

Sebuah Sistem Pencitraan Optik berbasis pada Proyeksi Pola Titik-titik Acak dengan Metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk Menentukan Profil Kekasaran Permukaan suatu Bahan

Karisna^(1,a), Margi Sasono^{(1,b)*} dan Subhan Zul Ardi^(2,c)

⁽¹⁾Program Studi Fisika-FAST, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia, 55166

⁽²⁾Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM), Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia, 55164

Email : ^(a)karisna1915014021@webmail.uad.ac.id, ^(b*)margi.sasono@fisika.uad.ac.id,

^(c)zulardisubhan@ikm.uad.ac.id

Diterima (23 April 2024), Direvisi (22 Juni 2024)

Abstract. *Reliable methods (techniques) are needed to determine surface roughness accurately. Contact techniques are prevalent but can damage materials and are subject to much noise. Meanwhile, non-contact techniques (usually optical) still face setup complexity and inaccuracy. This paper designs a simple optical imaging system based on the projection of random dot patterns to determine the surface roughness of a material. It is technically simple as it only requires a Liquids Crystal Display (LCD) projector device to highlight the random dot pattern onto the surface of the test material and then a digital camera to capture it. The camera captures a reference image (just the random dots pattern) and a distortion image when the random dots pattern highlights the test material. Both images are digitally processed using the Digital Image Correlation (DIC) algorithm to obtain a correlation value proportional to the change in the pattern of random dots due to the presence of the test material surface. This change manifests as a pixel displacement field image estimated to be proportional to the surface roughness profile of the material. Based on this profile, a surface roughness index can be estimated. The validation test results show that the design can determine the roughness index (R_a) of a randomly sprinkled plane surface with different diameters of cork balls (selected). The graph result shows that index R_a tends to increase linearly with the increase of cork ball diameter with a correlation value of $R = 0,97$. The larger the diameter of the cork ball, the larger the surface roughness index. This result is rational and valid. The design is also verified to determine the roughness index of the surface of commercial sandpaper with various grit sizes. The larger the grit of the sandpaper, the smoother the sandpaper. The verification results show that the design can demonstrate that the larger the grit, the smaller the roughness index of the sandpaper. Thus, the developed optical imaging design is valid and has the potential to be simple, cheap, easy to operate, and fast in obtaining information about the surface roughness of a material.*

Keywords: *imaging, optical, projection, random-dots, surface-roughness.*

Abstrak. Metode (teknik) yang handal adalah sangat dibutuhkan untuk menentukan kekasaran permukaan secara akurat. Teknik kontak adalah sangat populer, akan tetapi dapat merusak bahan dan dihindangi banyak noise. Sementara teknik non-kontak (biasanya metode optik) masih menghadapi kendala kerumitan *setup* dan belum akurat. Makalah ini merancang-bangun sebuah sistem pencitraan (*imaging*) optik sederhana berdasarkan pada proyeksi pola titik-titik acak untuk menentukan kekasaran permukaan suatu bahan. Secara teknis sederhana karena hanya membutuhkan perangkat *Liquids Crystal Display* (LCD) proyektor untuk menyorotkan pola titik-titik acak ke permukaan bahan uji dan lalu kamera digital untuk menangkapnya. Kamera menangkap citra referensi (hanya pola titik-titik acak), dan citra distorsi ketika bahan uji tersorot oleh pola titik-titik acak. Kedua citra diolah secara digital

dengan menggunakan algoritma *Digital Image Correlation* (DIC) untuk memperoleh nilai korelasi yang sebanding dengan perubahan pola titik-titik acak akibat permukaan bahan uji. Perubahan ini dinyatakan sebagai citra medan pergeseran pixel yang diestimasi sebanding dengan profil kekasaran permukaan bahan. Berdasarkan profil ini, sebuah indeks kekasaran permukaan dapat diestimasi. Dari hasil uji validasi menunjukkan bahwa rancang-bangun dapat menentukan indeks kekasaran (R_a) dari permukaan bidang yang ditaburi secara acak dengan diameter bola gabus yang berbeda-beda (terseleksi). Dari hasil grafik menunjukkan bahwa indeks R_a cenderung meningkat secara linear terhadap kenaikan diameter bola gabus dengan nilai korelasi adalah $R = 0,97$. Hasil ini adalah rasional dan valid bahwa semakin besar diameter bola gabus, semakin kasar permukaan. Rancang-bangun juga terverifikasi mampu menentukan indeks kekasaran dari permukaan amplas komersial dengan berbagai ukuran grit. Semakin besar grit amplas, semakin halus amplas. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa rancang-bangun mampu menunjukkan bahwa semakin besar grit, semakin kecil indeks kekasaran amplas. Dengan demikian, rancang-bangun pencitraan optik yang dikembangkan ini adalah valid dan berpotensi sederhana, murah, mudah operasionalnya, dan cepat dalam memperoleh informasi tentang kekasaran permukaan suatu bahan.

Kata kunci: pencitraan, optik, proyeksi, titik-titik acak, kekasaran-permukaan.

