

Analisis Pengukuran Kecepatan Aliran Permukaan Sungai Dengan Metode “Large Scale Particle Image Velocimetry” Menggunakan Fotogrametri Terestris, Studi Kasus : Sungai Mungkung, Kabupaten Sragen

Havi Sheehan Maladzi^{1*}, Nurhadi Bashit¹ dan Bandi Sasmito¹

¹ Departemen Teknik Geodesi, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia 50277
* penulis koresponden: havisheehanm@alumni.undip.ac.id

Abstrak: Sungai merupakan bentang alam yang umum dijumpai yang dapat dimanfaatkan masyarakat untuk kehidupan sehari-hari. Di sisi lain, sungai yang banjir dapat memiliki kecepatan aliran air yang tinggi dan dapat membahayakan masyarakat sehingga diperlukan pemantauan terhadap kecepatan arus sungai. Pengukuran kecepatan arus sungai dapat dilakukan dengan *Acoustic Doppler Current Profiler* dan *Current Meter* namun, masih terbatas pada melakukan kontak dengan aliran air dan hanya berpusat pada kecepatan di satu titik tertentu. Penelitian ini melakukan pengukuran kecepatan aliran permukaan sungai menggunakan kamera Digital Single Lens Reflex Canon EOS 2000D yang diproses menggunakan metode Large Scale Particle Image Velocimetry (PIV). Pengolahan data menggunakan data berupa video pengamatan sungai secara oblique yang dipecah menjadi pasangan gambar kemudian dilakukan proses orthorektifikasi untuk mendapatkan nilai kecepatan dalam meter per sekon. Validasi dilakukan dengan cara pengukuran langsung objek di atas air yang dihitung dengan stopwatch. Hasil orthorektifikasi yang mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014 memiliki ketelitian geometri skala 1:10.000 Kelas 3. Hasil kecepatan aliran permukaan sungai memiliki nilai rata-rata sebesar 0,227m/s. Hasil Cross section digunakan sebagai sampel uji statistik ditentukan menggunakan lima cross section dengan nilai rata-rata pada masing-masing cross section bernilai 0,188m/s; 0,135m/s; 0,039m/s; 0,109m/s; dan 0,125m/s. Pengujian hasil dilakukan dengan Independent T-Test menggunakan total 120 sampel data dengan 118 derajat kebebasan menghasilkan nilai T hitung 14,202 di luar dari nilai T Tabel 1,980 sehingga menghasilkan kesimpulan dari hipotesis bahwa terdapat perbedaan signifikan antara pengukuran metode PIV dengan pengukuran validasi data.

Diterima: 02 Januari 2024
Diperbaiki: 13 April 2024
Disetujui: 23 April 2024

Kata kunci: *Acoustic Doppler Current Profiler*, *Current Meter*, *Digital Single Lens Reflex*, *Independent T-Test*, *Particle Image Velocimetry*, Sungai

1. Pendahuluan

Sungai Mungkung merupakan salah satu sungai di Kabupaten Sragen yang berhulu dari Gunung Lawu dan bermuara di Sungai Bengawan Solo [1]. Sungai Mungkung menjadi salah satu sungai yang berpotensi mengalami banjir saat musim hujan di mana ketinggian Sungai Mungkung mencapai hingga empat meter. Kepala BPBD Kabupaten Sragen juga menjelaskan bahwa dampak lain dari banjir ini adalah tidak bisa dilaluinya Jalan Nasional Sragen-Solo di Ringroad Utara. Di sisi lain Bantaran Sungai Mungkung sering tergerus oleh aliran air yang deras terutama saat musim penghujan. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Mulatsih dan Sundoro (2012)

tentang kerusakan pelindung tebing sungai di Sungai Mungkung khususnya di daerah Desa Patihan Kabupaten Sragen [2]. Pelindung tebing sungai pada penelitian tersebut mengalami kerusakan seperti retak-retak dan bergeser akibat erosi dan longsor yang diperparah dengan kondisi tanah timbunan yang lunak akibat terkena air secara terus-menerus. Pemerintah Kabupaten Sragen melalui Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo rutin melakukan pengukuran kecepatan aliran Sungai Mungkung sebagai pendeteksian dini kenaikan muka air sungai dengan cara pengukuran merawas menggunakan *Current Meter*. Namun, *Current Meter* hanya dapat mengukur pada satu titik saja.

