

Perbandingan Hasil Simulasi Numerik dengan Hasil Eksperimen untuk Aliran Udara di dalam Saluran dengan Penampang Segitiga dari Suatu Kolektor Surya

Ekadewi Handoyo^{1,2}, Sutrisno¹, Fandi D. Suprianto¹, Djatmiko Ichسانی², Prabowo², Sutardi²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Siwalankerto 121 – 131 Surabaya, 60236

E-mail: ekadewi@petra.ac.id

Abstrak

Salah satu alat penukar kalor yang penting di negara tropis seperti Indonesia adalah kolektor surya yang dapat digunakan untuk memanaskan air atau udara. Problem terbesar yang dihadapi kolektor surya pemanas udara adalah rendahnya koefisien perpindahan kalor konveksi antara permukaan plat penyerap dengan udara yang mengalir di sebelah atas atau bawahnya. Koefisien perpindahan kalor konveksi gas jauh lebih rendah dari cairan, baik untuk konveksi jenis alami ataupun jenis paksa. Hal ini mendorong banyak peneliti berupaya untuk meningkatkan efisiensi kolektor surya pemanas udara. Berbagai upaya yang telah dilakukan peneliti terdahulu adalah menggunakan plat absorber yang dicat hitam atau diberi lapisan yang mempunyai *absorptance* tinggi dan *emittance* rendah, memasang *honeycomb* untuk mengurangi kalor yang hilang ke lingkungan, membuat aliran menjadi dua laluan, meningkatkan koefisien konveksi udara dengan plat *absorber* dengan mempersempit saluran sehingga aliran menjadi turbulen, dan menggunakan *v-corrugated absorber plate* sehingga membentuk saluran dengan penampang segitiga.

Kolektor surya pemanas udara yang menggunakan saluran dengan penampang segitiga mempunyai kinerja lebih baik dibandingkan dengan saluran plat datar. Namun, belum ada simulasi numerik untuk aliran dalam saluran dengan penampang segitiga ini. Oleh karenanya, makalah ini akan membahas simulasi numerik aliran tersebut dan kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen. Simulasi diawali dengan pembuatan *mesh* dan evaluasi *grid independency*. Dengan konfigurasi *mesh* yang terpilih, tahap selanjutnya adalah memilih model *viscous* yang tepat untuk masalah yang diteliti. Model *viscous steady state* yang dibandingkan adalah SKE, RNGKE, RKE, SKW, dan STTKW. Pemilihan model dilakukan dengan mengacu pada hasil eksperimen.

Mesh dengan jumlah node 540.000 dan jumlah cell 566.401 merupakan konfigurasi yang terbaik dan memenuhi *grid independency*, sehingga konfigurasi ini yang digunakan dalam studi numerik berikutnya. Sedangkan model *viscous* yang memberikan hasil simulasi paling mendekati hasil eksperimen terjadi pada model *viscous RKE*. Perbedaan hasil simulasi numerik terhadap hasil eksperimen untuk kenaikan temperatur udara mencapai 15.56% dan untuk penurunan tekanan mencapai 17.15%.

Keywords: saluran segitiga, kolektor surya, pemanas udara, simulasi numerik, model *viscous*.

Pendahuluan

Metode numerik CFD merupakan metode yang sering digunakan untuk memprediksi aliran yang terjadi pada semua tempat, termasuk daerah yang sulit diamati. Metode ini semakin populer pada awal tahun 2000 seiring dengan berkembangnya teknologi komputer. Metode ini dilakukan dengan cara menyelesaikan persamaan kekekalan massa, kekekalan energy, persamaan Navier Stokes, dan persamaan difusi massa dengan metode *finite difference* [1]. Metode tersebut membutuhkan kalkulasi perhitungan dengan jumlah yang sangat besar sehingga membutuhkan perangkat computer dengan spesifikasi yang tinggi, khususnya pada bagian *Central Processing Unit* prosesor dan memori komputer.

