



## STUDI NUMERIK DARI PENAMBAHAN *OBSTACLE* TERHADAP KINERJA KOLEKTOR SURYA PEMANAS UDARA DENGAN PLAT PENYERAP JENIS *V-CORRUGATED*

Ekadewi A. Handoyo<sup>1,2,a</sup>, Djatmiko Ichsani<sup>1,b</sup>, Prabowo<sup>1,c</sup>, Sutardi<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> PS Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya – Indonesia

<sup>2</sup> PS Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra, Surabaya – Indonesia

<sup>a</sup>ekadewi@peter.petra.ac.id, <sup>b</sup>djtmiko@me.its.ac.id, <sup>c</sup>prabowo@me.its.ac.id, <sup>d</sup>sutardi@me.its.ac.id

### ABSTRAK

Kolektor surya pemanas udara dapat digunakan untuk menghasilkan udara panas dengan sumber energi yang terbarukan. Namun, perpindahan kalor dari plat penyerap ke udara sangat rendah. Beberapa peneliti melaporkan bahwa *obstacle* dapat meningkatkan perpindahan kalor dalam kolektor surya saluran plat datar dan peneliti lain menemukan bahwa kolektor surya dengan plat penyerap jenis *v-corrugated* memberikan perpindahan kalor yang lebih besar daripada saluran plat datar. Namun, belum ada penelitian yang menggabungkan keduanya.

Dalam paper ini akan dibahas studi numerik dari penggabungan keduanya, yaitu penambahan *obstacle* terhadap kinerja kolektor surya pemanas udara dengan plat penyerap jenis *v-corrugated*. Studi diawali dengan pembuatan mesh, pemberian kondisi batas, pemberian data input, dan pemilihan model turbulen. Hasil studi numerik dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mengetahui keabsahannya. Suatu kolektor surya pemanas udara dibangun dengan skala laboratorium untuk keperluan eksperimen ini. Eksperimen dilakukan di dalam ruangan agar kondisi lingkungan dapat dijaga konstan.

Dari eksperimen didapat bahwa udara mengalami kenaikan temperatur lebih tinggi dan penurunan tekanan lebih besar saat diberi *obstacle*. Untuk udara dengan kecepatan 6,5 m/s dan intensitas radiasi 430 W/m<sup>2</sup>, udara mengalami kenaikan dari 24,5°C menjadi 37,2°C jika tanpa *obstacle* dan dari 24,3°C menjadi 40,5°C jika diberi *obstacle* serta peningkatan penurunan tekanan dari 94 menjadi 265 Pa dengan penambahan *obstacle*. Model turbulen yang tepat untuk studi numerik ini adalah *Shear Stress Transport (SST) k- $\omega$* . Dari studi numerik yang dilakukan, didapatkan bahwa aliran balik di antara *obstacle* dan celah sempit di antara *obstacle* dengan plat penyerap menyebabkan aliran lebih turbulen dan perpindahan kalor konveksi ke udara dari plat penyerap kolektor meningkat. Hasil studi numerik konsisten dengan hasil eksperimen.

*Kata kunci:* kolektor surya pemanas udara, *obstacle*, plat penyerap *v-corrugated*, studi numerik.

### Pendahuluan

Dengan semakin besar kepedulian terhadap lingkungan, maka kolektor surya menjadi peralatan yang sangat menarik untuk diteliti. Kolektor surya mengubah energi radiasi matahari menjadi energi termal yang kemudian dapat digunakan untuk memanaskan air atau udara. Kolektor surya pemanas udara umumnya mempunyai kinerja lebih rendah dari pemanas air. Hal ini disebabkan karena udara memiliki konduktivitas termal yang lebih kecil dibanding air dan koefisien perpindahan kalor konveksi antara permukaan plat penyerap dengan udara yang juga lebih rendah. Menurut [1], koefisien perpindahan kalor konveksi gas jauh lebih rendah dari cairan, baik untuk konveksi jenis alami ataupun jenis paksa. Di samping kekurangan yang ada, udara memiliki keunggulan seperti tidak menimbulkan masalah jika ada kebocoran, tidak korosif, dan ringan. Hal ini mendorong banyak peneliti berupaya untuk meningkatkan kinerja kolektor surya pemanas udara. Berbagai upaya yang telah dilakukan peneliti terdahulu adalah menggunakan plat penyerap yang dicat hitam atau diberi lapisan yang mempunyai *absorptance* tinggi dan *emittance* rendah [2], memasang honeycomb untuk mengurangi kalor yang hilang ke lingkungan [3], [4], [5], membuat aliran menjadi dua laluan [6], [7], [8], meningkatkan koefisien konveksi udara dengan plat penyerap dengan mempersempit saluran sehingga aliran menjadi turbulen [9], [10], menggunakan saluran dari plat bergelombang atau plat penyerap *v-corrugated* [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], dan membuat aliran lebih turbulen dengan menambahkan *fin*, *baffle*, atau *obstacle* [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24].

