

Pengukuran dan Perekaman Data Ketidakrataan Perkerasan Jalan dengan Sensor Ultrasonik pada *Rolling Straight Edge*

Suwardo^{1,*}, Heru Budi Utomo¹

Departemen Teknik Sipil Sekolah Vokasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta¹

Koresponden*, Email: suwardo@mail.ugm.ac.id

Info Artikel	Abstract
Diajukan Diperbaiki Disetujui	31 Oktober 2019 22 Februari 2020 13 April 2020
	<p><i>The road roughness parameter is the index called the International Roughness Index (IRI). The road roughness can be measured by using Bina Marga methods, Transport and Road Research Laboratory (TRRL) and the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). In this study, the method of TRRL with a Rolling Straight Edge is used. This study aims to develop instruments for reading road roughness with ultrasonic sensors as a substitute for reading manually on Rolling Straight Edge, and applying data analysis to evaluate road functional services. The results of the development of ultrasonic sensor instruments on Rolling Straight Edge are applied to measure road roughness then data analysis is carried out faster, more efficiently, and higher measurement productivity. From the application of the instrument to the road pavement in the form of tile floor, asphalt concrete, and paving block pavement, it was shown that there was a good consistency of accuracy (MAPE<10%) on the type of pavement tile flooring with a MAPE value of 2.06% and MAE of 0.03 mm/m. In asphalt concrete pavement, the accuracy is not good with MAPE value of 19.70% and MAE of 0.35 mm/m. In paving block pavement, the accuracy is poor with MAPE values of 110.16% and MAE of 3.20 mm/m. The categories of functional conditions of road services, visual conditions of road pavement, and the need for suitable types of road damage handling are further determined from IRI, RCI and IP (PSI) values.</i></p>

Keywords: road roughness, rolling straight edge, international roughness index (IRI), present serviceability index (PSI), road condition index (RCI), functional conditions of road,

Abstrak

Parameter kerataan permukaan jalan adalah indek ketidakrataan yang disebut *International Roughness Index (IRI)*. Ketidakrataan dapat diukur dengan metode dari Bina Marga, *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* maupun *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. Metode pengukuran ketidakrataan permukaan jalan pada penelitian ini adalah metode dari *TRRL* dengan alat *Rolling Straight Edge*. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan instrumen pembacaan data ketidakrataan dengan sensor ultrasonik sebagai pengganti pembacaan secara manual pada *Rolling Straight Edge*, dan menerapkan dalam perekaman data dan analisis tingkat ketidakrataan untuk mengevaluasi pelayanan fungsional jalan. Hasil pengembangan instrumen pembacaan ber-sensor ultrasonik pada *Rolling Straight Edge* diterapkan untuk pengukuran ketidakrataan jalan kemudian dilakukan analisis data dengan lebih cepat, efisien, dan produktivitas pengukuran yang lebih tinggi. Dari penerapan instrumen terhadap perkerasan jalan yang berupa lantai ubin, beton aspal, dan perkerasan *paving block*, ditunjukkan adanya konsistensi akurasi yang baik (MAPE<10%) pada jenis perkerasan lantai ubin dengan nilai MAPE 2,06% dan MAE 0,03 mm/m. Di perkerasan beton aspal, akurasinya kurang baik dengan nilai MAPE 19,70% dan MAE 0,35 mm/m. Di perkerasan *paving block*, akurasinya rendah dengan nilai MAPE 110,16% dan MAE 3,20 mm/m. Kategori kondisi fungsional pelayanan jalan, kondisi visual perkerasan jalan, dan kebutuhan jenis penanganan kerusakan jalan yang sesuai ditentukan lebih lanjut dari nilai *IRI*, *RCI* dan *IP (PSI)*.

Kata kunci: ketidakrataan permukaan, *rolling straight edge*, *international roughness index (IRI)*, *present serviceability index (PSI)*, indeks kondisi jalan (*RCI*), kondisi fungsional jalan

1. Pendahuluan

Survei kondisi perkerasan perlu dilakukan secara periodik baik struktural maupun non-struktural untuk mengetahui tingkat pelayanan jalan yang ada. Pemeriksaan non-struktural (fungsional) antara lain bertujuan untuk memeriksa ketidakrataan (*roughness*), kekasaran (*texture*), dan kekesatan (*skid resistance*). Pengukuran sifat ketidakrataan lapis

permukaan jalan akan bermanfaat di dalam usaha menentukan program rehabilitasi dan pemeliharaan jalan. Kerataan permukaan jalan adalah salah satu faktor pelayanan perkerasan yang mempengaruhi kenyamanan pengemudi disamping persyaratan utama jalan lainnya yaitu strukturnya kuat, rata, tahan air, tahan lama, dan ekonomis sepanjang umur manfaat. Pengukuran kerataan permukaan jalan di Indonesia mengalami keterbatasan peralatan sehingga pemantauan dan

evaluasi terhadap jalan yang ada tidak dapat dilakukan dengan baik sesuai standar.

Pengukuran tingkat ketidakrataan permukaan jalan belum banyak dilakukan di Indonesia mengingat kendala terbatasnya peralatan sehingga persyaratan ketidakrataan dalam *monitoring* dan *evaluation* terhadap konstruksi jalan yang ada tidak dapat dilakukan secara baik menurut standar nasional bidang jalan. Untuk mengetahui tingkat ketidakrataan permukaan jalan dapat dilakukan pengukuran dengan menggunakan berbagai cara/metode yang telah direkomendasikan oleh Bina Marga maupun *AASHTO*. Metode pengukuran ketidakrataan permukaan jalan yang digunakan adalah metode *Transport and Road Research Laboratory* dengan *Rolling Straight Edge (RSE)*. Fasilitas pembacaan data pada *Rolling Straight Edge* hanya bergantung pada pembacaan jarum skala secara manual, sehingga kurang cepat dan efektif. Sementara itu, instrumen printer (*optional*) untuk penyajian data juga tidak tersedia pada alat tersebut.

Berdasarkan latar belakang di atas maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengembangkan instrumen pembacaan data ketidakrataan dengan sensor elektronik untuk menggantikan pembacaan manual pada alat *Rolling Straight Edge*. Dengan dikembangkan alat pembacaan data (*data logger*) sensor elektronik ini maka diharapkan pengukuran dan analisis data dapat dilakukan dengan lebih cepat dan efisien. Akurasi pengukuran akan dilakukan dengan perbandingan bacaan sensor elektronik dengan bacaan secara manual. Obyek perkerasan jalan yang diukur adalah lantai ubin/keamik, perkerasan *paving block*, perkerasan beraspal, dan berkerasan beton.

Tujuan penelitian ini adalah:

1. membuat instrumen sensor elektronik untuk pembacaan data ketidakrataan perkerasan jalan pada alat *Rolling Straight Edge*,
2. melakukan perekaman data ketidakrataan perkerasan jalan (profil memanjang) dari pengukuran dengan alat *Rolling Straight Edge*,
3. menganalisis kondisi tingkat ketidakrataan dan mengevaluasi fungsi pelayanan jalan yang ada.