Simulasi numerik umumnya memberikan hasil yang berbeda dengan yang didapat dari eksperimen. Hal itu disebabkan adanya ketidaksesuaian antara kondisi batas pada simulasi numerik dengan eksperimen. Perbedaan tersebut dikenal sebagai penyimpangan atau *error* atau ketidak-pastian (*uncertainty*). Salah satu metode untuk mengurangi ketidakpastian numerik awalnya ditemukan oleh Richardson dan dikenal dengan metode Richardson extrapolasi. Kemudian dikembangkan oleh Roache dengan metode Grid Convergence Index (GBI). Sedangkan komunitas pertama kali yang aktif dalam menganalisa terjadi ketidak pastian hasil numerik adalah Stanford Olympics. Pernyataan pertama kali dilakukan oleh Roache [2] pada jurnal ASME. Validasi terhadap pemilihan parameter yang dipakai pada metode numerik perlu dilakukan terhadap hasil eksperimen sebelum hasil metode numerik tersebut dievaluasi atau dipergunakan.

Hal ini untuk memastikan bahwa hasil metode numerik tersebut valid untuk menjelaskan perilaku aliran dan perpindahan kalor secara detail dan kompleks yang sangat sulit didapat dengan eksperimen sebab keterbatasan alat ukur dan alat perekam visualisasi.

Aliran fluida dalam saluran banyak digunakan dalam suatu alat penukar kalor. Salah satu alat penukar kalor yang penting di negara tropis adalah kolektor surya yang dapat digunakan untuk pemanas air dan udara. Problem terbesar yang dihadapi kolektor surya pemanas udara adalah rendahnya koefisien perpindahan kalor konveksi antara permukaan plat penyerap dengan udara yang mengalir di sebelah atas atau bawahnya. Menurut [3], koefisien perpindahan kalor konveksi gas jauh lebih rendah dari cairan, baik untuk konveksi jenis alami ataupun jenis paksa. Hal ini mendorong banyak peneliti berupaya untuk meningkatkan efisiensi 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 [4], memasang honeycomb untuk mengurangi kalor yang hilang ke lingkungan [5], [6], [7], membuat aliran menjadi dua laluan [8], [9], [10], meningkatkan koefisien konveksi udara dengan plat penyerap dengan mempersempit saluran sehingga aliran menjadi turbulen [11], [12], dan menggunakan saluran dari plat bergelombang atau saluran berpenampang segitiga (*v-corrugated absorber plate*) [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

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 *v-corrugated* yang membentuk saluran berpenampang segitiga. El-Sebaai et al. [13] menyatakan bahwa kolektor udara dengan plat penyerap jenis *v-corrugated* mempunyai efisiensi 11 – 14% lebih tinggi dari kolektor dengan plat datar. Kedua kolektor yang dibandingkan merupakan kolektor dengan dua laluan. Dari simulasi numerik yang dilakukan Naphon [9], didapatkan bahwa ujung yang lancip dari plat bergelombang memberikan peningkatan perpindahan kalor yang berarti. Dari studi eksperimen, Naphon [15] 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. [16] dan Tao et al. [17] menemukan bahwa pemanas udara tipe

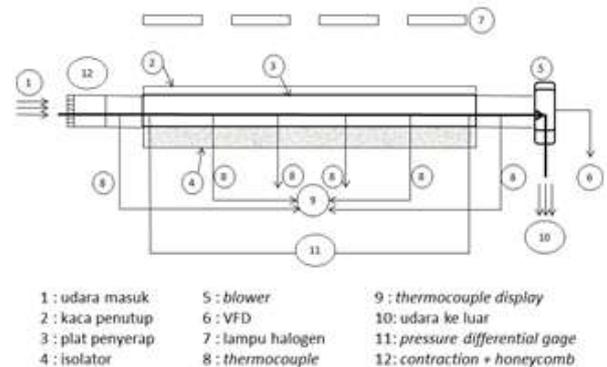
cross-corrugated mempunyai kinerja termal lebih baik dari tipe plat datar. Menurut Karim & Hawlader [18], kolektor tipe *v-corrugated* lebih efisien 10 – 15% dari plat datar jika digunakan satu laluan dan lebih efisien 5 – 11% jika digunakan dua laluan. Dua laluan memberi peningkatan efisiensi paling tinggi jika digunakan di kolektor plat datar dan paling sedikit di kolektor tipe *v-corrugated*. Bashria et al. [19] menemukan bahwa kolektor tipe *v-corrugated* memiliki efisiensi lebih tinggi dari plat datar baik dari simulasi matematis maupun dari eksperimen.