Kolektor surya pemanas udara secara sederhana terdiri dari plat penyerap, plat dasar, dan kaca penutup. Plat penyerap dapat terbuat dari plat datar, plat gelombang atau plat yang ditekuk membentuk saluran segitiga atau *v-corrugated*. El-Sebaai et al. [11] menyatakan bahwa kolektor udara dengan plat penyerap tipe *v-corrugated* mempunyai efisiensi 11 – 14% lebih tinggi dari kolektor dengan plat datar. Kedua kolektor yang dibandingkan merupakan kolektor dengan dua laluan. Dari studi eksperimental, Naphon [13] menemukan bahwa saluran dengan plat *v-corrugated* pada sebelah atas dan bawah menghasilkan peningkatan perpindahan kalor sebanyak 3,51 kali plat datar dan penurunan tekanan 1,96 kali lebih tinggi dari plat datar. Gao et al. [14] dan Tao et al. [15] menemukan bahwa pemanas udara tipe *cross-corrugated* mempunyai kinerja termal lebih baik dari tipe plat datar. Menurut Karim & Hawlader [16], kolektor tipe *v-corrugated* lebih efisien 10 – 15% dari plat datar jika digunakan satu laluan dan lebih efisien 5 – 11% jika digunakan

dua laluan. Dua laluan memberi peningkatan efisiensi paling tinggi jika digunakan di kolektor plat datar dan paling sedikit di kolektor tipe *v-corrugated*. Bashria et al. [17] menemukan bahwa kolektor tipe *v-corrugated* memiliki efisiensi lebih tinggi dari plat datar baik dari simulasi matematis maupun dari eksperimen.

Studi eksperimen yang dilakukan Promvonge [18] dalam daerah turbulen (bilangan Reynolds antara 5000 hingga 25.000) menunjukkan bahwa *baffle* jenis V dengan sudut  $60^\circ$  yang dipasang dalam saluran yang halus meningkatkan bilangan Nusselt dan factor gesekan. Kurtbas dan Turgut [19] meneliti pengaruh penambahan *fin* yang dipasang pada permukaan absorber secara tetap dan bebas. Dua *fin* yang digunakan mempunyai dimensi berbeda, tetapi luasan dan bentuk sama berupa empat persegi panjang. *Fin* (I) mempunyai dimensi 810x60 mm dan type (II) 200x60mm. Untuk mendapatkan total luasan yang sama, ada 8 *fin* (I) dan 32 *fin* (II). Hasil yang didapatkan adalah bahwa *fin* (II) baik dipasang tetap maupun bebas ternyata lebih efektif daripada *fin* (I) dan kolektor plat datar. *Fin* yang dipasang tetap di kolektor lebih efektif daripada *fin* yang dipasang bebas. Romdhane [20] meningkatkan turbulensi dalam saluran udara dengan *obstacle* atau *baffle*. Efisiensi dan temperature udara ditemukan mengalami kenaikan dengan penggunaan *baffle*, karena *baffle* mengarahkan aliran menuju plat penyerap. Dari penelitian dan pendekatan teoritis, Ho et al. [8] menemukan bahwa perpindahan kalor meningkat dengan digunakannya *baffle* aliran dua laluan dengan *recycle* dan *fin* yang dipasang di atas dan di bawah plat penyerap. Abene et al. [21] menggunakan *obstacle* pada kolektor surya pemanas udara plat datar untuk mengeringkan buah anggur. *Obstacle* meningkatkan perpindahan kalor ke udara di atas plat penyerap, menciptakan turbulensi dan mengurangi *dead zone* dalam kolektor. Dengan menggunakan kolektor surya dua laluan, Esen [22] meneliti tiga jenis *obstacle* yang dipasang di atas plat dan dibandingkan dengan plat datar biasa. Kolektor terdiri dari 3 saluran di mana udara mengalir melaluinya. Dari penelitian yang dilakukan, ditemukan bahwa *obstacle* jenis III dengan aliran di saluran tengah (di bawah plat penyerap) memberikan efisiensi tertinggi dan semua kolektor dengan *obstacle* memiliki efisiensi lebih tinggi dari kolektor plat datar. Akpinar and Koçyiğit [23] yang meneliti tiga macam *obstacle* menemukan bahwa *obstacle* jenis ke-2 memberikan efisiensi tertinggi untuk semua kondisi dan semua *obstacle* meningkatkan kinerja kolektor dibanding tanpa *obstacle*. Bekele et al. [24] menemukan secara eksperimen pengaruh dari *obstacle* bentuk delta yang dipasang di atas permukaan plat penyerap dari suatu saluran pemanas udara. *Obstacle* meningkatkan perpindahan kalor ke udara. Perpindahan kalor meningkat jika *obstacle* lebih tinggi dan jarak antar *obstacle* lebih rapat.