Penelitian terkait sebelumnya bertujuan melakukan pengukuran dan analisis ketidakrataan perkerasan jalan (profil memanjang) menggunakan *Rolling Straight Edge* dan mengevaluasi kondisi tingkat ketidakrataan dan mengevaluasi fungsi pelayanan jalan yang ada [1]. Pada penelitian tersebut alat *Rolling Straight Edge* tidak dilengkapi dengan instrumen pencatatan dan penyajian data dengan printer (*optional*), sehingga pembacaan data dilakukan secara manual melalui jarum pada skala. Penelitian tersebut dilakukan di tiga lokasi ruas jalan di Yogyakarta dengan tiga

jenis perkerasan, yaitu Jalan Kaliurang (beton aspal), Jalan Teknika – Jalan Kesehatan (*paving block*), dan Jalan Yacarana (*hot rolled sheet*) yang mana umur konstruksi (masa perbaikan terakhir tidak diketahui pasti).

Untuk itu perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengembangkan instrumen pembacaan data ketidakrataan dengan sensor elektronik untuk menggantikan pembacaan manual pada alat *Rolling Straight Edge*. Dengan dikembangkan alat pembacaan data (*data logger*) sensor elektronik ini maka diharapkan pengukuran dan analisis data dapat dilakukan dengan lebih cepat dan efisien. Akurasi pengukuran akan dilakukan dengan perbandingan bacaan sensor elektronik dengan bacaan secara manual. Obyek perkerasan jalan yang diukur adalah lantai ubin/keamik, perkerasan *paving block*, perkerasan beraspal, dan berkerasan beton.

Jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, dibawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel [2]. Pengelompokan jalan menurut UU No. 38 Tahun 2004 tentang Jalan Pasal 6 s.d. 10 mencakup pengelompokan sesuai peruntukannya, sistem jaringan, fungsi jalan, status, dan kelas spesifikasi jalan [3]. Pengelompokan jalan itu terkait dengan besarnya volume lalu lintas yang menggunakan jalan tersebut, besarnya kapasitas jalan, kelayakan ekonomi dari jalan tersebut serta pembiayaan pembangunan dan perawatan jalan. Pengelompokan jalan tersebut meliputi:

- a. jalan umum menurut fungsinya terdiri dari jalan arteri, kolektor, lokal, dan lingkungan,
- b. jalan umum menurut statusnya terdiri dari jalan nasional, provinsi, kabupaten/kota, dan desa,
- c. berdasarkan kelas spesifikasi jalan dikelompokkan atas: jalan bebas hambatan (*freeway*), jalan raya (*highway*), jalan sedang (*road*), dan jalan kecil (*street*).

1.1 Ketidakrataan Permukaan Perkerasan

Tingkat ketidakrataan jalan (*International Roughness Index, IRI*) merupakan salah satu faktor/fungsi pelayanan (*functional performance*) dari suatu perkerasan jalan yang sangat berpengaruh pada kenyamanan pengemudi (*riding quality*). Kualitas jalan yang ada maupun yang akan dibangun harus sesuai dengan standar dan ketentuan yang berlaku. Syarat utama jalan yang baik adalah kuat, rata, kedap air, tahan lama dan ekonomis sepanjang umur yang direncanakan. Untuk memenuhi standar tersebut perlu dilakukan *monitoring* dan *evaluation* secara periodik/berkala sehingga diperoleh metode perbaikan konstruksi yang tepat.

Pengukuran tingkat ketidakrataaan permukaan jalan belum banyak dilakukan di Indonesia mengingat kendala terbatasnya peralatan sehingga persyaratan ketidakrataaan dalam *monitoring* dan *evaluation* terhadap konstruksi jalan yang ada tidak dapat dilakukan secara baik menurut standar nasional bidang jalan. Untuk mengetahui tingkat ketidakrataaan permukaan jalan dapat dilakukan pengukuran dengan menggunakan berbagai cara/metode yang telah direkomendasikan oleh Bina Marga maupun *AASHTO*. Metode pengukuran ketidakrataaan permukaan jalan yang dikenal pada umumnya antara lain metode *NAASRA* (SNI 03-3426-1994) [4]. Metode lain yang dapat digunakan untuk pengukuran dan analisis ketidakrataaan perkerasan adalah *Rolling Straight Edge*, *Slope Profilometer* (*AASHTO Road Test*), *CHLOE Profilometer*, dan *Roughometer* [5].

1.2 Kinerja Perkerasan Jalan

Kinerja perkerasan (*pavement performance*) yang meliputi keamanan/kekuatan perkerasan (*structural pavement*), maupun fungsi (*functional performance*) dinyatakan dengan Indeks Permukaan (IP) atau *Present Serviceability Index* (*PSI*) dan Indeks Kondisi Jalan (*Road Condition Index = RCI*) [6]. Indeks Permukaan (IP) atau *Present Serviceability Index* (*PSI*) dikenalkan oleh *AASHTO* berdasarkan pengamatan kondisi jalan meliputi kerusakan-kerusakan seperti retak-retak, alur, lubang, lendutan pada lajur roda, kekasaran permukaan dan sebagainya yang terjadi selama umur pelayanan. Nilai Indeks Permukaan (IP) bervariasi dari 0-5 seperti disajikan pada **Tabel 1**. Jalan dengan lapis beton aspal yang baru dibuka untuk umum merupakan contoh jalan dengan nilai IP = 4,2. Indeks Permukaan mempunyai hubungan dengan *International Roughness Index* (*IRI*, dalam m/km) seperti ditampilkan pada **Gambar 1**. *IRI* adalah parameter kekasaran yang dihitung dari jumlah kumulatif naik-turunnya permukaan arah profil memanjang dibagi dengan jarak/panjang permukaan yang diukur. *IRI* merupakan bagian dari persyaratan teknis jalan dan kriteria perencanaan teknis jalan [7]. Menurut NCHRP, model ini dikembangkan oleh Dujisin dan Arroyo (1995) [8]. Menurut NCHRP juga, *PSR* adalah *Present Serviceability Rating*, modelnya dikembangkan oleh Paterson (1987), Al-Omari dan Darter (1994), dan Gulen dkk (1994), namun *PSR* tidak diuraikan lebih rinci dalam tulisan ini. Selanjutnya, IP (*PSI*) dinyatakan sebagai fungsi dari *IRI* dengan rumus:

1. Untuk perkerasan jalan beraspal:

$$PSI = 5 - 0,2937X^4 + 1,1771X^3 - 1,4045X^2 - 1,5803X \quad (1)$$

2. Untuk perkerasan jalan dengan beton/semen:

$$PSI = 5 + 0,6046X^3 - 2,2217X^2 - 0,0434X \quad (2)$$

dengan: $X = \text{Log}(1 + SV)$ untuk $SV = 2,2704 IRI^2$

$SV = \text{Slope variance}$ (106 x population of variance of slopes at 1-ft intervals)