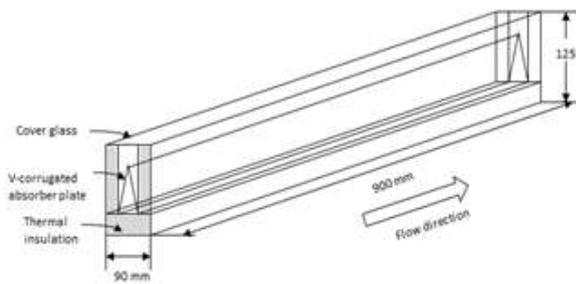
Dari pemaparan di atas, terlihat bahwa saluran berpenampang segitiga memberikan perpindahan kalor konveksi lebih tinggi daripada saluran plat datar. Saluran berpenampang segitiga ini nantinya dapat digunakan dalam suatu kolektor surya pemanas udara. Oleh karenanya suatu simulasi numerik untuk aliran dalam saluran ini akan dilakukan dan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Perbandingan meliputi temperatur di beberapa lokasi dan penurunan tekanan aliran udara dalam saluran.

Peralatan eksperimen yang digunakan

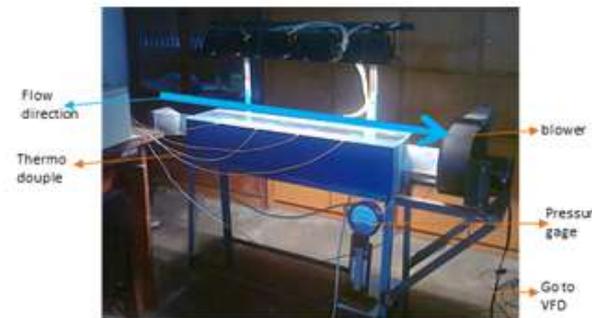
Eksperimen dilakukan di dalam ruangan agar kondisi lingkungan yang meliputi kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, dan temperatur udara sekitar selama eksperimen dapat dipertahankan sama. Eksperimen menggunakan kolektor surya pemanas udara dalam skala model. Skema dan foto peralatan yang digunakan selama eksperimen seperti pada Gambar 1.

Radiasi matahari digantikan oleh 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 potensio terpisah, sehingga radiasi yang diterima di seluruh plat penyerap dapat diatur agar seragam dengan nilai tertentu. Intensitas radiasi selama eksperimen diatur antara 390 hingga 650 W/m^2 .





Gambar 1. (a) Skema peralatan eksperimen.