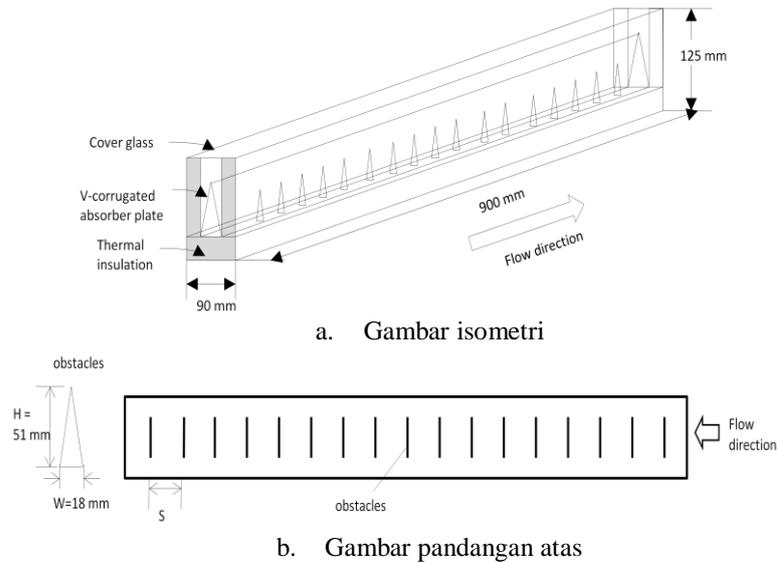
Studi numerik atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan metode yang sering digunakan dalam memprediksi aliran dan perpindahan kalor yang terjadi dalam suatu domain yang dipilih. Studi ini menyelesaikan persamaan kekekalan massa, kekekalan energy, persamaan Navier Stokes, dan persamaan difusi massa dengan metode *finite difference* atau *finite volume*. Ratnam dan Vengadesan [25] membuat prediksi CFD dari aliran tiga dimensi yang tidak termampatkan dalam saluran plat datar dengan sebuah *obstacle* berbentuk kubus diletakkan di tengah. Mereka mencari model turbulen yang paling tepat untuk aliran yang melibatkan *recirculation*, *separation*, dan *reattachment*. Dua persamaan dari model turbulen yang mereka gunakan adalah *standard k- $\epsilon$* , *low-Reynolds number k- $\epsilon$* , *non-linear standard k- $\epsilon$* , *standard k- $\omega$* , dan *improved k- $\omega$* . Hasil CFD yang memberikan prediksi terbaik adalah model *non-linear standard k- $\epsilon$*  dan *improved k- $\omega$* . Koefisien perpindahan kalor maksimum terjadi di dekat titik *reattachment* dan minimum di daerah *recirculation*. Srikanth et.al. [26] meneliti aliran dan perpindahan kalor pada prisma segitiga sama sisi yang terletak pada saluran horizontal datar dengan bilangan Reynolds antara 1 hingga 80 (dengan kenaikan 5), bilangan Prandtl 0,71 dan *blockage ratio* 0,25 secara numerik dengan software Fluent 6.3. Mereka menemukan bahwa bilangan Nusselt rata-rata dengan *obstacle* berbentuk segitiga sama sisi lebih besar 12,5% – 15% dibandingkan *obstacle* bentuk kotak pada bilangan Reynolds antara 5 – 45. Szczepanik [27] melakukan studi numerik untuk mengetahui perpindahan kalor dari suatu silinder dalam aliran melintang dengan model turbulen SST *k- $\omega$*  dan modified *k- $\omega$* . Hasil yang didapat menunjukkan bahwa model modified *k- $\omega$*  memberikan hasil prediksi yang lebih mendekati eksperimen. Eiamsa-ard dan Promvonge [28] melakukan studi numerik pada aliran paksa turbulen dalam saluran plat datar dimana terdapat beberapa cekungan kotak di plat bawah. Studi numerik dilakukan secara dua dimensi. Mereka membandingkan empat model turbulen, yaitu *Standard k- $\epsilon$* , *Renormalized Group (RNG) k- $\epsilon$* , *Standard k- $\omega$* , dan *Shear Stress Transport (SST) k- $\omega$* . Mereka menyimpulkan bahwa model turbulen RNG dan Standard *k- $\epsilon$*  memberikan hasil yang paling mendekati hasil pengukuran yang ada.

Dari pemaparan di atas, ada dua hal yang penting untuk diteliti lebih jauh. Pertama, *obstacle* dapat meningkatkan perpindahan kalor ke udara dalam kolektor surya plat datar. Kedua, plat penyerap *v-corrugated* dapat memberikan perpindahan kalor yang lebih tinggi daripada plat datar. Bagaimana jika keduanya digabung? Pada paper ini akan dibahas hasil studi numerik yang menggabungkan keduanya beserta validasi dengan percobaan yang terkait.

## Metodologi

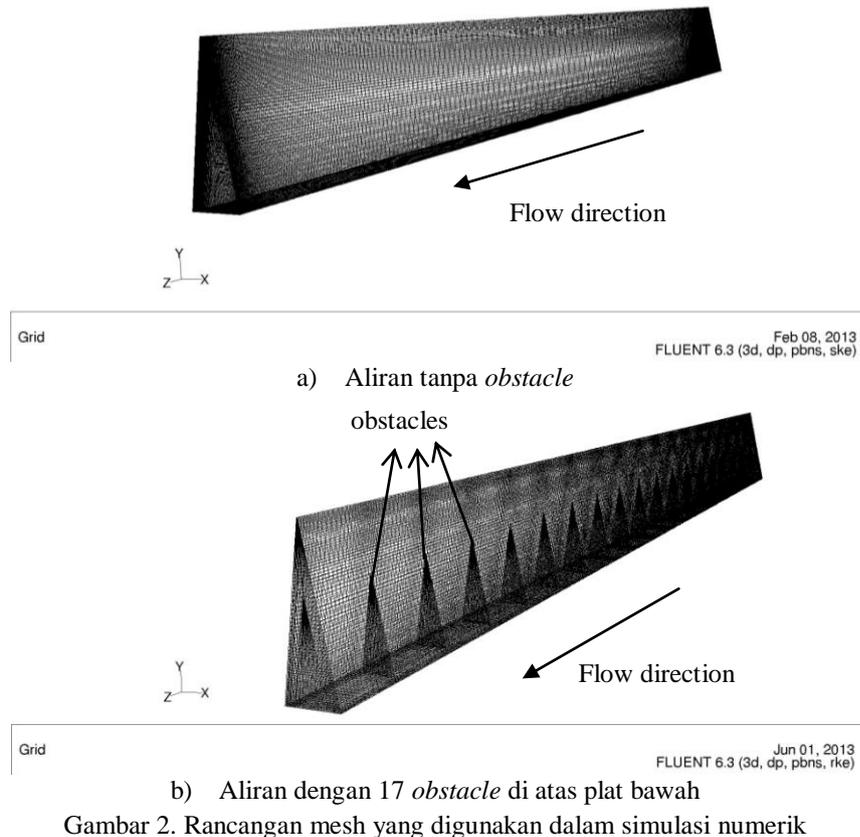
Saluran udara yang terdapat dalam kolektor surya pemanas udara dengan plat penyerap jenis *v-corrugated* memiliki penampang segitiga sama kaki. Bentuk geometri yang digunakan dalam studi numerik beserta dimensinya dapat dilihat pada Gambar 1. Sudut plat penyerap adalah  $20^\circ$  dengan dimensi panjang 900 mm dan sisi miring 87 mm. Dengan demikian dimensi saluran udara yang berupa segitiga adalah lebar 30 mm dan tinggi 85 mm. *Obstacle* yang digunakan mempunyai bentuk kongruen dengan saluran, sehingga dimensinya adalah lebar alas 18 mm dan tinggi 51 mm. *Obstacle* diletakkan sedemikian sehingga rasio spasi terhadap tinggi, S/H, sama dengan 1 atau persentase blokir dalam saluran

