

SNSU PK.P-08-2022

Panduan Kalibrasi Meja Rata



SNSU PK.P-08:2022

PANDUAN KALIBRASI (MEJA RATA)

Penyusun: 1. Okasatria Novyanto

2. A. Praba Drijarkara
3. Nurlathifah
4. Nurul Alfiyati
5. Eka Pratiwi
6. Ocka Hedrony
7. Ardi Rahman
8. Azwar Sabana
9. Istiqomah
10. Rina Yuniarty

Kontributor: 1. Muhammad Fathurachman

2. Ganang Adhitama
3. I Gusti Ayu Pristha Arvikadewi

Desain sampul: Bagus Muhammad Irvan dan David Nicko Harmanditya - BSN

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi, dan Biologi

Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2022

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Meja Rata (SNSU PK.P-08:2022) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi meja rata di laboratorium kalibrasi maupun institusi lain yang berkepentingan dengan pengukuran yang perlu dijamin keabsahannya. Panduan ini mencakup definisi umum, langkah-langkah kalibrasi, serta evaluasi ketidakpastian pengukuran. Panduan ini disusun berdasarkan acuan metode internasional, nasional, maupun sumber ilmiah lainnya melalui proses pembahasan internal di Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi, dan Biologi serta dengan mempertimbangkan masukan dari para ahli di bidang metrologi dimensi.

Dokumen ini diterbitkan secara bebas dan tidak untuk diperjualbelikan secara komersial. Bagian dari dokumen ini dapat dikutip untuk keperluan edukasi atau kegiatan ilmiah dengan menyebutkan sumbernya, namun tidak untuk keperluan komersial.

Disahkan tanggal 15 November 2022



Zakiyah

Plt. Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran
Badan Standardisasi Nasional

Daftar isi

1	Pendahuluan	1
2	Lingkup	1
3	Definisi.....	2
4	Pengaruh kondisi lingkungan	3
5	Prosedur pengukuran dan evaluasi data.....	3
5.1	Persiapan	3
5.2	Pengukuran	6
5.3	Kalkulasi data pengukuran	6
6	Evaluasi ketidakpastian pengukuran dengan metode Monte Carlo	8
	Lampiran A Dasar Teori	9
	Lampiran B Penurunan rumus least-square dan penyusunan matriks A	12
	Lampiran C Contoh hasil pengukuran dan pengolahan data	15
	Lampiran D Aplikasi untuk menganalisis kerataan meja rata.....	22
	Lampiran E Contoh laporan kalibrasi	26
	Bibliografi.....	27

Panduan Kalibrasi Meja Rata

1 Pendahuluan

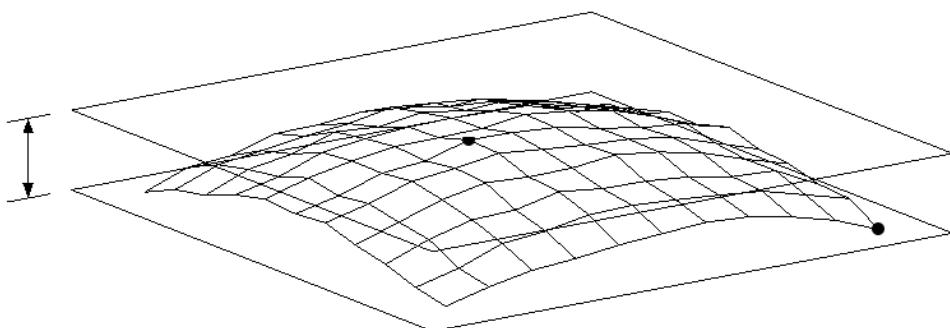
- 1.1 Tujuan dibuatnya panduan ini adalah untuk mengharmonisasikan pelaksanaan kalibrasi meja rata yang dilakukan oleh laboratorium penerap SNI ISO/IEC 17025, *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi*.
- 1.2 Informasi yang diuraikan dalam panduan ini mengacu pada standar ISO 8512-2:1990 - *Surface plates – Part 2: Granite*, dan standar atau dokumen lain yang relevan dan termutakhir [1].

2 Lingkup

- 2.1 Panduan ini menguraikan prosedur pengukuran kerataan meja rata (*surface plate*) dengan metode pengukuran kemiringan progresif dan pengolahan data menggunakan metode *least square*. Literatur acuan utama yang digunakan pada panduan ini adalah makalah Haitjema dan Meijer [2]. Sedangkan metode matriks untuk memecahkan perhitungan *least square* mengacu ke Herrmann [3].
- 2.2 Metode pengukuran pada panduan ini menggunakan alat ukur kemiringan absolut, yakni sebuah level elektronik dengan daya baca 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ atau lebih baik, bilah pelurus (*straight edge*), dan pola pengukuran yang berbentuk kisi-kisi saling bersilangan (*grid*). Pada panduan ini, kemiringan antara dua titik koordinat yang membentuk kisi-kisi saling bersilangan diukur dengan menggunakan alat ukur kemiringan. Dari data kemiringan tersebut, beda-tinggi antara tiap dua titik dapat dihitung. Nilai ketinggian tiap titik dari data beda-tinggi tersebut selanjutnya dikomputasikan.
- 2.3 Panduan ini dapat digunakan pada meja rata dengan ukuran minimal 3 kali panjang tapak kaki dan maksimal 13 kali panjang tapak kaki dari level elektronik yang digunakan. Secara fisik dapat diilustrasikan bahwa petunjuk teknis ini diperuntukkan bagi meja rata berukuran minimal 450 mm x 450 mm dengan panjang tapak kaki level elektronik yang digunakan yakni 125 mm dan maksimal 2000 mm x 2000 mm dengan panjang tapak kaki level elektronik yang digunakan yakni 150 mm.
- 2.4 Panduan ini menetapkan prosedur evaluasi ketidakpastian pengukuran menggunakan metode Monte Carlo yang terkait dengan kalibrasi meja rata.

3 Definisi

- 3.1. Meja rata atau *surface plate* adalah salah satu perangkat yang digunakan dalam kalibrasi dan pengukuran dimensional. Fungsinya adalah sebagai datum atau bidang acuan untuk pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan instrumen ukur seperti *dial gauge*, *height gauge* dan lain-lain.
- 3.2. Kerataan atau *flatness* didefinisikan sebagai jarak terkecil antara dua bidang sejajar yang dapat mengapit bidang uji, seperti diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Definisi kerataan (*flatness*).

Bentuk atau profil suatu permukaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, dapat dinyatakan sebagai ketinggian titik-titik pada permukaan tersebut, relatif terhadap suatu bidang datum. Nilai kerataan (F) merupakan selisih antara ketinggian titik tertinggi (f_{\max}) dan titik terendah (f_{\min}) pada permukaan tersebut. Untuk memenuhi definisi kerataan, bidang datum tersebut harus dipilih sedemikian sehingga F mempunyai nilai sekecil-kecilnya.

Pada **Error! Reference source not found.**, titik tertinggi dan titik terendah ditandai dengan noktah yang merupakan titik singgung antara permukaan uji dan bidang sejajar yang mengapit. Sehingga selisih ketinggian antara kedua titik tersebut sama dengan nilai kerataan dalam definisi baku.

- 3.3. Kedataran adalah ukuran seberapa sejajar suatu permukaan terhadap bidang horizontal. Bidang horizontal disebut juga sebagai bidang datar, umumnya tegak lurus terhadap gravitasi.
- 3.4. Gradien adalah kemiringan suatu garis atau bidang terhadap bidang datar. Gradien dapat dinyatakan dalam satuan m/m, mm/m, atau $\mu\text{m}/\text{m}$. Gradien juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara sisi tegak dan sisi datar suatu segitiga siku-siku. Bidang uji bertindak sebagai sisi miringnya sedangkan sisi datarnya sejajar dengan bidang horizontal.

- 3.5.** Level elektronik adalah salah satu peralatan pengukuran kemiringan berbasis elektronik yang ditunjukkan dalam bentuk gradien dan mempunyai ukuran panjang tapak kaki (*base*) tertentu.

4 Pengaruh kondisi lingkungan

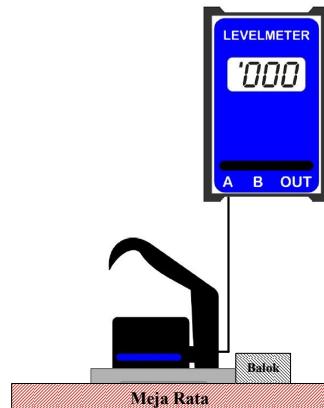
- 4.1** Pengukuran dilakukan dalam suhu $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ dan kelembapan relatif kurang dari 65%.
- 4.2** Batasi mobilitas orang atau barang di dekat area pengukuran.
- 4.3** Pastikan meja rata berada di atas dudukan yang kokoh dan stabil.