Particle Image Velocimetry (PIV) merupakan sebuah metode yang dikembangkan oleh Grant (1997) sebagai alternatif pengukuran kecepatan aliran fluida di seluruh penampang sungai tanpa melakukan kontak langsung. PIV melakukan pengukuran berbasis pada gambar berpasangan dengan tahap *image enhancement*, *image evaluation*, dan *post processing* [4]. PIV menggunakan *image processing* foto atau rekaman untuk mengetahui besar kecepatan sesaat pada aliran fluida dan menghitung pantulan pencahayaan kecepatan pergerakan partikel (*seeder*) yang tertangkap sensor. Pengukuran perpindahan seeder pada PIV dilakukan pada *Interrogation Area* di area sungai [4]. Berkas gambar selanjutnya diolah untuk mendapatkan besaran dan arah kecepatan aliran [5]. *Large Scale Particle Image Velocimetry* merupakan pengembangan PIV untuk area yang lebih luas serta dapat mengimplementasikan transformasi dan orthorektifikasi pada foto. Orthorektifikasi bekerja dengan cara memanipulasi gambar *oblique* sehingga setiap piksel ditransformasi menjadi koordinat tanah [6]. Metode ini dapat digunakan sebagai alternatif dari pengukuran kecepatan sungai menggunakan *Current Meter* dan menjadi keuntungan tambahan di mana pada PIV tidak diperlukan kontak langsung dengan objek dalam menentukan kecepatan aliran.

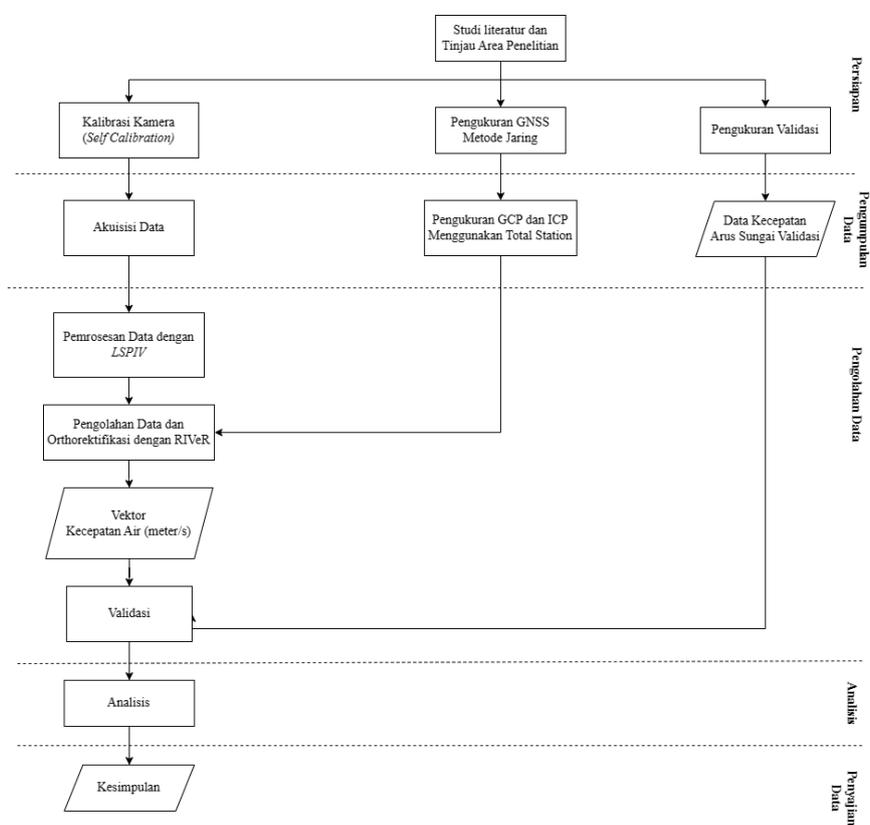
Penelitian oleh Liu, dkk. (2023) di Sungai Yufeng dengan menggunakan kamera 20fps menjelaskan bahwa LSPIV mengukur kecepatan aliran permukaan air berdasarkan analisis dari pola riak air [7]. Penentuan *interrogation area* dan GCP berperan penting dalam penentuan kecepatan oleh LSPIV. Hasil gambar yang diproses dengan LSPIV kemudian ditransformasi menjadi tegak dengan menggunakan informasi koordinat dari GCP. Sharif (2022) melakukan penelitian tentang PIV dengan metode LSPIV menggunakan seeder alami dengan tujuan untuk mencari parameter dan alat yang efektif digunakan untuk pemanfaatan LSPIV di Dinkel River dan Meuse River. Distorsi pada saat akuisisi dihilangkan dengan proses *image stabilisation* dan orthorektifikasi yang kemudian kualitas data ditingkatkan dengan *image enhancement* [6]. Patalano dkk. (2017) melakukan penelitian metode PIV untuk menentukan kecepatan aliran air pada Sungai Pisco di Peru dan Sungai Santa Fe di Argentina menggunakan kamera yang sudah dikalibrasi menggunakan Matlab® untuk mendapatkan masing-masing nilai parameter distorsi [8]. Penelitian tersebut memecah video yang direkam di sungai kemudian diubah ke dalam grayscale. Hasil gambar yang dipecah kemudian diproses dengan menggunakan perangkat lunak RIVeR dengan metode *Large Scale Particle Image Velocimetry* sehingga pasangan frame saling mengurangi vektor piksel yang terekam sehingga didapatkan vektor perubahan pergerakan partikel.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan mengetahui nilai kecepatan aliran permukaan sungai di Sungai Mungkung, Kabupaten Sragen dengan menggunakan fotogrametri terestris dengan metode *Large Scale Particle Image Velocimetry*. Data diakuisisi menggunakan kamera DSLR Canon 2000D yang sudah dikalibrasi untuk mendapatkan data pergerakan dalam piksel per sekon yang selanjutnya menggunakan titik kontrol GCP untuk mendapatkan nilai perubahan dalam meter per sekon. Hasil kecepatan aliran permukaan sungai kemudian dilakukan uji statistik dengan Uji T Independen untuk mengetahui akurasi dari hasil penelitian.

