

PENGARUH BENTUK *TURBULATORS* TERHADAP EFISIENSI SOLAR AIR HEATER DENGAN PENAMBAHAN *SENSIBLE HEAT STORAGE MATERIALS*

Faradin. A¹, Intan. H^{2,*}, Mahros. D³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jalan. Kalimantan No. 37, Kampus Tegalboto, Jember, Jawa Timur Universitas, 68121

*Email: intanhardiatama@gmail.com

Diterima: 23 November 2022

Direvisi: 25 Desember 2022

Disetujui: 31 Januari 2023

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara khatulistiwa. Hal tersebut menjadikan Indonesia memiliki sumber energi matahari di Indonesia sangat melimpah. Salah satu alat yang dapat dikembangkan menggunakan energi matahari adalah *solar air heater*. Pada aplikasinya *solar air heater* memiliki kelemahan salah satunya adalah koefisien perpindahan panas yang rendah. Pada penelitian ini digunakan *turbulators* dan *sensible heat storage materials* guna meningkatkan koefisien perpindahan panasnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi bentuk *turbulators* dan jarak setiap *turbulator*-nya yaitu 2,5 cm dan 3,5 cm terhadap efisiensi *solar air heater*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga lampu halogen sebagai pengganti sinar radiasi matahari. Sinar radiasi dikendalikan dengan *dimmer* dan dilakukan monitoring melalui multimeter digital. Nilai intensitas radiasi yang digunakan adalah 577 W/m²; 675,6 W/m²; 730,2 W/m²; dan 881,2 W/m². *Blower* digunakan sebagai konveksi paksa dengan laju aliran massanya 0,0083 kg/s. Hasil penelitian menunjukkan bentuk *crimp turbulators* mampu meningkatkan efisiensi dua kali lipat lebih besar dibandingkan bentuk *staggered turbulators* yaitu 25% dan 50% masing-masing pada *crimp turbulators* dan *staggered turbulators*. Penambahan jarak *turbulator* pada *crimp turbulators* mampu meningkatkan efisiensinya sebesar 5%. Namun penambahan jarak *turbulator* pada *staggered turbulators* menurunkan efisiensinya sebesar 5%. Hal ini membuktikan bahwa perlu adanya pengaturan jarak agar mencapai kinerja *solar air heater* yang optimal.

Kata kunci: *absorber, turbulators, solar air heater, reattachment point.*

ABSTRACT

Indonesia is an equatorial country. This makes Indonesia has a very abundant source of solar energy in Indonesia. One of the tools that can be developed using solar energy is solar air heaters. In its application, solar air heaters have weaknesses, one of which is the low heat transfer coefficient. In this study a reasonable amount of turbulator and heat storage material is used to increase the proportion of heat research. The purpose of this research is to study the variation of turbulator variations and the distance of each turbulator that is 2.5 cm and 3.5 cm to the efficiency of solar air heaters. Tests carried out using three halogen lamps as solar radiation. The radiation beam is

controlled with a dimmer and monitored via a digital multimeter. The value of the intensity of radiation used is 577 W/m^2 ; 675.6 W/m^2 ; 730.2 W/m^2 ; and 881.2 W/m^2 . Blowers are used as forced convection with mass flow rates of 0.0083 kg/s . The results show that the shape of the crimp turbulator can increase efficiency twice as much as the staggered turbulator, which is 25% and 50%, respectively for each crimp turbulator and staggered turbulator. The addition of the turbulator distance in the crimp turbulator can increase efficiency by 5%. However, the magnitude of the turbulator in the staggered turbulator decreases efficiency by 5%. This proves the importance of spacing so that it can achieve optimal results.

Keywords: absorber, turbulators, solar air heater, reattachment point.