5 Prosedur pengukuran dan evaluasi data

5.1 Persiapan

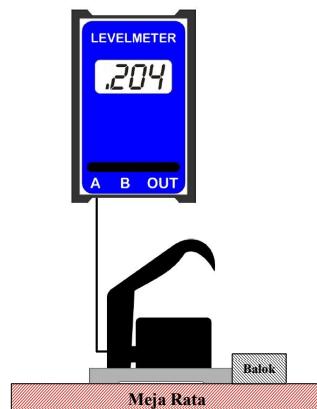
- 5.1.1 Periksa kedataran meja rata yang akan diukur.
- 5.1.2 Jika diperlukan, setel kedataran meja rata yang akan diukur sebaik mungkin, minimal dapat terbaca oleh level elektronik.
- 5.1.3 Bersihkan tapak kaki (*base*) level elektronik, baja pelurus (*straight edge*), dan permukaan meja rata yang akan diukur.
- 5.1.4 Setel penunjukan nol level elektronik untuk menunjukkan kemiringan absolut¹.
- Letakkan level elektronik di atas meja rata. Tandai posisinya, sehingga level elektronik tersebut dapat diletakkan kembali pada posisi yang persis sama.
 - Setel penunjukan pertama level elektronik (*g_{1.a}*) ke nol seperti pada Gambar 2.
 - Selama proses persiapan dan pengukuran, sebaiknya level elektronik tidak diangkat. Hal ini bertujuan untuk mencegah bergesernya sensor yang ada di dalam level elektronik.

¹ Setelan disesuaikan dengan buku panduan alat



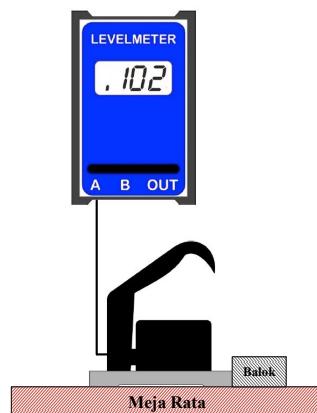
Gambar 2. Penunjukan pertama level elektronik

- d. Putar posisi level elektronik mengitari sumbu tegak. Pastikan posisi level elektronik di tempat yang persis seperti posisi awal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



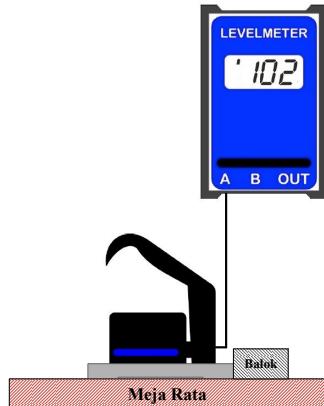
Gambar 3. Penunjukan kedua level elektronik

- e. Baca penunjukan kedua level elektronik ($g_{2.a}$). Lalu setel hingga menunjukkan nilai $g_{2.b} = g_{2.a}/2$, seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Penunjukan level elektronik setelah disetel

- f. Putar lagi posisi level elektronik ke posisi awal. Penunjukan level elektronik sekarang ($g_{1.b}$) seharusnya sama dengan $-g_{2.b}$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Jika tidak, lakukan penyetelan untuk mendekatkan nilai tersebut.

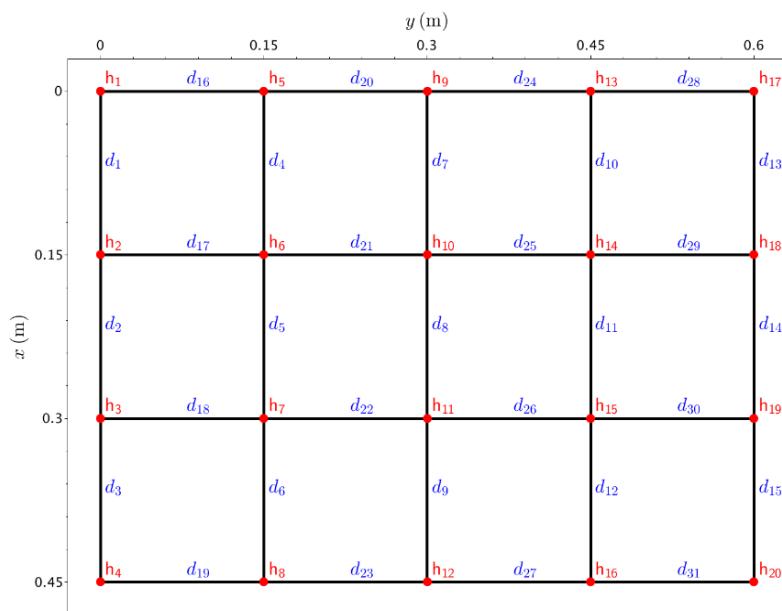


Gambar 5. Penunjukan level elektronik setelah disetel ke posisi awal.

- g. Lakukan Klausul 5.1.3.e ini dengan memutar posisi level elektronik beberapa kali sehingga nilai penunjukan di satu posisi sama dengan penunjukan di posisi sebaliknya, namun berlawanan tanda.
- 5.1.5 Buat kisi-kisi dengan jarak langkah l sehingga terdapat m ruas di sumbu- x dan n ruas di sumbu- y seperti pada Gambar .² Contoh pada meja rata berukuran 500 mm × 650 mm, dengan panjang ruas 150 mm, sehingga:

$$m = \frac{500}{150} = 3,33 \approx 3, \text{ dan } n = \frac{650}{150} = 4,33 \approx 4.$$

Perhatikan bahwa titik (0,0) ada di pojok kiri atas; sumbu- x vertikal dan sumbu- y horizontal.



Gambar 6. Contoh notasi titik dan ruas pada meja berukuran 500 mm × 650 mm, dengan panjang ruas 150 mm.

² Penandaan pola pengukuran pada permukaan meja rata dapat menggunakan spidol dan mistar.

5.1.6 Beri nomor pada setiap titik dan setiap ruas di antara dua titik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6:

- a. Nomor untuk titik h_j dimulai dengan angka satu mulai dari pojok kiri-atas, yaitu koordinat (0,0), lalu berurutan ke bawah (sumbu-x positif). Titik di pojok kanan-bawah akan bernomor $q = (m + 1) \times (n + 1)$.
- b. Nomor untuk ruas d_i dimulai dengan angka satu untuk ruas sejajar sumbu-x antara titik h_1 dan h_2 , lalu ruas antara titik h_2 dan h_3 , dan seterusnya. Setelah semua ruas sejajar sumbu-x diberi nomor, lanjutkan penomoran untuk ruas sejajar sumbu-y dimulai dari ruas antara titik h_1 dan h_{m+2} , lalu ruas antara titik h_2 dan h_{m+3} , dan seterusnya. Ruas terakhir akan bernomor $p = (m + 1) \times n + m \times (n + 1)$.

5.2 Pengukuran

5.2.1 Ukur gradien pada setiap ruas secara berurutan dengan menggunakan level elektronik dan baja pelurus sebagai pengarahnya. Pengukuran dimulai dengan ruas-ruas sejajar sumbu-x, lalu ruas-ruas sejajar sumbu-y. Jika Gambar 2 digunakan sebagai contoh, urutan pengukuran adalah sebagai berikut:

- a. $d_1 - d_2 - d_3 - d_4 - d_2 - d_1$
- b. $d_4 - d_5 - d_6 - d_7 - d_5 - d_4$
- c. Lakukan langkah yang sama untuk semua garis sejajar sumbu x
- d. $d_{16} - d_{20} - d_{24} - d_{28} - d_{28} - d_{24} - d_{20} - d_{16}$
- e. Lakukan langkah yang sama untuk semua garis sejajar sumbu y.

5.2.2 Untuk mengoreksi adanya *drift* pada alat ukur, lakukan salah satu langkah berikut ini.

- a. Cek dan setel lagi nilai *offset* nol (Klausul 5.1.4) dari level elektronik, sebelum memulai pengukuran pada setiap garis.
- b. Setelah selesai mengukur garis pertama di sumbu x dan sebelum mengukur setiap garis berikutnya, ukur lagi ruas d_1 sebelum dan sesudah mengukur garis tersebut. Jika penunjukan pada ruas d_1 kali ini berbeda dengan pengukuran d_1 yang pertama, selisihnya digunakan untuk mengoreksi pengukuran di garis tersebut.

5.3 Kalkulasi data pengukuran

Bagian ini menjelaskan langkah-langkah kalkulasi untuk mendapatkan nilai ketinggian h_j dari data pengukuran kemiringan d_i menggunakan metode *least-square*. Penjelasan lengkap mengenai penurunan rumus dalam metode *least-square* diuraikan dalam 0.