sebesar 36%. Karena jarak spasi antara *obstacle* adalah 51 mm, maka terdapat 17 *obstacle* dalam aliran.



Gambar 1. Skema kolektor surya dengan plat penyerap *v-corrugated* dengan *obstacle*.

Langkah awal dalam studi numerik adalah membuat domain dan merancang *mesh* dengan software Gambit 2.4.6, seperti pada Gambar 2 (a) untuk aliran tanpa *obstacle* dan (b) untuk aliran dengan *obstacle*. Mesh atau grid dirancang sama untuk aliran dengan *obstacle* maupun tanpa *obstacle*. Namun, grid dirancang tidak seragam. Mesh yang lebih rapat digunakan untuk daerah dekat dinding baik plat sebelah atas (plat penyerap) maupun plat bawah seperti pada Gambar 2 a. Untuk simulasi dengan *obstacle*, mesh juga dirancang lebih rapat di daerah dekat *obstacle* seperti pada Gambar 2 b. Karena saluran mempunyai penampang segitiga, maka simulasi numerik harus dilakukan dalam tiga dimensi. Plat absorber dikondisikan pada temperatur konstan sebesar 320K. Aliran *free stream* udara masuk saluran dengan kecepatan 6,5 m/s, temperatur 300 K dan Intensitas turbulensi 5%. Pada plat bawah saluran dinyatakan sebagai *wall* yang terisolasi sempurna.

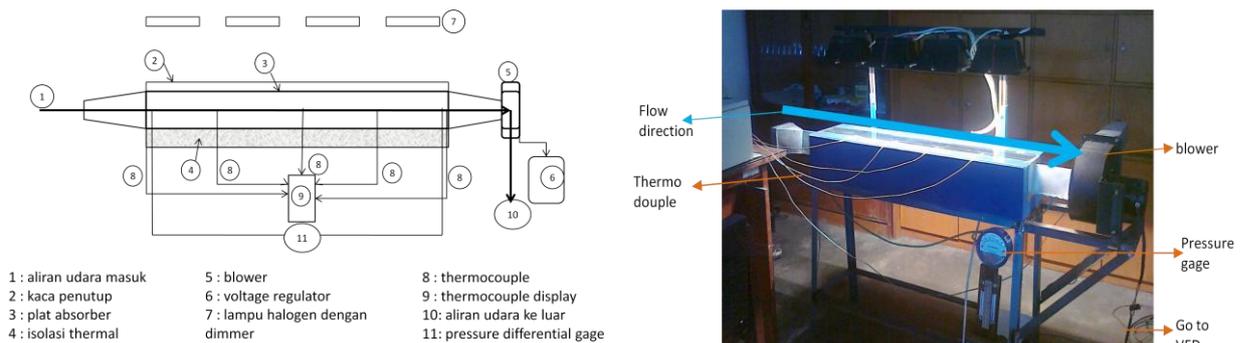


Gambar 2. Rancangan mesh yang digunakan dalam simulasi numerik

Dengan menggunakan software CFD komersial FLUENT 6.3.26, simulasi numerik dilakukan untuk mesh yang telah dirancang. Konfigurasi mesh yang digunakan terdiri dari jumlah cell sebanyak 1.008.000, jumlah sisi permukaan

sebanyak 3.080.000, dan jumlah node sebanyak 1.063.468. Dengan konfigurasi mesh yang sama, tahap selanjutnya adalah penentuan *model turbulen viscous* yang sesuai untuk kondisi aliran seperti pada penelitian ini. Model *viscous* yang digunakan adalah jenis model *viscous steady state* dengan dua persamaan yaitu Standard k- $\epsilon$  (SKE), RNG k- $\epsilon$  (RNGKE), Realizable k- $\epsilon$  (RKE), Standard k- $\omega$  (SKW), dan Shear Stress Transport k- $\omega$  (SSTKW). Dalam melakukan simulasi numerik untuk semua model turbulen, *discretization equation* dipilih *second order upwind discretization* dan hubungan perhitungan kecepatan dan tekanan menggunakan algoritma SIMPLEC. Hasil simulasi numerik semua model viscous tersebut dibandingkan dengan hasil eksperimen. Perbandingan tersebut meliputi perbandingan kenaikan temperatur udara keluar dan masuk serta penurunan tekanan udara dalam saluran.