Gambar 1. (b) Foto peralatan eksperimen dari model kolektor surya pemanas udara

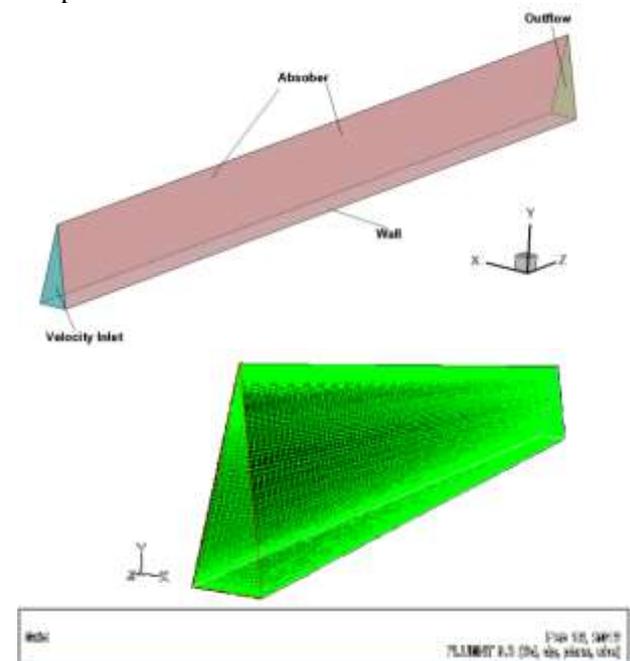
Eksperimen dilakukan dalam ruangan yang dilengkapi dengan mesin pengkondisi udara (*Air Conditioner*) sehingga temperatur, kelembaban, dan kecepatan angin dapat dikendalikan. Kolektor yang dipakai dilengkapi dengan termokopel tipe T dengan ketelitian 0.1°C untuk mengukur temperatur udara masuk dan ke luar, temperatur di empat posisi (yaitu $y = 1\text{ cm}$, 2 cm , 3 cm , dan 4 cm dari plat bawah) pada garis *centerline* di jarak $z = 32\text{ cm}$ dan $z = 57\text{ cm}$ dari masukan, temperatur plat penyerap (pada empat lokasi berbeda) dan temperatur udara sekitar.

Penurunan tekanan antara masukan dan keluaran udara saat mengalir dalam kolektor diukur dengan *Magnehelic differential pressure gage* dengan ketelitian 2 Pa . Suatu *blower* sentrifugal ($1000\text{ m}^3/\text{h}$, 580 Pa , 0.2 kW , 380 Volt input) digunakan untuk mengalirkan udara melalui saluran. Laju aliran udara diukur di keluaran dengan anemometer digital dengan ketelitian 0.1 m/s . Laju udara yang mengalir dalam saluran diatur dengan suatu *variable-frequency drive* (VFD). Eksperimen dilakukan dengan laju aliran udara 3.1 m/s .

Pengaturan Simulasi Numerik

Langkah awal dalam simulasi numerik adalah membuat domain dan merancang *mesh* yang dilanjutkan dengan evaluasi *grid independency*. Domain CFD dan *mesh* yang digunakan dalam

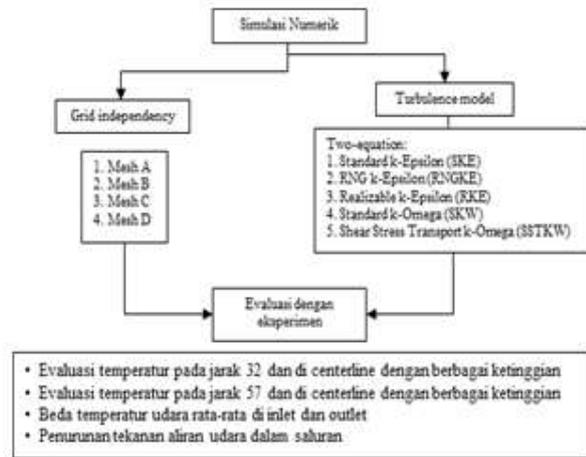
simulasi seperti pada Gambar 2. Pembuatan *mesh* dengan software Gambit 2.4.6. Plat penyerap dikondisikan pada temperatur konstan sebesar 340 K . Udara mengalir dalam saluran dengan kecepatan 3.1 m/s , temperatur 300 K dan intensitas turbulensi 5% . Pada sisi bawah saluran dinyatakan sebagai *wall* yang terisolasi sempurna.



Gambar 2. Domain dan rancangan *mesh* yang digunakan dalam simulasi numerik.