- 5.3.1 Kalikan rerata nilai pengukuran \bar{g}_l (dalam satuan $\mu\text{m}/\text{m}$) dengan panjang langkah pengukuran l (dalam satuan m) untuk mendapatkan nilai beda tinggi:

$$\underline{d}_i = \bar{g}_l \times l$$

- 5.3.2 Masukkan nilai-nilai d_i ke dalam matrix $\underline{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix}$.

- 5.3.3 Susun matriks A (lihat Lampiran B).

- 5.3.4 Hitung ketinggian titik \underline{h}_j ($j > 1$) relatif terhadap \underline{h}_1 menggunakan operasi matriks:

$$\underline{h} = Q \cdot A^T \cdot \underline{d}$$

dengan

$$\underline{h} = \begin{bmatrix} \underline{h}_2 \\ \vdots \\ \underline{h}_q \end{bmatrix} \text{ dan } Q = (A^T \cdot A)^{-1}$$

- 5.3.5 Hitung parameter untuk persamaan bidang datum $z = ax + by + c$ secara *least-square fitting* untuk profil permukaan yang telah dihitung dengan operasi matriks (lihat Lampiran C):

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = W \cdot B^T \cdot \underline{h}$$

dengan

$$\underline{h} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 \\ \vdots \\ \underline{h}_q \end{bmatrix}, W = (B^T \cdot B)^{-1}, \text{ dan } B = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_q & y_q & 1 \end{bmatrix}$$

- 5.3.6 Hitung penyimpangan dari bidang datum:

$$\underline{f}_j = \underline{h}_j - (\hat{a}x_j + \hat{b}y_j + \hat{c})$$

atau

$$\underline{f} = \underline{h} - B \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix}$$

- 5.3.7 Tentukan j_1 dan j_2 , yaitu indeks untuk elemen \underline{f} yang nilainya terbesar dan terkecil sehingga $f_{j_1} = \max(\underline{f})$ dan $f_{j_2} = \min(\underline{f})$.

- 5.3.8 Hitung nilai penyimpangan total dari kerataan:

$$F = f_{j_1} - f_{j_2}$$

6 Evaluasi ketidakpastian pengukuran dengan metode Monte Carlo

Pada panduan ini, metode Monte Carlo digunakan untuk mengevaluasi ketidakpastian pengukuran. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengalkulasi nilai kerataan seperti pada klausul 5.3 sebanyak ratusan ribu kali (misal 200.000 kali) dengan memberikan nilai acak pada variabel g_i dan l .

Sumber ketidakpastian utama paling signifikan dalam pengukuran ini adalah:

- a. Penentuan panjang tapak level elektronik
- b. Repeatability pada level elektronik
- c. Pembulatan akibat daya baca level elektronik
- d. Nilai koreksi level elektronik
- e. *Residual error* akibat penggunaan persamaan regresi

Sumber pertama dan keempat bersifat sistematik dan berkorelasi untuk setiap ruas yang diukur, sedangkan sumber kedua, ketiga, dan kelima bersifat random dan independen. Model pengukuran kerataan bersifat non-linear, artinya: jika terjadi kesalahan pengukuran yang bersifat random di semua ruas pengukuran, hasil analisis bisa menghasilkan pasangan titik tertinggi dan titik terendah yang berbeda-beda, sehingga penambahan pada nilai sumber ketidakpastian tidak secara linear berdampak pada perubahan nilai ketidakpastian gabungan. Maka dari itu, metode yang paling optimal untuk mengestimasi ketidakpastian adalah metode Monte Carlo [4].

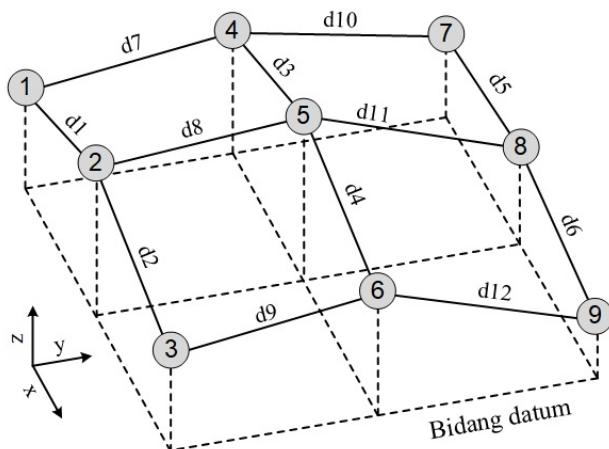
Lampiran A

(informatif)

Dasar teori

Meja rata atau *surface plate* adalah salah satu perangkat yang digunakan dalam kalibrasi dan pengukuran dimensional. Fungsinya adalah sebagai datum atau bidang acuan untuk pengukuran yang dilakukan menggunakan instrumen ukur seperti *dial gauge*, *height gauge* dan lain-lain. Oleh karena itu, kualitas utama yang diharus dijaga adalah kerataan permukaannya dan ini perlu diukur secara berkala untuk memastikan kelayakannya.

Contoh ilustrasi sebuah profil permukaan yang diwakili oleh titik 1 s.d. 9 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Ilustrasi profil permukaan.

Pada gambar tersebut, ketinggian tiap titik pada permukaan tersebut terhadap bidang datum dinotasikan dengan h_j . Dalam contoh diatas, titik nomor 5 adalah titik tertinggi dan titik 9 adalah titik terendah, sehingga nilai kerataan dihitung dari $(h_5 - h_9)$.

A.1 Metode pengukuran kerataan

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengukur kerataan berdasarkan alat yang digunakan, antara lain:

- Menggunakan acuan kerataan dan alat pengukur jarak celah. Acuan kerataan dapat berupa meja rata lain yang sudah diketahui kerataannya. Cara ini tidak praktis karena membutuhkan meja rata dengan ukuran minimal sama dengan meja yang diuji. Metode ini juga dapat diterapkan menggunakan CMM (mesin pengukur koordinat), namun tentunya hanya dapat dilakukan untuk meja rata berukuran relatif kecil.
- Menggunakan acuan kelurusan dan alat pengukur jarak celah. Acuan kelurusan dapat berupa bilah pelurus (*straight edge*), sedangkan *dial gauge* atau *gap gauge* dapat

berfungsi sebagai pengukur celah. Cara ini juga kurang praktis karena membutuhkan bilah pelurus sepanjang diagonal meja yang diuji.

- c. Mengukur kemiringan antara dua titik koordinat di permukaan bidang, kemudian merekonstruksi profil garis dan/atau profil permukaan bidang dari data kemiringan tersebut. Pengukuran kemiringan dapat dilakukan dengan menggunakan dua jenis alat pengukur kemiringan:
 - i. Alat ukur kemiringan relatif, misalnya: *autocollimator, laser angle interferometer*.
 - ii. Alat ukur kemiringan absolut, misalnya: waterpas, level elektronik, *inclinometer*.

A.2 Teknik pengukuran

Pengukuran beda tinggi pada permukaan meja rata dapat dilakukan dengan alat ukur kemiringan, baik kemiringan relatif maupun kemiringan absolut. Bedanya, alat ukur kemiringan relatif tidak dapat mengukur sudut terhadap suatu acuan yang tetap, sehingga memerlukan pengukuran di arah diagonal dengan pola *union jack*. Sebaliknya, alat ukur kemiringan absolut dapat mengukur sudut terhadap suatu acuan yang tetap, yaitu arah gravitasi bumi sehingga pengukuran cukup dilakukan dengan pola pengukuran yang berbentuk kisi-kisi saling bersilangan (*grid*). Saat ini alat yang paling populer untuk keperluan ini adalah level elektronik.

A.3 Perhitungan data

Nilai yang didapat dari alat ukur adalah gradien (g_i) atau kemiringan dalam satuan $\mu\text{m/m}$. Nilai kemiringan ini harus dikalikan dengan panjang langkah pengukuran (l) untuk mendapatkan nilai beda tinggi (d_i) dengan persamaan:

$$d_i = g_i \cdot l$$

Setelah itu akan didapatkan sejumlah persamaan dengan nilai yang diketahui yaitu beda tinggi d_i , $i = 1, \dots, p$. Sedangkan nilai yang tidak diketahui adalah ketinggian titik h_j , $j = 1, \dots, q$. Sistem persamaan ini dapat dituliskan dalam bentuk matriks, sehingga nilai yang tidak diketahui dapat dihitung menggunakan inversi matriks. Pemecahan menggunakan operasi matriks merupakan sebuah pendekatan untuk mereduksi galat atau kesalahan pengukuran akibat ketidak sempurnaan alat ukur dan benda ukur. Hal ini dapat dilakukan dengan metode *least-square fitting*.

