



ANALISIS UKURAN BUTIRAN PASIR MENGGUNAKAN TEKNIK PENGOLAHAN CITRA DIGITAL METODE BINER

Fitriyanti^{1a}, Fathia Rayhani^{2b}, Khaerul Ikhsan^{3c}

^{1,2,3} Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.

^afitriyanti_fisika@uin-alauddin.ac.id, ^bfathiarayhani01@gmail.com,

^ckhaerulikhsan@gmail.com

ABSTRACT: *To determine a particle size, various methods are commonly used, including sieve analysis, laser diffraction sedimentation (LAS), electronical zone sensing (EZS), image analysis or microscopy, chromatography methods, and others. In some techniques, complex processes are typically required and analysis can be time-consuming. One method that simplifies particle size analysis, especially in the micro-size range, is by utilizing digital images. One of the methods in digital imaging is the binary method. Measurements using ImageJ software were conducted with two samples, namely beach sand and concrete sand, which have different particle sizes. Based on the research results, it was obtained that were in accordance with standard measurements based on references. For beach sand with a dataset of 57 samples, the range of particle size values obtained was 0.00220 – 0.766 mm, while for concrete sand with 56 data points, the minimum value obtained was 0.315, and the maximum value was 3.30.*

Keyword: *Digital Imaging, ImageJ, binary method.*

ABSTRAK: Untuk mengetahui suatu ukuran partikel, umumnya digunakan antara lain metode ayakan, metode sedimentasi laser difraksi (LAS), *electronical zone sensing* (EZS), analisa gambar atau mikrografi, metode kromatografi dan lain sebagainya. Dalam beberapa teknik umumnya membutuhkan proses yang rumit dan memerlukan waktu dalam analisa. Salah satu metode yang memudahkan dalam analisa suatu ukuran partikel khususnya dalam ukuran mikro yaitu dengan memanfaatkan citra digital. Salah satu metode dalam citra digital yaitu dengan metode biner. Pengukuran dengan *software* ImageJ, dilakukan dengan 2 sampel yaitu pasir pantai dan pasir beton yang memiliki ukuran butir yang berbeda. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh hasil yang cukup baik yang telah sesuai dengan standar ukuran berdasarkan referensi yang ada. Pada pasir pantai dengan jumlah data sebanyak 57 buah diperoleh rentang nilai ukuran butiran yaitu 0,00220 – 0,766 mm, untuk pasir beton dengan jumlah data sebanyak 56, diperoleh nilai minimum sebesar 0,315 mm dan nilai maksimum sebesar 3,30 mm

Kata Kunci: *Digital Imaging, ImageJ, metode biner.*

PENDAHULUAN

**corresponding author*

email: fitriyanti_fisika@uin-alauddin.ac.id

Beberapa referensi terkait seperti pada penelitian (Wiegel dkk, 2016), (Kudo dkk, 2020) (De Simone dkk., 2018) (Cervantes dkk., 2016) perkembangan citra digital baik dalam analisis bentuk maupun pengenalan pola, memungkinkan analisis citra mikroskopik secara otomatis melalui komputer. Ukuran partikel dapat di deskripsikan dengan menjelaskan ukuran dari suatu panjang, lebar maupun tinggi, atau jika berbentuk bola sempurna dinyatakan dengan besarnya diameter. Menurut (Oktaviani, 2019) ilmu partikel dituangkan dalam mikromeritik yaitu suatu ilmu dan teknologi yang mempelajari tentang partikel kecil terutama mengenai ukuran partikel. Setiap partikel memiliki ukuran yang berbeda-beda, Teknik pengukuran butiran partikel, penting dilakukan dalam ilmu material yaitu dalam penentuan kualitas dari suatu partikel. Dengan mengetahui ukuran partikel kita dapat memahami banyak sifat-sifat material seperti kekuatan mekanik, kelenturan, konduktivitas panas, resistansi, kapasitansi dan sifat-sifat listrik dan magnet bahan lainnya (Sagala, 2021)