2. Metode

Penelitian ini melakukan akuisisi data video pada objek menggunakan kamera *Digital Single Lens Reflex* yang sudah dilakukan kalibrasi. Akuisisi dilakukan dengan sudut pengambilan video sebesar 60° selama 30 detik dengan titik kontrol sebanyak enam buah *Ground Control Point* dan enam buah titik uji

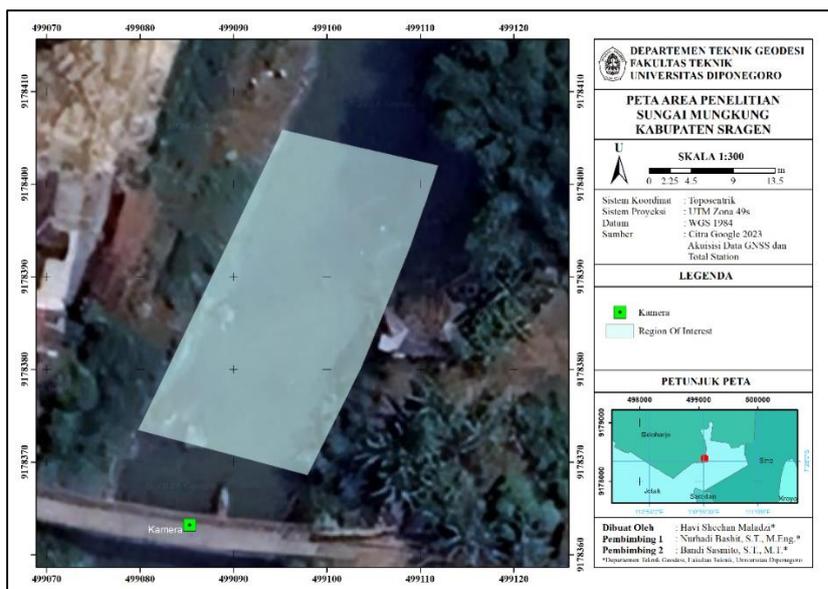
Independent Check Point. Koordinat GCP dan ICP diukur dengan cara pengukuran detail situasi menggunakan alat *Total Station* berdasar pada titik koordinat yang sudah diukur dengan menggunakan GNSS. Foto hasil akuisisi kemudian diproses menggunakan metode *Large Scale Image Velocimetry* dan dilakukan orthorektifikasi menggunakan aplikasi RIVeR sehingga menghasilkan nilai kecepatan rata-rata dan kecepatan aliran permukaan sungai. Pengujian orthorektifikasi dilakukan dengan ICP dan perhitungan CE90 sebagai dasar penentuan kelas foto yang mengacu pada Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 15 Tahun 2014. Sampel kecepatan didapatkan dengan cara menarik lima *cross section* di area sungai. Hasil pengukuran sampel kecepatan aliran permukaan sungai kemudian dilakukan uji statistik dengan menggunakan uji normalitas Kolmogorov Smirnov dan Uji T Independen *two tailed* pada R Studio dengan nilai interval kepercayaan sebesar 95%. Penentuan hipotesis Uji T Independen mengambil asumsi hipotesis H_0 : Kecepatan Aliran Permukaan Sungai Metode LSPIV tidak memiliki perbedaan signifikan dengan Pengukuran Validasi Arus Sungai; dan H_1 : Kecepatan Aliran Permukaan Sungai Metode LSPIV memiliki perbedaan signifikan dengan Pengukuran Validasi Arus Sungai. Metode penelitian lebih lengkap dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1. Material

Penelitian ini menggunakan data berupa data koordinat *benchmark* sebagai acuan referensi, data *ground control point* sebagai titik kontrol orthorektifikasi, data *independent check point* sebagai titik kontrol pengujian hasil orthorektifikasi, data kalibrasi kamera, dan data video objek sungai. Data diambil secara primer pada lokasi penelitian di Sungai Mungkung, Kabupaten Sragen yang dapat dilihat pada **Gambar 2** dengan detail data dapat dilihat pada **Tabel 1**. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah Laptop, set Total Station Sokkia IM-52 dan perlengkapannya, GNSS Topcon HiPer II dan HiPer SR, dan kamera DSLR Canon 2000D dengan tripod kamera. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Microsoft Word 2019, Microsoft Excel 2019, PIVlab dan RIVeR.