PENDAHULUAN

Menyikapi cadangan energi yang semakin menipis, menghemat energi merupakan langkah cerdas. Namun, peningkatan konsumsi energi sebagai indikator kemajuan ekonomi Indonesia tetap harus difasilitasi dengan keberadaan sumber energi yang mendukung. Menghadapi tantangan tersebut, negara kita perlu memperluas pemanfaatan sumber energi lain untuk menggantikan pemakaian energi minyak dan fosil. Salah satu cara efektif yang dapat dikembangkan untuk mengatasi masalah krisis energi yang terjadi adalah dengan menggunakan energi terbarukan. Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan seperti tenaga surya, tenaga angin, panas bumi, dan lainnya. Salah satu peralatan yang dapat dikembangkan dengan menggunakan sumber energi matahari adalah pemanas udara surya atau *solar air heater*. *Solar air heater* (SAH) merupakan sebuah alat penukar kalor yang berfungsi untuk menaikkan temperatur udara yang masuk ke dalam kolektor dengan memanfaatkan energi panas dari matahari (Naili dkk., 2017).

Pada penerapannya, umumnya SAH menggunakan *smooth duct* (pelat halus dan datar). Namun pada aplikasinya terdapat permasalahan, diantaranya efisiensi termal yang rendah. Salah satu penyebabnya adalah perpindahan panas konveksi antara pelat penyerap dengan aliran udara yang rendah. Koefisien konveksi yang rendah bisa disebabkan karena kerugian panas ke udara lingkungan. Hal ini bisa ditingkatkan dengan meningkatkan intensitas turbulensi dengan memecah *laminar sublayer*. Menciptakan aliran turbulen dalam SAH dengan kekasaran buatan telah terbukti kemampuannya untuk meningkatkan performa *thermo-hydraulic* sehingga nilai perpindahan panas meningkat.

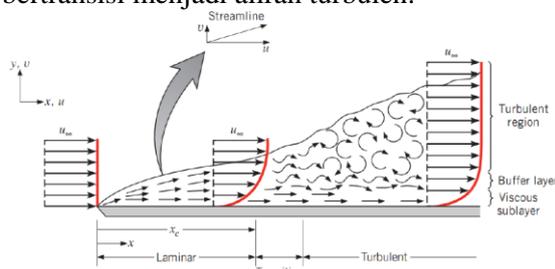
Beragam geometri dari kekasaran buatan diteliti, mulai dari perbedaan bentuk *ribs* seperti *thin ribs* (Sharma dkk., 2017), *multiple V-shaped baffles and ribs* (Jalil dkk., 2018), dan *rectangular ribs* (Komolafe dkk., 2019). Selain itu, dengan penambahan *fin* pada pelat penyerap untuk memperluas area perpindahan panas juga dapat meningkatkan efisiensi SAH (Hosseini dkk., 2017). Upaya pasif yang dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai perpindahan panas adalah dengan penggunaan *turbulators* pada permukaan pelat penyerap. Penelitian mengenai pengaruh penambahan *turbulators*, telah dilakukan oleh para ilmuwan dengan cara menciptakan alat-alat uji yang memodelkan saluran pemanas udara surya. Abdullah dkk., (2018) melakukan penelitian dengan memberikan *turbulators* pada pelat penyerap SAH yang bertujuan memperluas area perpindahan panas dan menciptakan aliran turbulen. Hasilnya, efisiensi meningkat senilai 20% daripada tanpa penggunaan *turbulators*.

Turbulators harus diatur dan dijaga jaraknya sebanding dengan dimensi saluran. Hal ini bertujuan untuk menghindari kerugian gesekan yang dapat menyebabkan terganggunya aliran sehingga menaikkan daya perpompaan. Selain itu, penambahan penyimpanan energi serta warna pelat penyerap juga menjadi parameter untuk peningkatan performa SAH. Penggunaan *heat storage material* yang sederhana dan mudah diaplikasikan dengan batu kerikil dapat meningkatkan keandalan untuk menghasilkan keluaran sistem yang optimal (ShazibUddin dkk., 2016).

Turbulator pada dasarnya adalah teknik untuk meningkatkan perpindahan panas secara pasif sehingga kinerja termohidrolik dari pemanas surya dapat ditingkatkan. Penggunaan *turbulator* untuk meningkatkan perpindahan panas pada konveksi paksa yang kemudian

harus membutuhkan perubahan aliran pada permukaan perpindahan panas menjadi turbulen. Namun, energi untuk membuat turbulensi berasal dari kipas atau *blower* dan bila terjadi turbulensi berlebihan maka daya yang dibutuhkan juga harus tinggi untuk membuat aliran udara melalui saluran. Oleh karena itu, diharapkan bahwa turbulensi harus dibuat di daerah yang sangat dekat dengan permukaan perpindahan panas yaitu daerah *laminar sublayer*.