Pada penelitian ini menggunakan dua buah jenis pasir yang berbeda yang akan diukur besar butirannya, yaitu pasir pantai dan pasir beton. Ukuran butiran pasir pantai dapat bervariasi tergantung pada lokasi dan kondisi geografisnya. Pasir pantai biasanya memiliki beragam ukuran butiran, dan ukuran ini dapat memengaruhi penampilan, tekstur, dan karakteristik pantai tersebut. Ukuran butiran pasir pantai dapat diukur dalam fraksi berdasarkan ukuran partikelnya. Rata-rata ukuran pasir pantai yaitu berkisar 0,25 hingga 2 milimeter. (Surjono dkk., 2022)

Pasir beton adalah salah satu bahan utama dalam campuran beton, yang digunakan dalam berbagai proyek konstruksi seperti pembangunan gedung, jalan, jembatan, dan banyak lagi. Pasir ini berperan penting dalam mengisi rongga-rongga antara agregat kasar (biasanya kerikil atau batu pecah) dan semen, menciptakan campuran beton yang kuat dan tahan terhadap tekanan, berfungsi sebagai bahan pengisi yang mengisi rongga-rongga antara agregat kasar dan semen dalam campuran beton. Pasir beton berasal dari berbagai sumber, dan kandungan mineral dalam pasir dapat bervariasi. Pasir beton memiliki ukuran butiran yang lebih kecil dibandingkan dengan agregat kasar, tetapi lebih besar dari pasir yang biasa digunakan untuk keperluan lain seperti pasir pantai. Ukuran butiran pasir beton berkisar antara 0,075 hingga 4,75 milimeter (Kodoatie, 2021). Kualitas pasir beton harus diuji sebelum digunakan dalam proyek konstruksi. Pengujian meliputi penentuan komposisi mineral, ukuran butiran, kebersihan, dan gradasi butiran. Hasil pengujian ini memastikan bahwa pasir beton memenuhi standar yang ditetapkan (Capes, 2013). Kualitas pasir beton dapat memiliki dampak signifikan pada kualitas beton akhir. Pemilihan pasir beton yang tepat dan perhatian terhadap kualitasnya adalah kunci untuk menciptakan beton yang kuat dan tahan lama dalam berbagai proyek konstruksi. Oleh karena itu, pemilihan, pengujian, dan pemeliharaan pasir beton yang baik sangat penting dalam industri konstruksi.

Pengukuran ukuran butiran pasir adalah langkah penting dalam karakterisasi material geoteknikal, konstruksi sipil, dan berbagai aplikasi lainnya. Ukuran butiran pasir memengaruhi sifat mekanik material, perpindahan air, serta interaksi antara material dengan lingkungannya. Oleh karena itu, memiliki data yang akurat tentang ukuran butiran pasir sangat penting dalam perencanaan, perhitungan stabilitas lereng, penentuan kualitas material bangunan, pemodelan aliran sungai, dan banyak aplikasi teknik lainnya (Maiti dkk., 2017). Metode tradisional pengukuran ukuran butiran pasir melibatkan penggunaan saringan standar dengan lubang berukuran tertentu, yang digunakan untuk menyaring butiran pasir dari campuran material. Kemudian, butiran yang tertinggal di atas dan di bawah saringan dianalisis secara manual. Meskipun metode ini telah digunakan selama bertahun-tahun, mereka memiliki beberapa kelemahan yang signifikan. Data hasil pengayakan menggunakan alat pengayak dapat diolah lebih lanjut sehingga didapat data distribusi ukuran partikel sampel melalui pengolahan data digital. Beberapa media pengelola data digital untuk menganalisis suatu partikel yang didapat dari publik domain diantaranya Scion Image, NIH-Image dan ImageJ. ImageJ yang berbasis pemrograman java dapat digunakan untuk sistem operasi windows, linux, dan lain-lain (Kurniawan dkk., 2011).