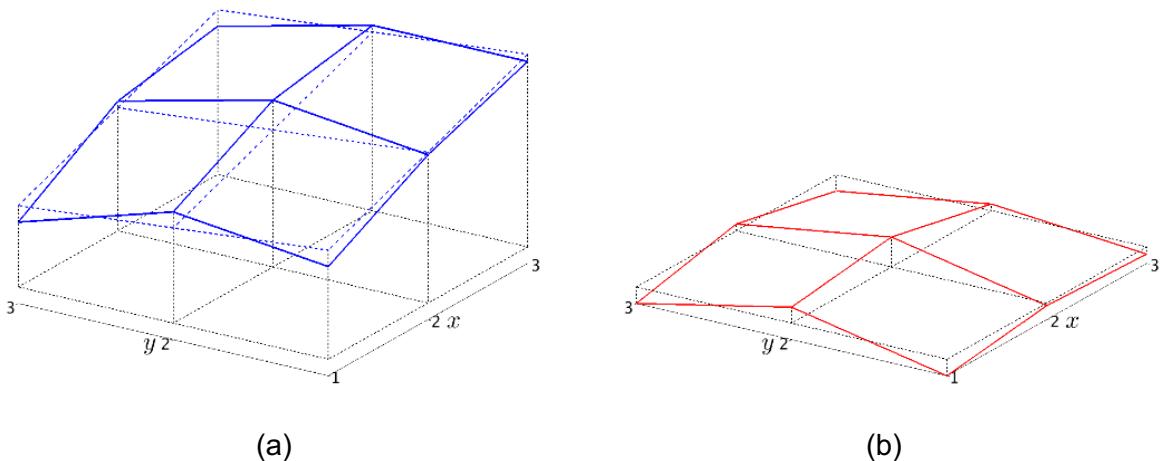
A.4 Koreksi kemiringan

Hasil analisis ketinggian titik-titik ukur yang dilakukan di atas mungkin menghasilkan suatu profil permukaan yang tampak miring jika dibandingkan dengan bidang datumnya. Hal ini dapat terjadi jika permukaan yang diukur secara fisik berada dalam posisi sedikit miring terhadap bidang datar. Untuk dapat menentukan nilai kerataan, perlu ditetapkan bidang datum

baru sedemikian rupa agar selisih antara ketinggian titik tertinggi dan titik terendah (relatif terhadap bidang datum yang baru) dapat diminimalkan. **Error! Reference source not found.**(a) menampilkan contoh hasil rekonstruksi permukaan yang dipengaruhi oleh kemiringan pada saat pengukuran, sedangkan **Error! Reference source not found.**(b) menunjukkan profil permukaan tersebut setelah kemiringannya dihilangkan secara matematis. Bidang datum optimal dapat ditentukan dari salah satu pilihan berikut:

- Persamaan bidang *least square* dari semua titik-titik koordinat yang telah ditemukan;
- Persamaan bidang dari tiga titik sudut.

Opsi pertama memberikan bidang datum yang lebih mewakili keseluruhan permukaan yang diuji, dengan demikian lebih mendekati definisi kerataan. Sedangkan opsi kedua lebih bersifat arbiter. Secara matematis, keduanya dapat dikalkulasi secara sederhana, sehingga tidak ada ruginya menggunakan opsi pertama.



Gambar 8. Hasil rekonstruksi profil permukaan:

- Hasil awal dengan efek kemiringan akibat posisi benda ukur yang tidak sempurna;
- Hasil akhir setelah efek kemiringan dikoreksi secara matematis.

Lampiran B

(informatif)

Penurunan rumus *least-square* dan penyusunan matriks *A*

Matriks *A* memberikan hubungan antara variabel yang diketahui (beda tinggi d_i) dan variabel yang tidak diketahui (ketinggian h_j) dalam suatu himpunan persamaan. Sebagai contoh, untuk bidang berukuran $2l \times 2l$ seperti pada **Error! Reference source not found.**, hubungan antara d_i dan h_j ditetapkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 d_1 &= h_1 - h_2 \\
 d_2 &= h_2 - h_3 \\
 d_3 &= h_4 - h_5 \\
 d_4 &= h_5 - h_{64} \\
 d_5 &= h_7 - h_8 \\
 d_6 &= h_8 - h_9 \\
 d_7 &= h_1 - h_4 \\
 d_8 &= h_2 - h_5 \\
 d_9 &= h_3 - h_6 \\
 d_{10} &= h_4 - h_7 \\
 d_{11} &= h_5 - h_8 \\
 d_{12} &= h_6 - h_9
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sistem persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \\ d_9 \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix}$$

atau

$$\underline{d} = A_0 \cdot \underline{h}$$

Nilai h_j dapat dihitung dengan operasi matriks:

$$\underline{h} = (A_0^T \cdot A_0)^{-1} \cdot A_0^T \cdot \underline{d}$$

Namun, persamaan di atas tidak dapat dipecahkan karena matriks $(A_0^T \cdot A_0)$ bersifat singular sehingga tidak dapat diinversi. Secara fisik dapat diterangkan bahwa suatu himpunan bilangan d_i dapat dihubungkan dengan lebih dari satu kemungkinan himpunan bilangan \mathbf{h}_j ; atau, himpunan bilangan \mathbf{h}_j bersifat “mengambang”.

Agar sistem persamaan di atas dapat dipecahkan, himpunan bilangan h_j “diikat” dengan cara menetapkan nilai sembarang untuk salah satu anggotanya, misalnya $h_1 \equiv 0$, sehingga nilai h_j (untuk $j \neq 1$) dinyatakan sebagai ketinggian titik-titik yang lain relatif terhadap titik h_1 . Maka, dua dari sistem Persamaan (1) berubah menjadi:

$$\begin{aligned} d_1 &= -h_2 \\ d_7 &= -h_4 \end{aligned}$$

sehingga sistem persamaan tadi dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

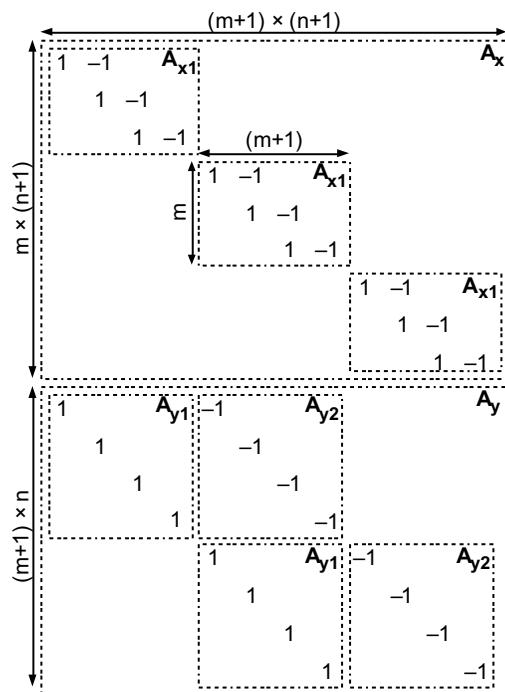
$$\left[\begin{array}{c} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \\ d_9 \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{12} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccccccccc} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{array} \right] \quad (2)$$

atau

$$\underline{d}_i = A \cdot \underline{h}_j^* \quad (3)$$

Perhatikan bahwa matriks A adalah matriks A_0 yang dihilangkan kolom paling kirinya, sedangkan vektor \underline{h}_j^* tidak mempunyai anggota \mathbf{h}_1 [5]. Berikut ini adalah cara menyusun matriks A untuk berbagai ukuran meja:

1. Susun dulu matriks A_0 yang terdiri atas dua matriks yang lebih kecil, A_x dan A_y , sebagaimana ditunjukkan pada Gambar .
2. Kedua matriks ini masing-masing mempunyai tinggi $m \times (n + 1)$ dan $(m + 1) \times n$, sedangkan lebarnya sama, yaitu $(m + 1) \times (n + 1)$.



Gambar 9. Struktur matriks A_0 .

Matriks A_x tersusun atas beberapa sub-matriks A_{x1} yang berdimensi $m \times (m + 1)$. Elemen utama Matriks A_{x1} adalah satu (1) yang tersusun secara diagonal menurun dari posisi (1, 1), dan minus satu (-1) yang menurun secara diagonal dari posisi (1, 2). Matriks A_y tersusun atas beberapa matriks skalar A_{y1} and A_{y2} ; A_{y1} berskala 1 sedangkan A_{y2} berskala -1. Baik A_{y1} maupun A_{y2} mempunyai dimensi yang sama yaitu $(m + 1) \times (m + 1)$. Semua elemen matriks (selain yang diuraikan di atas) bernilai nol.

Dengan menghilangkan kolom pertama matrix A_0 , didapatkan matriks A .

Catatan: matriks A_0 mewakili sistem persamaan ketika semua nilai h_j tidak diketahui, sedangkan matriks A berlaku untuk kondisi ketika $h_1 = 0$.