Laminar sublayer adalah kondisi dimana lapis batas kecepatan fluida berupa aliran laminar. Pada Gambar 1. ditunjukkan profil kecepatan daerah laminar dan turbulen. Awalnya aliran dalam lapis batas yang terjadi adalah sepenuhnya laminar. Namun semakin jauh jarak aliran fluida, maka ketebalan lapis batas berkembang dari tepi depan (*leading edge*) dan pada satu jarak kritis x_c . Efek inersia menjadi cukup besar dibandingkan dengan aksi redaman kekentalan. Sehingga gangguan kecil dalam aliran mulai berkembang. Setelah gangguan ini menjadi kuat, keteraturan aliran viskos terganggu kemudian aliran laminar bertransisi menjadi aliran turbulen.



Gambar 1. Profil kecepatan daerah laminar dan turbulen (Incropera, 2011)

Aliran turbulen pada fluida di dalam *solar air heater* memiliki berbagai manfaat untuk meningkatkan efisiensinya. Aliran fluida yang turbulen dapat menahan fluida kerja lebih lama di dalam *solar air heater* sehingga penyerapan panas oleh fluida kerja dapat menjadi optimal. Aliran fluida tersebut juga akan mendistribusikan suhunya semakin rata pada seluruh bagian *solar air heater*. Hal tersebut dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas *solar air heater*. Aliran fluida yang lebih turbulen juga dapat meningkatkan laju ekstraksi panas dari pelat *absorber* yang menerima panas radiasi. Hal ini mengakibatkan tahanan termal bahan tersebut akan berkurang sehingga panas pada pelat *absorber* akan dilepaskan di lingkungan

sekitarnya dan terserap oleh fluida kerjanya. Meningkatnya koefisien perpindahan panas pada *solar air heater* akan meningkatkan juga nilai efisiensinya. Nilai efisiensi yang lebih tinggi menunjukkan unjuk kerja *solar air heater* yang optimal.

Penggunaan material penyimpan panas dapat meningkatkan perpindahan panas serta mempertahankannya. Terdapat dua jenis sistem penyimpanan panas pada pemanas udara surya yaitu *phase change heat storage material* dan *sensible heat storage materials*. Pada penelitian ini akan digunakan sistem penyimpanan panas yaitu *sensible heat storage materials*.

Sensible heat storage materials adalah sistem penyimpan panas pada *solar air heater* dengan menggunakan material *thermal mass*. Material *thermal mass* adalah material yang memiliki sifat *density* dan *specific heat capacity* yang tinggi (Laela, 2015). Material *thermal mass* pada saat terdapat radiasi matahari akan menyimpan kalor dari radiasi matahari dan akan melepaskannya ketika sudah tidak terdapat lagi radiasi matahari. Parameter yang perlu diperhatikan dalam pemilihan materialnya adalah pada kerapatan massa (*density*) dan ketebalan material. Semakin tinggi kerapatan massa material maka semakin mudah material tersebut dalam menyimpan panas. Semakin tebal material maka semakin lama kemampuan penyimpanan panas material tersebut tinggi (Laela, 2015).

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh bentuk turbulators pada pelat absorber terhadap efisiensi solar air heater, mengetahui pengaruh jarak pada setiap spesimen turbulators pada pelat absorber terhadap efisiensi solar air heater, dan mengetahui perbandingan efisiensi solar air heater dengan bentuk turbulators staggered dan crimp.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu metode pengamatan secara langsung. Metode ini digunakan untuk membandingkan efisiensi dari solar air heater menggunakan bentuk turbulators staggered dengan crimp. Jarak setiap *turbulators* pada masing-masing bentuk *turbulators* juga diteliti dalam penelitian ini. Sebagai tambahannya digunakan *sensible heat storage materials* sebagai

material penyimpan panas dan juga berguna untuk meningkatkan kalor dalam *solar air heater*. Penelitian dilakukan di dalam ruangan Berikut spesifikasi bahan yang digunakan dalam penelitian ini sesuai yang ditunjukkan Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi bahan

