

PENGEMBANGAN METODE PENGUKURAN MEDAN KECEPATAN ALIRAN DENGAN METODE BAYANGAN PARTIKEL

Fahmi Rizal¹ dan Adam Pamudji Rahardjo²

ABSTRACT

Flow velocity measurement is one of the very important aspect in the field of hydraulics. Until today, the common method used in measuring flow velocity is limited to one point measurement. In order to get velocity pattern in a single measurement, multi point velocity measurement methods such particle image and tracking methods have to be developed. A study for the development of the instrument based on particle image method has been conducted.

The developed measurement method was validated by applying it on velocity field measurement of two steady uniform flow cases, they were: flow in normal straight flume and down-stream flow of broad crested weir. Collecting and analyzing data procedure were as follows: setting up flow cases and inserting particles into water flow, lighting the flow and recording image by developed instrument, photographic (studio) processing, photo scanning, reading pixel brightness data, transforming pixel data into velocity flow data, visualizing velocity vectors, and validating data by comparing them with data collected by a volumetric calibrated Mini Propeller velocimeter.

The results indicate that data collected by developed measurement method were comparable and relevant to data collected by the volumetric calibrated Mini Propeller. The mean velocity profile measured by developed measurement method in straight flume was 8-14 cm/s, meanwhile that of Mini Propeller was 9-13.5 cm/s. Measurement error between data obtained by those two methods was 4.8 percent (RMS=0.5635 cm/s). In case of downstream flow of a broad crested weir, the data were 0.97-2.24 cm/s for developed measurement method and 0.77-2.19 cm/s for standard measurement. Measurement error was 7.7 percent (RMS=0.1228 cm/s). Furthermore, by using the measurement method developed in this research, location, magnitude, and direction of the velocity vectors distributed on the velocity field would be available simultaneously.

PENDAHULUAN

Pengukuran kecepatan aliran zat cair (air) merupakan suatu proses yang sangat penting dalam bidang hidraulika. Berbagai alat telah dikembangkan untuk mendeteksi

dan mengukur besarnya kecepatan aliran. Pengukuran kecepatan aliran dapat dilakukan pada suatu titik di dalam aliran zat cair, misalnya dengan alat tabung pitot (*Prandtl*), dan turbin meter. Data kecepatan yang diperoleh dengan menggunakan peralatan tersebut terbatas pada data kecepatan aliran pada suatu titik.

Penelitian pengukuran medan kecepatan aliran dua dimensi dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, seperti Stevens dan Coates (1993); Lloyd, Ball, dan Stansby (1995); Wu dan Tsanis (1994); dan Cheng, Atkinson, dan Bursik (1997); Harada dkk. (1998); Nezu dan Nakayama (1998). Dalam penelitian mereka pada umumnya digunakan peralatan yang canggih dan mahal. Telah dikembangkan alat ukur yang lebih ekonomis dan program khusus untuk keperluan pengumpulan dan analisis data yang sesuai dengan konteks penelitian. Komponen lampu sorot tidak memakai sinar laser yang mahal tetapi diganti dengan sinar lampu halogen, dan partikel yang dipakai adalah butiran lokal yang murah dan mudah didapat.

TEORI METODE BAYANGAN PARTIKEL

Metode Pengukuran yang Telah Dikembangkan

Stevens dan Coates (1993) meneliti medan kecepatan aliran dalam suatu tanki kaca dengan metode PIV (*Particle Image Velocimetry*). Air dalam tanki kaca yang bergerak akibat perbedaan suhu disorot dengan laser dan direkam dengan kamera digital, kemudian dianalisis dengan teknik korelasi silang maksimum. Ternyata teknik yang dipakai efektif untuk pengukuran medan kecepatan aliran. Penelitian senada dilakukan oleh Lloyd, Ball, dan Stansby (1995) yang mengembangkan instrumen PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) untuk mengukur medan kecepatan pada permukaan aliran di sekitar model pulau. Peneliti memakai partikel polipropelin (BJ = 0,95 dan D = 5 mm) sebagai *tracer*. Untuk validasi data dilakukan pengukuran simultan dengan alat LDA (*Laser Doppler Anemometer*). Meskipun terdapat kelemahan (pada aliran kecepatan tinggi), peneliti menyatakan bahwa metode PTV dapat dipakai untuk keperluan analisis kecepatan aliran pada model hidraulik di laboratorium.

Cheng, Atkinson, dan Bursik (1997) mengembangkan instrumen PIV untuk mengukur struktur turbulensi aliran pada tanki kaca. Gerakan turbulensi aliran di dalam tanki kaca yang dipicu oleh *impeller* direkam dengan kamera digital yang dihubungkan langsung ke komputer. Satu bingkai gambar meliputi objek seluas 60 x 60 inci, sementara luas *interrogation area* adalah 0,8 x 0,8 mm (64 x 64 piksel). Pencarian pasangan bayangan partikel dilakukan oleh *PIV interrogation software*, sehingga menghasilkan data vektor kecepatan. Nezu dan Nakayama (1998) juga memakai metode PIV untuk mengetahui pengaruh fluktuasi gelombang permukaan terhadap struktur dan intensitas turbulensi serta pusaran koherensi di dekat permukaan air bebas. Peneliti menggunakan serbuk *Nylon 12* berdiameter 50 mikron dan berat jenis 1,01. Data bayangan partikel direkam dalam bentuk *frame* dengan interval 1/30 detik. Analisis data dilakukan dengan program berdasarkan algoritma PIV. Hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil pengukuran alat LDA, dan ternyata hasil pengukuran dari kedua metode tersebut adalah sepadan (*matched*). Penelitian yang masih relevan dilakukan oleh Harada dkk. (1998),

