara real-time, aman, dan tidak dapat dimanipulasi. Sistem ini mempercepat proses audit, meningkatkan efisiensi, serta mendukung penerapan metrologi industri 4.0 dan 5.0.

BAB XI

1. Teknologi *Computer-Aided Design* (CAD) berperan penting dalam metrologi modern karena menyediakan model digital tiga dimensi yang menjadi acuan dalam proses pengukuran dan verifikasi produk. Dengan CAD, data geometri yang dihasilkan dapat langsung diintegrasikan ke dalam sistem pengukuran seperti CMM untuk membandingkan dimensi aktual dengan desain teoretis. Hal ini mempercepat proses inspeksi dan meningkatkan ketepatan dalam kontrol mutu produk manufaktur.
2. *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) mengatur proses pembuatan produk berdasarkan data dari CAD, sedangkan *Coordinate Measuring Machine* (CMM) memverifikasi hasil produksi agar sesuai dengan desain. Hubungan keduanya bersifat saling melengkapi: CAM memastikan produk diproduksi secara efisien, sementara CMM memastikan produk tersebut memenuhi toleransi geometrik. Integrasi keduanya membentuk sistem produksi presisi yang berorientasi pada kualitas.

3. Metrologi non-kontak adalah metode pengukuran yang menggunakan sensor optik, laser, atau teknologi pencitraan tanpa menyentuh benda kerja. Keunggulannya antara lain menghindari deformasi objek akibat tekanan mekanis, memungkinkan pengukuran cepat pada permukaan kompleks, serta menghasilkan model digital 3D dengan resolusi tinggi. Teknologi ini sangat ideal untuk material sensitif atau komponen mikro presisi.
4. Teknologi *laser scanning* bekerja dengan memancarkan sinar laser ke permukaan objek, kemudian mendeteksi pantulan cahaya tersebut untuk menghitung jarak dan membentuk koordinat titik-titik (point cloud). Data ini diolah menjadi model 3D yang menggambarkan bentuk dan dimensi objek secara akurat. Proses ini sangat cepat, presisi tinggi, dan cocok untuk pengukuran permukaan yang kompleks atau sulit dijangkau.
5. Perbedaan utamanya terletak pada metode akuisisi data. Laser scanning menggunakan pancaran laser tunggal yang memindai permukaan titik demi titik, sedangkan *3D scanning* dapat menggunakan berbagai metode seperti fotogrametri, structured light, atau multi-laser untuk menghasilkan model tiga dimensi. 3D scanning umumnya lebih cepat dan menghasilkan representasi spasial yang lebih lengkap dalam waktu singkat.
6. IoT menghubungkan berbagai alat ukur melalui jaringan internet sehingga data pengukuran dapat dikumpulkan dan dianalisis secara real-time. Hal ini memungkinkan pengawasan proses produksi secara berkelanjutan, deteksi dini kesalahan, serta pengendalian kualitas otomatis. Dengan IoT, sistem metrologi menjadi lebih responsif, efisien, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi proses industri.
7. Penerapan *cloud computing* dalam metrologi berbasis IoT memungkinkan penyimpanan dan analisis data pengukuran dalam skala besar secara terpusat. Keuntungan utamanya adalah akses data yang cepat, integrasi antar departemen produksi, dan pemantauan

kondisi alat ukur dari jarak jauh. Sistem ini juga mendukung kolaborasi antar pabrik atau laboratorium dalam pengendalian mutu global.

8. *Digital traceability* adalah kemampuan untuk melacak dan memverifikasi setiap proses pengukuran, kalibrasi, dan analisis data secara digital. Setiap hasil pengukuran tercatat dalam sistem berbasis IoT dan cloud, memastikan keaslian, integritas, dan keterhubungan data antar tahapan proses. Konsep ini meningkatkan transparansi, akuntabilitas, serta kepercayaan terhadap hasil pengukuran industri.
9. *Smart sensors* mampu mengukur, memproses, dan mengirimkan data secara otomatis ke sistem pengolahan pusat. Dalam metrologi digital, sensor ini mendukung otomatisasi pengukuran dan mengurangi ketergantungan pada operator manusia. Selain itu, sensor cerdas dapat melakukan diagnosis mandiri (self-diagnosis) dan kalibrasi otomatis, sehingga keakuratan pengukuran selalu terjaga.
10. Metrologi masa depan akan semakin terintegrasi dengan teknologi digital seperti AI, IoT, machine learning, dan sistem siber-fisik (CPS). Pengukuran akan dilakukan secara otonom, berbasis data besar (big data), dan mampu beradaptasi dengan kondisi dinamis proses manufaktur. Dampaknya adalah terciptanya *Smart Measurement Systems* yang meningkatkan produktivitas, kualitas, dan keberlanjutan proses industri global.