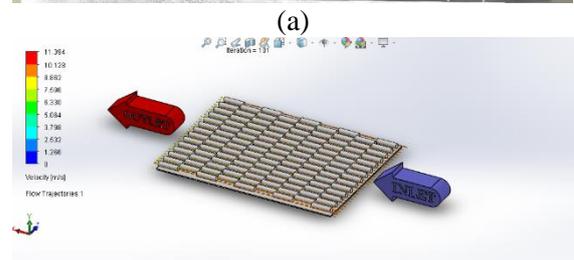
Bahan	Spesifikasi
Rangka	
bahan	triplek
tebal	1,8 cm
Insulasi	
bahan	styrofoam
tebal	2 cm
<i>Sensible heat storage materials</i>	
bahan	batu alam lava
ukuran	3-5 cm
<i>Absorber</i>	
bahan	aluminium
tebal	0,5 cm
ukuran	91,0 x 71,0 cm
<i>Turbulators</i>	
bahan	aluminium
tebal	0,5 mm
diameter	2,5 cm
<i>Cover</i>	
bahan	tempered glass
tebal	0,5 cm
dimensi	90 x 78 cm

Bentuk *staggered turbulators* menggunakan panjang aluminiumnya adalah 10 cm pada setiap *turbulator* yang digunakan. Sedangkan *crimp turbulators* menggunakan 71 cm pada setiap panjang *turbulator* yang digunakan. Berikut adalah spesifikasi *turbulators* yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

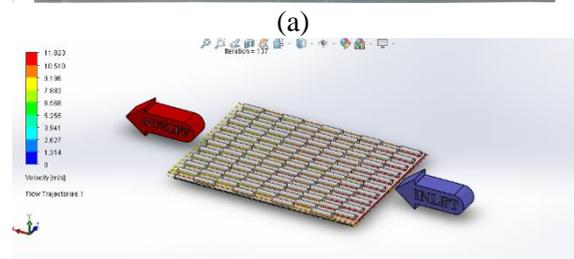
Tabel 2. Spesifikasi *turbulators*

Jenis <i>turbulators</i>	Jarak antar <i>turbulator</i>	Jumlah <i>turbulators</i>
<i>Staggered</i>	2,5 cm	122
	3,5 cm	86
<i>Crimp</i>	2,5 cm	25
	3,5 cm	34

Desain dan bentuk *turbulators* yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 2., Gambar 3., Gambar 4., dan Gambar 5.



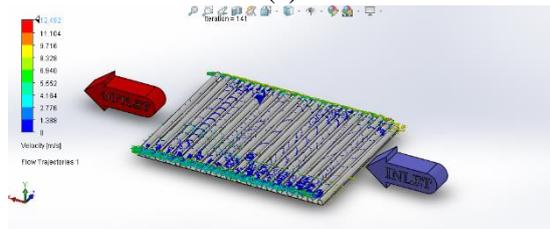
(a)
 (b)
Gambar 2. *Staggered turbulators* dengan jarak tiap *turbulator* yaitu 2,5 cm dalam bentuk (a) eksperimen dan (b) modelling



(a)
 (b)
Gambar 3. *Staggered turbulators* dengan jarak tiap *turbulator* yaitu 3,5 cm dalam bentuk (a) eksperimen dan (b) modelling



(a)

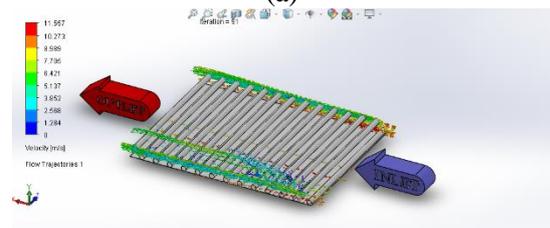


(b)

Gambar 4. Crimp turbulators dengan jarak tiap turbulator yaitu 2,5 cm dalam bentuk (a) eksperimen dan (b) modelling



(a)



(b)