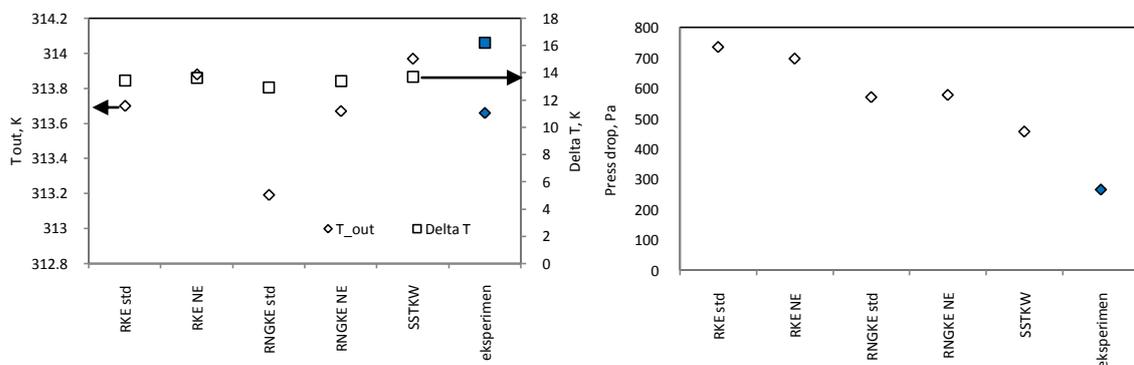
Eksperimen dilakukan dalam ruangan agar kondisi lingkungan selalu terjaga. Upaya ini dilakukan untuk menghindari perbedaan hasil karena kondisi luar yang tidak sama. Eksperimen menggunakan peralatan dengan skema dan foto seperti pada Gambar 3. Eksperimen dilakukan dengan kolektor surya pemanas udara dalam skala model di laboratorium di PS Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra, Surabaya. Radiasi matahari dimodelkan dengan empat buah lampu halogen yang masing-masing menggunakan daya 500 Watt. Selama eksperimen, intensitas radiasi yang diterima di permukaan kaca penutup diukur dengan pyranometer (Kipp & Zonen, type SP Lite2). Setiap lampu dilengkapi dengan *dimmer* terpisah, sehingga radiasi yang diterima di seluruh plat absorber dapat diatur agar seragam dengan nilai tertentu, yaitu 430 W/m<sup>2</sup>. Kolektor yang dipakai dilengkapi dengan enam termokopel tipe T dengan ketelitian 0,1°C untuk mengukur temperatur udara masuk dan ke luar, temperatur plat penyerap di empat lokasi berbeda. Penurunan tekanan antara udara masuk dan keluar kolektor diukur dengan Magnehelic differential pressure gage dengan ketelitian 2 Pa. Suatu *blower* sentrifugal (1000 m<sup>3</sup>/h, 580 Pa, 0,2 kW, 380 Volt input) digunakan untuk mengalirkan udara melalui saluran secara *induced*. Laju aliran udara diukur di keluaran dengan anemometer digital yang mempunyai ketelitian 0,1 m/s. Laju udara yang mengalir diatur dengan mengubah frekuensi putara motor dengan *variable-frequency drive* (VFD). Pada eksperimen, laju aliran udara ke luar diatur konstan sebesar 5,0 m/s. Angka ini setara dengan kecepatan aliran 6,5 m/s di dalam saluran.



Gambar 3. Skema dan foto peralatan yang digunakan dalam eksperimen.

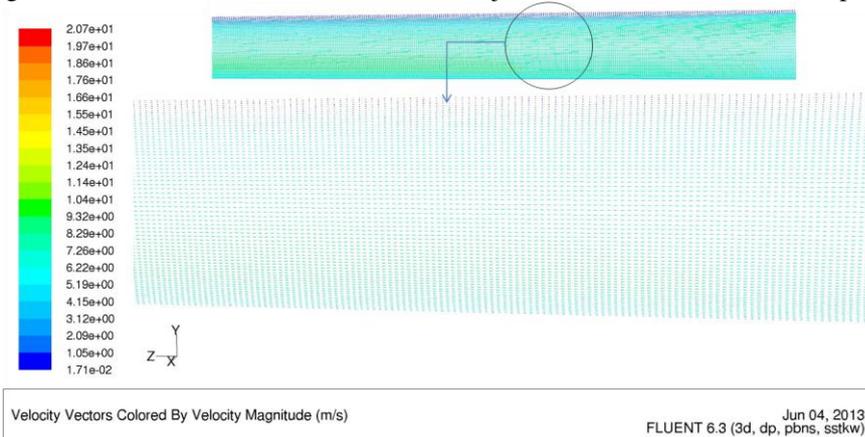
## Hasil dan Pembahasan

Dengan konfigurasi mesh seperti pada Gambar 2 di atas, didapat perbandingan hasil simulasi numerik dengan eksperimen untuk kenaikan temperatur dan beda tekanan seperti pada Gambar 4. Laju aliran udara di keluaran ditetapkan pada 5,0 m/s (atau 6,5 m/s dalam saluran di kolektor) dan intensitas radiasi 430 W/m<sup>2</sup>. Dari Gambar 4 terlihat bahwa model turbulen SSTKW memberikan prediksi yang paling mendekati hasil eksperimen. Hal ini sesuai dengan panduan yang diberikan Fluent [29], bahwa model turbulen SSTKW sesuai untuk aliran dengan banyak separasi dan vortex.