$PSI = \text{Present Serviceability Index}$

$IRI = \text{International Roughness Index}$, m/km

Tabel 1. Indeks Permukaan (IP) dan Fungsi Pelayanan

No	Indeks Permukaan (IP)	Fungsi pelayanan
1	4-5	sangat baik
2	3-4	baik
3	2-3	cukup
4	1-2	kurang
5	0-1	sangat kurang

Sumber: Sukirman [6]

1.3 Indeks Kondisi Jalan

Indeks Kondisi Jalan (*Road Condition Index = RCI*) adalah skala tingkat kenyamanan atau kinerja jalan yang dapat diperoleh dari pengukuran dengan alat *Roughometer* maupun secara visual. Jika penelitian dilakukan dengan menggunakan alat *Roughometer* sehingga diperoleh *International Roughness Index* (*IRI*), maka untuk Indonesia dipergunakan korelasi antara Indeks Kondisi Jalan (*Road Condition Index = RCI*) dan *IRI* (Lihat **Gambar 2**) [6], [9]. Korelasi *RCI* dan *IRI* untuk Indonesia adalah

$$RCI = 10 \times \text{Exp}(-0,0501 \times IRI^{1,220920}) \quad (3)$$

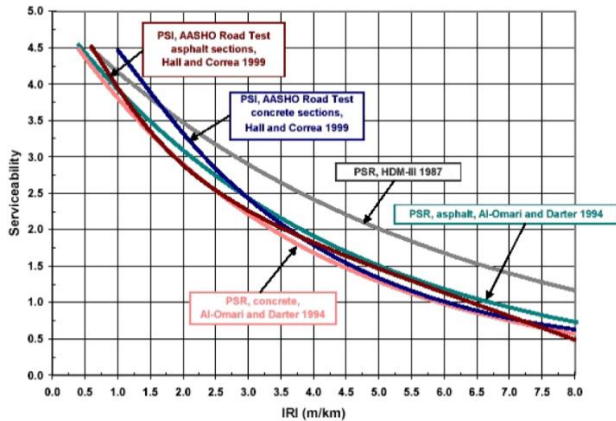
Tabel 2 menyajikan Nilai *RCI* bervariasi dari 2-10 sesuai kondisi permukaan secara visual.

1.4 Laik Fungsi Jalan

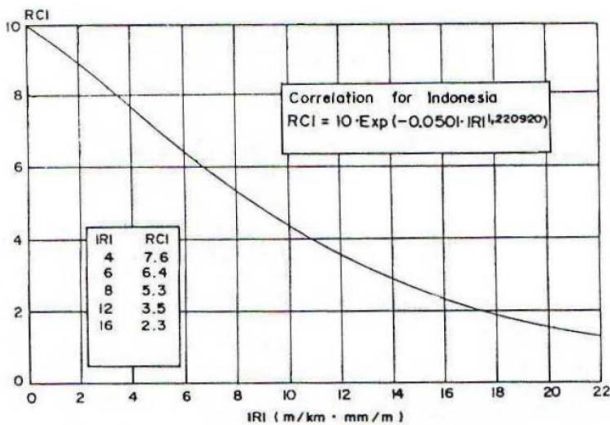
Laik fungsi jalan adalah kondisi suatu ruas jalan yang memenuhi persyaratan teknis kelaikan untuk memberikan keselamatan bagi penggunaannya dan persyaratan administratifnya yang memberikan kepastian hukum bagi penyelenggara jalan dan pengguna jalan, sehingga jalan tersebut dapat dioperasikan untuk umum [11]. Ruang lingkup persyaratan teknis laik fungsi jalan meliputi teknis geometrik jalan, teknis struktur perkerasan jalan, teknis struktur bangunan pelengkap jalan, teknis pemanfaatan bagian-bagian jalan, teknis manajemen dan rekayasa lalu lintas, teknis perlengkapan jalan yang terkait langsung dengan pengguna jalan dan teknis perlengkapan jalan yang tidak terkait langsung dengan pengguna jalan.

Selanjutnya, menurut Panduan Teknis Pengisian Form Uji Laik Fungsi Jalan komponen potongan melintang badan jalan meliputi 6 (enam) bagian [12], yaitu a) lajur lalu lintas, b) bahu, c) median, d) selokan samping, e) ambang pengaman, dan f) alat-alat pengaman lalu-lintas. Kondisi struktur perkerasan jalan, yang menjadi komponen fokus laik fungsi jalan adalah kerataan (*roughness*) dengan ukuran *IRI* (m/km), kedalaman dan intensitas lubang (%), lebar dan intensitas

retak (m²), kedalaman dan intensitas alur (mm), tekstur perkerasan jalan, dan asphalt yang meleleh. Kondisi perkerasan jalan tersebut dibedakan per status jalan, jalan raya harus dengan data lengkap, jalan sedang lebih ringkas, jalan kecil tidak perlu (cukup IRI saja).



Gambar 1. Hubungan Indeks Permukaan dan IRI
 Sumber: NCHRP [8]



Gambar 2. Korelasi antara Nilai IRI dan Nilai RCI
 Sumber: Sukirman [6]

Tabel 2. Kondisi Permukaan secara Visual dan Nilai RCI

RCI	Kondisi Permukaan Jalan secara Visual
8-10	Sangat rata dan teratur
7-8	Sangat baik, umumnya rata
6-7	Baik
5-6	Cukup, sedikit sekali atau tidak ada lubang, tetapi permukaan jalan tidak rata
4-5	Jelek, kadang-kadang ada lubang, permukaan jalan tidak rata
3-4	Rusak, bergelombang, banyak lubang
2-3	Rusak berat, banyak lubang dan seluruh daerah perkerasan hancur
< 2	Tidak dapat dilalui, kecuali dengan 4 WD Jeep

Sumber: Sukirman [10]

1.5 Akurasi Data Pengukuran

Rata-rata persentase kesalahan mutlak (MAPE, mean absolute percentage error), yang juga dikenal sebagai rata-rata persentase penyimpangan (MAPD, mean absolute percentage deviation), adalah ukuran akurasi prediksi metode peramalan dalam statistik, misalnya dalam trend estimation, demand forecasts, dan sebagainya [13]. MAPE juga digunakan sebagai loss function untuk masalah regresi dalam machine learning. MAPE biasanya mengekspresikan akurasi sebagai persentase kesalahan, dan didefinisikan oleh rumus:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \tag{4}$$

Dengan: A_t = nilai aktual,
 F_t = nilai perkiraan
 n = jumlah titik pasangan data
 100% = pengalihan dengan 100% untuk menjadikannya presentase kesalahan

Dalam statistik, mean absolute error (MAE), yang juga dikenal sebagai rata-rata kesalahan mutlak (MAD, mean absolute deviation), adalah ukuran perbedaan antara dua variabel kontinu [14]. Dalam hal ini, diasumsikan A_t dan F_t adalah variabel pengamatan/ pengukuran berpasangan yang mengekspresikan fenomena yang sama. Contoh A_t versus F_t meliputi perbandingan antara pengamatan dan prediksi, waktu awal versus waktu berikutnya, dan satu teknik pengukuran versus teknik pengukuran alternatif. Jumlah titik sebaran pengukuran adalah n titik pasangan data, di mana titik t memiliki koordinat (A_t, F_t). Mean Absolute Error (MAE) adalah jarak vertikal rata-rata antara setiap titik dan garis identitas. MAE juga merupakan jarak horizontal rata-rata antara setiap titik dan garis identitas. Kesalahan mutlak rata-rata diberikan oleh rumus:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |A_t - F_t| \tag{5}$$

Dengan: A_t = nilai aktual,
 F_t = nilai perkiraan/prediksi
 n = jumlah titik pasangan data

Kesalahan mutlak rata-rata adalah rata-rata kesalahan mutlak |A_t - F_t| di mana A_t adalah nilai sebenarnya dan F_t adalah nilai prediksi. Kesalahan mutlak rata-rata menggunakan skala yang sama dengan data yang diukur. MAE ini dikenal sebagai ukuran akurasi yang bergantung pada skala, oleh karena itu tidak dapat digunakan untuk membuat perbandingan antara pasangan data yang menggunakan skala yang berbeda.