Gambar 5. Crimp turbulators dengan jarak tiap turbulator yaitu 3,5 cm dalam bentuk (a) eksperimen dan (b) modelling

Penambahan *sensible heat storage materials* yang digunakan disusun secara *rock bed integrate*. Bahan yang digunakan berupa batu lava berukuran 3-5 cm. Total keseluruhan batu lava yang digunakan adalah 24 kg. Berikut gambaran penyusunan *sensible heat storage materials* sesuai ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Penyusunan *sensible heat storage materials* pada solar air heater

Penyusunan alat dan bahan yang dilakukan dalam penelitian ini guna mencapai hasil pengukuran yang optimal dapat dilihat pada Gambar 7. Pengambilan data dilakukan dengan kondisi lingkungan dianggap ideal dan udara di sekeliling kolektor surya dianggap udara diam. Fluida kerja pada *solar air heater* merupakan udara dengan propertis konstan (tidak terpengaruh dengan suhu) dan bersifat inkompresibel. Laju aliran massa pada seluruh bagian *collector* dianggap seragam. Perpindahan panas berada dalam kondisi *steady state*. *Contact resistance* pada *turbulators* dengan pelat penyerap tidak diperhitungkan atau diabaikan. Data-data lain yang diperlukan dalam perencanaan dan analisa diambil sesuai dengan literatur yang relevan.



Gambar 7. Penyusunan pengujian solar air heater

Lampu halogen yang ditunjukkan dengan jumlah tiga buah digunakan sebagai pengganti radiasi matahari. Penyangga yang digunakan sebagai tempat lampu serta untuk mengatur ketinggian lampu guna mencapai nilai intensitas radiasi lampu sesuai yang direncanakan. Fluida kerja berupa udara dihasilkan dari *blower*. *Data logger* digunakan untuk melihat hasil pengukuran temperatur dari *thermocouple type K*

Stavolt yang berfungsi menstabilkan arus *blower* agar kecepatan fluida kerjanya tetap. Fluida kerja berupa udara masuk melalui *inlet* yang ditunjukkan dengan kecepatan 3,5 m/s. Pada *inlet* ditempatkan *thermocouple type K* untuk mengukur temperatur fluida kerja ketika memasuki *solar air heater*. *Dimmer* yang berfungsi mengatur besar dan/atau kecilnya intensitas radiasi lampu halogen. Kemudian besarnya daya lampu akan dipantau secara *real time* melalui multimeter digital. Area *solar air collector* dimana dalam area tersebut ditempatkan insulasi berupa *styrofoam*, *sensible heat storage materials*, dan pelat penyerap dengan *turbulators* secara *staggered* dan *crimp*. Pada area inilah *solar air heater* mendapat penyinaran dari lampu halogen. *Sensible heat storage materials* disusun secara *bed integrated* sesuai penelitian yang telah dilakukan ShazibUddin (2016).

Udara kemudian keluar melalui *outlet*. Pada *outlet* ditempatkan sensor *thermocouple type K* untuk mengukur temperatur udara yang telah dicapai setelah mengalir dalam *solar air heater* dan mengalami peningkatan temperatur pada area *solar air collector*. Hasil pengukuran sensor suhu yang ditempatkan pada *inlet* dan *outlet* akan terukur oleh termometer. Efisiensi *solar air heater* bergantung pada hasil pengukuran temperatur yang dicapai pada *inlet*, *outlet*, dan besar daya pada *blower*. Lamanya waktu pengujian dipantau melalui *stopwatch*. Adapun parameter-parameter yang diukur dalam penelitian ini adalah suhu udara masuk dan suhu udara keluar *solar air heater*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik perpindahan panas pada saluran pemanas udara surya bergantung pada hasil pengukuran suhu masuk dan keluarnya. Karakter intensitas radiasi serta bentuk *turbulators* yang digunakan mempengaruhi hasil pengukurannya. Jarak tiap *turbulators* juga menjadi salah satu pengaruh dalam menentukan karakter perpindahan panas solar air heater. Kecepatan fluida kerja yang digunakan adalah kecepatan tetap dengan nilai 3,5 m/s. Karakter intensitas radiasi yang digunakan bervariasi mulai dari 557 W/m²; 675,6 W/m²; 730,2 W/m²; dan 881,2 W/m². Efisiensi *solar air heater* diteliti dengan membandingkan penggunaannya pada bentuk *crimp turbulators* dan *staggered turbulators*. Jarak antar *turbulator* pada setiap bentuk