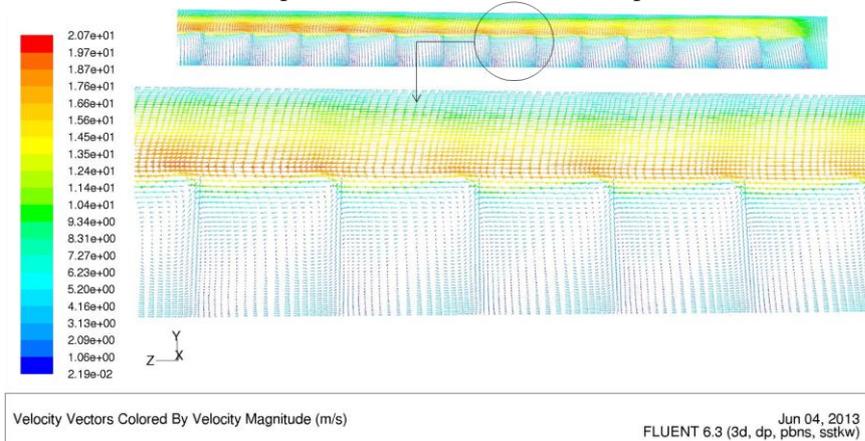


(a) Temperatur ke luar dan kenaikan temperatur  
Gambar 4. Perbandingan antara hasil simulasi numerik dengan eksperimen.

Gambar 5 menunjukkan vektor kecepatan aliran udara di *centerline* dalam saluran dengan plat penyerap bentuk *v-corrugated* yang dihasilkan dari simulasi numerik. Gambar 5a untuk aliran tanpa *obstacle* dan Gambar 5b untuk aliran dengan *obstacle*. Agar sesuai dengan eksperimen, maka kecepatan udara di inlet ditentukan 6,5 m/s untuk studi numerik ini. Untuk aliran tanpa *obstacle*, kecepatan udara semakin tinggi di tengah saluran dan mengecil di daerah dekat plat penyerap maupun plat bawah. Sedang untuk aliran dengan *obstacle*, kecepatan udara tampak lebih tinggi di daerah di atas *obstacle*. Hal ini disebabkan luas penampang saluran mengecil dengan adanya *obstacle*. Jika dibandingkan pada Gambar 5a dan 5b, terlihat bahwa kecepatan udara dekat plat penyerap sebelah atas lebih rendah jika tidak diberi *obstacle*. Ketika sebagian udara mengenai *obstacle*, udara menempel pada *obstacle* dan turun ke bawah dengan kecepatan rendah seperti pada Gambar 6b. Kemudian udara mengenai *obstacle* yang di depannya dan menimbulkan aliran balik. *Obstacle* meningkatkan turbulensi dan mengarahkan aliran menuju plat penyerap yang panas. Hal ini membuat perpindahan kalor konveksi antara udara dengan plat penyerap meningkat, sehingga kenaikan temperatur udara saat mengalir dalam kolektor juga meningkat. Dari Gambar 6a terlihat bahwa tidak terjadi aliran balik dalam aliran tanpa *obstacle*.

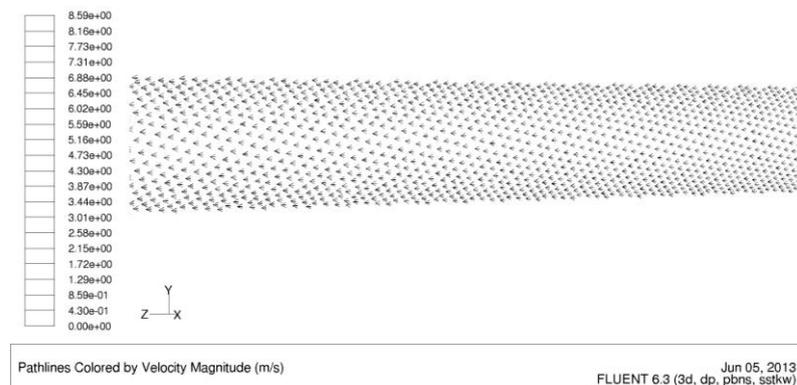


a. Vektor kecepatan udara di *centerline* saat tanpa *obstacle*

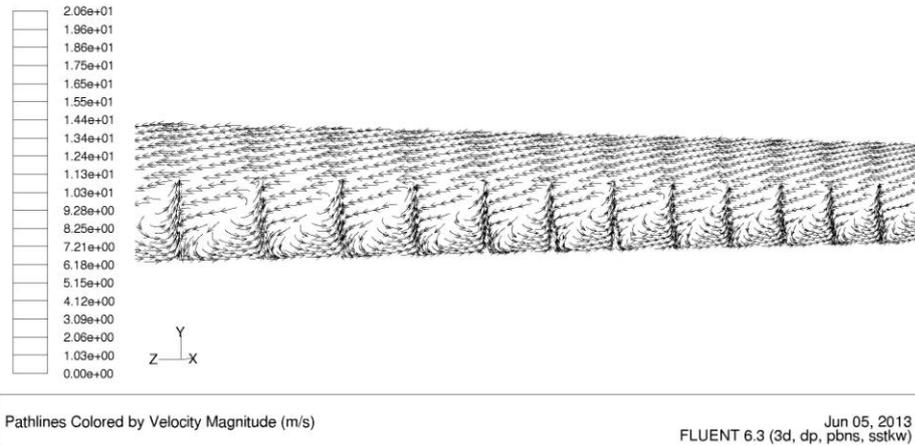


b. Vektor kecepatan udara di *centerline* dengan *obstacle*

Gambar 5. Vektor kecepatan udara di *centerline* dengan kecepatan udara di masukan = 6,5 m/s