Gambar 2. Lokasi area penelitian

Tabel 1. Sumber data

Data	Sumber	Keterangan
Data Koordinat <i>Benchmark</i>	Survei Lapangan	Data didapat menggunakan GNSS dan digunakan sebagai acuan referensi koordinat GCP dan ICP
Data Pengukuran GCP dan ICP	Survei Lapangan	Data didapat menggunakan pengukuran Total Station untuk proses orthorektifikasi dan pengujian hasil orthorektifikasi
Data Kalibrasi Kamera	<i>On the Job Calibration</i>	Data didapat dengan melakukan kalibrasi kamera di lokasi penelitian menggunakan pola <i>checkerboard</i>
Data Video Objek Sungai	Survei Lapangan	Data didapat dengan menggunakan kamera DSLR Canon 2000D

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1. Akuisisi Data Koordinat Benchmark

Proses akuisisi data koordinat *benchmark* dilakukan dengan pengukuran GNSS. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode Jaring dengan base yang berada pada TTG. 1116 yang terletak di Desa Krikilan, Kecamatan Masaran, Kabupaten Sragen. Pengukuran dilakukan dengan durasi pengamatan selama 4 jam menggunakan satu base dan tiga rover yang berada di area sungai untuk titik berdiri dan referensi koordinat Total Station.

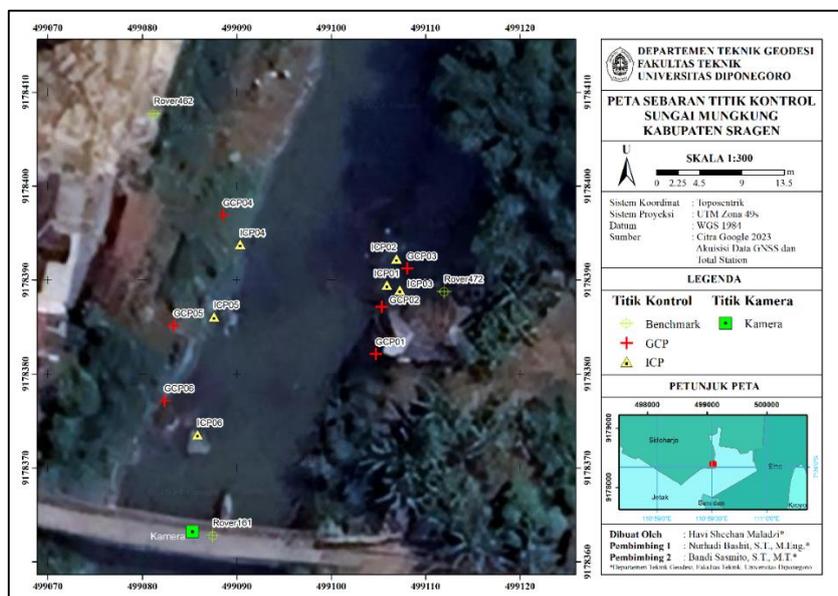
2.2.2. Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter distorsi, meliputi distorsi radial dan distorsi tangensial, serta parameter-parameter lensa lainnya, termasuk juga *principal point* (c_x dan c_y), *focal length* (f_x dan f_y), serta titik pusat fidusial foto [9]. Proses kalibrasi kamera dilakukan dengan metode *on the job calibration* menggunakan kertas *checkerboard* dengan ukuran pola sebesar 20mm.

2.2.3. Akuisisi Data GCP dan ICP

Data titik kontrol diakuisisi menggunakan Total Station yang berdiri pada setiap *benchmark* yang mengacu pada pengukuran GNSS dengan lokasi GCP dan ICP seperti pada Gambar 3. Data titik kontrol digunakan sebagai GCP untuk pemrosesan orthorektifikasi dan ICP untuk uji kualitas

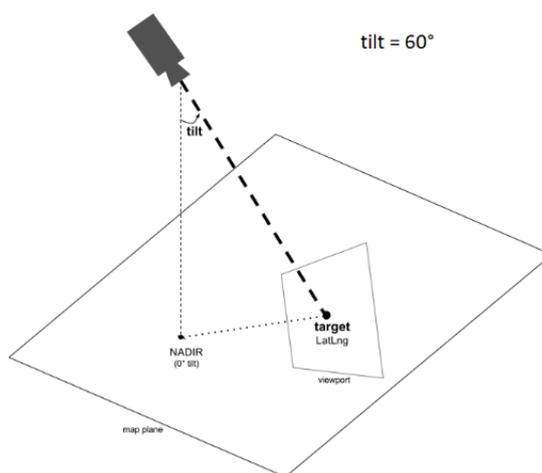
data hasil orthorektifikasi. Pengukuran GCP dan ICP dilakukan dengan 6 kali pengukuran iterasi untuk GCP dan 4 kali pengukuran iterasi untuk ICP.