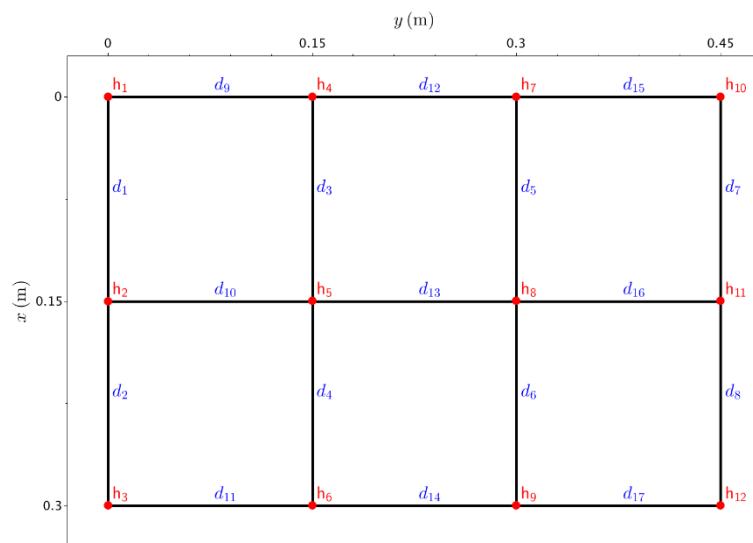
Lampiran C

(informatif)

Contoh hasil pengukuran dan pengolahan data

C.1 Setup dan data pengukuran

Bidang yang diukur dibagi dalam 2 ruas searah sumbu x dan 3 ruas searah sumbu y seperti ditunjukkan dalam Gambar , sehingga $m = 2$ dan $n = 3$.



Gambar 10. Notasi untuk titik ukur dan ruas yang diukur

Total banyaknya titik ukur:

$$\begin{aligned} j_{\max} &= q = (m + 1) \times (n + 1) \\ &= (2 + 1) \times (3 + 1) \\ &= 12 \end{aligned}$$

Total banyaknya ruas yang diukur:

$$\begin{aligned} i_{\max} &= p = m \times (n + 1) + (m + 1) \times n \\ &= 2 \times (3 + 1) + 3 \times (2 + 1) \\ &= 17 \end{aligned}$$

Tiap ruas memiliki panjang 150 mm sesuai dengan panjang alat *electronic level* yang digunakan:

$$l = 0,15 \text{ m}$$

Data pengukuran kemiringan g_i ditampilkan dalam tabel berikut. Nilai beda-tinggi d_i dihitung dengan rumus $d_i = g_i \times 0,15 \text{ m}$.

i	$g_i/(\mu\text{m}/\text{m})$	$d_i/\mu\text{m}$
1	16	2,4

15 dari 27

2	-2	-0,3
3	17	2,55
4	-4	-0,6
5	17	2,55
6	0	0
7	15	2,25
8	1	0,15
9	30	4,5
10	32	4,8
11	30	4,5
12	5	0,75
13	6	0,9
14	9	1,35
15	-9	-1,35
16	-15	-2,25
17	-13	-1,95

C.2 Kalkulasi profil permukaan

Dari data pengukuran, didapatkan matriks \underline{d} sebagai berikut:

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,4 \\ -0,3 \\ 2,55 \\ -0,6 \\ 2,55 \\ 0 \\ 2,25 \\ 0,15 \\ 4,5 \\ 4,8 \\ 4,5 \\ 0,75 \\ 0,9 \\ 1,35 \\ -1,35 \\ -2,25 \\ -1,95 \end{bmatrix}$$

Buat matriks A_0 yang sesuai untuk ukuran meja (bandingkan dengan pola di **Error! Reference source not found.**):

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Buat matriks A dengan membuang kolom pertama matriks A_0 :

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

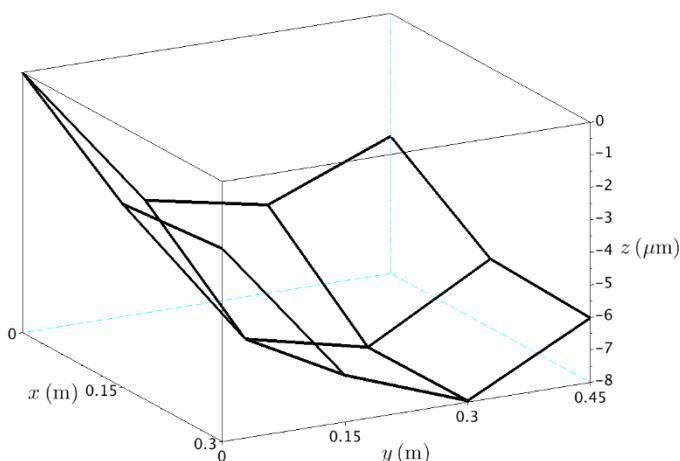
Hitung $Q = (A^T \cdot A)^{-1}$

$$Q = \begin{bmatrix} 0,705 & 0,619 & 0,295 & 0,496 & 0,533 & 0,388 & 0,453 & 0,483 & 0,416 & 0,444 & 0,464 \\ 0,619 & 1,238 & 0,381 & 0,619 & 0,857 & 0,524 & 0,619 & 0,714 & 0,571 & 0,619 & 0,667 \\ 0,295 & 0,381 & 0,705 & 0,504 & 0,467 & 0,612 & 0,547 & 0,517 & 0,584 & 0,556 & 0,536 \\ 0,496 & 0,619 & 0,504 & 0,870 & 0,742 & 0,640 & 0,740 & 0,735 & 0,677 & 0,714 & 0,725 \\ 0,533 & 0,857 & 0,467 & 0,742 & 1,181 & 0,660 & 0,785 & 0,945 & 0,727 & 0,794 & 0,870 \\ 0,388 & 0,524 & 0,612 & 0,640 & 0,660 & 1,196 & 0,901 & 0,815 & 1,075 & 0,953 & 0,884 \\ 0,453 & 0,619 & 0,547 & 0,740 & 0,785 & 0,901 & 1,175 & 0,996 & 0,981 & 1,062 & 1,029 \\ 0,483 & 0,714 & 0,517 & 0,735 & 0,945 & 0,815 & 0,996 & 1,386 & 0,932 & 1,048 & 1,217 \\ 0,416 & 0,571 & 0,584 & 0,677 & 0,727 & 1,075 & 0,981 & 0,932 & 1,658 & 1,242 & 1,087 \\ 0,444 & 0,619 & 0,556 & 0,714 & 0,794 & 0,953 & 1,062 & 1,048 & 1,242 & 1,531 & 1,290 \\ 0,464 & 0,667 & 0,536 & 0,725 & 0,870 & 0,884 & 1,029 & 1,217 & 1,087 & 1,290 & 1,754 \end{bmatrix}$$

Dengan menetapkan $\mathbf{h}_1 = \mathbf{0}$, hitung ketinggian titik \mathbf{h}_j dengan rumus $\begin{bmatrix} \mathbf{h}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{h}_q \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \underline{\mathbf{d}}$; sehingga

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,000 \\ -2,363 \\ -2,064 \\ -4,537 \\ -7,125 \\ -6,565 \\ -5,285 \\ -7,986 \\ -7,956 \\ -3,782 \\ -5,878 \\ -6,017 \end{bmatrix}$$

Nilai \mathbf{h}_j yang didapatkan di atas adalah ketinggian profil bidang terhadap bidang datum, seperti ditunjukkan dalam Gambar . Tampak bahwa orientasi profil tersebut agak miring terhadap datum, sehingga diperlukan datum baru yang lebih representatif untuk menghitung kerataan.



Gambar 11. Profil permukaan hasil pengolahan data pengukuran.