turbulators yang digunakan juga diteliti dalam penelitian ini. Hasil energi berguna dan efisiensi *solar air heater* di lakukan analisis berdasarkan bentuk *turbulators* yang digunakan. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan diperoleh data seperti yang ditampilkan pada Tabel 3. yaitu data hasil pengukuran pada suhu udara masuk dan keluar.

Tabel 3. Data hasil pengukuran pada suhu udara masuk dan keluar

Jenis <i>turbulators</i>	Waktu (menit)	Intensitas Radiasi (I, W/m ²)				Suhu pada saluran masuk (Tin, °C)				Suhu pada saluran keluar (Tout, °C)			
		I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
		<i>Staggered</i> 2,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	34,7	35,5	35,5	34,2	47,3	48,5
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	34,6	35,4	35,4	34,4	48,0	50,0	51,4	53,0
<i>Staggered</i> 3,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	36,4	36,6	36,1	36,8	45,6	48,3	48,4	51,5
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	36,3	36,6	36,0	36,9	46,1	49,1	49,4	52,1
<i>Crimp</i> 2,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	34,8	38,6	35,0	35,2	52,5	59,7	60,4	64,5
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	35,0	39,1	35,5	35,2	54,9	62,8	62,2	66,7
<i>Crimp</i> 3,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	34,1	37,8	36,0	34,9	57,5	63,6	65,4	68,5
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	34,1	38,3	35,8	35,5	60,9	65,8	68,5	71,5

Dari data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dilakukan pengolahan data untuk mengetahui performa dari *solar air heater*. Pengolahan data-data yang dilakukan adalah sebagai berikut.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk mengetahui energi berguna dan efisiensi pada *solar air heater*. Contoh perhitungan yang digunakan adalah menggunakan bentuk *crimp turbulators* dengan jarak tiap *turbulator* adalah 3,5 cm. Adapun data-data yang diperoleh dari pengujian *solar air heater* menggunakan *crimp turbulators* dengan jarak tiap *turbulator* yaitu 3,5 cm adalah sebagai berikut:

- Laju aliran massa (\dot{m}) = 0,0083 kg/s
- Specific heat* udara (C_p) = 1007 J/kg.K
- Intensitas radiasi (I) = 881,2 W/m²
- Suhu udara masuk menit ke 30 = 34,9 °C = 307,9 K
- Suhu udara keluar menit ke 30 = 68,5 °C = 341,5 K
- Suhu udara masuk menit ke 60 = 35,5 °C = 308,5 K
- Suhu udara keluar menit ke 60 = 71,5 °C = 344,5 K
- Luas permukaan pelat *absorber* (A) = 0,65 m²

Menghitung Energi Berguna (Qu) *Solar Air Heater* pada menit ke 30 dan 60.

- Qu pada menit ke 30

$$Qu = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$Qu = 0,0083 \frac{kg}{s} \times$$

$$1007 \frac{J}{kg.K} \times (341,5 - 307,9)K$$

$$Qu = 280,14 W$$

- Qu pada menit ke 60

$$Qu = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$Qu = 0,0083 \frac{kg}{s} \times$$

$$1007 \frac{J}{kg.K} \times (321 - 307,6)K$$

$$Qu = 300,02 W$$

Menghitung Efisiensi (η) *Solar Air Heater* pada menit ke 30 dan 60.

- Efisiensi pada menit ke 30

$$\eta = \frac{Qu}{I.A}$$

$$\eta = \frac{280,14 W}{577 \frac{W}{m^2} \times 0,65 m^2} \%$$

$$\eta = 49 \%$$

- Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Qu}{I.A}$$

$$\eta = \frac{300,02 W}{577 \frac{W}{m^2} \times 0,65 m^2} \%$$

$$\eta = 52 \%$$

Hasil perhitungan energi berguna dan efisiensi solar air heater berdasarkan bentuk *turbulators*-nya disajikan pada Tabel 4. berikut ini.