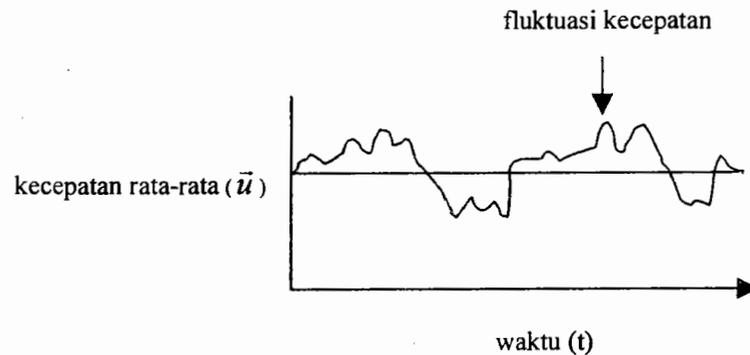
metoda PIV. Cairan suspensi (*Iriki Kaolin*) dipakai sebagai *tracer* sekaligus sebagai sedimen suspensi. Pengukuran dilakukan pada ruangan gelap dengan memakai lampu *fluorescent*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metoda pengukuran yang dipakai ternyata sangat efektif.

Sifat Obyek Ukur

Aliran turbulen adalah aliran zat cair yang mengandung peristiwa turbulensi, yaitu gerakan partikel zat cair tidak teratur dalam dimensi waktu dan ruang. Kecepatan sesaat (*instantaneous velocity*) dalam aliran turbulen pada suatu titik adalah bervariasi atau bersifat sembarang di sekitar nilai rata-ratanya. Apabila kecepatan dalam suatu aliran zat cair diuraikan menjadi u , v , dan w yang merupakan kecepatan sesaat pada arah sumbu aksial, lateral, dan vertikal maka kecepatan sesaat dapat ditulis sebagai berikut:

$$u = \bar{u} + u'; v = \bar{v} + v'; \text{ dan } w = \bar{w} + w'$$

Dalam hal ini, komponen \bar{u} , \bar{v} , dan \bar{w} adalah kecepatan rerata dan u' , v' , dan w' merupakan komponen fluktuasi kecepatan. Gambar 1 di bawah ini memperlihatkan fluktuasi kecepatan pada aliran turbulen.



Gambar 1. Fluktuasi kecepatan aliran turbulen pada suatu lokasi.

Untuk mendapatkan nilai reratanya tersebut untuk suatu lokasi tertentu diperlukan periode pengukuran yang cukup. Dilaporkan bahwa periode tersebut berkisar antara 3 menit untuk aliran permanen dalam saluran di laboratorium (Kironoto, 1995). Angka tersebut kemungkinan bervariasi untuk skala aliran yang berbeda. Dalam hal ini skala tersebut lebih ditentukan oleh nisbah antara kelembaman dan kekentalan pada aliran zat cair yang dinyatakan dengan bilangan Reynold, $Re = \frac{V \cdot D}{\gamma}$. dengan V (m/d) adalah kecepatan aliran, D (m) adalah jari-jari hidraulik, dan γ adalah kekentalan kinematik (m^2/d). Aliran semakin turbulen apabila ia memiliki angka Reynold semakin besar.

Pengukuran Medan Kecepatan Aliran

informasi kecepatan di titik mana saja pada bidang (medan) aliran dapat diungkapkan pada suatu saat tertentu. Teknik pengukuran dengan memanfaatkan penyinaran partikel dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu metode penjajakan partikel (*particle tracking velocimetry*) dan metode bayangan partikel (*particle image velocimetry*). Melalui metode penjajakan partikel dapat diperoleh data kecepatan aliran dalam bentuk *Lagrangian*, kemudian diinterpolasi untuk memperoleh medan kecepatan aliran (Stevens dan Coates, 1993). Pada metode bayangan partikel dapat dipakai teknik korelasi silang maksimum antar bidang yang merekam gerak maju bayangan partikel. Pasangan bayangan diproses dengan program berdasarkan algoritma korelasi silang maksimum untuk memperoleh vektor kecepatan pada medan aliran. Metode bayangan partikel banyak dipakai oleh para ahli, misalnya pada bidang meteorologi dan geofisika untuk mengukur gerakan awan, bongkahan gunung es, dan suhu permukaan laut (Stevens dan Coates, 1993).

Pengukuran medan kecepatan aliran dua dimensi dapat dilakukan dengan teknik penyinaran partikel. Caranya adalah dengan memasukkan sejumlah butiran partikel yang tidak larut ke dalam zat cair yang sedang mengalir, sehingga partikel tersebut dapat bergerak mengikuti gerakan zat cair. Partikel harus memiliki massa jenis yang setara dengan massa jenis zat cair (misalnya, air = 1000 kg/m^3), sehingga partikel akan bergerak sesuai dengan gerakan molekul atau massa zat cair yang membawanya. Gerakan partikel pada bidang aliran dapat dilihat dengan cara menyorotkan lembar cahaya ke dalam aliran. Umumnya para peneliti membuat lembar sinar laser dengan mengkombinasikan lensa bola dan lensa tabung (Cheng dkk., 1997; dan Stevens and Coates, 1994). Gerakan partikel direkam dengan kamera atau video sehingga diperoleh gambar atau foto bayangan partikel yang sedang bergerak. Partikel yang tidak terkena sorotan lembar sinar (*noise*) juga ikut terekam meskipun tidak secerah partikel yang tersorot lembar sinar. Dalam analisis data mereka dapat dihapus dengan menetapkan batas minimal kecerahan piksel (*minimum threshold*).