Langkah berikutnya, tentukan parameter persamaan bidang untuk datum baru. Jika titik \mathbf{h}_1 mempunyai koordinat $(x_i, y_i) = (0, 0)$ dalam satuan meter, maka koordinat untuk $\mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3, \mathbf{h}_4$, dan seterusnya adalah $(0.15, 0.00), (0.30, 0.00), (0.00, 0.15)$, dan seterusnya. Maka matriks \mathbf{B} dapat dituliskan:

$$B = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & 1 \\ 0,150 & 0,000 & 1 \\ 0,300 & 0,000 & 1 \\ 0,000 & 0,150 & 1 \\ 0,150 & 0,150 & 1 \\ 0,300 & 0,150 & 1 \\ 0,000 & 0,300 & 1 \\ 0,150 & 0,300 & 1 \\ 0,300 & 0,300 & 1 \\ 0,000 & 0,450 & 1 \\ 0,150 & 0,450 & 1 \\ 0,300 & 0,450 & 1 \end{bmatrix}$$

Hitung matriks $W = (B^T \cdot B)^{-1}$:

$$W = \begin{bmatrix} 5,556 & 0,000 & -0,833 \\ 0,000 & 2,963 & -0,667 \\ -0,833 & -0,667 & 0,358 \end{bmatrix}$$

Hitung parameter persamaan bidang untuk datum baru:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = W \cdot B^T \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7,500 \\ -8,167 \\ -2,001 \end{bmatrix}$$

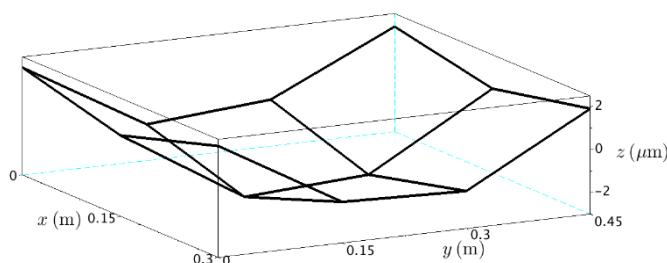
Hitung ketinggian profil permukaan, relatif terhadap datum baru:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,000 \\ -2,363 \\ -2,064 \\ -4,537 \\ -7,125 \\ -6,565 \\ -5,285 \\ -7,986 \\ -7,956 \\ -3,782 \\ -5,878 \\ -6,017 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & 1 \\ 0,150 & 0,000 & 1 \\ 0,300 & 0,000 & 1 \\ 0,000 & 0,150 & 1 \\ 0,150 & 0,150 & 1 \\ 0,300 & 0,150 & 1 \\ 0,000 & 0,300 & 1 \\ 0,150 & 0,300 & 1 \\ 0,300 & 0,300 & 1 \\ 0,000 & 0,450 & 1 \\ 0,150 & 0,450 & 1 \\ 0,300 & 0,450 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -7,500 \\ -8,167 \\ -2,001 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,001 \\ 0,763 \\ 2,187 \\ -1,311 \\ -2,775 \\ -1,090 \\ -0,834 \\ -2,410 \\ -1,255 \\ 1,894 \\ 0,922 \\ 1,908 \end{bmatrix}$$

Merujuk ke notasi di Gambar , maka nilai-nilai f_j dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$f_{x,y} = \begin{bmatrix} 2,001 & -1,311 & -0,834 & 1,894 \\ 0,763 & -2,775 & -2,410 & 0,922 \\ 2,187 & -1,090 & -1,255 & 1,908 \end{bmatrix}$$

Data ini dapat divisualkan seperti dalam Gambar .



Gambar 12. Profil permukaan setelah kemiringan dihilangkan

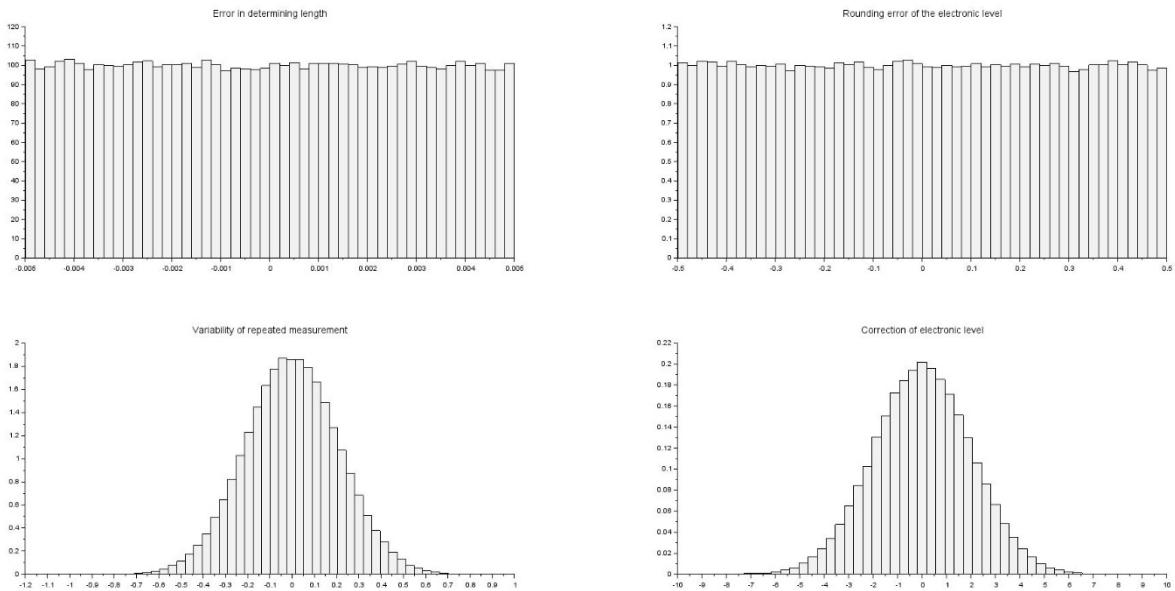
C.3 Evaluasi ketidakpastian pengukuran

Sumber-sumber ketidakpastian pada kalibrasi meja rata dapat dievaluasi sebagai berikut.

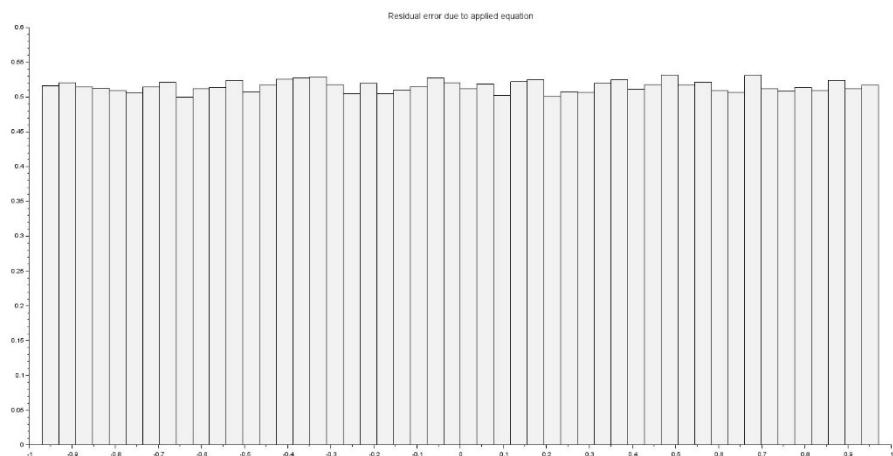
Tabel 1. Evaluasi Sumber-sumber ketidakpastian

Simbol	Sumber kesalahan	Jenis kesalahan	Contoh Nilai
l_{cal}	Penentuan panjang tapak level elektronik	Sistematik	0,005 m
g_{rep_i}	<i>Repeatability</i> pada level elektronik	Random	29 μm/m, 28 μm/m, 28 μm/m, 28 μm/m, 28 μm/m, 29 μm/m, 28 μm/m, 27 μm/m, 27 μm/m, 28 μm/m
g_{rdg_i}	Pembulatan akibat daya baca level elektronik	Random	0,5 μm/m
g_{cal}	Nilai koreksi level elektronik	Sistematik	2 μm/m
g_{rsd_i}	<i>Residual error</i> akibat penggunaan persamaan regresi	Random	0,97 μm/m

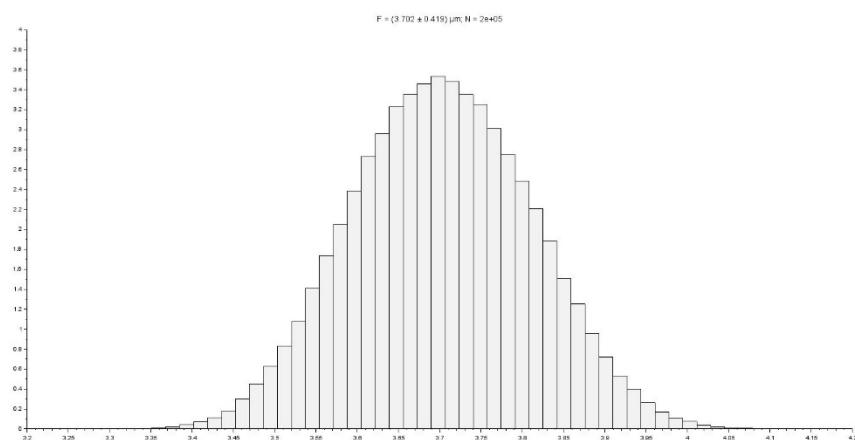
Hasil analisis ketidakpastian dengan menggunakan metode Monte Carlo seperti ditunjukkan pada Gambar 13 s.d. Gambar 15.