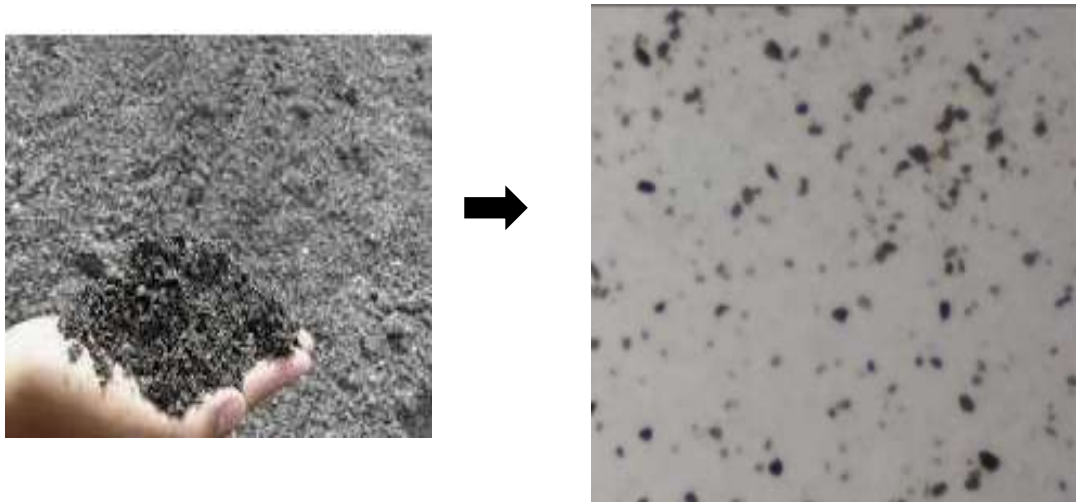
Aplikasi citra digital dengan metode biner memiliki beberapa keuntungan yang signifikan dalam pengukuran ukuran butiran pasir dibandingkan dengan metode tradisional manual, yaitu, proses pengukuran dengan aplikasi ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan pengukuran manual, terutama ketika harus mengukur sejumlah besar butiran pasir (Yang dkk., 2018). Aplikasi ini mudah digunakan dan tidak memerlukan keterampilan khusus dalam pengukuran butiran pasir dan dapat mengukur banyak butiran pasir secara bersamaan, yang praktis tidak mungkin dilakukan secara manual. Aplikasi citra digital dapat memberikan tingkat akurasi yang tinggi dalam pengukuran ukuran butiran pasir sehingga kecenderungan kesalahan manusia dapat diminimalkan (Payton, 2022).

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak pengolahan citra digital dengan ImageJ dan teknik pemrosesan citra untuk mengisolasi dan mengukur butiran pasir. Metode biner digunakan untuk membedakan butiran pasir dari latar belakang citra. Pada tahap awal, citra butiran pasir diperoleh menggunakan perangkat fotografi digital. Kemudian, citra tersebut diolah dengan mengaplikasikan teknik pengolahan citra biner pada *software* ImageJ yang menonjolkan butiran pasir. Banyak penelitian terkait menggunakan *software* ImageJ, contohnya termasuk penggunaan ImageJ dalam studi berbagai jenis kanker pada penelitian Vrekoussis dkk., (2009), Fulawka & Halon, (2016), penelitian dalam bidang partikel oleh Grishagin (2015), Arena dkk., (2017) tentang menghitung jumlah sel secara otomatis dengan imageJ, dan berbagai penelitian lainnya. Hasil pengukuran butiran pasir pada penelitian ini akan dibandingkan dengan data pada referensi yang telah ada. Hasil percobaan menunjukkan bahwa aplikasi citra digital ini memberikan hasil yang sebanding dengan referensi dengan

tingkat akurasi yang tinggi dan waktu yang lebih singkat. Selain itu, aplikasi ini juga memungkinkan untuk mengukur sejumlah besar butiran pasir secara bersamaan, yang sulit dilakukan secara manual. Penelitian ini menunjukkan bahwa aplikasi citra digital dengan metode biner memiliki potensi besar dalam mengukur ukuran butiran pasir secara efisien dan akurat. Dengan penggunaan teknologi ini, pengukuran ukuran butiran pasir dapat dilakukan dengan lebih cepat dan dengan tingkat ketepatan yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam berbagai aplikasi di bidang geoteknikal dan konstruksi.