2. Metode

2.1 Lokasi dan Survei Pengukuran

Pengukuran dilakukan di tiga lokasi ruas jalan dengan jenis perkerasan yang berbeda **Gambar 3**, yaitu ruas jalan

beton aspal, ruas jalan *paving block*, dan ruas jalan hot rolled sheet yang mana umur konstruksi (masa perbaikan terakhir tidak diketahui pasti). Pada penelitian analisis kondisi jalan ini ada beberapa tolok ukur minimal yang harus dicapai, beberapa tolok ukur tersebut dapat dicari dan diketahui dengan cara melakukan pengujian, olah data dan survei lapangan. Untuk kegiatan survei dan pengolahan data digunakan beberapa alat pendukung, seperti formulir survei ketidakrataan perkerasan jalan, alat tulis, meteran, laptop, kamera, dan alat pelindung diri.

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analisis, yakni suatu metode yang digunakan untuk mencari unsur, ciri dan sifat-sifat dari suatu fenomena yang terjadi. Metode ini dilakukan dengan mengumpulkan data, menganalisis dan menginterpretasikannya. Data primer merupakan data yang diperoleh dengan cara pengamatan secara langsung di lokasi untuk memperoleh data-data kondisi lokasi penelitian.

Oleh karena sumber kajian berupa kasus terapan maka metode pengambilan data primer yang diusulkan adalah melalui survei lapangan, sedangkan data sekunder diperoleh dari kajian pustaka, laporan studi dan peraturan yang berlaku. Data primer untuk analisis diperoleh dari survei yang meliputi: survei pendahuluan, survei data primer prasarana jalan dan fasilitas lainnya, dan survei data sekunder (instansional) yang berkaitan dengan data dasar prasarana jalan dan fasilitasnya. Data sekunder untuk mendukung analisis terdiri dari: peta ruas jalan dan kondisi di lokasi studi, asumsi-asumsi dalam standar desain, laporan studi terkait.

Prinsip-prinsip cara analisis dalam penelitian meliputi:

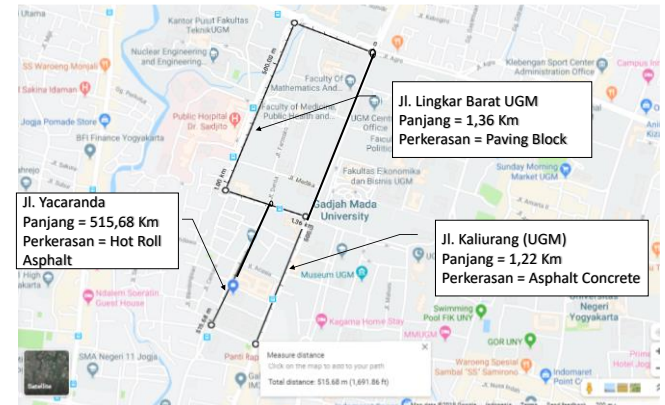
- Analisis awal: membuat instrumen sensor elektronik untuk pembacaan data ketidakrataan perkerasan jalan pada alat *Rolling Straight Edge (RSE)*
- Analisis utama: untuk melakukan perekaman data ketidakrataan perkerasan jalan (profil memanjang) dari pengukuran dengan alat *Rolling Straight Edge*,
- Evaluasi hasil: menganalisis kondisi tingkat ketidakrataan dan mengevaluasi fungsi pelayanan jalan.

2.2 Peralatan Pengukuran

Keterbatasan pada alat *RSE* di laboratorium dan bengkel kerja transportasi adalah tidak tersedianya *Autograph Chart Recorder* (termasuk dengan *drive gearbox* dan *pen carriage*). *Controls Testing Equipment Ltd.* menyajikan spesifikasi detail dari *RSE* [15], antara lain:

- Jangkauan skala: ± 25 mm, kenaikan tiap 2 mm sampai nilai ± 10 mm dan kenaikan tiap 5 mm sampai ± 25 mm.
- Dimensi *RSE* adalah: panjang 3.000 mm, lebar 152 mm, tinggi 545 mm tanpa *Autograph Chart Recorder* atau 722 mm dengan *Autograph Chart Recorder*

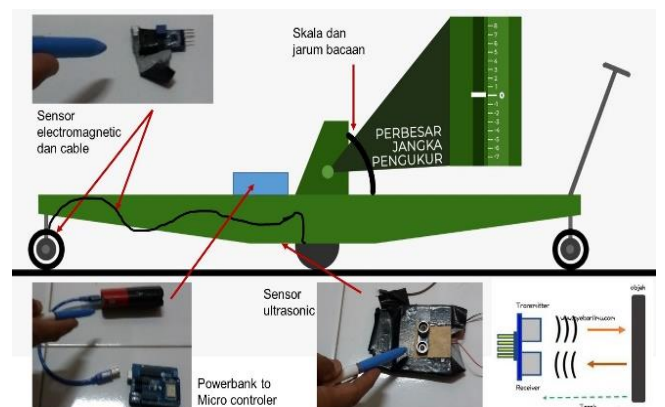
- Berat 100kg
- Aksesoris pilihan: *Autograph Chart Recorder* (80-B187/1, lengkap dengan *drive gearbox* dan *pen carriage*)
- Kelengkapan bahan habis pakai: paket 10 *chart rolls* dilengkapi dengan 10 *fibre tipped pens* (80-B187/2). Setiap *chart roll* dapat mencatat profil permukaan jalan sepanjang 1 km.



Gambar 3. Lokasi Pengambilan Data untuk Penerapan Instrumen Pembacaan Ketidakrataan pada *RSE*

Data IRI diperoleh dari pengukuran menggunakan sensor ultrasonik yang dipasang pada alat *RSE* (Lihat **Gambar 4**). Instrumen pembacaan data pengukuran tersebut dilengkapi dengan *serial monitor* dari *arduino*, tampilan dalam grafik interaktif berbasis *web* menggunakan akses jaringan yang disediakan oleh *wifi shield* dari *arduino* yang digunakan.