Dengan menggunakan software CFD komersial FLUENT 6.3.26, simulasi numerik dilakukan untuk *mesh* yang telah dirancang. Simulasi dilakukan untuk beberapa rancangan *mesh* agar *grid independency* dapat dievaluasi untuk menentukan jumlah *node* atau *grid* yang digunakan. Dengan konfigurasi *mesh* yang terpilih, tahap berikut dalam simulasi numerik adalah penentuan model 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). Hasil semua model viscous tersebut dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini. Sedangkan *discretization equation* untuk semuanya dipilih *first order upwind discretization* dan hubungan perhitungan kecepatan dan tekanan menggunakan algoritma SIMPLEC. Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Sutrisno [20], dinyatakan bahwa *discretization* dan hubungan tekanan dan momentum merupakan faktor yang hanya mempengaruhi konvergensi saja, bukan hasil dari simulasi. Dengan demikian pada penelitian ini tidak dilakukan evaluasi tentang perbedaan parameter tersebut. Pada Gambar 3 dipaparkan metodologi yang digunakan dalam simulasi numerik ini. Evaluasi dilakukan dengan

mempbandingkan temperatur hasil numerik dan hasil eksperimen di *center line* dengan berbagai ketinggian ($y = 1 \text{ cm}$, 2 cm , 3 cm , dan 4 cm dari plat bawah) pada jarak $z = 32 \text{ cm}$ dan $z = 57 \text{ cm}$ dari masukan. Kemudian dilanjutkan dengan evaluasi perbedaan kenaikan temperatur masuk dan ke luar serta penurunan tekanan udara selama mengalir dalam saluran.

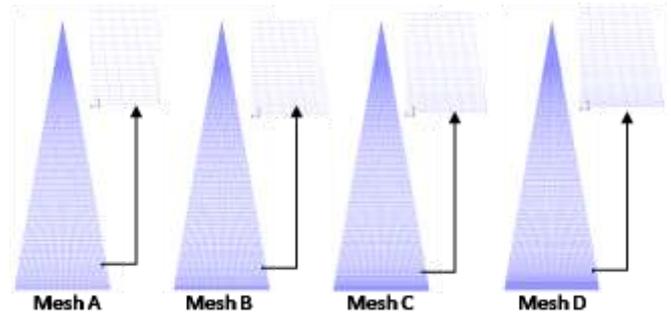


Gambar 3. Metodologi simulasi numerik penelitian ini.

Hasil dan Diskusi

Setelah melakukan eksperimen dan simulasi numerik, didapat hal-hal berikut.

Evaluasi *grid independency* ini dilakukan dengan menggunakan berbagai variasi *mesh* mulai dari renggang hingga semakin rapat. Keunggulan dari *mesh* yang rapat adalah mendapatkan informasi yang lebih detail. Namun hal tersebut membutuhkan waktu untuk proses iterasi yang semakin lama dan alat komputasi dengan kemampuan lebih tinggi, sehingga menyebabkan operasional iterasinya semakin mahal. Selain itu dampak jumlah *mesh* yang berlebihan menyebabkan konvergensi sulit terjadi. Untuk mengantisipasi hal ini maka dibutuhkan strategi *mesh* yang baik, yaitu dengan cara memperbanyak jumlah *mesh* pada daerah dekat dinding dan merenggangkan *mesh* pada daerah yang jauh dari dinding. Hal ini bertujuan untuk menghemat penggunaan jumlah *mesh* sehingga proses simulasi numerik lebih cepat, tetapi hasil simulasi memiliki informasi yang lebih detail di daerah yang diperlukan. Pada Gambar 4 dipaparkan bentuk *mesh* yang digunakan pada saluran internal yang melintasi penampang segitiga, dimana aliran yang sangat kritis terjadi pada bagian *corner* sehingga pada bagian itu konsentrasi jumlah *mesh* dari *Mesh A* ke *Mesh D* akan semakin rapat.