Ada dua cara pemotretan dalam proses perekaman bayangan partikel. Pertama, menyorot bidang aliran dengan lembar sinar kemudian dipotret dengan kamera yang sudah diatur kecepatannya. Melalui cara ini diperoleh gambar dengan garis-garis bayangan yang menggambarkan suatu lintasan (jejak) partikel. Titik pangkal garis merupakan titik awal Bergeraknya satu buah partikel, sedangkan ujung garis merupakan titik akhir gerakan partikel. Panjang garis pada gambar menunjukkan jarak lintasan yang ditempuh oleh suatu partikel selama rentang waktu tertentu. Kedua, memakai teknik *strobo*, yaitu dengan pengaturan pancaran sinar dengan suatu program komputer. Lampu yang dikendalikan oleh program komputer dapat dinyalakan, dimatikan, dan dinyalakan kembali dengan rentang waktu tertentu. Dalam hal ini, setidaknya-tidaknya dibutuhkan dua kali pancaran sinar sehingga akan diperoleh dua peristiwa aliran yang direkam dalam satu bingkai gambar. Untuk memperoleh satu bingkai gambar yang memuat dua peristiwa, maka rana kamera diatur agar tetap terbuka (*shutter* kamera tidak diaktifkan). Melalui proses ini dihasilkan gambar dengan pasangan titik-titik bayangan. Setiap butir partikel memiliki dua buah titik yang menggambarkan titik awal dan akhir gerakannya selama rentang waktu pancaran sinar yang diatur oleh komputer. Untuk menentukan titik-titik

kan teknik korelasi silang maksimum (Stevens and Coates, 1993). Di samping itu, pengaturan konsentrasi butiran partikel yang tepat dalam suatu aliran menjadi suatu hal yang penting. Ia akan mempengaruhi kualitas gambar dan proses analisis bayangan partikel.

METODOLOGI

Bahan

Bahan untuk keperluan penerapan alat ukur meliputi: air bersih dan partikel yang dapat melayang di dalam air. Partikel yang dipakai sebagai *tracer* dicoba dengan berbagai bahan yaitu: benang, nilon, manik-manik, karet, dan serbuk gergaji. Akhirnya diperoleh partikel yang paling optimal yaitu serpihan serlak (*shellac flakes*). Serlak yang dipakai adalah serlak merk Kupu-kupu produksi PT Bintang Lima Solo, yang dihaluskan dan diayak (ukuran 0,5 – 0,7 mm, dengan BJ = 1,075 gr/ml).

Alat

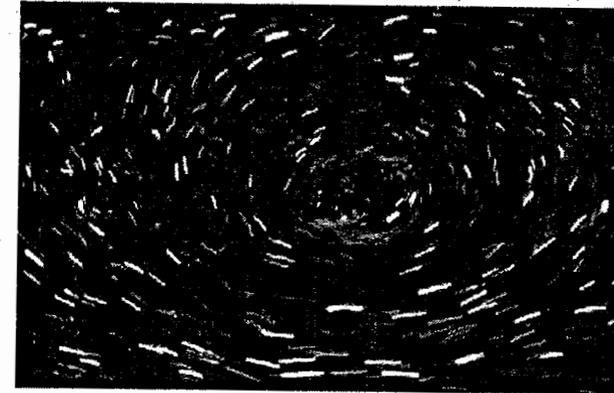
Alat ukur yang dikembangkan terdiri dari komponen: kamera dan tuas penjepret, lampu sorot (2 Halogen 1000 watt), sistim pengarah dan pembentuk lembar sinar, *dimer* (peredup lampu), komputer (dilengkapi dengan *scanner* dan printer). Untuk mengaplikasikan alat ukur yang dikembangkan dibutuhkan peralatan lain yaitu: saluran (*sediment circulating flume*), alat ukur *Mini Propeller*, *stopwatch*, meteran, timbangan, gelas ukur, ayakan, dan alat tulis. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Adobe Photoshop*, *BOSS SMS* dan perangkat lunak yang dikembangkan adalah pengubah data *image* ke data *text*, pembaca vector kecepatan termasuk filter data, program *Solusi* yang berfungsi untuk membuat file yang dapat dibaca oleh *BOSS SMS* berdasarkan data yang dihasilkan oleh program *Vektor*

Pengembangan Metode dan Alat Pengukuran

Pengembangan alat ukur meliputi pembuatan unit pencahayaan (lampu), unit pemotretan (kamera), dan alat peredup lampu (*dimer*). Unit lampu dirancang untuk dapat menghasilkan lembar sinar yang akan disorotkan ke dalam aliran. Sumber cahaya harus kuat dan memiliki ukuran yang panjang. Untuk itu dipilih dua buah lampu halogen berkekuatan 1000 watt yang dirakit menjadi satu. Untuk memfokuskan arah sinar di belakang lampu dipasang aluminium berbentuk setengah lingkaran. Pada bagian depan lampu dipasang dua lembar aluminium untuk mengapit sinar sehingga terbentuk lembar sinar dengan ketebalan yang diinginkan. Arus listrik untuk menyalakan dan meredupkan (mematikan) lampu sorot dialirkan melalui *dimer* dan dikendalikan oleh program komputer.