PENDAHULUAN

Penentuan parameter kekasaran permukaan (*Surface Roughness*) dari suatu bahan adalah krusial dalam berbagai bidang sains dan teknik. Parameter ini menggambarkan sebuah ukuran variasi ketinggian dari kondisi permukaan ideal (atau dari bidang referensi) bahan yang sedang diuji [1]. Misalnya, dalam bidang aeronautika, kekasaran permukaan bodi pesawat terbang akan membawa dampak pada dinamika terbang dan keausan komponen pesawat [2]. Dalam bidang medis, ukuran kekasaran permukaan digunakan untuk menganalisis kualitas implan gigi [3]. Industri optik menggunakan ukuran kekasaran permukaan untuk menjamin mutu produk komponen optik [4,5]. Oleh karena itu, untuk memperoleh parameter kekasaran permukaan memerlukan sebuah metode pengukuran yang akurat dan handal.

Secara teknis, pengukuran kekasaran permukaan terdiri atas teknis kontak dan non-kontak. Teknik kontak ini meliputi penggunaan ujung sensor *stylus profilers* [6,7] dan *atomic force microscopy* (AFM) [8]. Teknik ini dapat merusak bahan yang sedang diuji karena ada interaksi langsung antara ujung sensor dengan permukaan bahan. Luaran pengukuran teknik ini adalah berupa sinyal elektrik yang sebanding dengan profil kekasaran permukaan.

Sinyal ini memiliki potensi tinggi untuk dihindangi oleh banyak *noise* yang tidak diinginkan [7]. Oleh karena itu, teknik kontak dapat menghasilkan pengukuran tidak akurat dan kurang handal dalam penentuan parameter kekasaran permukaan dari suatu bahan yang sedang diuji.

Sebaliknya, metode optik adalah alternatif dalam penentuan parameter kekasaran permukaan secara non-kontak dan tidak merusak bahan yang sedang diuji. Beberapa metode optik sudah dikembangkan seperti yang ditunjukkan di dalam referensi [7]. Informasi optik tentang kekasaran permukaan bahan dapat diperoleh melalui profiling sinyal optik [6], visual topografi [9], dan hamburan cahaya oleh permukaan [10]. Sebagian besar metode optik yang sudah dikembangkan menggunakan sumber cahaya laser dan dengan teknik interferometer. Berkas laser digunakan untuk membangkitkan *speckle* (titik-titik noda) sebagai dasar untuk mendeteksi kekasaran permukaan suatu bahan yang sedang diuji, sebagaimana dijelaskan dalam referensi [7,11]. Keuntungan penggunaan metode optik adalah non-kontak, tidak merusak bahan, cepat prosesnya, dan dapat berpotensi dilakukan secara *online* [7,12]. Namun demikian, kelemahan metode optik seperti kerumitan dan kebutuhan presisi tinggi terutama dalam *setup* peralatan optik interferometer, dan keakuratan

hasil pengukuran adalah masih menantang untuk diselesaikan.

Makalah ini menyajikan sebuah rancang-bangun pencitraan (*imaging*) optik sederhana untuk menentukan profil kekasaran permukaan suatu bahan. Pencitraan ini bekerja berdasarkan pada proyeksi pola titik-titik acak (*random-dots*) terhadap bahan yang akan diuji. Proyeksi ini ditangkap oleh kamera digital sebagai citra distorsi. Dengan metode pengolahan citra DIC sebuah medan pergeseran titik-titik acak yang sebanding dengan kekasaran permukaan bahan diperoleh setelah dibandingkan dengan citra referensi (sebelum ada proyeksi bahan).

Selanjutnya, rancang-bangun sistem pencitraan optik ini diuji-cobakan pada bahan dengan permukaan kekasaran yang dirancang (diketahui) sebelumnya untuk kepentingan validasi. Sebagai bahan validasi dipilih dengan kriteria (atau batasan) memiliki warna yang sama dan ukuran tidak boleh lebih kecil dari dimensi pola-pola titik acak. Bagian akhir makalah (kerja) ini membahas juga hasil pengujian (verifikasi) kekasaran permukaan terhadap sebuah produk amplas (spesimen amplas) komersial dengan berbagai ukuran kekasaran. Rancang-bangun pencitraan optik ini dapat sebagai alternatif dan memiliki potensi sederhana, murah (*low-cost*), mudah operasionalnya, dan cepat dalam memperoleh informasi tentang profil kekasaran permukaan bahan.