Gambar 13. Histogram sumber-sumber kesalahan dengan metode Monte Carlo



Gambar 14. Histogram sumber-sumber kesalahan dengan metode Monte Carlo



Gambar 15. Histogram nilai ketidakpastian pengukuran dengan metode Monte Carlo

Lampiran D

(informatif)

Aplikasi untuk menganalisis kerataan meja rata yang dikembangkan oleh

Badan Standardisasi Nasional

"Integrated Monte Carlo Simulation for Flatness Measurement with Full Grid Method"

Penjelasan Umum

Program komputer *Integrated Monte Carlo Simulation for Flatness Measurement with Full Grid Method* adalah suatu aplikasi yang merupakan bagian dari satu set perangkat lunak untuk menganalisis kerataan meja rata (*surface plate*) dengan menggunakan pola kisi-kisi tertutup. Kisi-kisi tertutup merupakan salah satu contoh metode kalibrasi yang sedang dikembangkan oleh SNSU-BSN sebagai Lembaga Metrologi Nasional di Indonesia.

Program komputer *Integrated Monte Carlo Simulation for Flatness Measurement with Full Grid Method* sudah terdaftar di Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia RI sebagai Surat Pencatatan Ciptaan dengan nomor dan tanggal permohonan yakni EC00202235756, 12 Juni 2022. Aplikasi tersebut dirancang untuk menganalisis pengukuran kerataan meja rata berdimensi hingga 2000 mm x 2000 mm dengan nilai ketidakpastian pengukuran yang kecil. Aplikasi ini merupakan penyempurnaan dari program komputer sebelumnya yang terdaftar di Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia RI sebagai Surat Pencatatan Ciptaan dengan nomor dan tanggal permohonan yakni EC00202161343, 4 November 2021. Pada program komputer dengan nomor EC00202161343, *variable output* yang dihasilkan hanya gradien saja. Sedangkan pada program komputer *Integrated Monte Carlo Simulation for Flatness Measurement with Full Grid Method*, *variable output* yang dihasilkan tidak terbatas hanya gradien saja tetapi juga *variable output* yang nantinya dapat digunakan untuk mengevaluasi nilai ketidakpastian pengukuran dengan menggunakan metode Monte Carlo.

Aplikasi ini terdiri dari 3 (tiga) bagian utama yaitu: pengaturan, pengukuran, dan analisis data. Fungsi pengaturan digunakan untuk mempersiapkan pengukuran terhadap salah satu jenis meja rata sebagai objek ukur. Selain itu, bagian pengaturan juga berfungsi untuk memasukan nilai koreksi dari level elektronik sebagai standar ukur yang digunakan sehingga hasil kalibrasi meja rata tersebut tertelusur ke Sistem Internasional. Fungsi pengukuran merupakan lembar kerja pengamatan yang perlu diisi oleh operator laboratorium kalibrasi. Sedangkan fungsi analisis data akan aktif setelah operator menekan tombol *Run*. Berikut ini merupakan langkah-langkah penggunaan program komputer tersebut:

1. Pengaturan

Fungsi pengaturan terdiri atas 5 (Lima) bagian yang perlu diisikan, yakni:

- **Number of segments**

Number of segments adalah keterangan tentang ukuran meja rata per panjang *base line* dari level elektronik yang digunakan. Bagian ini perlu diisi terlebih dahulu untuk mengaktifkan lembar kerja pengamatan secara otomatis, setelah tombol *Set Up* ditekan. Kolom m untuk pengukuran arah x (panjang meja rata) dan kolom n untuk pengukuran arah y (lebar meja rata).

- **Instrument Information**

Kolom yang perlu diisikan pada bagian *instrument information*, antara lain: *Manufacturer*, *Serial Number*, *Calibration Date*, *Calibration Place*, *Order No.*, dan *Calibration Officer*.

- **Reference Standard**

Informasi tentang sertifikat kalibrasi standar yang digunakan merupakan salah satu bagian penting pada fungsi pengaturan. Informasi tentang *Slope*, *Intercept*, *Instrument Name*, dan *Serial Number* perlu diisi karena hal ini merupakan parameter bahwa kalibrasi meja rata tersebut tertelusur ke Sistem Internasional.

- **Influence Quantities (Source of Uncertainty)**

Bagian penting ini merupakan parameter masukan (*input parameter*) untuk menganalisis nilai ketidakpastian pengukuran dengan menggunakan metode Monte Carlo. Kolom yang perlu diisikan, seperti: *I_cal* (sumber ketidakpastian dari panjang landasan level elektronik), *g_rdg_i* (sumber ketidakpastian dari daya baca alat), *g_rep_i* (sumber ketidakpastian dari pengulangan pengukuran), *g_cal* (sumber ketidakpastian dari koreksi level elektronik), dan *g_rsd_i* (sumber ketidakpastian dari residual error akibat penggunaan persamaan regresi).

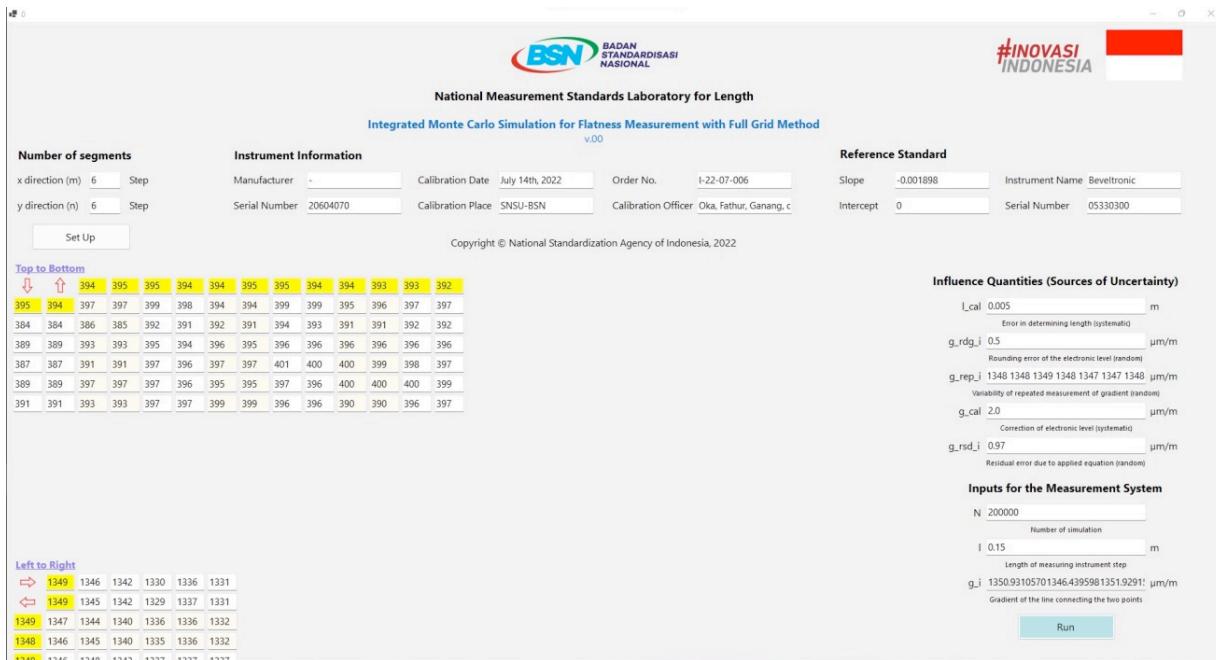
- **Inputs for the Measurement System**

Bagian ini juga merupakan komponen penting untuk menganalisis nilai ketidakpastian pengukuran dengan menggunakan metode Monte Carlo. Dari 3 (tiga) buah kolom yang tersedia, hanya 2 (dua) kolom yang perlu diisikan, yakni: *N* (jumlah simulasi) dan *I* (panjang *base line* dari level elektronik yang digunakan). Sedangkan kolom *g_i* (gradien disetiap ruas) tidak perlu diisikan karena akan secara otomatis keluar nilainya pada akhir proses pengukuran, setelah tombol *Run* ditekan.