Kamera yang dilengkapi dengan kabel jepret dipakai untuk mengambil foto partikel yang sedang bergerak. Tombol pada kepala kabel jepret kamera dipencet secara otomatis oleh tuas penjepret yang juga dihubungkan dengan alat *dimer*. Komponen *dimer* dirancang untuk mengatasi persoalan dalam penentuan arah vektor kecepatan aliran

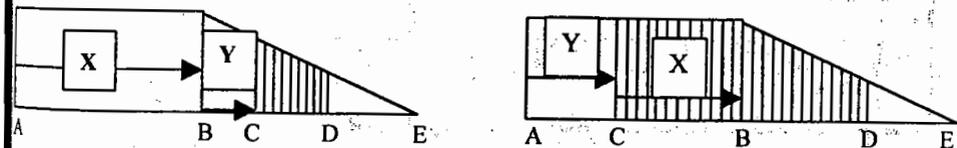
serlak, kemudian disorot dengan lembar sinar. Pemotretan dilakukan dengan memakai kamera yang diatur kecepatan rananya. Setelah dilakukan uji coba dengan aliran yang berpusar pada akuarium diperoleh *setting* kamera yang optimal, yaitu: kecepatan 1/15 detik, diafragma 2 – 2,8, dan jarak 1 meter. Hasil pemotretan menampilkan garis-garis lintasan partikel yang seterusnya dianalisis untuk memperoleh medan kecepatan aliran (Gambar 2).



Gambar 2: Foto garis lintasan partikel di dalam akuarium.

Pada tahap ini dilakukan pemilihan material *tracer* yang paling baik dengan kriteria kedekatan rapat massanya dengan rapat massa air, bentuk partikel, sifat pemantulannya, kemudahan memperolehnya dalam jumlah yang diperlukan. Akhirnya diperoleh bahwa material serlak adalah yang paling sesuai.

Terdapat empat program yang dibutuhkan dalam rangka pengumpulan dan analisis data, yaitu program *Kamera*, *BMP-JPG*, *Vektor*, dan *Solusi*. Program *Kamera* untuk mengontrol prosedur operasi rangkaian *dimer*, yaitu sinkronisasi antara waktu penyalaan dan peredupan lampu sorot serta penjepretan kamera. Karena kecepatan kamera bervariasi sementara rentang waktu redup lampu tidak bervariasi (perilaku *filament* konstan), dibutuhkan dua algoritma program *Kamera* agar *setting* kamera dapat diatur secara fleksibel (Gambar 3).



Keterangan:

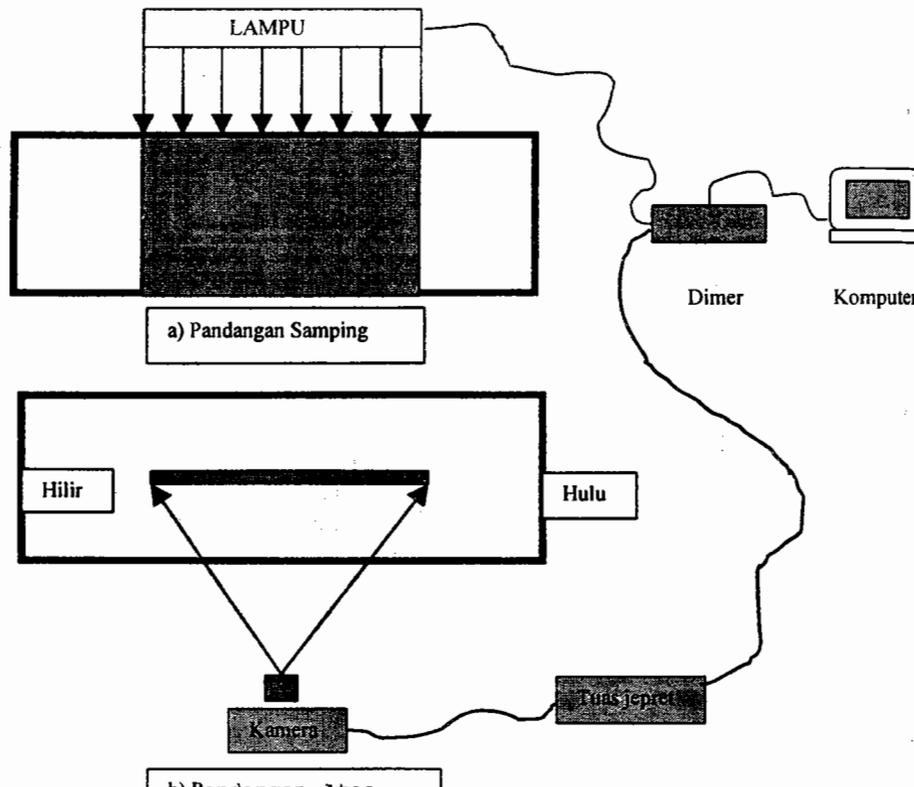
- | | |
|--------------------------|----------------|
| A = Lampu hidup (nyala) | E = Lampu mati |
| B = Lampu mulai redup | X = Lag Lampu |
| C = Rana kamera terbuka | Y = Lag Kamera |
| D = Rana kamera tertutup | |

Telah diperoleh *lag kamera* yang tepat yaitu pada angka 225 milidetik untuk kecepatan kamera = 1/15 detik dan angka 725 milidetik untuk kecepatan kamera = 1 detik.

Program *BMP-JPG* berfungsi untuk mentransformasikan data file gambar menjadi data teks. Program *Vektor* berfungsi untuk mentransformasikan data nilai skala keabuan menjadi besaran dan arah vektor.

Ada dua model aliran yang dibuat, yaitu model aliran pada saluran lurus dan model aliran di hilir peluap. Dimensi saluran adalah: lebar = 60 cm, tinggi = 60 cm, dan panjang = 12 meter. Pemotretan dengan alat ukur yang dikembangkan dilakukan pada lokasi yang terletak 6 meter dari pintu masuk (*entrance*) saluran. Pada model aliran pertama, yakni aliran pada saluran lurus, kedalaman aliran dibuat setinggi 12 cm. Hal ini dilakukan agar diperoleh *aspect ratio* = $b/d < 5$. Debit aliran yang tercatat pada panel kontrol adalah 8 liter/detik.