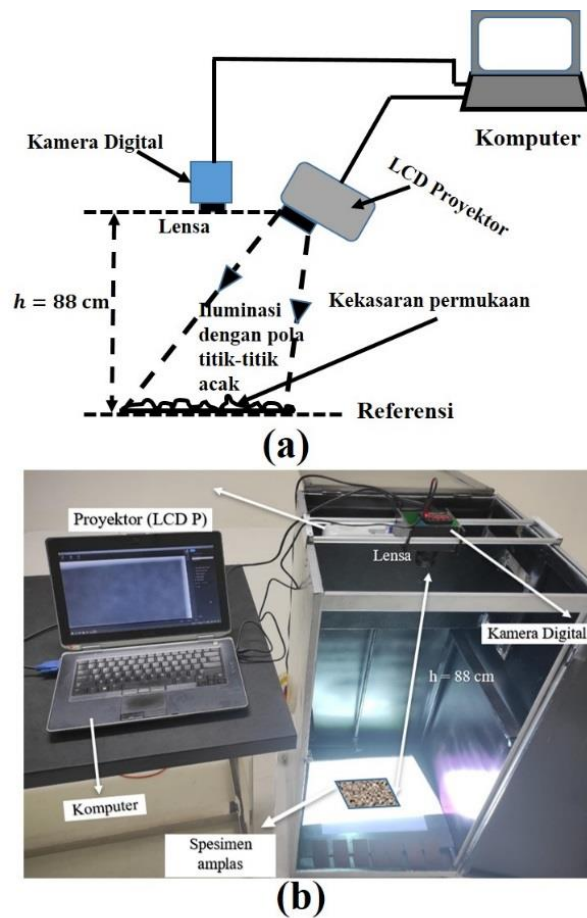
METODE PENELITIAN

Makalah ini melakukan penyusunan (*setup* eksperimen) dari berbagai komponen optik di dalam sebuah ruang gelap laboratorium untuk mereduksi cahaya lain yang tidak diinginkan. Tujuan eksperimen adalah melakukan pencitraan (*imaging*) optik untuk memperoleh profil kekasaran permukaan dengan cara memproyeksikan pola titik-titik acak ke atas permukaan bahan yang diuji. Pola titik-titik ini adalah mirip dengan *speckle* yang dibangkitkan oleh sebuah laser sebagai sumber cahaya, sebagaimana dilakukan oleh referensi [7,12] sebelumnya. Metode ini tidak menggunakan

laser, akan tetapi menggunakan sebuah sumber cahaya putih yang berasal dari sebuah perangkat LCD proyektor komersial. Secara optik, cahaya putih LCD dimodulasi oleh pola titik-titik acak yang dibangkitkan oleh sebuah program komputer MATLAB. **Gambar 1a** dan **Gambar 1b** menunjukkan berturut-turut skema optik yang digunakan dan fotograf dari rancang-bangun pencitraan optik ini. Perangkat utama yang digunakan adalah terdiri atas LCD proyektor, kamera digital, dan komputer. Perangkat komputer adalah sebagai sistem kendali eksperimen dan terkoneksi, baik ke LCD proyektor maupun ke kamera digital. Kerja perangkat komputer bersama dengan LCD proyektor menampilkan proyeksi pola titik-titik acak pada bahan yang diuji. Selanjutnya bersama dengan kamera digital melakukan akuisisi citra, merekam citra, serta mengolah data citra digital. Spesifikasi perangkat/komponen optik yang digunakan pada kerja eksperimen ini ditunjukkan pada **Tabel. 1**.

Di sini, secara teknis LCD proyektor menyorotkan citra (gambar) pola-pola titik acak dari program komputer ke arah permukaan bahan yang sedang diuji. Dengan kata lain, LCD memproyeksikan sebuah pola titik-titik acak ke permukaan suatu bahan yang sedang diuji. Kamera digital menangkap proyeksi ini sebagai sebuah citra distorsi. Sebelumnya, kamera digital juga menangkap sebuah citra referensi, dimana citra ini adalah proyeksi pola-pola titik acak tanpa bahan yang diuji. Kedua citra hasil tangkapan kamera diolah (atau dikomparasi) dengan menggunakan sebuah metode pengolahan citra digital DIC. Algoritma DIC ini digunakan untuk memetakan pergeseran pixel antara citra referensi dan citra distorsi. Hasil peta pergeseran pixel ini selanjutnya diestimasi besar atau *magnitude* pergeserannya. Besar pergeseran pixel citra secara kuat terkait dengan kekasaran permukaan bahan. Dengan demikian, rancang-bangun sistem pencitraan optik ini bekerja berdasarkan pada sebuah pergeseran citra untuk memperoleh informasi kekasaran suatu permukaan bahan yang sedang diuji.

Karisna: Sebuah Sistem Pencitraan Optik berbasis pada Proyeksi Pola Titik-titik Acak dengan Metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk Menentukan Profil Kekasaran Permukaan suatu Bahan



Gambar 1. (a) Skema rancang-bangun pencitraan optik untuk menentukan kekasaran permukaan, dan (b) Fotograf hasil rancang-bangun.

Tahapan eksperimen dalam makalah ini ditunjukkan pada skema **Gambar 2a**. Prinsip utama adalah mengiluminasi (atau melakukan penyorotan) pola titik-titik acak (titik warna hitam di atas cahaya latar putih) menggunakan sebuah perangkat LCD proyektor ke atas bidang permukaan bahan yang diuji. Kamera (lensa kamera) ditempatkan pada suatu jarak kira-kira $h = 88$ cm dari bidang permukaan referensi. Pola titik-titik acak dihasilkan dari sebuah program komputer (dalam hal ini digunakan sebuah *software* MATLAB), dan selanjutnya ditayangkan (*displayed*) pada bidang permukaan referensi menggunakan LCD proyektor. Pada tahapan ini, kamera digital menangkap citra proyeksi pola titik-titik