Gambar 4. Variasi rancangan *mesh* yang diuji

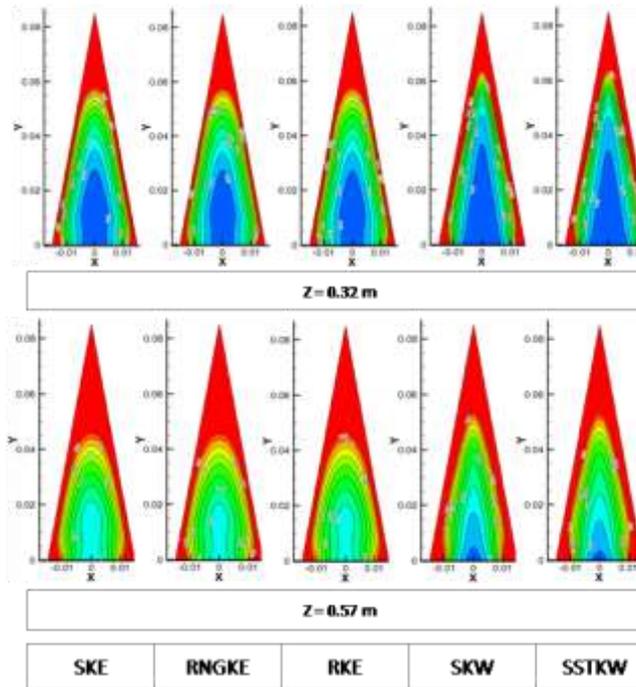
Hasil simulasi dengan beberapa variasi *mesh* dipaparkan pada Tabel 1 untuk model viscous RKE. Semakin banyak jumlah *cell* dan *node* yang dipakai atau semakin rapat *mesh* yang digunakan, waktu untuk satu kali iterasi semakin lama. Dengan demikian, waktu yang diperlukan untuk simulasi dengan *mesh D* paling lama. Dari Tabel 1 terlihat bahwa terdapat perbedaan hasil simulasi numerik untuk temperatur dan penurunan tekanan ketika *mesh* yang digunakan berbeda. Hasil simulasi dengan *mesh B* berbeda dibandingkan ketika menggunakan *mesh A*. Demikian pula ketika menggunakan *mesh C* dan *mesh D*. Namun, hasil simulasi *mesh D* tidak banyak berbeda dengan hasil *mesh C*. Perbedaan kenaikan temperatur udara hasil simulasi dengan *mesh A* ke *mesh B* adalah 0.75%, dari *mesh B* ke *C* adalah 0.70%, dan dari *C* ke *D* adalah 0.47%. Sedang perbedaan penurunan tekanan dari *mesh A* ke *B*, *mesh B* ke *C*, dan *mesh C* ke *D* adalah: 2.0%, 0.42%, dan 0.55%. Terlihat *mesh D* tidak memberikan perbedaan yang cukup besar dari hasil *mesh C*. Oleh karenanya, *mesh C* merupakan konfigurasi terbaik untuk digunakan dalam proses selanjutnya.

Tabel 1. Evaluasi *Grid Independency* dengan model viscous RKE

<i>Mesh</i>	Cells	Nodes	$\Delta T(K)$	$\Delta P(Pa)$	Iterasi
<i>Mesh A</i>	360,000	379,161	21.40	12.260	1329
<i>Mesh B</i>	450,000	472,781	21.56	12.502	1063
<i>Mesh C</i>	540,000	566,401	21.41	12.449	1168
<i>Mesh D</i>	630,000	660,021	21.31	12.381	1403

Dari simulasi numerik, kontur distribusi temperatur di penampang saluran pada jarak 0.32 m dan 0.57 m dari masukan dapat dilihat pada Gambar 5. Distribusi temperatur yang dihasilkan dengan model viscous k-epsilon berbeda cukup signifikan dibandingkan model k-omega. Sebaran temperatur udara di sekitar penyerap pada ketiga model viscous k-epsilon, yaitu SKE, RNGKE, dan RKE mendekati sama baik pada jarak 0.32 m maupun 0.57 m dari masukan. Namun hasil simulasi model SKE pada posisi *centerline* memiliki sebaran temperatur rendah yang lebih luas dibandingkan dengan RNGKE dan RKE. Hal yang sama juga terjadi pada model k-omega, dimana sebaran temperatur rendah pada *centerline* SKW lebih besar dibandingkan dengan