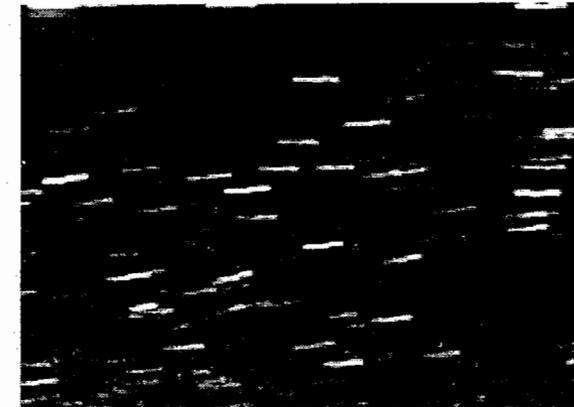
Untuk model yang kedua maka saluran tersebut dilengkapi dengan suatu peluap ambang lebar. Ukuran peluap adalah panjang 60 cm, lebar 60 cm, dan tinggi adalah 10 cm. Peluap dicat dengan warna hitam agar diperoleh warna yang kontras dengan warna atau kecerahan butiran partikel. Pada model kedua kedalaman aliran adalah 30 cm, dan debit tercatat pada panel kontrol sebesar 2 liter/detik. Tata letak eksperimen diatur seperti Gambar 4.



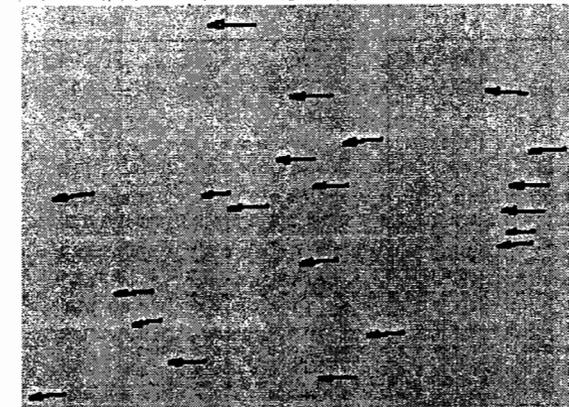
Lampu sorot diletakkan di atas saluran disorotkan ke bawah ke dalam aliran. Partikel ditaburkan kedalam aliran pada bagian hulu saluran. Kamera diletakkan sejauh 90 cm dari objek. Akurasi proporsi ukuran objek gambar dan bingkainya dilakukan dengan mengatur *zoom* kamera.

PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Pada Saluran Lurus



Gambar 5. Foto aliran di saluran lurus.



Gambar 6. Visualisasi aliran pada saluran lurus.

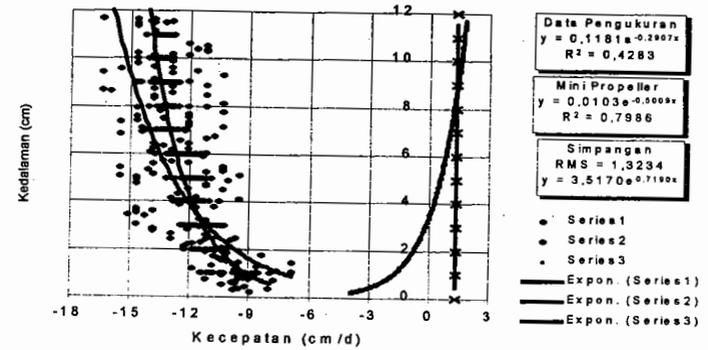
Gambar 5 adalah foto aliran pada saluran yang sudah diolah menjadi file gambar yang dapat diinputkan pada program *BMP-JPG* sehingga diperoleh data berupa matriks angka kecerahan piksel. Seterusnya data piksel dianalisis dengan program *Vektor* sehingga diperoleh vektor kecepatan seperti terlihat pada tabel berikut (setelah evaluasi visual). Dengan menggunakan program *Boss-SMS* data hasil analisis program *Vektor*

Selanjutnya untuk keperluan validasi alat yang dikembangkan, hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan alat *Mini propeller* yang sudah dikalibrasi secara volumetrik. Pemotretan dilakukan dalam jumlah yang memadai (62 file gambar) dan setelah dianalisis diperoleh 444 vektor kecepatan valid yang tersebar pada suatu bidang aliran. Alat yang dikembangkan memiliki sensitivitas tinggi yang dapat mengungkapkan data vektor dengan ketelitian dalam satuan piksel.

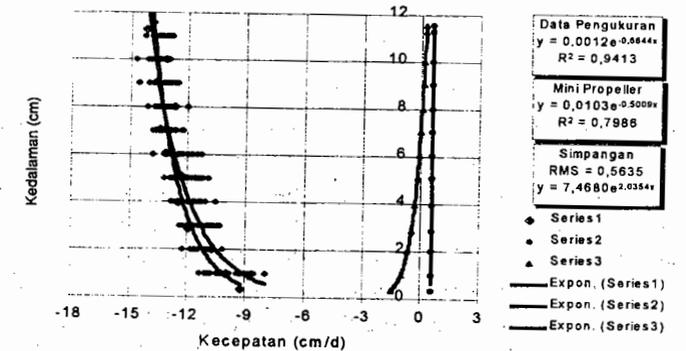
Dengan mengamati Gambar 7 dapat dinyatakan bahwa simpangan (*error*) pengukuran yang diperoleh adalah bervariasi. Apabila data besaran vektor kecepatan yang memiliki kedalaman yang relatif sama (dalam rentang 0,5 mm) dirata-ratakan, kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil pengukuran alat yang standar (*Mini Propeller*) diperoleh nilai $RMS=1,3234$ cm/d atau 11,244 persen dari nilai reratanya (Gambar 7.a). Alat *Mini Propeller* memiliki *probe* dengan baling-baling berdiameter 1 cm. Artinya, data kecepatan yang direkam merupakan data aliran yang mewakili suatu tampang aliran dengan diameter 1 cm. Apabila data pengukuran dengan alat yang dikembangkan dirata-ratakan dengan interval kedalaman 1 cm diperoleh error pengukuran yang lebih kecil, yaitu $RMS=0,5635$ (4,7876 persen), seperti terlihat pada Gambar 7.b. Sebaran data pengukuran juga menunjukkan kontribusi yang besar terhadap garis regresinya, yaitu dengan $R^2=0,9413$ yang ternyata lebih tinggi dari pada hasil pengukuran *Mini Propeller* ($R^2=0,7986$). Berdasarkan hasil analisis kuantitatif ini dapat dinyatakan bahwa alat yang dikembangkan cukup akurat, yaitu dengan tingkat kesalahan yang kecil ($error < 5\%$).