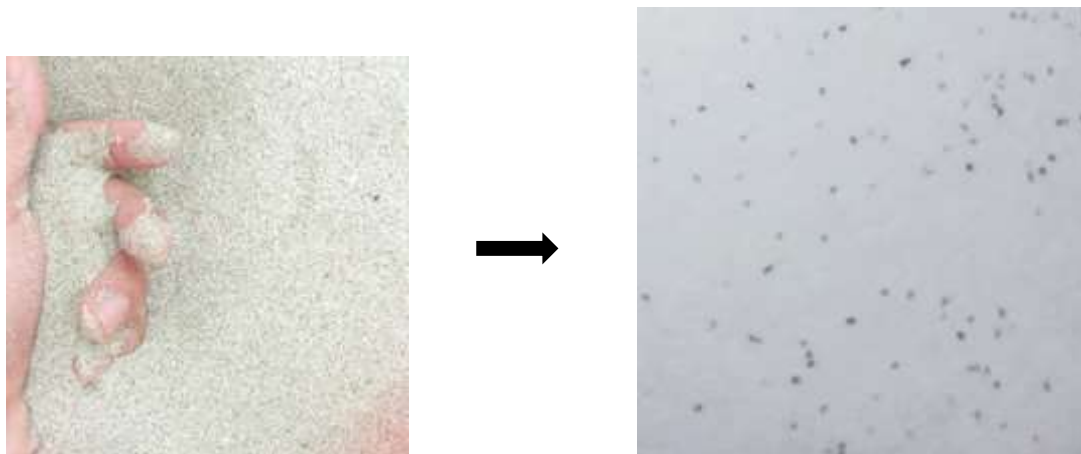
METODE PENELITIAN

Percobaan ini dilaksanakan di Laboratorium Fisika Dasar Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah ayakan 50 dan 100 mesh yang digunakan untuk memisahkan sampel dari kotoran dan material yang tidak diharapkan ikut dalam proses pengambilan data. Kamera *smartphone* digunakan dalam pengambilan gambar untuk diproses dengan *software* ImageJ, digunakan penyangga dan penggaris untuk membantu dalam pengambilan data. Sampel yang digunakan dalam penelitian yaitu dua buah jenis pasir yang berbeda yaitu pasir pantai dengan pasir beton. Prosedur kerja pada penelitian ini yaitu dimulai dengan tahapan persiapan sampel, sebelum pengambilan data, sampel dilakukan pengayakan untuk memisahkan dari kotoran dan butiran-butiran material lainnya yang dapat mengganggu proses validasi data sesungguhnya. Citra sampel diambil dengan kamera *smartphone* yang diambil pada jarak 5 cm kemudian memfokuskan kamera dan mengatur pencahayaan hingga citra yang dihasilkan dapat terlihat jelas. Berikut adalah citra dari sampel yang digunakan pada penelitian :



Gambar 1. Pasir Beton

Sampel pasir beton diambil dari pasir untuk bahan bangunan, sebelum digunakan sebagai sampel dalam penelitian, pasir diayak dengan ayakan ukuran 50 mesh, untuk memisahkan butiran pasir dengan kotoran yang ada