2. Pengukuran

Setelah menekan tombol *Set Up*, lembar kerja pengamatan akan aktif secara otomatis membentuk konfigurasi tertentu, sesuai dengan nilai isian pada kolom m untuk pengukuran arah x (panjang meja rata) dan kolom n untuk pengukuran arah y (lebar meja rata), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 16. Operator kalibrasi hanya perlu mengisi nilai gradien pada baris dan kolom yang aktif saja. Sedangkan untuk menggerakan *cursor*

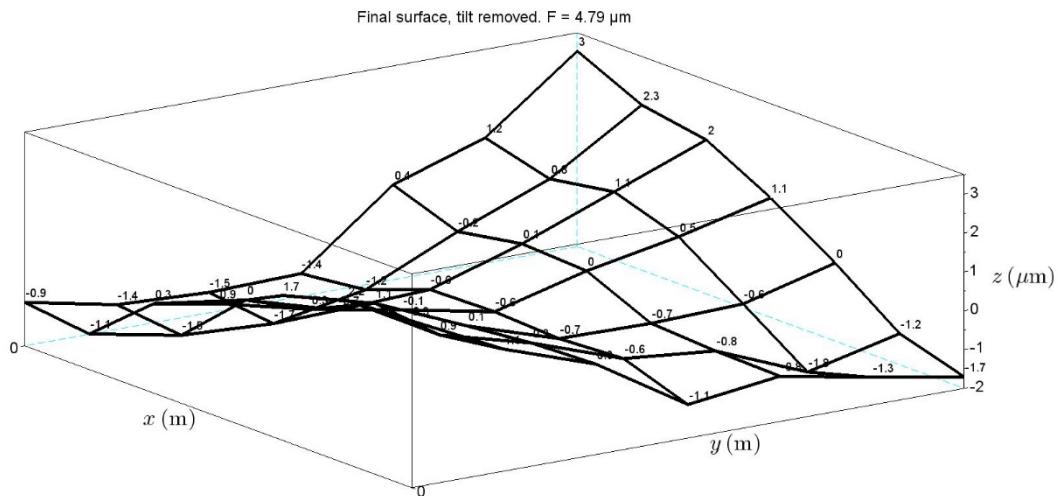
dari satu kolom ke kolom yang lain, operator kalibrasi cukup dengan menekan tombol *tab* pada *keyboard* komputer.



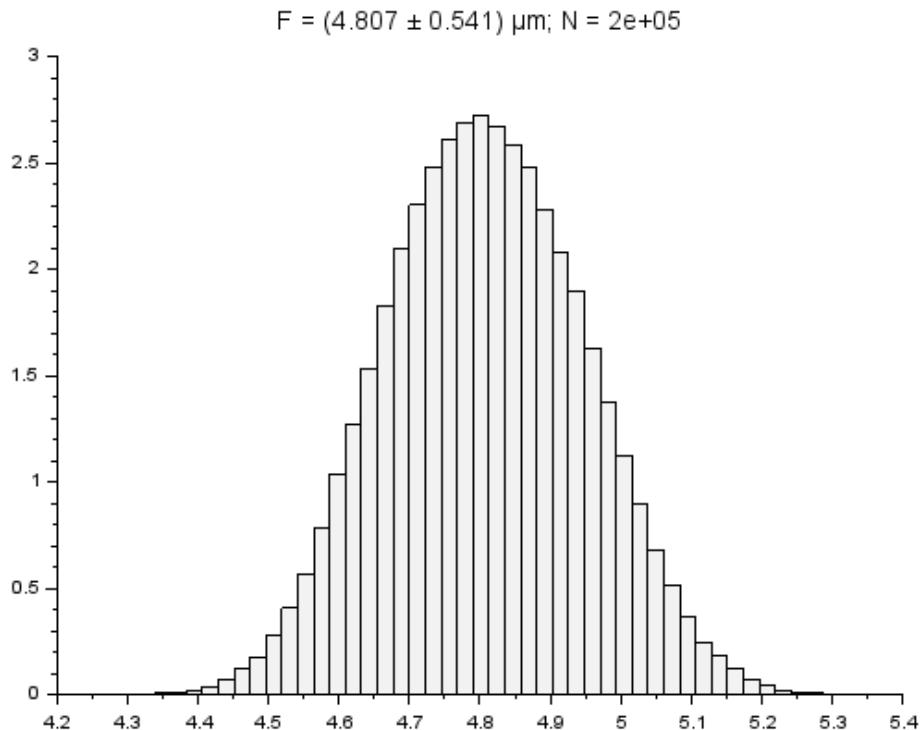
Gambar 16. Program Aplikasi

3. Analisis Data

Fungsi analisis data akan aktif setelah tombol *Run* ditekan oleh operator. Oleh karena itu perlu dipastikan bahwa pengisian kolom-kolom yang tersedia pada aplikasi tersebut sudah benar. Dengan menekan tombol *Run* maka hasil analisis gradien dan data-data kolom isian pada bagian *Influence Quantities (Sources of Uncertainty)* dan *Inputs for the Measurement System* akan tersimpan di sebuah folder khusus secara otomatis. Selain itu, dengan menekan tombol *Run* maka akan mengaktifkan perangkat lunak Scilab secara otomatis. Nantinya, perangkat lunak Scilab ini dapat digunakan untuk memodelkan bentuk 3D kerataan meja rata dengan nilai ketidakpastian pengukuran yang berbasis metode Monte Carlo, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 17 dan Gambar 18.



Gambar 17. Bentuk 3D kerataan meja rata

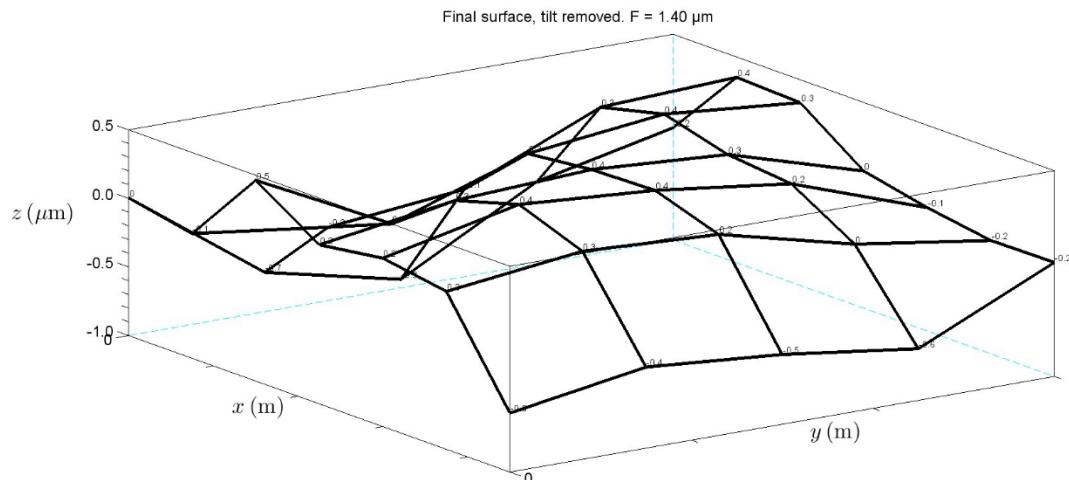


Gambar 18. Nilai ketidakpastian pengukuran berbasis metode Monte Carlo

Lampiran E
(informatif)
Contoh laporan kalibrasi

Nama Alat/ *Instrument Name* :
Nama Pembuat/ *Manufacturer* :
Tipe & No. Seri/ *Type & Serial Number* :
Ukuran (L x W)/ *Size (L x W)* :
Tanggal Kalibrasi/ *Calibration Date* :
Tempat Kalibrasi/ *Calibration Place* :
Suhu/ *Temperature* : (+) °C
Kelembapan/ *Relative Humidity* : (+) %
Metode/ *Method* :

HASIL KALIBRASI/ CALIBRATION RESULT
(Semua nilai dalam satuan μm / All figures in units of μm)



Gambar Kerataan meja rata
Figure. Flatness of surface plate

Catatan/ *Notes*:

Standar kalibrasi/ *Reference standard* :
Prosedur kalibrasi/ *Calibration procedure* :
Kerataan seluruh permukaan/ *Flatness of overall surface* :
Ketidakpastian pengukuran/ *Uncertainty of measurement* :

Ketidakpastian pengukuran dinyatakan pada tingkat kepercayaan tidak kurang dari 95% dengan faktor cakupan $k = 2$. *Uncertainty of measurement is expressed at a confidence level of no less than 95% with coverage factor k = 2.*

Hasil pengukuran yang dilaporkan tertelusur ke SI melalui / *The reported measurement result is traceable to the SI through*

Dikalibrasi oleh/ *Calibrated by*:

Diperiksa oleh/ *Checked by*

Bibliografi

- [1] ISO, *ISO 8512-2:1990 Surface plates — Part 2: Granite*. 1990.
- [2] H. Haitjema and J. Meijer, "Evaluation of surface plate flatness measurements," *Eur. J. Mech. Eng*, pp. 1–8, Apr. 1993.
- [3] J. Herrmann, "Least-Squares Wave Front Errors of Minimum Norm.," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 70, no. 1, pp. 28–35, 1980.
- [4] ISO, *JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. 2008.
- [5] O. Novyanto *et al.*, "The development software used for surface plate calibration in national standardization agency of Indonesia," in *Proceeding of the 1St International Conference on Standardization and Metrology (Iconstam) 2021*, 2022, vol. 2664, no. November, p. 030004.



Diterbitkan oleh :

LABORATORIUM STANDAR NASIONAL SATUAN UKURAN BSN
Kompleks Puspitek, Gedung 420, Setu,
Tangerang Selatan 15314 - Banten Indonesia
Telp. 021- 7560533, 7560534, 7560571
Fax. 021-7560568, 7560064
www.bsn.go.id