Tabel 4. Energi berguna dan efisiensi *solar air heater*

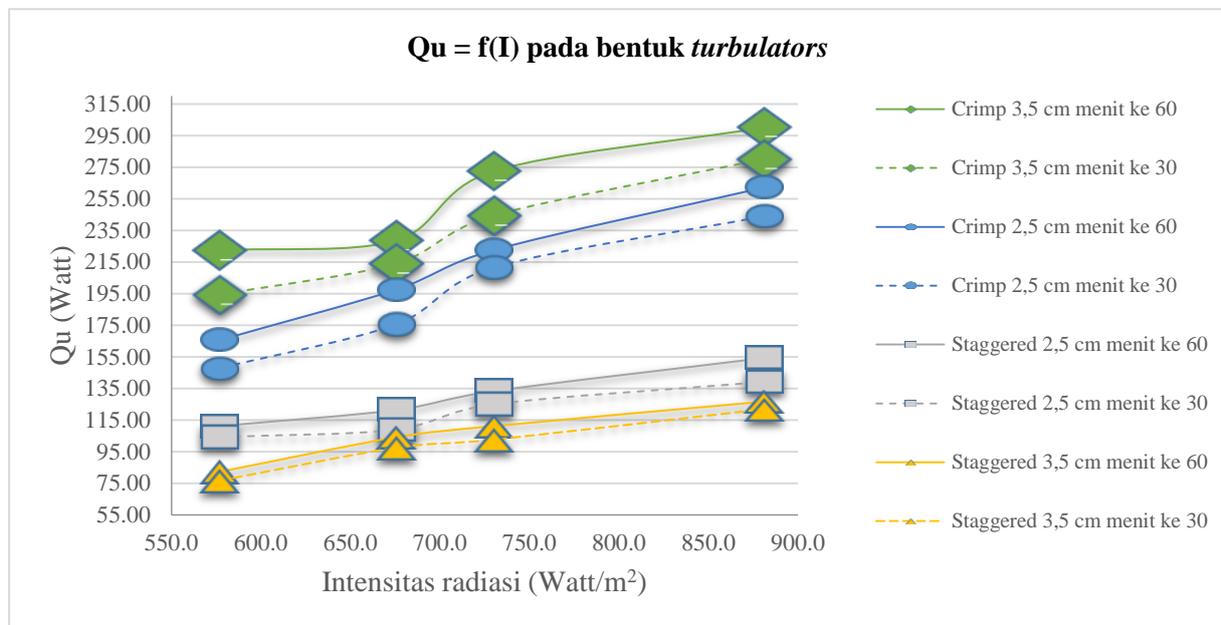
Jenis <i>turbulators</i>	Waktu (menit)	Intensitas Radiasi (I, W/m ²)				Energi Berguna (Qu, W)				Efisiensi (η, %)			
		I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	Qu ₁	Qu ₂	Qu ₃	Qu ₄	η ₁	η ₂	η ₃	η ₄
<i>Staggered</i> 2,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	104,14	108,88	124,93	139,07	28%	25%	26%	24%
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	111,13	121,27	133,25	154,21	30%	28%	28%	27%
<i>Staggered</i> 3,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	76,69	97,48	102,56	121,86	20%	22%	22%	21%
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	82,18	104,06	111,13	126,60	22%	24%	23%	22%
<i>Crimp</i> 2,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	147,72	175,51	211,52	243,88	39%	40%	45%	43%
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	165,52	197,47	222,50	262,09	44%	45%	47%	46%
<i>Crimp</i> 3,5 cm	30	577,0	675,6	730,2	881,2	194,30	214,02	244,38	280,14	52%	49%	51%	49%
	60	577,0	675,6	730,2	881,2	222,34	228,57	272,41	300,02	59%	52%	57%	52%

Dari hasil pengolahan data yang telah dilakukan menghasilkan grafik hubungan energi berguna terhadap karakter intensitas radiasi dan efisiensi terhadap karakter intensitas radiasi. Analisis data yang dilakukan berdasarkan grafik yang dihasilkan adalah sebagai berikut.