Gambar 3. Sebaran titik kontrol area penelitian

2.2.4. Akuisisi Data Video Pergerakan Sungai

Proses akuisisi dilakukan pada tanggal hari Jumat 21 Juli 2023, pukul 14:53 WIB. Akuisisi dilakukan melewati tengah hari untuk menghindari pencahayaan/iluminasi cahaya berlebih. Pemilihan waktu juga untuk menghindari banyaknya bayangan yang jatuh pada area objek penelitian. Kamera dipasang pada tripod dengan sudut 60° dari titik nadir di area penelitian dengan detail pada Gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi posisi kamera terhadap sudut nadir

2.2.5. Orthorektifikasi Hasil

Orthorektifikasi dilakukan pada perangkat lunak RIVeR menggunakan data kecepatan aliran yang sudah diproses dengan PIVlab. PIVlab menghasilkan nilai kecepatan aliran permukaan sungai dalam nilai piksel/s. Orthorektifikasi dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan perubahan kecepatan aliran sungai dalam m/s. Orthorektifikasi menggunakan enam titik koordinat GCP dan nilai kalibrasi kamera untuk menghasilkan model kecepatan aliran permukaan sungai secara tegak [10].

2.2.6. Pengukuran Validasi

Pengambilan data validasi dilakukan menggunakan objek daun kerigen yang dihanyutkan dalam rentang jarak 5 meter dan diukur durasinya menggunakan *stopwatch*. Lokasi pengambilan data validasi dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Lokasi pengambilan data validasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran GNSS

Hasil pengukuran koordinat *Benchmark* menggunakan GNSS dengan *Base* pada TTG. 1116 yang terletak di Desa Krikilan, Kecamatan Masaran, Kabupaten Sragen pada lokasi penelitian. Hasil pengukuran GNSS ditampilkan dalam koordinat kartesian toposentrik UTM zona 49s dan sistem tinggi orthometrik pada **Tabel 2**. Berdasarkan hasil pengolahan GNSS, dapat dilihat bahwa hasil pengamatan memberikan nilai standar deviasi kurang dari 5mm sehingga dapat disimpulkan bahwa pengamatan memenuhi spesifikasi teknis pengamatan jaring kontrol orde 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran GNSS

Name	Grid Northing	Grid Easting	Elevation	Std Dev N	Std Dev E	Std Dev U	Std Dev Hz
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Base 165	9175172,832	494426,786	118,169	0	0	0	0
Rover 161	9178362,772	499087,485	104,896	0,002	0,002	0,006	0,003
Rover 462	9178407,698	499081,246	104,567	0,002	0,002	0,005	0,003
Rover 472	9178388,724	499111,974	102,459	0,002	0,002	0,005	0,003

3.2. Hasil Kalibrasi Kamera

Proses kalibrasi kamera *on the job calibration* menghasilkan nilai parameter fokus (fx, fy), titik pusat (cx, cy), nilai distorsi radial (k1, k2, k3), dan nilai distorsi tangensial (p1, p2) dalam piksel. Nilai eror ditampilkan dalam milimeter dengan rincian seperti pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil kalibrasi kamera

Parameter	Definisi	Nilai (px)	Eror (mm)
fx	Nilai <i>focal length</i> sumbu X	896,4593	1.792
fy	Nilai <i>focal length</i> sumbu Y	922,4208	1.844
cx	Nilai <i>principal points</i> sumbu X	529,7757	1.0596
cy	Nilai <i>principal points</i> sumbu Y	411,0305	0.8221
k1		0,1589	3.177
k2	Nilai distorsi radial	-9,9251	-198.5
k3		-32,7400	-654.8
p1		-0,0093	-0.1861
p2	Nilai distorsi tangensial	-0,0085	-0.170