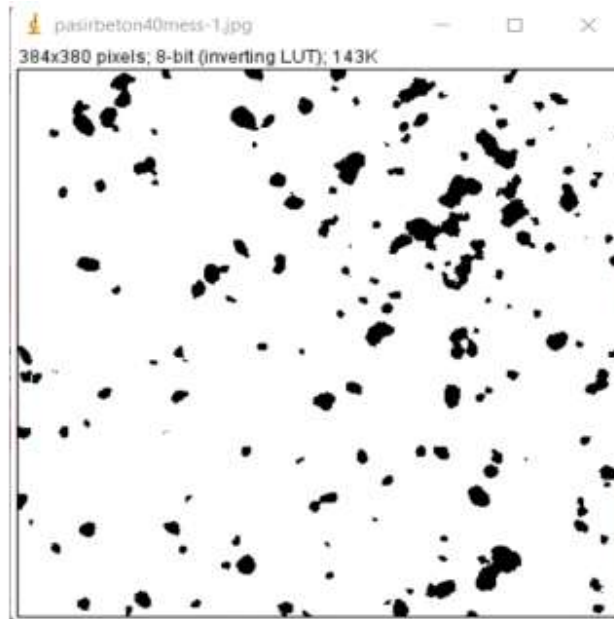
Gambar 2. Pasir Pantai

Sampel pasir pantai berbeda dengan pasir beton, butir-butirannya lebih halus sehingga memerlukan ayakan yang lebih kecil. Ayakan yang digunakan yaitu ukuran 100 mesh. Selain untuk memisahkan kotoran yang mungkin ada, ayakan ini juga mampu memisahkan butir-butiran pasir dengan lebih baik sehingga mudah dilakukan pengambilan data. Setelah dilakukan proses pengambilan citra. Gambar kemudian dilakukan pengukuran butiran dan analisis dengan menggunakan *software* ImageJ dengan metode Biner.

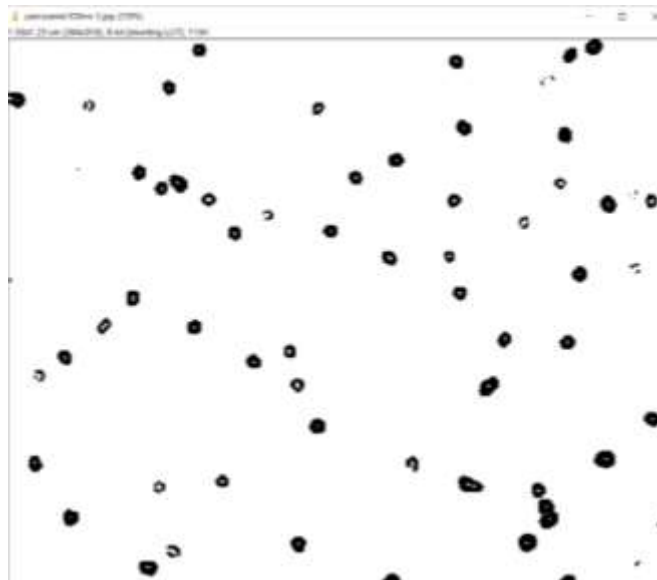
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ukuran partikel dengan dua jenis pasir yang berbeda yaitu pasir pantai dan pasir beton diperoleh hasil citra setelah dilakukan preprocessing data hasil citra dengan metode biner ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4. Berdasarkan gambar 3 dan gambar 4 dapat dilihat bahwa citra biner dapat memisahkan antara gambar dari latar belakang citra asli dengan objek yang ingin diteliti, untuk melihat kelayakan citra yang dihasilkan untuk diproses lebih lanjut dalam validasi pengambilan, pada gambar 4 dan 5 adalah analisis hasil histogramnya, yang ditunjukkan pada gambar 5. Pada gambar 5 menunjukkan hasil histogram dari citra biner pada sampel pasir beton, berdasarkan citra histogramnya dapat dilihat persebaran intensitas yang merata dari setiap partikel yang dihasilkan. Analisis histogram menunjukkan bahwa citra dapat diolah lebih lanjut untuk mengetahui ukuran partikelnya. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa ukuran partikel berkisar dari 0,75 mm hingga 3.3 mm. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834-2000), pasir beton

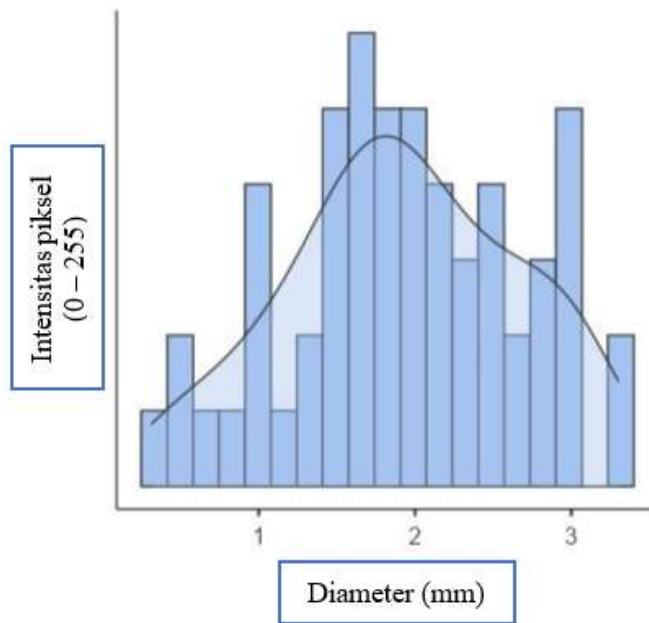
adalah material yang memiliki ukuran butiran tidak lebih dari 4,75 mm dan tidak kurang dari 0,075 mm.