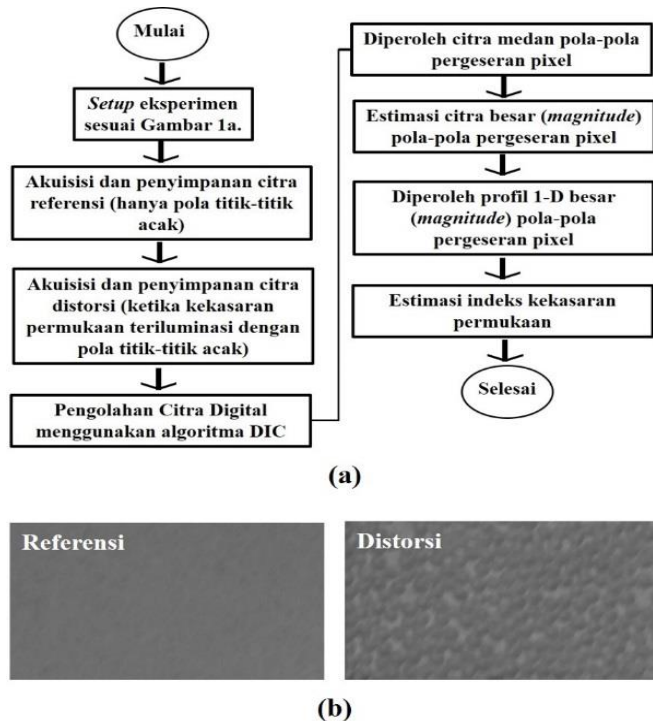
acak pada bidang referensi. Citra yang tertangkap oleh kamera digital ini disebut sebagai cira referensi (proyeksi pola titik acak sebelum ada bahan uji).

Tabel 1. Spesifikasi komponen optik yang digunakan

Nama Komponen Optik	Parameter	Spesifikasi
Kamera Digital (Model: Hayear 1080P)	Kelajuan Frame	30 fps
	Resolusi Spasial	1080 pixel × 1920 pixel
	Ukuran Pixel	1,43 μm × 1,43 μm
Lensa (Model : Fujian)	Panjang Fokal /Aperture	50 mm/f1.4
LCD Proyektor (Model: Epson EB-W06 WXG A 3LCD)	Resolusi Pixel	1200 pixel × 800 pixel

Tahap berikutnya adalah menempatkan sebuah permukaan bahan yang diuji di atas bidang referensi. Sebagaimana ditunjukkan pada fotograf **Gambar 1b**, permukaan bahan ini memiliki variasi ketinggian relatif terhadap bidang referensi. Oleh karena itu, variasi ketinggian dapat menyatakan atau mewakili sebuah profil kekasaran permukaan bahan yang diuji. Secara optik, cahaya putih datang dari LCD proyektor termodulasi oleh pola titik-titik acak dan akan mengalami variasi refleksi atau juga hamburan (*scattering*) akibat kekasaran permukaan bahan yang diuji. Variasi refleksi cahaya ini ditangkap oleh kamera digital sebagai sebuah citra dengan pola titik-titik acak terdistorsi (terdeformasi) atau citra distorsi. Kedua citra ini (referensi dan distorsi) direkam oleh kamera digital dan tersimpan ke dalam perangkat komputer. Contoh citra referensi dan distorsi ditunjukkan pada **Gambar 2b**. Selanjutnya kedua citra ini diolah menggunakan sebuah algoritma DIC yang ditulis dalam program MATLAB. Keluaran program DIC ini adalah sebuah pola-pola

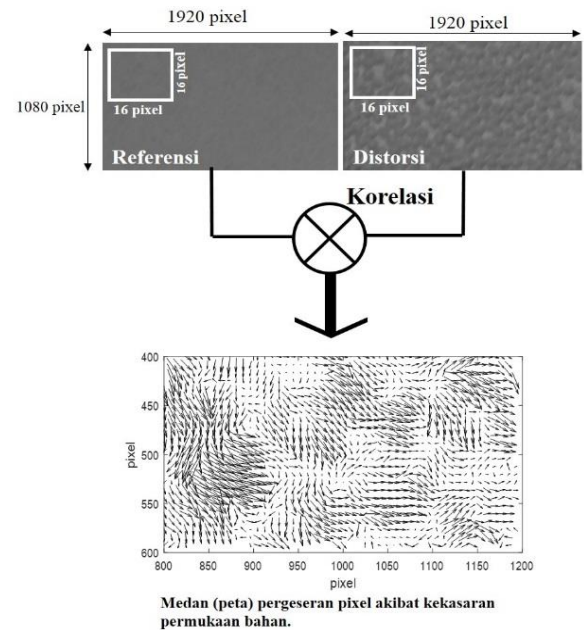
pergeseran (medan pergeseran) dari pixel-pixel di dalam kedua citra digital tersebut.



Gambar 2. (a) Tahapan eksperimen pencitraan optik, dan (b) Contoh citra referensi dan distorsi.

Tahapan algoritma DIC ini ditunjukkan pada **Gambar 3**. Pertama kali, kedua citra (referensi dan distorsi) dengan ukuran 1080 pixel \times 1920 pixel dibagi ke dalam sub-citra ukuran 16 pixel \times 16 pixel. Kedua sub-citra ini dihitung (diestimasi) nilai korelasinya secara numerik melintasi citra dengan *step* (langkah) tertentu menggunakan program MATLAB. Nilai korelasi kedua sub-citra dikonversi menjadi sebuah nilai pergeseran pixel (ditunjukkan dengan tanda anak panah kecil pada ilustrasi **Gambar 3**). Estimasi di seluruh bidang citra akan dihasilkan sebuah peta (medan) pergeseran pixel. Tahap berikutnya adalah mengestimasi besar (*magnitude*) medan pergeseran pixel yang sebanding dengan profil kekasaran permukaan bahan yang sedang diuji. Penjelasan tentang algoritma DIC melebihi cakupan dalam makalah ini. Penjelasan lebih

rinci tentang algoritma DIC dapat diperoleh pada referensi [13].