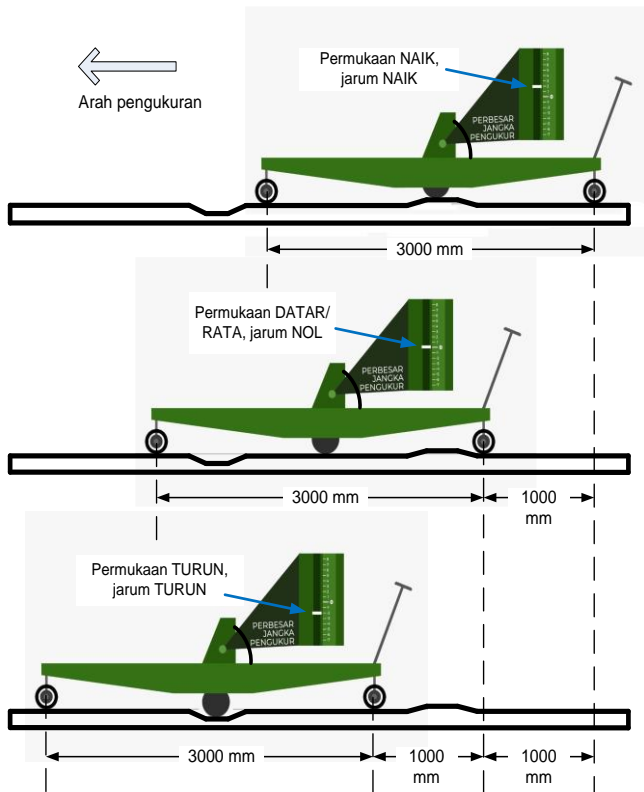
Pengukuran ketidakrataan diilustrasikan secara skematis baik pengukuran dengan *RSE* berskala manual maupun dengan *RSE* ber-sensor seperti disajikan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Persiapan alat dan pelaksanaan pengukuran di lapangan dideskripsikan seperti pada **Gambar 7** sampai **Gambar 12**.



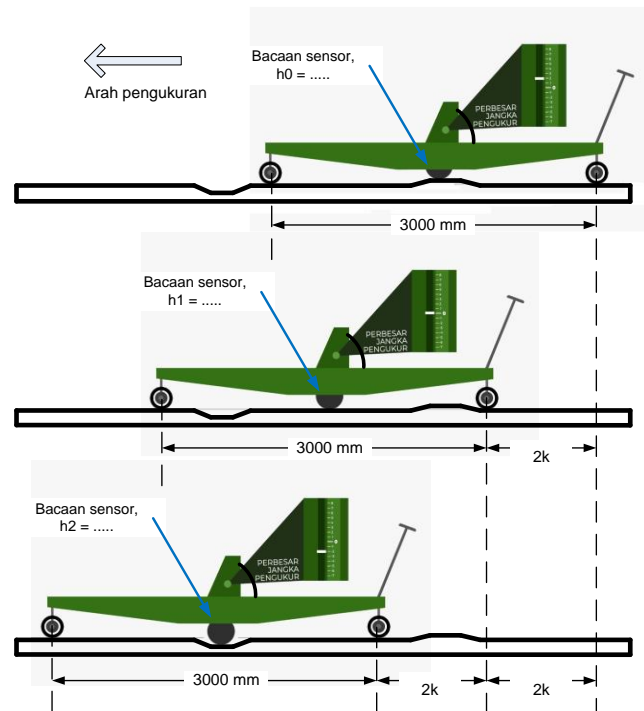
Gambar 4. Pemasangan instrumen sensor ultrasonik pada *RSE*

Dalam kasus *RSE* ber-sensor ini **Gambar 6**, ketidakrataan diperoleh dari nilai perbedaan bacaan berikutnya terhadap bacaan awal, diberikan dengan rumus:

$$\Delta h_{2k} = h_1 - h_0 \text{ dan } \Delta h_{4k} = h_2 - h_1 \quad (6)$$



Gambar 5. Ilustrasi Pengukuran dengan RSE berskala manual



Gambar 6. Ilustrasi Pengukuran dengan RSE ber-sensor



(a) Roda ujung depan/belakang



(b) Observasi roda pivot dan pengecekan dimensi RSE

Gambar 7. Ilustrasi roda depan/belakang (\varnothing 150 mm) dan roda pivot di tengah RSE



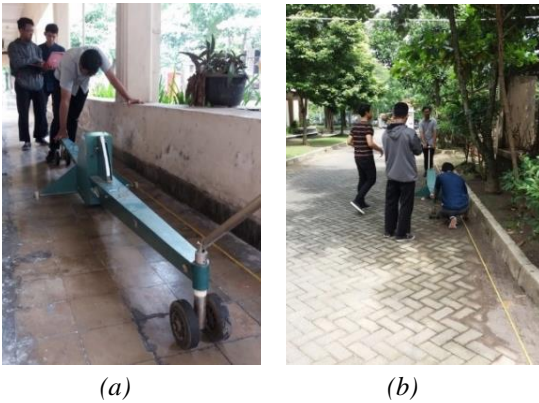
Gambar 8. Setting dan Instalasi Rolling Straight Edge di Lapangan (paving block)



Gambar 9. Tipikal Pengukuran dengan Pembacaan Jarum Skala secara Manual



Gambar 10. Pencatatan data Ketidakrataan dari Jarum Skala secara Manual



Gambar 11. Ilustrasi Pengukuran secara Manual: a) di Permukaan Lantai Ubin/Keramik dan b) di Permukaan Perkerasan Jalan *Paving block*



(a) RSE ber-sensor oleh 2 orang



(b) RSE berskala secara manual oleh 3 orang

Gambar 12. Pengukuran di Jalan Kaliurang dengan (a) RSE ber-sensor dan (b) RSE berskala secara manual

2.3 Metode Analisis dan Studi Komparatif

Dalam analisis terhadap pembacaan data ketidakrataan dan hasil analisis komparasi terhadap hasil-hasil pengujian pada studi lainya maupun pedoman yang berlaku maka perlu dirujuk beberapa referensi pemahaman terkait seperti yang disajikan pada **Tabel 3** sampai

Tabel 7.

Tabel 3. Parameter perencanaan jalan untuk menetapkan standar pelayanan minimal jalan (SPM)

LHRT, kend/hari	Kelas penyediaan	Tipe perkerasan jalan min.	Kondisi jalan	
			IRI*), m/km	Kondisi visual
> 20.000	Jalan bebas hambatan	Beton aspal atau beton semen	3-4	-
> 20.000	Jalan raya	Beton aspal atau beton semen	4-6	-
6.000-20.000	Jalan sedang	Perkerasan beraspal	5-8	sedang
1.000-6.000		Perkerasan beraspal	5-8	sedang
< 1.000			-	sedang
< 1.000 dan paling besar kendaraan bermotor roda 2	Jalan kecil	Perkerasan tidak beraspal/tanah diperkeras	-	sedang

*) catatan: dipilih angka yang besar untuk pemerintah daerah yang mampu, dan sebaliknya dipilih angka yang kecil untuk pemerintah daerah yang kurang mampu.