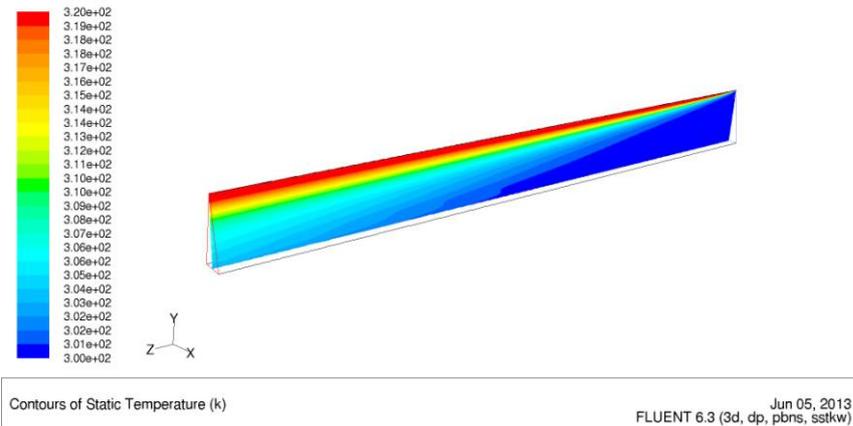
a. Pathline aliran udara di *centerline* saat tanpa *obstacle*



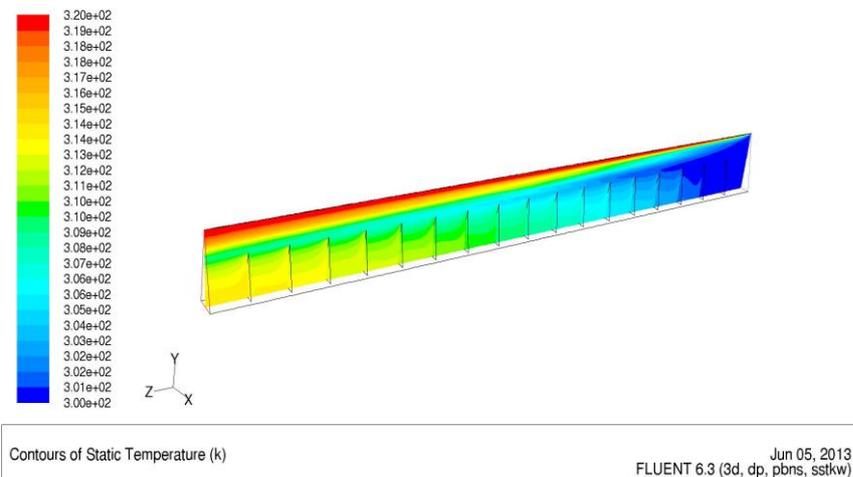
b. Pathline aliran udara di *centerline* dengan *obstacle*

Gambar 6. Pathline aliran udara di *centerline* dengan kecepatan udara di masukan = 6,5 m/s

Peningkatan perpindahan kalor dapat diketahui dari kenaikan temperatur udara. Dari eksperimen, udara mengalami kenaikan temperatur dari 24,5°C menjadi 37,2°C jika tanpa *obstacle* dan dari 24,3°C menjadi 40,5°C jika diberi *obstacle*. Hasil ini bersesuaian dengan simulasi numerik. Temperatur udara ketika melintasi kolektor dengan *obstacle* lebih tinggi daripada jika tanpa *obstacle* seperti pada Gambar 7a dan 7b. Temperatur udara dalam saluran tidak memiliki distribusi yang seragam, udara dekat plat penyerap yang di sebelah atas mempunyai temperatur lebih tinggi dari yang dekat plat bawah. Dengan *obstacle*, terjadinya aliran balik atau vortex membuat temperature udara di antara *obstacle* meningkat seperti pada Gambar 7b. Hal ini membuat udara ke luar kolektor dengan temperatur lebih tinggi dibandingkan aliran tanpa *obstacle*.



a. Distribusi temperatur udara di *centerline* saat tanpa *obstacle*



b. Distribusi temperatur udara di *centerline* saat tanpa *obstacle*

Gambar 7. Distribusi temperatur udara di *centerline* saat temperature plat penyerap 320 K.



## Kesimpulan

Dari eksperimen pada suatu kolektor pemanas udara dengan plat penyerap jenis *v-corrugated*, udara mengalami kenaikan temperatur lebih tinggi dan penurunan tekanan lebih besar saat diberi *obstacle*. Untuk udara dengan kecepatan 6,5 m/s dan intensitas radiasi 430 W/m<sup>2</sup>, udara mengalami kenaikan dari 24,5°C menjadi 37,2°C jika tanpa *obstacle* dan dari 24,3°C menjadi 40,5°C jika diberi *obstacle* serta peningkatan penurunan tekanan dari 94 menjadi 265 Pa dengan penambahan *obstacle*.

Model turbulen yang tepat untuk studi numerik ini adalah SSTKW. Dari studi numerik yang dilakukan, didapatkan bahwa aliran balik di antara *obstacle* dan celah sempit di antara *obstacle* dengan plat penyerap menyebabkan aliran lebih turbulen dan perpindahan kalor konveksi ke udara dari plat penyerap kolektor meningkat.