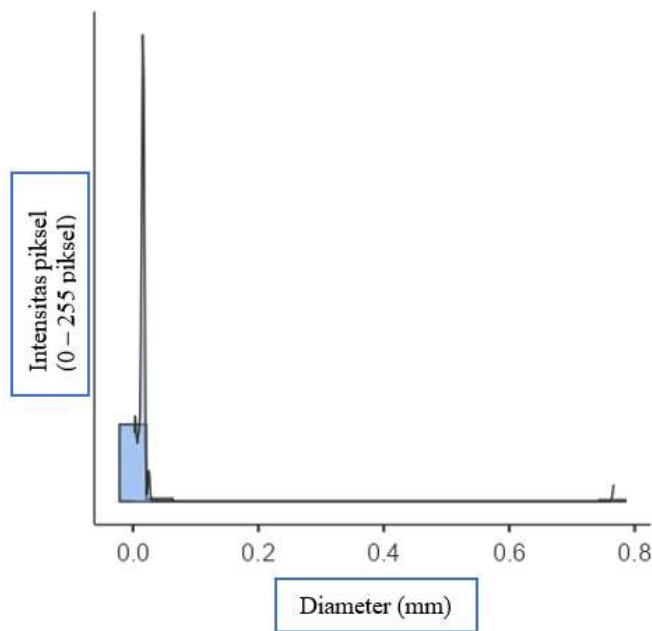
Gambar 3. Citra hasil biner pasir beton



Gambar 4. Citra hasil biner pasir Pantai



Gambar 5. grafik citra biner dari sampel pasir beton



Gambar 6. Grafik histogram citra biner pasir pantai

Pada gambar 6 menunjukkan hasil histogram dari citra biner pada sampel pasir pantai, berdasarkan citra histogramnya dapat dilihat persebaran intensitas yang merata dari setiap partikel yang dihasilkan. Analisis histogram menunjukkan bahwa citra dapat diolah lebih lanjut untuk mengetahui ukuran partikelnya. Dari grafik dapat dilihat bahwa ukuran partikel berkisar dari 0,002 mm hingga 0,766 mm. Berdasarkan referensi bahwa ukuran pasir pantai yang didapatkan telah sesuai dengan hasil penelitian yang dihasilkan. Sesuai dengan klasifikasi Wentworth (1922) ukuran butiran pasir pantai bervariasi tergantung pada lokasi geografis dan sumber materialnya, dengan kisaran diameter rata-rata 0,063 mm hingga 2 mm, Studi lain oleh Williams dkk. (2014) menemukan bahwa pasir pantai di wilayah tropis cenderung lebih kasar (0,5 - 2 mm) dibandingkan dengan pasir di daerah beriklim sedang (0,063 - 1 mm), karena perbedaan sumber sedimen dan energi gelombang. Selain itu, penelitian Coelho dkk. (2020) menunjukkan bahwa ukuran butiran pasir pantai berperan penting dalam kestabilan garis pantai, di mana pasir yang lebih halus lebih mudah tererosi dibandingkan dengan pasir yang lebih kasar. Dengan demikian, memahami distribusi ukuran butiran pasir pantai sangat penting untuk pengelolaan pesisir dan mitigasi dampak erosi.