Tabel . Hasil Evaluasi Visual Vektor Kecepatan Pada Saluran Lurus

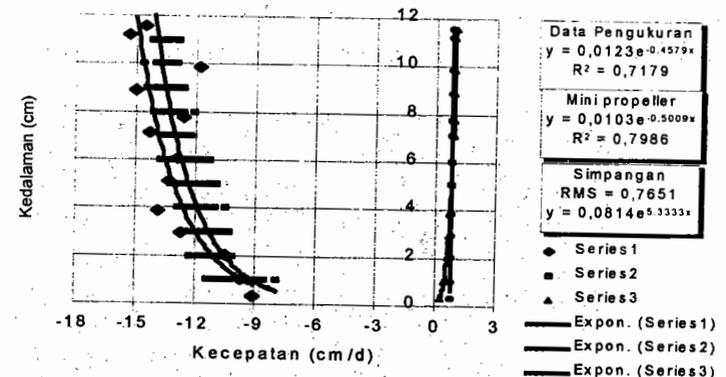
Nomor	Koordinat Titik (piksel)		Vektor Kecepatan (cm/d)
	x1	y1	
1	108	196	-20.294
2	239	161	-17.647
3	145	160	-17.647
4	169	139	-16.765
5	257	134	-14.118
6	136	129	-15.000
7	152	117	-13.235
8	249	116	-15.882
9	31	113	-17.647
10	96	113	-9.706
11	114	107	-16.765
12	247	103	-17.647
13	242	94	-9.706
14	241	88	-13.235
15	147	80	-15.000
16	59	65	-15.882
17	63	50	-10.588
18	179	44	-15.000
19	84	30	-14.118
20	156	21	-15.000
21	17	14	-14.118



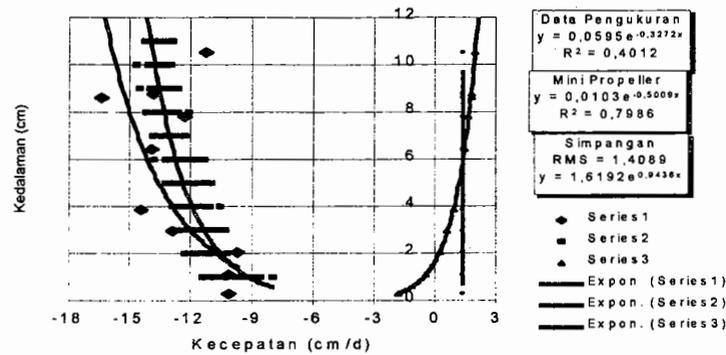
a. perataan dengan interval 0,5 mm



b. perataan dengan interval 1 cm



c. data sedang



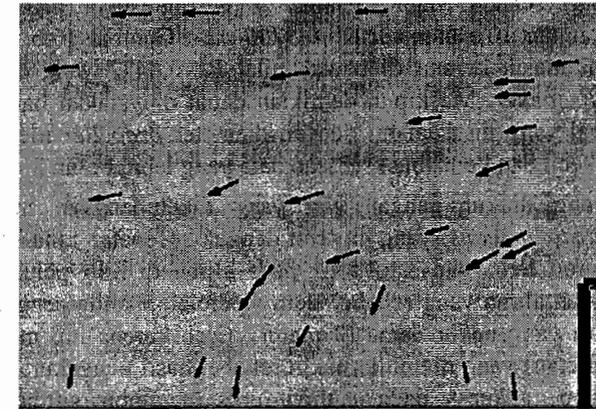
d. data kecil

Gambar 7. Perbandingan hasil pengukuran kecepatan di saluran lurus.

Vektor kecepatan pada saluran lurus yang diukur dengan alat yang dikembangkan merupakan kecepatan sesaat (*instantaneous*) yang dipotret dengan kecepatan rana kamera 1/15 detik. Pengukuran kecepatan aliran yang reliabel akan diperoleh apabila pengukuran dilakukan dalam jangka waktu yang cukup lama (3-5 menit pada aliran permanen). Oleh karena itu, makin banyak data pengukuran (pemotretan) yang diambil, makin reliabel hasil pengukuran yang diperoleh. Hasil analisis data pengukuran pada saluran lurus menunjukkan bahwa pengukuran dengan data kecil menimbulkan *error* yang terbesar, yaitu $RMS=1,4089$ (Gambar 7.d). Pengukuran dengan data sedang menghasilkan *error* yang makin berkurang, yaitu $RMS=0,7651$ (Gambar 7.c). Analisis yang melibatkan data total menghasilkan *error* terkecil (Gambar 7.b).

Hasil Pengukuran di Hilir Peluap Ambang Lebar

Foto medan kecepatan aliran di hilir peluap ambang lebar terlihat pada Gambar 8.