BAB XII

1. Metrologi berperan penting dalam memastikan setiap komponen otomotif, seperti poros engkol, blok mesin, dan sistem rem, memiliki presisi tinggi sesuai spesifikasi desain. Penggunaan alat ukur seperti CMM dan sistem *laser scanning* membantu mendeteksi deviasi dimensi sekecil mikron, sehingga menjamin performa, efisiensi bahan bakar, dan keselamatan kendaraan.
2. Karena setiap komponen pesawat harus memenuhi toleransi ketat untuk menjamin keselamatan dan performa aerodinamis. Metrologi memastikan setiap bagian pesawat, seperti bilah turbin dan sayap,

diproduksi dan diuji sesuai standar internasional (AS9100) sehingga meminimalkan risiko kegagalan struktural.

3. Dalam industri energi, sensor digital dan *laser alignment system* digunakan untuk memantau posisi turbin dan pipa secara real-time. Selain itu, penggunaan *vibration analyzer* dan *thermographic camera* memungkinkan pengukuran non-kontak untuk deteksi dini keausan dan efisiensi sistem pembangkit listrik.
4. Melalui alat ukur seperti *total station* dan *laser level*, data posisi dan elevasi dapat diukur dengan presisi tinggi dan langsung terintegrasi ke model *Building Information Modeling (BIM)*. Hal ini meminimalkan kesalahan pembangunan, meningkatkan efisiensi material, serta memastikan kesesuaian struktur dengan desain teknis.
5. *Traceability* adalah kemampuan untuk menelusuri hasil pengukuran hingga ke standar nasional atau internasional. Setiap alat ukur yang dikalibrasi memiliki catatan berjenjang yang menunjukkan hubungan antara hasil pengukuran dan standar acuannya, menjamin keabsahan dan keandalan data yang dihasilkan.
6. Metrologi merupakan elemen penting dalam sistem manajemen mutu seperti ISO 9001, karena memastikan seluruh proses produksi diukur dan dikontrol dengan standar yang konsisten. Pengukuran yang akurat mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan mencegah terjadinya produk cacat.
7. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data pengukuran dari sensor secara real-time, sedangkan AI menganalisis data tersebut untuk mendeteksi pola penyimpangan, prediksi keausan alat, dan penentuan langkah korektif otomatis. Kombinasi keduanya menciptakan sistem metrologi adaptif yang lebih efisien dan prediktif.
8. Manfaatnya meliputi peningkatan akurasi pengukuran, efisiensi proses produksi, pengurangan cacat produk, dan peningkatan kepercayaan pelanggan terhadap kualitas produk. Selain itu, *best practice* memperkuat daya saing perusahaan melalui penerapan standar mutu dan sistem kalibrasi yang terverifikasi.

9. Personel metrologi harus memahami prinsip pengukuran, sumber kesalahan, serta cara kalibrasi yang benar. Kompetensi teknis yang baik memastikan alat ukur digunakan secara tepat, hasil pengukuran valid, dan keputusan kualitas diambil berdasarkan data yang akurat.
10. Metrologi industri bergerak menuju sistem otomatis berbasis kecerdasan buatan, robotik, dan *machine vision* yang memungkinkan pengukuran adaptif serta analisis prediktif. Fokus utamanya adalah kolaborasi manusia dan mesin, keberlanjutan, serta peningkatan efisiensi energi dalam sistem produksi cerdas



Pengukuran Teknik & Metrologi Industri

Di era globalisasi dan revolusi industri 4.0, permintaan terhadap produk industri semakin meningkat. Pelanggan dan pengguna menginginkan produk yang berkualitas, tepat, aman serta memiliki daya saing di pasar internasional. Dalam menghadapi tantangan itu, sektor manufaktur diharuskan tidak hanya memproduksi barang dalam jumlah besar, tetapi harus menjamin bahwa setiap produk memiliki akurasi dan kesesuaian ukuran. Setiap langkah dalam proses produksi mulai dari perancangan, pemilihan bahan, perakitan hingga pengendalian kualitas tidak bisa terlepas dari aktivitas pengukuran. Pengukuran memiliki peran krusial dalam menetapkan dimensi produk agar sesuai dengan desain, memeriksa toleransi serta kualitas permukaan yang berdampak pada kinerja produk, menguji kecocokan antar komponen dapat dirakit dengan baik, hingga menjamin keselamatan produk saat digunakan, khususnya di sektor industri.



✉ literasinusantaraofficial@gmail.com
🌐 www.penerbitlitnus.co.id
📺 @litnuspenerbit
📞 literasinusantara_
☎ 085755971589

Pendidikan +17