Hasil studi numerik konsisten dengan hasil eksperimen.

## Penghargaan

Penulis sangat bersyukur untuk hibah penelitian yang diterima dari Kopertis Wilayah VII Jawa Timur, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan dengan kontrak no. 0004/SP2H/PP/K7/KL/II/2012.

## Daftar Pustaka

- [1] I. P. Frank and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed, John Wiley & Sons., 2002.
- [2] A. A. El-Sebaei and H. Al-Snani, "Effect of selective coating on thermal performance of flat plate solar air heaters," *Energy*, vol. 35, p. 1820–1828, 2010.
- [3] A. H. Abdullah, H. Z. Abou-Ziyan and A. A. Ghoneim, "Thermal performance of flat plate solar collector using various arrangements of compound honeycomb," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, p. 3093–3112, 2003.
- [4] A. A. Ghoneim, "Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, p. 95–105, 2005.
- [5] H. Suehrcke, D. Daldehog, J. A. Harris and R. W. Lowe, "Heat transfer across corrugated sheets and honeycomb transparent insulation," *Solar Energy*, vol. 76, p. 351–358, 2004.
- [6] S. Chamoli, R. Chauhan, N. S. Thakur and J. S. Saini, "A review of the performance of double pass solar air heater," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 481–492, 2012.
- [7] P. Naphon, "On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins," *Renewable Energy*, vol. 30, p. 1345–1357, 2005.
- [8] C.-D. Ho, H.-M. Yeh and T.-C. Chen, "Collector efficiency of upward-type double-pass solar air heaters with fins attached," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, p. 49–56, 2011.
- [9] W. Sun, J. Ji and W. He, "Influence of channel depth on the performance of solar air heaters," *Energy*, vol. 35, pp. 4201–4207, 2010.
- [10] Y. Islamoglu and C. Parmaksizoglu, "The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel," *Applied Thermal Engineering* 23, p. 979–987, 2003.
- [11] A. A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, S. M. Shalaby and B. M. Moharram, "Investigation of Thermal Performance of Double-pass-flat and *V-corrugated* Plate Solar Air Heaters," *Energy*, vol. 36, pp. 1076–1086, 2011a.
- [12] P. Naphon, "Effect of wavy plate geometry configurations on the temperature and flow distributions," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, p. 942–946, 2009.
- [13] P. Naphon, "Heat transfer characteristics and pressure drop in channel with *V* corrugated upper and lower plates," *Energy conversion and management* 48, p. 1516 – 1524, 2007.
- [14] W. f. Gao, W. x. Lin, L. Tao Liu and C. f. Xia, "Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters," *Applied Energy* 84, p. 425 – 441, 2007.
- [15] L. Tao, X. L. Wen, F. G. Wen and X. L. Chan, "A Parametric study on the thermal performance of a solar air collector with a *V*-groove absorber," *International Journal of Green Energy*, 4, p. 601–622, 2007.
- [16] M. A. Karim and M. N. A. Hawlader, "Performance Investigation of Flat Plate, *V-corrugated* and *Finned* Air Collector," *Energy* 31, pp. 452–470, 2006.
- [17] A. A. Bashria, N. M. Adam, S. M. Sapuan, M. Daud, H. Omar, H. M. Megat and F. Abas, "Prediction Of The Thermal Performance Of Solar Air Heaters By Internet-Based Mathematical Simulation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, p. 579 – 587, 2004.
- [18] P. Promvongse, "Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° *V-baffles*," *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, p. 835–840, 2010.
- [19] I. Kurtbas and E. Turgut, "Experimental Investigation of Solar Air Heater with Free and Fixed *Fins*: Efficiency and



- Exergy Loss," *Int. J. of Science & Technology*, vol. Volume 1, no. No 1, pp. 75-82., 2006.
- [20] B. S. Romdhane, "The air solar collectors: Comparative study, introduction of *baffles* to favor the heat transfer," *Solar Energy*, vol. 81, p. 139 – 149, 2007.
- [21] A. Abene, V. Dubois, M. Le Ray and A. Oagued, "Study of a solar air flat plate collector: use of *obstacle* and application for the drying of grape," *J. of Food Engineering*, vol. 65, p. 15 – 22, 2004.
- [22] H. Esen, "Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different *obstacle* on absorber plates," *Building and Environment*, vol. 43, p. 1046–1054, 2008.
- [23] E. K. Akpınar and F. Koçyiğit, "Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different *obstacle* on absorber plates," *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, p. 416–421, 2010.
- [24] A. Bekele, M. Mishra and S. Dutta, "Effects of Delta-Shaped *Obstacle* on the Thermal Performance of Solar Air Heater," *Hindawi Publishing Corporation: Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2011, p. 10 pages, 2011.
- [25] G. S. Ratnam and S. Vengadesan, "Performance of two equation turbulence models for prediction of flow and heat transfer over a wall mounted cube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 51, pp. 2834-2846, 2008.
- [26] S. Srikanth, A. K. Dhiman and S. Bijjam, "Confined flow and heat transfer across a triangular cylinder in a channel," *International Journal of Thermal Sciences*, no. 49, pp. 2191-2200, 2010.
- [27] K. Szczepanik, A. Ooi, L. Aye and G. Rosengarten, "A numerical study of heat transfer from a cylinder in cross flow," *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 2004.
- [28] S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 35, pp. 844-852, 2008.
- [29] FLUENT, FLUENT User's Guide, 2003.