Tabel 1. Hasil pengamatan ukuran partikel pasir beton

No.	Area (m ²)	Mean (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Jari-Jari (mm)	Diameter (mm)
1	34,195	238,699	0	255	0,282166324	0,564332648
2	15,77	214,604	0	255	0,399043442	0,798086884
3	29,511	241,508	0	255	0,488726409	0,977452819
4	22,172	240,634	0	255	0,564332648	1,128665296
5	25,295	236,111	0	255	0,630943081	1,261886163

Tabel 2. Hasil Pengamatan ukuran partikel pasir pantai

No.	Area (m ²)	Mean (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Jari-Jari (mm)	Diameter (mm)
1	8.983 x 10 ⁻⁴	250.678	0	255	8.457 x 10 ⁻³	1.691 x 10 ⁻²
2	5.18 x 10 ⁻⁴	225	0	255	6.420 x 10 ⁻³	1.284 x 10 ⁻²
3	7.46 x 10 ⁻⁴	244.592	0	255	7.707 x 10 ⁻³	1.541 x 10 ⁻²
4	7.31 x 10 ⁻⁴	244.375	0	255	7.628 x 10 ⁻³	1.526 x 10 ⁻²
5	8.98 x 10 ⁻⁴	250.678	0	255	8.457 x 10 ⁻³	1.691 x 10 ⁻²

Setelah dilakukan proses biner dan analisis histogram pada kedua gambar, kemudian dilakukan analisis terhadap ukuran partikel pasir, berikut hasil data pada tabel 1 dan 2 yang diperoleh dari *software* imageJ dari kedua sampel. Hasil yang diperoleh pada pengukuran butiran pasir pantai dengan ayakan 100 mesh jumlah data butiran pasir sebanyak 57, nilai mean sebesar 0,0273, nilai median sebesar 0,0153, nilai standard deviasi sebesar 0,0998, nilai minimum sebesar 0,0220 mm dan nilai maksimum sebesar 0,766 mm. Hasil yang di peroleh pada pengukuran butiran pasir beton dengan ayakan 50 mesh adalah diperoleh jumlah data butiran pasir sebanyak 56, nilai mean sebesar 1,93 mm nilai median sebesar 1,91 mm nilai standard deviasi sebesar 0,749 nilai minimum sebesar 0,315 dan nilai maksimum sebesar 3,30.

Mengukur ukuran butiran pasir beton dan pasir pantai menggunakan *software Image* dengan metode biner memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode tradisional seperti analisis saringan mekanis. Teknik ini memungkinkan identifikasi dan pengukuran butiran pasir secara cepat, akurat, dan objektif dengan memanfaatkan pemrosesan citra digital. Menurut Smith dkk. (2018), metode biner dalam analisis gambar dapat meningkatkan efisiensi segmentasi partikel, mengurangi kesalahan manusia, dan memberikan hasil yang lebih konsisten dalam pengukuran ukuran butiran. Rahman dkk. (2021) juga menegaskan bahwa penggunaan *software* ImageJ dapat mengidentifikasi distribusi ukuran partikel dengan lebih presisi, bahkan untuk pasir dengan karakteristik ukuran yang kompleks. Selain itu, penelitian Putra (2021) menunjukkan bahwa metode ini sangat berguna dalam penelitian material konstruksi, karena memungkinkan analisis data dalam jumlah besar secara simultan tanpa perlu intervensi manual yang memakan waktu. Dengan demikian, penerapan *software* ImageJ berbasis metode biner memberikan solusi efisien dan inovatif dalam studi karakteristik pasir untuk berbagai aplikasi, termasuk industri beton dan kajian geomorfologi pantai.

SIMPULAN

Berdasarkan data yang dihasilkan aplikasi citra digital dengan menggunakan *software* ImageJ dengan metode citra biner menunjukkan tingkat akurasi data yang sesuai berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834-2000). Hasil yang diperoleh pada pengukuran butiran pasir pantai yaitu nilai minimum sebesar 0,0220 mm dan nilai maksimum sebesar 0,766 mm. Hasil yang diperoleh pada pengukuran butiran pasir beton nilai minimum sebesar 0,315mm dan nilai maksimum sebesar 3,30 mm. Berdasarkan berbagai penelitian, metode ini mampu mengidentifikasi distribusi ukuran butiran pasir dengan presisi tinggi, menjadikannya solusi yang ideal untuk studi material konstruksi dan analisis geomorfologi pantai. Dengan demikian, penggunaan *ImageJ* berbasis metode biner dapat menjadi alat