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum [11]

Tabel 4. Ketidakrataan permukaan perkerasan, IRI dan RCI

No	Kategori Jalan	IRI maks (m/km)	RCI
1.	Jalan Raya	6	Baik s/d sedang
2.	Jalan Sedang	8	Baik s/d sedang
3.	Jalan Kecil	10	Baik s/d sedang

Sumber: Sukirman [6]

Tabel 5. Nilai IRI vs Jenis Penanganan

No	Kondisi Jalan	IRI (m/km)	Kebutuhan Penanganan
1.	Baik	IRI rata-rata ≤ 4	Pemeliharaan rutin
2.	Sedang	$4 < \text{IRI rata-rata} \leq 8$	Pemeliharaan berkala
3.	Rusak Ringan	$8 < \text{IRI rata-rata} \leq 12$	Peningkatan jalan
4.	Rusak Berat	IRI rata-rata > 12	Peningkatan jalan

Sumber: Kementerian Pekerjaan Umum [16], [17]

Tabel 6. Hasil Pengukuran Ketidakrataan Perkerasan Jalan

Nama Jalan	Jl. Kaliurang	Jl. Teknika Selatan - Jl. Yacaranda Kesehatan	
		Concrete Block (<i>Paving block</i>)	HRS
Jenis Perkerasan	AC	Concrete Block (<i>Paving block</i>)	HRS
Jarak Pengukuran (m)	500	500	500
	-2	-14	-15
Range Data (mm/m)	-	-	-
	2	10	15
Identifikasi Landai (%)	0,05% naik ke arah Utara	0,71% naik ke arah Utara	0,92% naik ke arah Utara

IRI (m/km)	0,764	2,956	4,604
------------	-------	-------	-------

Tabel 7. Hasil Estimasi IP dan RCI Berdasarkan Nilai IRI

Lokasi / Jalan	Jl. Kaliurang	Jl. Teknika – Jl. Kesehatan	Jl. Yacaranda
Jenis Perkerasan	AC	Paving block	HRS
IRI (m/km)	0,764	2,956	4,604
PSI (=IP)	4,28	2,47	1,6
RCI	9,65	8,28	7,24

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Penerapan Teknologi Sensor Ultrasonik

Penelitian ini menerapkan instrumen pembacaan data ketidakrataan perkerasan jalan yang dipasang pada alat Rolling Straight Edge (RSE) sebagai alternatif yang lebih efisien dan cepat dibanding cara manual (bacaan jarum pada kurva berskala). Cara kerja alat yang lama kurang efisien dan perlu waktu lama. Oleh karena itu, dalam penelitian digunakan teknologi sensor ultrasonik yang terintegrasi dengan MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) dan log berbasis web untuk memudahkan pengukuran ketidakrataan jalan dengan RSE dan pemantauannya.

Pada prinsipnya, MQTT adalah protokol untuk menyampaikan pesan dari server ke client maupun sebaliknya. MQTT bermanfaat dalam melakukan optimasi untuk sistem IoT (Internet of Think), dengan cara: (a) mengirim pesan secepat mungkin, (b) meminimalisir encoding dan decoding data, dan (c) memanfaatkan storage sekecil mungkin. Signal Control MQTT banyak jenisnya, namun yang digunakan di sini meliputi 3 saja, yaitu:

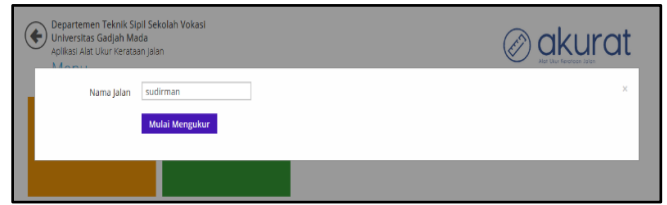
- a. connect - connect ke server (broker)
- b. subscribe - guna menerima pesan dengan topik tertentu
- c. publish - mengirim pesan dengan topik tertentu

Dari pengukuran ketidakrataan diperoleh nilai IRI (International Roughness Index), yang kemudian digunakan untuk menilai kondisi fungsional jalan berdasarkan Indeks Permukaan (IP atau PSI, Present Serviceability Index) dan Indeks Kondisi Jalan (RCI, Road Conmdition Index). Menurut AASHTO, PSI secara umum diperoleh berdasarkan pengamatan kondisi jalan yang meliputi kerusakan-kerusakan seperti retak, alur, lubang, lendutan pada lajur roda, dan sebagainya.

3.2 Hasil Analisis Program Pengukuran

Tampilan prosedur program dalam pengoperasian instrumen pembacaan data ketidakrataan perkerasan jalan disajikan berikut ini.

1. Tahap program dijalankan (Lihat Gambar 13) diikuti dengan input nama jalan yang akan diukur kemudian diklik tombol Mulai Mengukur.



Gambar 13. Display Memulai Pengukuran

2. Selesai pengukuran, instrumen pada RSE dimatikan dan data terekam dalam database. Untuk memeriksa rekap hasil pengukuran ketidakrataan jalan, koneksi internet di laptop dihidupkan lebih dulu, lalu website akurat dibuka sehingga tampilan awal halaman web terbuka seperti pada Gambar 14.



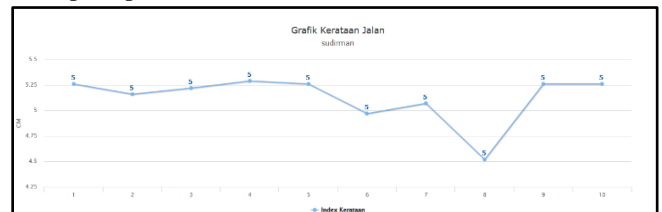
Gambar 14. Display Menu Pengukuran Baru atau Melihat Hasil Pengukuran

3. Setelah menu Lihat Hasil Pengukuran diklik akan ditampilkan daftar hasil pengukuran yang sudah dilakukan seperti pada Gambar 15.

NAMA JALAN	WAKTU PENGUKURAN	OPS
agip	2019-09-27 14:42:29	Hapus
coba	2019-09-27 14:14:13	Hapus
grafika	2019-05-16 08:08:34	Hapus
jalan	2019-09-27 13:35:59	Hapus
sudirman	2019-09-27 14:15:49	Hapus

Gambar 15. Display Daftar Hasil Pengukuran

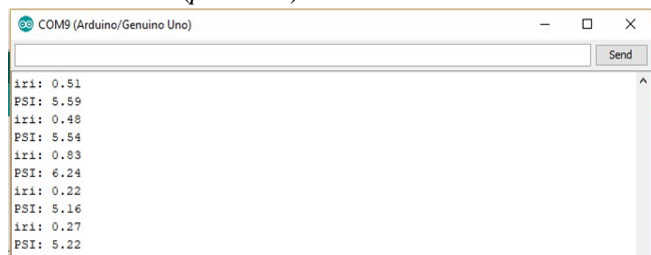
4. Selanjutnya, dipilih nama jalan dari pengukuran yang telah ada sehingga ditampilkan grafik kerataan jalan seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. Display Grafik Hasil Pengukuran

Melalui alamat local host yang telah dibuat, dapat secara manual diinputkan bulan, tanggal, tahun, jam, dan menit mulai dan selesai pengukuran, sebagai indikasi untuk web

menampilkan hasil *measurement* dalam bentuk grafik interaktif yang berupa IRI dan PSI pada setiap periodenya. Pada sisi *IDE arduino*, terdapat eksekusi program untuk mendapatkan hasil perhitungan parameter IRI dan PSI yang dilakukan oleh instrumen pada jalan yang diukur (Lihat **Gambar 17**). Data yang diterima pada periode tertentu akan dikirimkan ke *database* dan *server*. Dengan instrumen pembacaan data ketidakrataan ini maka grafik *output* yang interaktif berbasis *web* dapat menunjang keperluan dokumentasi dan penyajian data hasil pengukuran ketidakrataan dari berbagai jenis perkerasan jalan yang berbeda dengan lebih efisien waktu dan teliti (*precision*).