Gambar 3. Ilustrasi tahapan algoritma DIC

Hasil akhir tahapan eksperimen ini adalah berupa citra 2-D (dua dimensi) besar medan pergeseran pixel yang sebanding dengan kekasaran permukaan bahan uji. Profil kekasaran permukaan dapat diperoleh melalui profiling variasi nilai medan pergeseran pixel pada suatu baris data tertentu pada bidang citra. Plot baris data ini terhadap posisi pixel citra menghasilkan profil kekasaran permukaan 1-D (satu dimensi) dari bahan yang diuji. Berdasarkan profil 1-D ini dapat diestimasi indeks kekasaran permukaan bahan (dinyatakan dengan simbol R_a), dimana di sini berlaku bahwa semakin besar nilai R_a akan semakin kasar permukaan suatu bahan. Penjelasan lebih rinci tentang cara menentukan nilai R_a dari suatu profil sinyal kekasaran permukaan dapat diperoleh pada referensi [14].

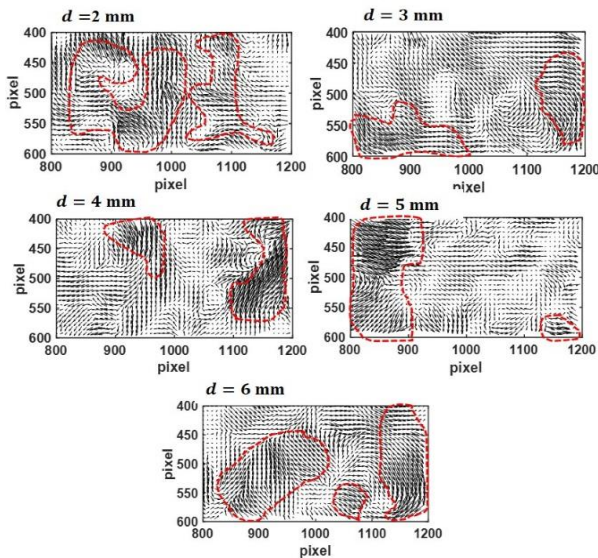
HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Eksperimen

Untuk memvalidasi hasil eksperimen rancang-bangun pencitraan optik (**Gambar 1**), beberapa bahan uji validasi dipersiapkan

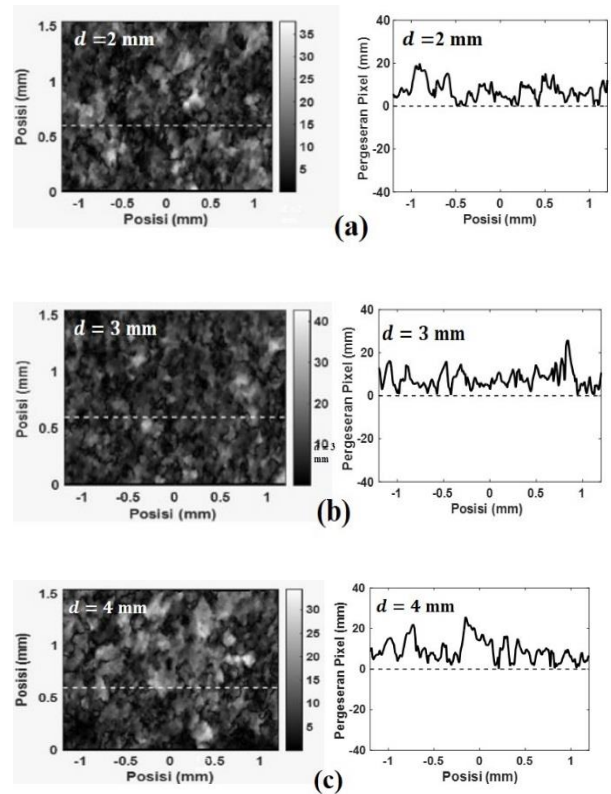
dengan cara menaburkan secara acak bola gabus dengan diameter tertentu (dalam orde milimeter) di atas kertas berukuran $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$. Diameter bola gabus dipilih dari ukuran 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, dan 6 mm. Prosedur validasi dimulai dengan akuisisi citra referensi dan dilanjutkan dengan citra distorsi dengan menggunakan kamera digital (spesifikasi pada **Tabel 1**). Lensa terfokus pada pola titik-titik acak pada bidang referensi selama akuisisi citra berlangsung.

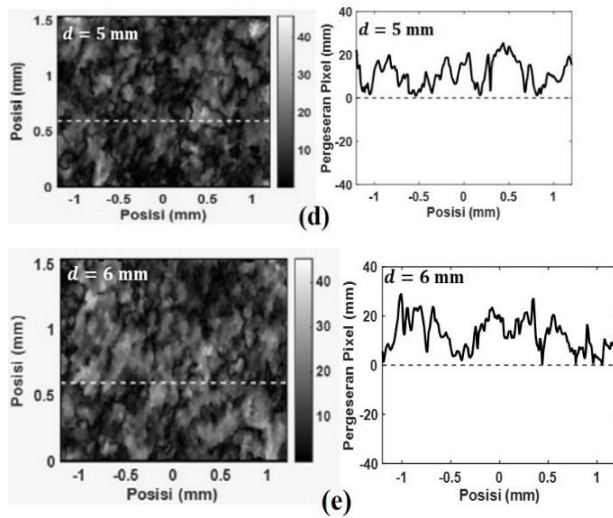
Dengan menggunakan program MATLAB, kedua citra diolah secara digital berdasarkan algoritma DIC. Citra medan pergeseran pixel pada semua bahan uji (untuk validasi) ditunjukkan pada **Gambar 4**. Tampak bahwa pola-pola pergeseran pixel pada setiap bahan uji validasi memiliki arah acak (ditunjukkan dengan anak panah kecil) dan masing-masing memiliki pola-pola berbeda. Beberapa daerah pada bidang citra (kurva merah putus-putus) menunjukkan kerapatan pergeseran pixel yang lebih besar daripada daerah yang lain. Perbedaan ini menunjukkan bahwa distribusi (saat penaburan) bola gabus pada permukaan kertas tidak merata (tidak homogen).