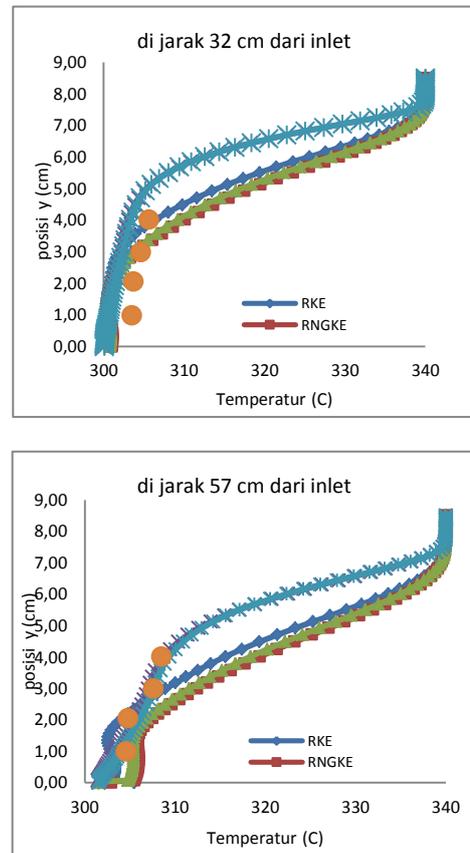
SSTKW. Evaluasi yang dilakukan ini belum menunjukkan perbedaan yang berarti sehingga dilanjutkan dengan evaluasi distribusi temperatur di sepanjang garis *centerline* di empat posisi ketinggian pada jarak $z = 0.32$ m dan $z = 0.57$ m dari masukan.



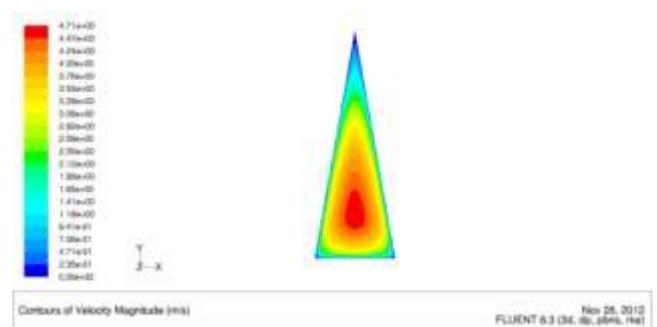
Gambar 5. Kontur temperatur pada saluran berpenampang segitiga.

Pada Gambar 6 ditunjukkan grafik sebaran temperatur di sepanjang sumbu y pada *centerline* setiap permukaan evaluasi. Pada kedua grafik di Gambar 6 terlihat bahwa baik pada jarak yang dekat dengan inlet (0.32 m dari masukan) maupun agak jauh (0.57 m dari masukan) temperatur udara semakin tinggi di y yang lebih tinggi dan mencapai harga maksimum ketika bersinggungan dengan plat penyerap yang panas. Temperatur udara yang lebih dekat dengan masukan (32 cm dari inlet) terlihat lebih rendah pada ketinggian, y , yang sama. Hal ini sesuai dengan natur perpindahan panas. Hasil simulasi menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan. Data pengukuran pada eksperimen hanya pada posisi y tertentu. Hal ini disebabkan keterbatasan peralatan dan kesulitan posisi penempatan alat ukur. Prediksi metode numerik yang paling mendekati hasil eksperimen adalah model viscous SKW atau SSTKW dibandingkan model yang lainnya. Pada Gambar 6 untuk jarak 0.57 m dari masukan, terlihat bahwa hasil simulasi numerik dengan model RKE memiliki kecenderungan agak membengkok di posisi tinggi $y = 1 - 2$ cm yang bersesuaian dengan hasil eksperimen. Kecenderungan membengkok ini berarti

temperatur udara di ketinggian $1 - 2$ cm lebih rendah dari di bawah atau di atasnya. Hal ini kemungkinan karena aliran udara di ketinggian $1 - 2$ cm mempunyai kecepatan tertinggi seperti terlihat pada Gambar 7. Kecepatan aliran udara yang tinggi membuat temperatur di tempat tersebut menjadi rendah.



Gambar 6. Grafik distribusi temperatur di *centerline*.