Gambar 17. Tampilan data Eksekusi Program Perhitungan IRI dan PSI

3.3 Penerapan Instrumen Pembacaan Data Ketidakrataan dan Hasil Analisisnya

Pada bagian ini disajikan penerapan instrumen pembacaan data ketidakrataan dan hasil analisisnya yang diujicobakan pada beberapa lokasi jalan yang memiliki jenis perkerasan jalan yang berbeda, meliputi:

1. Permukaan lantai ubin di selasar kampus DTE SV UGM
2. Perkerasan beton aspal di Jalan Kaliurang (Simpang Mirota – Simpang MM UGM)
3. Perkerasan *paving block* di jalan lingkungan SV UGM

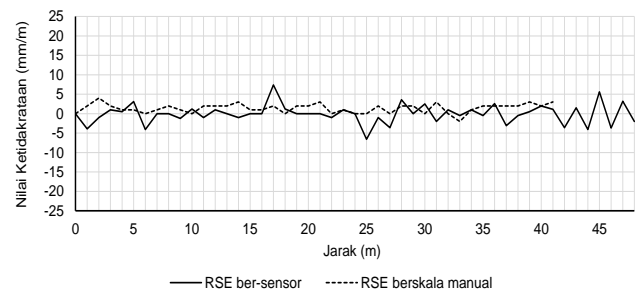
Hasil-hasilnya disajikan pada **Tabel 8** sampai **Tabel 10** dan **Gambar 18** sampai **Gambar 20**. Dari hasil penerapan instrumen pembacaan ketidakrataan tersebut menunjukkan konsistensi akurasi yang baik ($MAPE < 10\%$) pada jenis perkerasan lantai ubin dengan nilai $MAPE$ 2,06% dan MAE 0,03 mm/m. Di perkerasan beton aspal di Jalan Kaliurang didapatkan nilai $MAPE$ 19,70% dan MAE 0,35 mm/m (konsistensi kurang). Di perkerasan *paving block* diperoleh nilai $MAPE$ 110,16% dan MAE 3,20 mm/m (konsistensi rendah).

Berdasarkan acuan **Tabel 1**, **Tabel 2** dan **Tabel 5** kemudian dilakukan analisis data dan hasilnya disajikan pada **Tabel 11**. Menurut analisis kondisi fungsional (fungsi pelayanan) dari jenis perkerasan lantai ubin, beton aspal, dan *paving block* masing-masing lokasi diperoleh kategori adalah baik, cukup, dan kurang. Kategori kondisi permukaan jalan secara visual dari lantai ubin dan beton aspal keduanya

adalah “sangat rata dan teratur”, sementara itu *paving block* termasuk kategori “baik”. Dilihat analisis tentang kebutuhan jenis penanganan yang diperlukan pada ketiga jenis perkerasan semuanya diperlukan “pemeliharaan rutin”.

Tabel 8. Bacaan dan hasil analisis ketidakrataan di lantai ubin Kampus DTE SV UGM (lantai ubin)

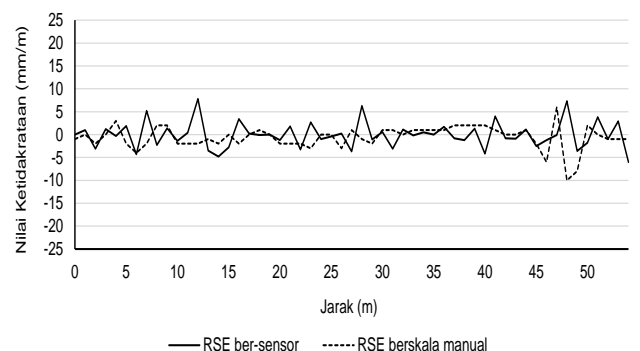
No	Parameter	RSE ber-sensor	RSE berskala manual	Catatan
a	n =	42	42	
b	min (mm/m) =	-6,6	-2	
c	max (mm/m) =	7,4	4	4 untuk
d	average = kelandaian jalan (mm/m) =	-0,01	1,4	pengukuran jarak satu
e	IRI = rata2 abs (mm/m) =	1,469	1,5	trip
f	MAPE (%) =		2,06	
g	MAE (mm/m)		0,03	



Gambar 18. Profil ketidakrataan perkerasan di lantai ubin Kampus DTE SV UGM (lantai ubin)

Tabel 9. Bacaan dan hasil analisis ketidakrataan di Jalan Kaliurang (beton aspal)

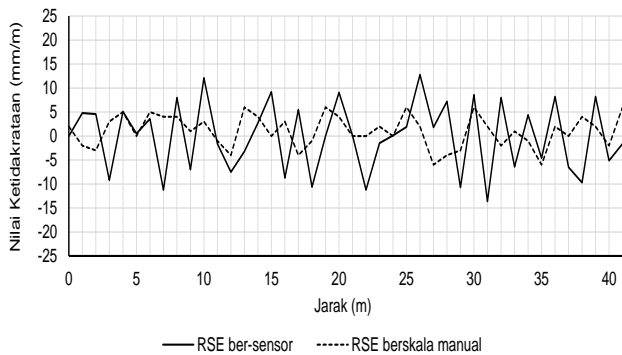
No	Parameter	RSE ber-sensor	RSE berskala manual	Catatan
a	n =	55	55	
b	min (mm/m) =	-12,3	-10	
c	max (mm/m) =	7,8	6	6 untuk
d	average = kelandaian jalan (mm/m) =	0,05	-0,44	pengukuran jarak satu
e	IRI = rata2 abs (mm/m) =	2,155	1,8	trip
f	MAPE (%) =		19,7	
g	MAE (mm/m)		0,35	



Gambar 19. Profil ketidakrataan permukaan perkerasan di Jalan Kaliurang (beton aspal)

Tabel 10. Bacaan dan hasil analisis ketidakrataan di jalan lingkungan SV UGM (*paving block*)

No	Parameter	RSE ber-sensor	RSE berskala manual	Catatan
a	n =	42	42	
b	min (mm/m) =	-13,6	-6	
c	max (mm/m) =	12,8	6	untuk
d	average = kelandaian jalan (mm/m) =	-0,08	1,05	pengukuran jarak satu
e	IRI = rata2 abs (mm/m) =	6,105	2,9	trip
f	MAPE (%) =		110,16	
g	MAE (mm/m)		3,2	



Gambar 20. Profil ketidakrataan perkerasan di jalan lingkungan SV UGM (*paving block*)

4. Simpulan

Dari penelitian ini disimpulkan sebagai berikut:

1. Alat RSE berbasis sensor ultrasonik yang dibuat ini sangat membantu dalam melakukan pengukuran ketidakrataan

perkerasan jalan terutama dalam efisiensi waktu, tenaga *operator/surveyor*, dan produktivitas *data logging*. Sebaliknya, proses pengukuran dan perhitungan dengan menggunakan RSE secara manual membutuhkan waktu yang lama, jumlah *operator/surveyor* lebih banyak, hasilnya kurang presisi.