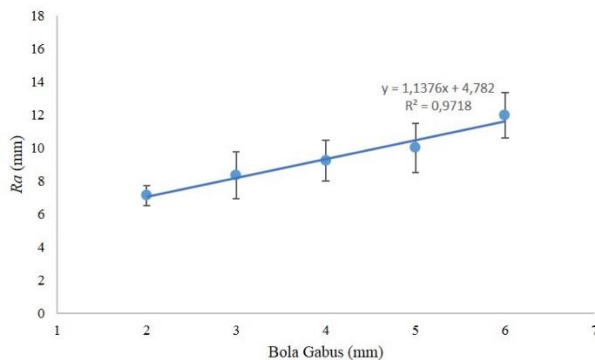
Gambar 4. Citra medan pergeseran pixel dari semua bahan uji validasi dengan berbagai diameter bola gabus (d).

Gambar 5 menunjukkan citra besar pergeseran pixel beserta profil 1-D pada suatu baris tertentu (garis putih putus-putus melintasi citra). Dengan menggunakan konversi 1 pixel = $1,43\mu\text{m}$ (**Tabel 1**), citra medan besar pergeseran pixel (**Gambar 5** kolom kiri) merupakan citra di dalam bidang sensor kamera. Secara visual, citra besar pergeseran pixel pada setiap bahan uji validasi tampak berbeda. Perbedaan ini dikonfirmasi dengan profil plot antara data besar pergeseran pixel terhadap posisi pixel (**Gambar 5** kolom kanan) yang diambil pada suatu baris data tertentu (garis putih putus-putus) pada masing-masing citra **Gambar 5** kolom kiri. Tampak bahwa profil (grafik) 1-D menunjukkan perbedaan secara jelas dari masing-masing bahan uji validasi.





Gambar 5. Pasangan citra besar (*magnitude*) medan pergeseran pixel (kolom kiri) dan profil 1-D baris data citra (kolom kanan) yang ditunjukkan oleh garis putih putus-putus untuk bahan uji validasi dengan berbagai diameter bola gabus berturut-turut (a) $d=2$ mm, (b) $d=3$ mm, (b) $d=4$ mm, (b) $d=5$ mm, dan (e) $d=6$ mm.



Gambar 6. Plot grafik hasil validasi antara antara nilai indeks kekasaran permukaan R_a dengan diameter bola gabus.

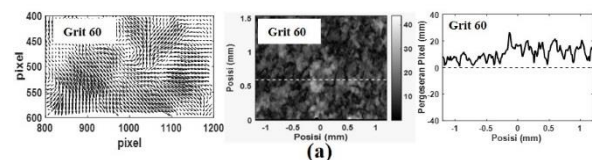
Berdasarkan profil 1-D Gambar 5 kolom kiri, nilai indeks kekasaran permukaan (R_a) dari setiap bahan uji validasi dapat diestimasi. Plot data antara nilai R_a dengan diameter bola gabus ditunjukkan pada **Gambar 6**. Dapat diamati dari grafik bahwa indeks R_a cenderung meningkat secara linear terhadap kenaikan diameter bola gabus dengan nilai korelasi adalah $R = 0,97$. Hasil ini menunjukkan fakta

rasional bahwa semakin besar diameter bola gabus, semakin kasar permukaan bahan uji validasi. Dari hasil uji validasi ini menunjukkan bahwa rancang-bangun ini sudah bekerja sesuai yang diharapkan (valid) untuk menentukan profil kekasaran permukaan suatu bahan.