3.3. Hasil Pengukuran GCP dan ICP

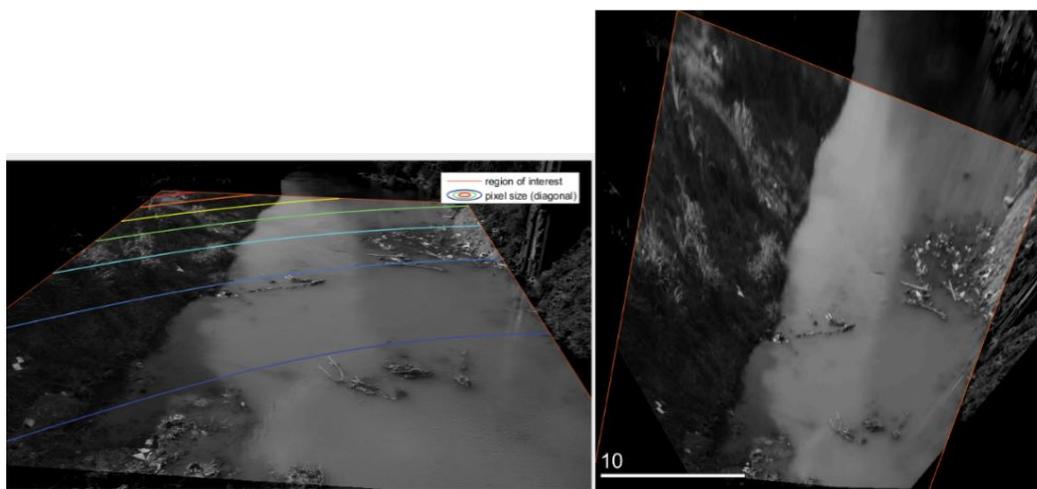
Pengukuran GCP dan ICP menggunakan alat *Total Station* mengacu pada koordinat *benchmark* hasil pengukuran GNSS. Hasil pengolahan koordinat GCP dan ICP dengan pengukuran iterasi dijelaskan dalam koordinat kartesian toposentrik dengan sistem tinggi orthometrik dapat dilihat pada **Tabel 4.**

Tabel 4. Hasil pengukuran GCP dan ICP

Titik	Northing	Easting	Elevasi	Std Dev N	Std Dev E	Std Dev Z
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
GCP01	9178382,142	499104,715	98,578	0,005	0,003	0,008
GCP02	9178387,165	499105,333	98,340	0,007	0,006	0,009
GCP03	9178391,270	499108,043	99,228	0,004	0,002	0,007
GCP04	9178396,933	499088,552	10,620	0,005	0,012	0,008
GCP05	9178385,175	499083,332	10,213	0,005	0,011	0,007
GCP06	9178377,190	499082,345	99,361	0,004	0,007	0,008
ICP01	9178389,461	499105,876	98,271	0,012	0,007	0,005
ICP02	9178392,265	499106,910	98,221	0,002	0,002	0,005
ICP03	9178388,919	499107,254	99,307	0,005	0,010	0,010
ICP04	9178393,790	499090,346	98,868	0,003	0,009	0,006
ICP05	9178386,083	499087,595	99,058	0,001	0,007	0,005
ICP06	9178373,555	499085,827	98,253	0,002	0,004	0,007

3.4. Hasil Orthorektifikasi

Hasil pengujian orthorektifikasi didapatkan nilai RMSE sebesar 2,929 yang dapat dilihat pada **Gambar 6** dengan rincian hasil pengujian akurasi pada **Tabel 5**. Penentuan kelas peta dilakukan dengan menghitung RMSE uji ICP dengan rumus $CE90 = 1,5175 \times RMSE_{Horizontal}$ menghasilkan nilai sebesar 4,445 sehingga dapat disimpulkan kualitas foto masuk ke dalam peta kelas 3 dengan skala 1:10.000.



Gambar 6. Foto Sebelum Orthorektifikasi (kiri) dan Setelah Orthorektifikasi (kanan)

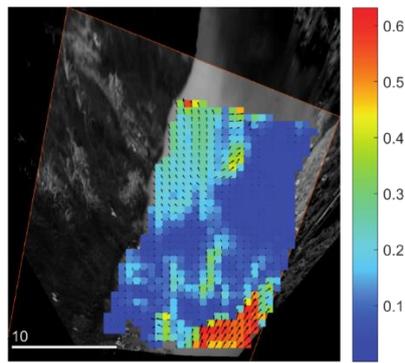
Tabel 5. Nilai hasil uji akurasi model orthorektifikasi

Titik	Koordinat ICP		Koordinat model		Akurasi (X_2-X_1) ² +(Y_2-Y_1) ² (m)
	X ₁ (m)	Y ₁ (m)	X ₂ (m)	Y ₂ (m)	
ICP01	499105,876	9178389,461	499103,930	9178386,390	13,218
ICP02	499106,910	9178392,265	499104,050	9178388,020	26,200
ICP03	499107,254	9178388,919	499104,350	9178389,830	9,63
ICP04	499090,346	9178393,790	499089,400	9178392,950	1,601
ICP05	499087,595	9178386,083	499087,090	9178386,770	0,727
ICP06	499085,827	9178373,555	499086,480	9178373,360	0,464
Jumlah					51,473
Rata-rata					8,579
RMSE					2,929