Gambar 7. Distribusi kecepatan pada jarak 0.57 m dari masukan pada *centerline*

Untuk evaluasi kuantitatif dilakukan dengan membandingkan perbedaan temperatur dan tekanan yang terjadi pada saluran masuk dan saluran keluar, kemudian dibandingkan dengan eksperimen. Hasilnya seperti pada Tabel 2 yang menunjukkan bahwa kesalahan prediksi temperatur terkecil diperoleh dengan menggunakan model viscous SST-KW atau SKW. Kesalahan hasil simulasi dengan eksperimen pada kondisi ini sebesar 7.51%. Namun, kesalahan prediksi penurunan tekanan dengan model ini sangat besar, yaitu mencapai 33%.

Sedangkan untuk evaluasi penurunan tekanan yang terjadi pada saluran, model viscous SKE, RNG-KE memberikan persentase kesalahan yang lebih rendah dibandingkan dengan semua model K-Omega yaitu hanya berkisar 10%. Namun, kesalahan dalam prediksi temperatur sangat tinggi, yaitu berkisar 22 – 25%. Model RKE memberikan kesalahan yang menengah besarnya, baik untuk kesalahan dalam memprediksi temperatur, yaitu 15,56% dan penurunan tekanan, yaitu 17,15%. Dengan demikian, model viscous RKE dapat digunakan untuk prediksi dan simulasi numerik aliran dalam kolektor surya pemanas udara dengan plat penyerap jenis *v-corrugated*.

Tabel 2. Perubahan temperatur dan tekanan pada saluran berpenampang segitiga.

Model Viscous	T _{in} , K	T _{out} , T	ΔT, K	Error %	P _{in} , Pa	P _{out} , Pa	ΔP, Pa	Error %
SKE	300.67	323.35	22.68	22.59	0.07	-13.24	13.31	10.03
RNG-KE	300.67	323.92	23.25	25.68	0.07	-13.11	13.18	10.93
RKE	300.67	322.06	21.39	15.56	0.06	-12.20	12.26	17.15
SKW	300.67	320.57	19.90	7.56	-0.03	-9.94	9.91	33.42
SST-KW	300.67	320.56	19.89	7.51	-0.03	-9.90	9.86	33.33
eksperimen	298.90	317.40	18.50	-	-	-	14.8	-

Kesimpulan

Dari perbandingan antara hasil simulasi numerik dengan hasil eksperimen pada aliran internal dalam saluran berpenampang segitiga didapatkan bahwa:

1. *Mesh* yang paling baik digunakan adalah *Mesh C* dengan jumlah node = 540000 dan jumlah cell = 566401.
2. Model viscous terbaik untuk memprediksi temperatur udara pada penggunaan dua persamaan adalah model viscous SST-KW dan untuk penurunan tekanan adalah model SKE.
3. Model viscous yang tepat digunakan untuk prediksi temperatur dan penurunan tekanan adalah RKE. Dengan model RKE, perbedaan hasil simulasi numerik dengan hasil eksperimen untuk kenaikan temperatur udara yang mengalir dalam saluran berpenampang segitiga mencapai 15.56% dan untuk penurunan tekanan mencapai 17.15%.

Ucapan Terima kasih

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.

Nomenklatur

T temperatur (°C)
P tekanan (Pa atau Nm⁻²)
Subsripts
in masuk
out ke luar

Referensi

- [1] H. K. Versteeg and W. Malalsekera, An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, Malaysia: Longman Scientific & Technical ISBN 0-582-21884-5, 1995.
- [2] P. J. Roache, K. N. Ghia and F. White, "Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy," *J. Fluids Engineering*, pp. 108, 2, 1986.
- [3] I. P. Frank and D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed, John Wiley & Sons., 2002.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 penyerap," *International Journal of Green Energy*, 4, p. 601–622, 2007.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Sutrisno, H. Sasongko and W. A. Widodo, "Evaluation of the uncertainty for flow around a bluff rectangular," in *Annual Engineering Seminar*, Yogyakarta, 2012.