2. Grafik *output* yang interaktif berbasis *web* dapat menunjang keperluan dokumentasi dan penyajian data hasil pengukuran ketidakrataan dari berbagai jenis perkerasan jalan yang berbeda dengan lebih efisien waktu dan teliti (*precision*).
3. Hasil penerapan instrumen pembacaan ketidakrataan menunjukkan adanya konsistensi akurasi yang baik ($MAPE < 10\%$) pada perkerasan lantai ubin dengan nilai *MAPE* 2,06% dan *MAE* 0,03 mm/m. Pada perkerasan beton aspal di Jalan Kaliurang didapatkan nilai *MAPE* 19,70% dan *MAE* 0,35 mm/m (konsistensi kurang). Pada perkerasan *paving block* diperoleh nilai *MAPE* 110,16% dan *MAE* 3,20 mm/m (konsistensi rendah).
4. Menurut analisis kondisi fungsional (fungsi pelayanan) dari jenis perkerasan lantai ubin, beton aspal, dan paving block masing-masing lokasi diperoleh kategori adalah baik, cukup, dan kurang. Kategori kondisi permukaan jalan secara visual dari lantai ubin dan beton aspal keduanya adalah “sangat rata dan teratur”, sementara itu *paving block* termasuk kategori ‘baik’. Dilihat analisis tentang kebutuhan jenis penanganan yang diperlukan pada ketiga jenis perkerasan semuanya diperlukan “pemeliharaan rutin”.

Tabel 11. Kategori Fungsi Pelayanan, Kondisi Visual Jalan, dan Kebutuhan Penanganan

No	Lokasi dan Jenis Perkerasan	Parameter	RSE ber-sensor	RSE berskala manual
1	Dampak ketidakrataan perkerasan di lantai ubin Kampus DTE SV UGM (lantai ubin)	a. <i>IRI</i> , mm/m =	1,469	1,50
		b. <i>PSI</i> = IP	3,38	3,35
		Kategori fungsi pelayanan	Baik	Baik
		c. <i>RCI</i> =	9,23	9,21
		Kategori kondisi permukaan jalan secara visual	Sangat rata dan teratur	Sangat rata dan teratur
		Kebutuhan jenis penanganan	Pemeliharaan rutin	Pemeliharaan rutin
2	Dampak ketidakrataan perkerasan di Jalan Kaliurang (beton aspal)	a. <i>IRI</i> , mm/m =	2,155	1,80
		b. <i>PSI</i> = IP	2,77	3,06
		Kategori fungsi pelayanan	Cukup	Baik
		c. <i>RCI</i> =	8,80	9,01
		Kategori kondisi permukaan jalan secara visual	Sangat rata dan teratur	Sangat rata dan teratur
		Kebutuhan jenis penanganan	Pemeliharaan rutin	Pemeliharaan rutin
3	Dampak ketidakrataan perkerasan di jalan lingkungan SV UGM (<i>paving block</i>)	a. <i>IRI</i> , mm/m =	6,105	2,90
		b. <i>PSI</i> = IP	1,10	2,31
		Kategori fungsi pelayanan	Kurang	Cukup
		c. <i>RCI</i> =	6,34	8,32
		Kategori kondisi permukaan jalan secara visual	Baik	Sangat rata dan teratur
		Kebutuhan jenis penanganan	Pemeliharaan rutin	Pemeliharaan rutin

Daftar Pustaka

- [1] Suwardo and Sugiharto, "Tingkat Kerataan Jalan Berdasarkan alat *Rolling Straight Edge* untuk Mengestimasi Pelayanan Jalan," in *Prosiding Simposium VII FSTPT*, 2004.
- [2] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan*. Jakarta: Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia, 2006, p. 92.
- [3] Pemerintah Republik Indonesia, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 tahun 2004 tentang Jalan*. Jakarta: Sekretaris Negara Republik Indonesia, 2004, p. 59.
- [4] Pustran-Balitbang PU, *Tata Cara Survei Kerataan Permukaan Perkerasan Jalan dengan Alat Ukur Kerataan NAASRA (SNI 03-3426-1994)*. Jakarta: Pustran-Balitbang PU, 1994, p. 8.
- [5] E. J. Yoder and M. W. Witczak, *Principle of Pavement Design*, 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1975.
- [6] S. Sukirman, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Badan Penerbit Nova, 1992.
- [7] Kementerian Pekerjaan Umum, *Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan*. Jakarta: Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia, 2011, p. 38.
- [8] NCHRP, *Rehabilitation Strategies for Highway Pavements*. Washington: TRB-NRC, 2001.
- [9] Suherman, "Studi Persamaan Korelasi antara Ketidakrataan Permukaan Jalan dengan Indeks Kondisi Jalan Studi Kasus Ruas Jalan Labuan – Cibaliung," *J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 3, p. 206–214, 2008.
- [10] S. Sukirman, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Badan Penerbit Nova, 1999.
- [11] Menteri Pekerjaan Umum, *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 11 /PRT/M/2010 tentang Tata Cara dan Persyaratan Laik Fungsi Jalan*. Jakarta: Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia, 2010.
- [12] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Panduan Teknis Pengisian Form Uji Laik Fungsi Jalan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum, 2012, p. 74.
- [13] S. Kim and H. Kim, "A New Metric of Absolute Percentage Error for Intermittent Demand Forecasts," *Int. J. Forecast.*, vol. 32, no. 3, p. 669–679, 2016, doi: 10.1016/j.ijforecast.2015.12.003.
- [14] W. Weijie and L. Yanmin, "Analysis of the Mean Absolute Error (MAE) and the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Rounding Model," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 324. 01204, doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012049.
- [15] Controls Testing Equipment Ltd., *Rolling Straight Edge B187: User Manual*, 1st ed. Icknield Way, Tring HP 23 4JX, England: Controls House, 1993.
- [16] Kementerian Pekerjaan Umum, *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 13/PRT/M/2011 tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilikan Jalan*. Jakarta: Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia, 2011, p. 21.
- [17] Direktorat Jendral Bina Marga, *Tata Cara Penyusunan Program Pemeliharaan Jalan Kota, No. 018/T/ BNKT/1990*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum, 1990.