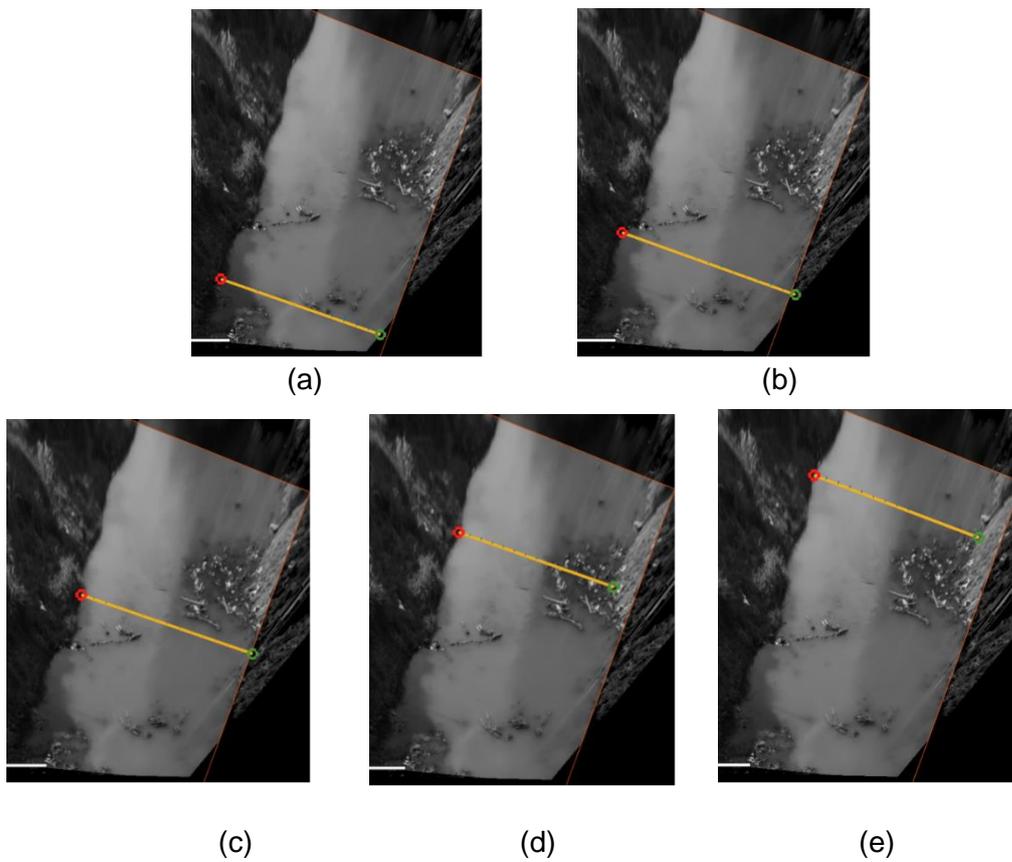
3.5. Hasil Kecepatan Aliran Permukaan Sungai

Perhitungan kecepatan permukaan aliran sungai pada seluruh area objek penelitian mendapatkan rentang nilai sebesar 0-0,7m/s dengan *velocity magnitude* dapat dilihat pada **Gambar 7**. Perhitungan kecepatan dilakukan pada lima *cross section* dengan detail pada **Gambar 8** memiliki masing-masing nilai rata-rata *cross section* bernilai 0,188m/s; 0,135m/s; 0,039m/s; 0,109m/s; 0,125m/s. Perbandingan kecepatan aliran permukaan sungai pada seluruh *cross section* dapat dilihat di grafik pada **Gambar 9** memiliki nilai terendah sebesar 0,0001m/s pada sampah serta endapan sungai dan memiliki nilai terbesar sebesar 0,572m/s pada aliran permukaan sungai yang tidak memiliki halangan endapan sungai.