Gambar 9. Medan kecepatan di hilir peluap

Dengan melakukan prosedur yang sama dengan pengolahan data pada model aliran di saluran lurus diperoleh visualisasi medan kecepatan aliran di hilir peluap ambang lebar. Gambar 9 menampilkan medan kecepatan aliran di hilir peluap yang terdiri dari 31 vektor kecepatan yang valid (hasil evaluasi visual). Evaluasi visual dilakukan dengan cara membandingkan gambar (visualisasi) medan kecepatan aliran dengan foto asli dan/atau file gambarnya. Dalam hal ini, observasi terhadap gerakan atau pola aliran sewaktu *running* ikut menjadi bahan pertimbangan. Vektor kecepatan yang menyimpang (*erroneous vectors*), karena besar dan arahnya yang tidak logis, dibuang; sehingga akhirnya diperoleh vektor-vektor yang valid.

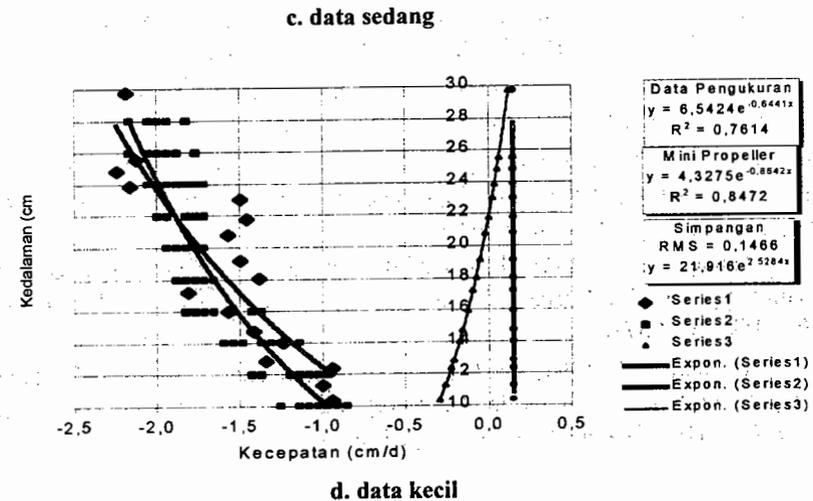
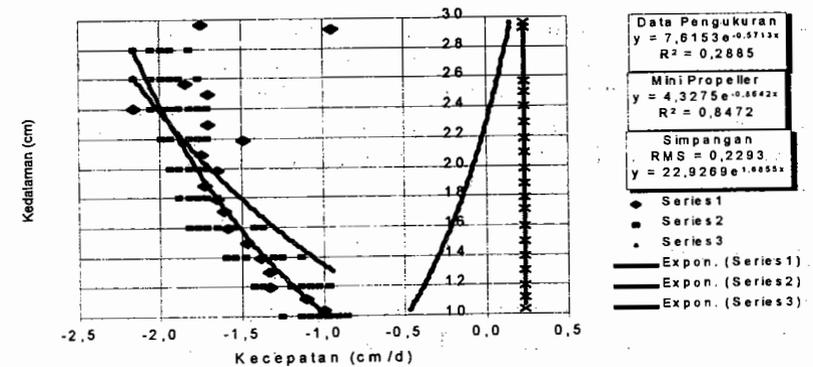
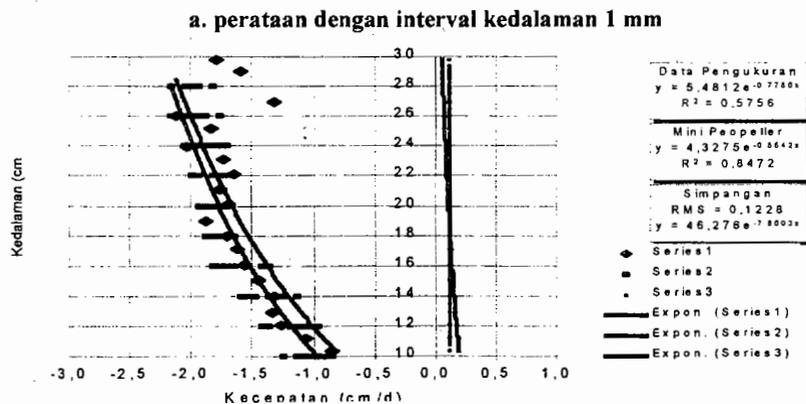
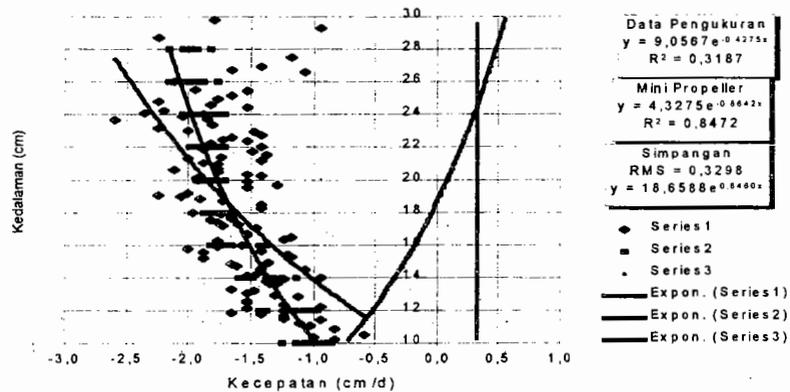
Pengukuran kecepatan aliran di daerah pusaran dengan alat *Mini Propeller* sulit dilakukan karena baling-baling atau propeller cenderung tidak bergerak dan berputar bolak-balik. Oleh karena itu, pengukuran hanya dilakukan pada kedalaman aliran dengan ketinggian di atas 10 cm dari dasar (di atas ketinggian peluap) dan pada lokasi sejauh 20 cm di sebelah hilir peluap. Pengukuran dengan alat yang dikembangkan dilakukan pada lokasi yang sama.