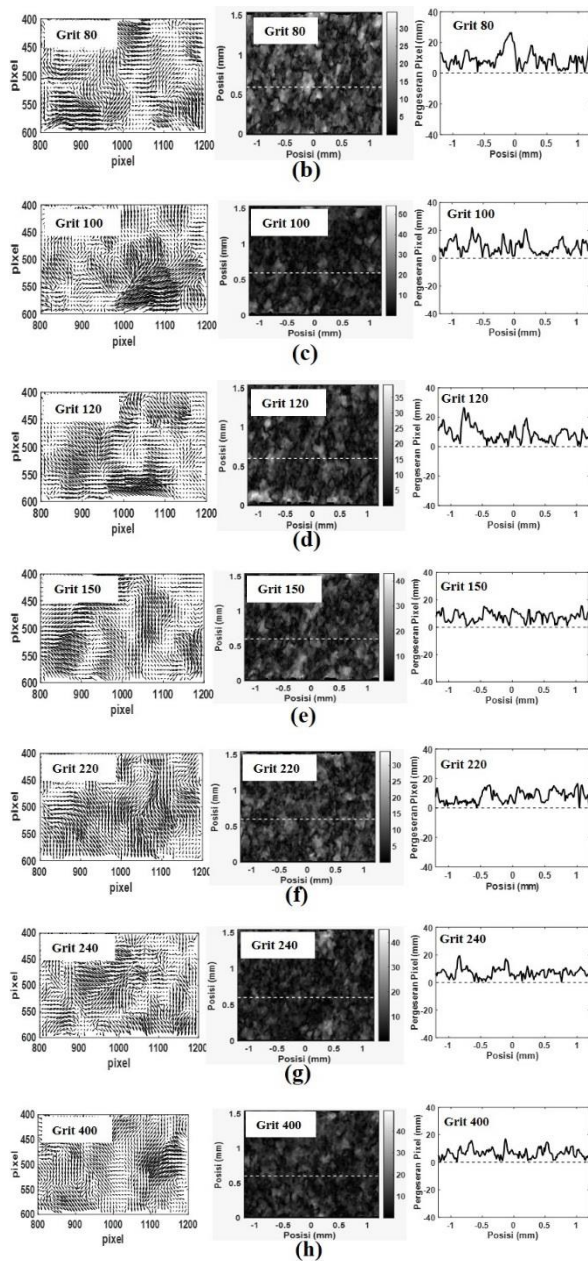
Hasil Uji pada Bahan Amplas

Untuk memverifikasi hasil validasi tersebut, rancang-bangun pencitraan optik diujikan pada permukaan amplas komersial. Bidang amplas ini memiliki spesifikasi tingkat (tekstur) kekasaran berbeda-beda yang dinyatakan dalam ukuran grit. Semakin besar nilai grit, semakin halus tekstur permukaan amplas. Eksperimen ini memilih amplas dengan grit 60, 80, 100, 120, 150, 220, 240 dan 400 sebagai permukaan untuk ditentukan profil kekasarannya.

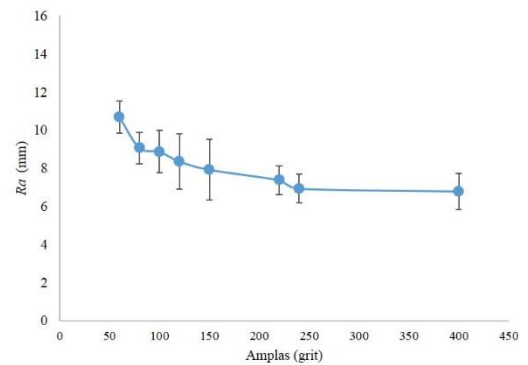
Gambar 7 menunjukkan hasil uji pada seluruh amplas. Kolom paling kiri pada **Gambar 7** menunjukkan hasil citra medan pergeseran pixel pada masing-masing grit amplas. Secara umum, medan pola-pola pergeseran pixel (ditunjukkan dengan anak panah kecil) dari setiap grit amplas menunjukkan arah berbeda-beda dan acak. Namun ada beberapa daerah menunjukkan kerapatan pergeseran yang lebih besar dibandingkan dengan daerah lain pada setiap citra. Ini menunjukkan bahwa amplas komersial memiliki tekstur kekasaran yang tidak merata pada saat dibuat oleh pabrik.



Karisma: Sebuah Sistem Pencitraan Optik berbasis pada Proyeksi Pola Titik-titik Acak dengan Metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk Menentukan Profil Kekasaran Permukaan suatu Bahan



Gambar 7. Hasil pengujian profil kekasaran permukaan untuk sampel amplas komersial. Citra pergeseran pixel ditunjukkan pada gambar kolom paling kiri, medan besar (*magnitude*) pergeseran pixel pada kolom tengah, dan profil 1-D baris data citra yang sesuai dengan garis putih putus-putus di dalam citra kolom tengah ditunjukkan pada kolom paling kanan untuk masing-masing (a) grit 60, (b) grit 80, (c) grit 100, (d) grit 120, (e) grit 150, (f) grit 220, (g) grit 240, dan (h) grit 400.



Gambar 8. Plot grafik hasil uji permukaan amplas antara antara nilai indeks kekasaran permukaan R_a dengan ukuran grit.

Gambar 7 kolom tengah menunjukkan citra besar (*magnitude*) pergeseran pixel pada masing-masing grit amplas. Dari pengamatan secara visual, kontras citra juga nampak berbeda-beda. Di sini intensitas cerah pada citra menyatakan besarnya pergeseran pixel, dan sebanding dengan variasi ketinggian (ketidakrataan) dari permukaan amplas yang diuji. Akan tetapi dapat diamati bahwa pada ukuran grit besar (150, 240 dan 400) intensitas citra cenderung lebih gelap. Ini menunjukkan bahwa permukaan amplas pada grit besar 150, 240 dan 400 memiliki permukaan lebih halus sesuai dengan klaim pabrik pembuatnya.

Profil 1-D besar pergeseran pixel yang melintasi masing-masing citra **Gambar 7** kolom tengah (garis putih putus-putus) menguatkan hasil ini. Sederetan profil 1-D besar pergeseran pixel dari setiap grit amplas ditunjukkan pada **Gambar 7** kolom paling kanan. Nampak bahwa pada puncak-puncak grafik untuk grit 150, 240 dan 400 cenderung rata. Hasil ini memperkuat pengamatan secara visual bahwa untuk citra besar pergeseran pixel amplas dengan grit 150, 240, dan 400 memperlihatkan sebuah kecenderungan lebih gelap.