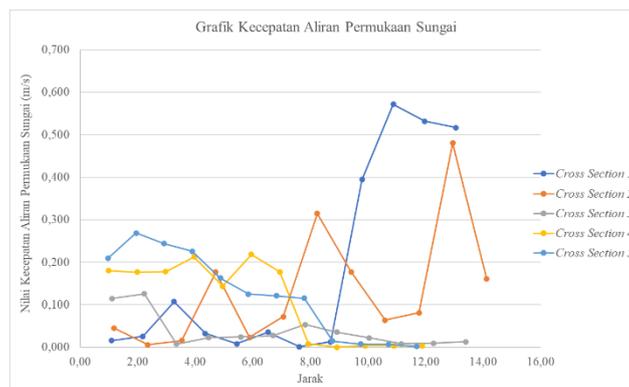
Pengujian statistik menggunakan R Studio mencakup uji normalitas Kolmogorov Smirnov dan Uji T Independen *two tailed*. Pengujian normalitas didapatkan nilai *p-value* sebesar 0,0122 lebih kecil dibandingkan dengan nilai kepercayaan (α) sebesar 0,05. Namun, berdasarkan Teorema Limit Pusat, dikarenakan observasi data berjumlah lebih dari 60, dapat disimpulkan bahwa data berdistribusi normal. Hasil Uji T Independen *two tailed* dengan interval kepercayaan 95% mendapatkan nilai T_{hitung} sebesar -14,202 dan nilai *p-value* dengan 118 *degree of freedom* bernilai 2,2e-16. Karena *p-value* bernilai lebih kecil daripada nilai $\alpha/2$ dan nilai T_{hitung} berada di luar area T_{tabel} maka dapat ditentukan bahwa H₁ diterima dengan kesimpulan bahwa Kecepatan Aliran Permukaan Sungai Metode LSPIV memiliki perbedaan signifikan dengan Pengukuran Validasi Arus Sungai.



Gambar 7. Velocity magnitude pengukuran kecepatan aliran permukaan sungai



Gambar 8. (a) Cross section 1, (b) Cross section 2, (c) Cross section 3, (d) Cross section 4, (e) Cross section 5



Gambar 9. Grafik kecepatan aliran permukaan sungai pada lima cross section

4. Kesimpulan

Kesimpulan Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil uji akurasi foto mendapatkan nilai RMSE sebesar 2,929m. Perhitungan CE90 menghasilkan nilai sebesar 4,445 dan mendapatkan peta kelas 3 dengan skala 1:10.000.
2. Hasil pengukuran kecepatan aliran permukaan sungai pada sungai Mungkung menggunakan metode *Large Scale Particle Image Velocimetry* didapatkan nilai rata-rata sebesar 0,227m/s. Pengukuran dibagi menjadi lima *cross section* dengan kecepatan rata-rata pada *cross section* satu bernilai 0,188m/s, *cross section* dua bernilai 0,135m/s, *cross section* tiga bernilai 0,039m/s, *cross section* empat bernilai 0,109m/s, *cross section* lima bernilai 0,125m/s
3. Nilai pengujian akurasi dengan menggunakan Uji T Independen *two tailed* pada 60 sampel di lima *cross section* menghasilkan nilai T_{hitung} 14,202 di luar nilai $T_{tabel} \pm 1,980$ sehingga disimpulkan terdapat perbedaan signifikan antara pengukuran metode LSPIV dengan pengukuran validasi hasil.

Daftar Pustaka

- [1] Y. Risdiyanto and C. Ikhsan, "Evaluasi Tinggi Muka Air Kali Mungkung Sragen Terhadap Elevasi Banjir Sungai Bengawan Solo," *Matriks Tek. Sipil*, pp. 535–540, 2017, [Online]. Available: <https://matriks.sipil.ft.uns.ac.id/index.php/MaTekSi/article/view/760>
- [2] U. S. Mulatsih and G. H. Sundoro, "Studi Kasus Kerusakan Pelindung Tebing Sungai Geocell Di Kali Mungkung Desa Patihan Kabupaten Sragen," *J. Tek. Hidraul.*, pp. 143–156, 2012, [Online]. Available: <https://jurnalth.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/view/268>
- [3] I. Grant, "Particle image velocimetry: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 211, no. 1, pp. 55–76, 1997, doi: 10.1243/0954406971521665.
- [4] Y. Kim, "Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry," *PhD Thesis*, no. July, 2006.
- [5] A. P. Rahardjo, R. Burdiarto, and I. E. Prabowo, "Pengembangan Particle Image Velocimetry (PIV) Berbasis Pengolahan Citra untuk Pengukuran Aliran 2D," *Annu. Eng. Semin. 2011*, 2011.
- [6] O. Sharif, "Measuring surface water flow velocities by a drone and large-scale particle image velocimetry (LSPIV)," *Univ. Twente*, no. August, 2022.
- [7] W. C. Liu, W. C. Huang, and C. C. Young, "Uncertainty Analysis for Image-Based Streamflow Measurement: The Influence of Ground Control Points," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.3390/w15010123.
- [8] A. Patalano, C. M. García, and A. Rodríguez, "Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)," *Comput. Geosci.*, vol. 109, no. July, pp. 323–330, 2017, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.009.
- [9] J.-Y. Bouguet and P. Perona, "Camera Calibration from Points and Lines in Dual-Space Geometry," *Proc. 5th Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 2–6, 1998.
- [10] M. Muste, I. Fujita, and A. Hauet, "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments," *Water Resour. Res.*, vol. 46, no. 4, pp. 1–14, 2008, doi: 10.1029/2008WR006950.