Pengukuran (pemotretan) dengan alat yang dikembangkan menghasilkan 27 file gambar. Semua file gambar yang diperoleh kemudian dianalisis dengan metoda yang sama dengan metoda yang digunakan sebelumnya pada pengukuran di saluran lurus. Setelah analisis dilakukan akhirnya diperoleh sebanyak 225 vektor yang valid. Gambar 9 memperlihatkan hasil pengukuran dengan alat yang dikembangkan yang dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan *Mini Propeller*.

Gambar 10. menunjukkan bahwa terdapat simpangan (*error*) antara hasil pengukuran yang diperoleh dari kedua alat yang dibandingkan. Simpangan yang terbesar ditunjukkan oleh Gambar 10.a dengan $RMS=0,3298$ (20,61 persen dari nilai kecepatan rerata sebesar 1,6 cm/d), dalam hal ini hasil pengukuran dengan alat yang dikembangkan datanya dirata-ratakan dengan interval kedalaman 1 mm. Apabila data vektor kecepatan yang berada dalam interval kedalaman 1 cm dirata-ratakan dan kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran *Mini Propeller*, maka diperoleh simpangan yang kecil, yaitu

Kontribusi dari sebaran data terhadap garis regresinya juga meningkat dari $R^2=0,3187$ pada Gambar 10.a menjadi $R^2=0,5756$ pada Gambar 10.b. Kedua nilai yang disebut terakhir ini masih berada di bawah nilai $R^2=0,8472$ yang dimiliki oleh data pengukuran *Mini Propeller*. Meskipun demikian dapat dinyatakan bahwa perata-rataan data dengan interval yang disesuaikan dengan diameter *propeller* memiliki simpangan (*error*) yang lebih kecil dan kontribusi sebaran data yang lebih besar.

Kecepatan yang diukur dengan alat yang dikembangkan merupakan vektor kecepatan sesaat (*instantaneous*) yang dipotret dengan kecepatan rana kamera 1/15 detik pada aliran di saluran lurus dan satu detik pada aliran di hilir peluap ambang lebar. Pengukuran kecepatan aliran yang reliabel akan diperoleh apabila pengukuran dilakukan dalam jangka waktu yang cukup lama (3 menit). Oleh karena itu, makin banyak data pengukuran (pemotretan) yang diambil, makin reliabel hasil pengukuran yang diperoleh. Hasil analisis data pengukuran pada saluran lurus menunjukkan bahwa pengukuran dengan data kecil menimbulkan *error* yang terbesar, yaitu $RMS=1,4089$ (Gambar 10.d). Pengukuran dengan data sedang menghasilkan *error* yang makin berkurang, yaitu $RMS=0,7651$ (Gambar 10.c). Kemudian dengan melibatkan semua data yang ada diperoleh simpangan atau *error* terkecil (Gambar 10.b).



Gambar 10. Perbandingan hasil pengukuran kecepatan di hilir peluap ambang lebar.

KESIMPULAN

Hasil pengukuran dengan alat yang dikembangkan dapat dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan *Mini Propeller* terkalibrasi. Simpangan (*error*) yang diperoleh (dengan merata-ratakan data vektor kecepatan dengan interval kedalaman 1 cm atau sebesar diameter baling-baling *Mini Propeller* adalah sebesar 4,8 persen pada aliran di saluran lurus, dan 7,7 persen pada aliran di hilir peluap. Karena pengukuran dengan alat yang dikembangkan merupakan vektor kecepatan sesaat (*instantaneous*), reliabilitas hasil pengukuran ditentukan oleh jumlah data yang diperoleh. Simpangan (*error*) hasil pengukuran dengan data total (baik pada aliran di saluran lurus maupun di hilir peluap) lebih kecil dibandingkan dengan data sedang atau kecil.

Garis regresi data hasil pengukuran aliran di saluran lurus dengan alat yang

seimbang dengan garis regresi data hasil pengukuran *Mini Propeller* terkalibrasi (R^2 sebesar 79,86%). Regresi untuk mendapatkan profil kecepatan aliran di hilir peluap ambang lebar dari 225 data vector yang diperoleh dengan alat yang dikembangkan mempunyai $R^2=57,56\%$ dengan *Mini Propeller* mempunyai $R^2=84,72\%$. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah data sangat berpengaruh terhadap nilai korelasi yang diperoleh.

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, C.Y., Atkinson, J.F., and Bursik, M.I. 1997, Direct measurement of turbulence structures in mixing jar using PTV, *Journal of Environmental Engineering*, Volume 123, No.2, pp. 115-125.
- Harada, M., Hiramatsu, K., Shikasho, Sh., and Mori, K., 1998, Measuring method of Suspension concentration in open channel flow using image processing, *Eleventh Congress of the Asia and Pacific Division of the IAHR*, pp. 607-616.
- Kironoto, B.A., 1995, Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow, *Water Maritime and Energy*, Volume 106, pp. 333-344.
- Lloyd, P.M., Ball, D.J., and Stansby, P.K., 1995, Unsteady surface-velocity field measurement using particle tracking velocimetry, *Journal of Hydraulics Research*, IAHR, Volume 33, No. 4, pp. 519-534.
- Nezu, I. and Nakayama, T., 1998, Effect of the surface-wave fluctuations on coherent structures near the free surface, *Eleventh Congress of the Asia and Pacific Division of the IAHR*, pp. 057-516.
- Stevens, C. and Coates, M., 1994, Applications of maximised cross-correlation technique for resolving velocity fields in laboratory experiments, *Journal of Hydraulics Research*, IAHR, Volume 32, No. 32, pp. 195-212.