Berdasarkan profil 1-D **Gambar 7** kolom paling kanan, indeks kekasaran permukaan R_a dari amplas komersial dapat diestimasi. **Gambar 8** menunjukkan plot grafik antara R_a dengan ukuran grit amplas komersial. Semakin

besar nilai grit amplas nampak grafik cenderung menurun. Ini berarti menunjukkan bahwa semakin besar grit, semakin halus permukaan amplas. Hasil ini memperkuat hasil validasi sebagaimana yang sudah dilakukan sebelumnya.

KESIMPULAN

Penelitian (makalah) ini berhasil dengan sukses merancang-bangun sebuah sistem pencitraan optik sederhana berdasarkan pada proyeksi pola titik-titik acak untuk menentukan profil kekasaran permukaan suatu bahan secara non-kontak dan tidak merusak. Secara teknis, rancang-bangun adalah sederhana, dimana hanya terdiri atas perangkat LCD proyektor dan kamera digital sebagai komponen optik utama. Rancang-bangun juga sukses divalidasi dengan menguji kekasaran permukaan pada berbagai bidang yang ditaburi secara acak dengan bola gabus terseleksi berdiameter 2, 3, 4, 5 dan 6 mm. Dari hasil grafik menunjukkan bahwa ada hubungan linear (nilai korelasi $R = 0,97$) antara indeks R_a dengan kenaikan diameter bola gabus. Hasil uji menunjukkan bahwa ada kesesuaian (fakta rasional) dimana semakin besar kenaikan diameter bola gabus, semakin besar nilai indeks kekasaran permukaan R_a . Hasil uji pada amplas komersial juga memverifikasi hasil validasi ini, dan menyatakan bahwa semakin besar ukuran grit amplas (semakin halus) menunjukkan indeks R_a semakin kecil. Dengan demikian, rancang-bangun sistem pencitraan optik ini sudah tervalidasi dan terverifikasi, dan memiliki potensi sederhana, harga rendah (*low-cost*), kemudahan operasional, dan cepat dalam memperoleh hasil informasi tentang kekasaran permukaan bahan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian atau kerja ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat-Universitas Ahmad Dahlan (LPPM-UAD) melalui skema riset internal UAD. Ucapan terimakasih disampaikan kepada

segenap staf LPPM-UAD dan staf laboran *Advanced Laboratory Physics* (ALOP) Program Studi Fisika UAD yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. F. Senge, A. H. Astaraee, P. Dłotko, S. Bagherifard, and W. A. Bosbach, "Extending conventional surface roughness ISO parameters using topological data analysis for shot peened surfaces," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2022.
- [2] F. Salazar and A. Barrientos, "Surface roughness measurement on a wing aircraft by speckle correlation," *Sensors (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, pp. 11772–11781, 2013.
- [3] G. R. M. Matos, "Surface Roughness of Dental Implant and Osseointegration," *J. Maxillofac. Oral Surg.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–4, 2021.
- [4] A. Duparré, J. Ferre-Borrull, S. Gliech, G. Notni, J. Steinert, and J. M. Bennett, "Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 1, p. 154, 2002.
- [5] R. Li, F. Wu, H. Huang, W. Cai, Y. Zhang, and J. Han, "Investigation of Surface Defects in Optical Components Based on Reflection Mueller Matrix Spectroscopy," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 16, 2023.
- [6] H.-G. Rhee, Y.-W. Lee, I.-W. Lee, and T. V. Vorburger, "Roughness Measurement Performance Obtained with Optical Interferometry and Stylus Method," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 10, no. 1, pp. 48–54, 2006.
- [7] Neeraj. R.H. and Veerasha. R. K., "A Review on Surface Roughness Measurement using Image Processing,"

- Int. J. Res. Publ. Rev.*, no. November, pp. 1104–1107, 2022.
- [8] T. Importance and S. Characterization, “Atomic Force Microscopy for Advanced Optical Components,” no. Figure 2, pp. 2–5, 2020, [Online]. Available: www.covalentmetrology.com.
- [9] A. Sanner, W. G. Nöhring, L. A. Thimons, T. D. B. Jacobs, and L. Pastewka, “Scale-dependent roughness parameters for topography analysis,” *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 7, no. September 2021, 2022.
- [10] D. R. Patel and M. B. Kiran, “Vision based prediction of surface roughness for end milling,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 792–796, 2021.
- [11] M. qi Shao *et al.*, “A review of surface roughness measurements based on laser speckle method,” *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 30, no. 10, pp. 1897–1915, 2023.
- [12] B. Özcan and J. Blankenbach, “Quality Assessment of a Novel Camera-Based Measurement System for Roughness Determination of Concrete Surfaces—Accuracy Evaluation and Validation,” *Sensors*, vol. 22, no. 11, 2022.
- [13] H. Nguyen, J. Liang, Y. Wang, and Z. Wang, “Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements,” *JPhys Photonics*, vol. 3, no. 1, 2021.
- [14] B. S. Jain, “Sensors in Surface Roughness Measurement: A Guide Significance of Sensors in Surface Roughness Measurement Different Sensors Used in Surface Roughness Measurement,” 2023.