penting dalam penelitian dan aplikasi industri yang memerlukan karakterisasi partikel pasir secara akurat dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Arena, E. T., Rueden, C. T., Hiner, M. C., Wang, S., Yuan, M., & Eliceiri, K. W. (2017). Quantitating the cell: Turning images into numbers with ImageJ. *WIREs Developmental Biology*, 6(2), e260. <https://doi.org/10.1002/wdev.260>
- Capes, C. E. (2013). *Particle Size Enlargement*. Elsevier.
- Cervantes, E., Martín, J. J., & Saadaoui, E. (2016). Updated Methods for Seed Shape Analysis. *Scientifica*, 2016, 5691825. <https://doi.org/10.1155/2016/5691825>
- De Simone, V., Caccavo, D., Lamberti, G., d'Amore, M., & Barba, A. A. (2018). Wet-granulation process: Phenomenological analysis and process parameters optimization. *Powder Technology*, 340, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>
- Fulawka, L., & Halon, A. (2016). Proliferation Index Evaluation in Breast Cancer Using ImageJ and ImmunoRatio Applications. *ANTICANCER RESEARCH*.
- Grishagin, I. V. (2015). Automatic cell counting with ImageJ. *Analytical Biochemistry*, 473, 63–65. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2014.12.007>
- Kodoatie, R. J. (2021). *Tata Ruang Air Tanah*. Penerbit Andi.
- Kudo, Y., Yasuda, M., & Matsusaka, S. (2020). Effect of particle size distribution on flowability of granulated lactose. *Advanced Powder Technology*, 31(1), 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.10.004>
- Kurniawan, C., Waluyo, T., & Sebayang, P. (2011, January 1). *Particle Size Analysis Using Free-Software ImageJ*.
- Maiti, A., Chakravarty, D., Biswas, K., & Halder, A. (2017). Development of a mass model in estimating weight-wise particle size distribution using digital image processing. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(3), 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.015>
- Oktaviani, I. (2019). *Klasifikasi Jenis Batuan Pasir Sedimen Melalui Pengolahan Citra Digital Menggunakan Metode Local Binary Pattern (Lbp) dan Support Vector Machine (SVM)*. Universitas Telkom, S1 Teknik Telekomunikasi.
- Putra, S. A. (2021). *Pengaruh Ukuran Butiran Pasir terhadap Kuat Tekan Bata Ringan*. Repository Polman Babel. Diakses dari: <https://repository.polman-babel.ac.id/id/eprint/900/>
- Rahman, M., Hossain, M., & Karim, M. (2021). Image-based particle size analysis for granular materials using binary segmentation. *Journal of Engineering Research*, 45(2), 89-103.

- Sagala, C. C. (2021). *Pengaruh Ukuran Partikel Pasir Silika Sebagai Bahan Penguat Terhadap Kekerasan Dan Kekasaran Pelet Komposit* [Other, Universitas Islam Riau]. <https://repository.uir.ac.id/17523/>
- Smith, J., Brown, P., & Lee, R. (2018). Automated sand grain analysis using image processing techniques. *International Journal of Material Science*, 12(3), 45-60.
- Surjono, S. S., Amijaya, D. H., & Winardi, S. (2022). *Analisis Data Sedimen*. UGM PRESS. *The influence of grain shape and size on the relationship between porosity and permeability in sandstone: A digital approach | Scientific Reports*. (n.d.). Retrieved October 13, 2023, from <https://www.nature.com/articles/s41598-022-11365-8>
- Vrekoussis, T., Chaniotis, V., Navrozoglou, I., Dousias, V., Pavlakis, K., Stathopoulos, E. N., & Zoras, O. (2009). Image Analysis of Breast Cancer Immunohistochemistry-stained Sections Using ImageJ: An RGB-based Model. *ANTICANCER RESEARCH*.
- Wiegel, D., Eckardt, G., Priese, F., & Wolf, B. (2016). In-line particle size measurement and agglomeration detection of pellet fluidized bed coating by Spatial Filter Velocimetry. *Powder Technology*, 301, 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.009>
- Yang, J., Yu, W., Fang, H., Huang, X., & Chen, S. (2018). Detection of size of manufactured sand particles based on digital image processing. *PLOS ONE*, 13(12), e0206135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206135>