Yang pertama adalah analisis energi berguna terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk *turbulators*. Hubungan energi berguna terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk *turbulators* disajikan dalam bentuk grafik. Hubungan antara energi berguna solar air heater terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk *turbulators* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 8.

cm pada intensitas radiasi yang tertinggi yaitu 881,3 W/m² bernilai 300,02 W pada menit ke 60. Sedangkan nilai terendah energi bergunanya yaitu pada bentuk *turbulators staggered* dengan jarak tiap *turbulator* yaitu 3,5 cm pada intensitas radiasi yang terkecil yaitu 577 W/m² bernilai 82,18 W pada menit ke 30.

Bentuk *crimp turbulators* cenderung memiliki nilai energi berguna yang lebih besar dibandingkan dengan bentuk *staggered turbulators*. Pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60 *crimp turbulators* memiliki rata-rata nilai hasil energi berguna mencapai 2 kali lebih tinggi dibandingkan *staggered turbulators* dimana nilainya adalah 233,87 W dan 117,98 W masing-masing pada *crimp*



Gambar 8. Grafik hubungan energi berguna terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk *turbulators*

Energi berguna dengan nilai yang tertinggi terdapat pada *turbulators* berbentuk *crimp* dengan jarak tiap *turbulators* yaitu 3,5

turbulators dan *staggered turbulators*. Hal ini membuktikan bahwa bentuk *crimp turbulators* memiliki kemampuan menghasilkan intensitas

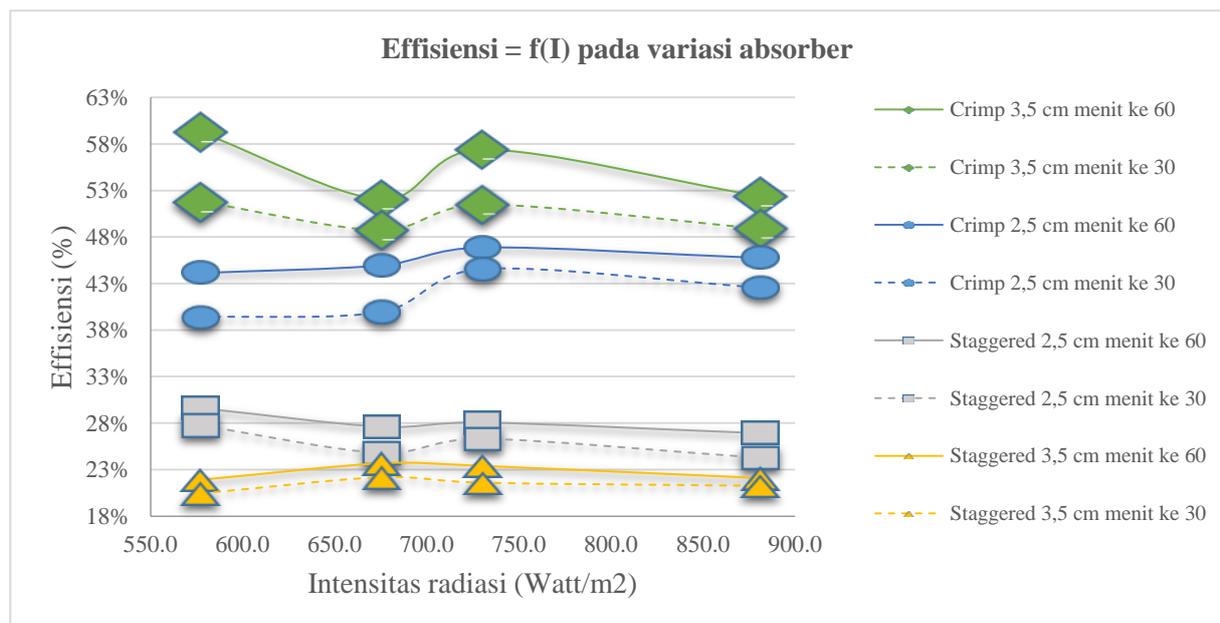
turbulensi yang lebih tinggi serta kemampuan penyerapan panas yang lebih tinggi juga.

Pada intensitas radiasi tertinggi yaitu 881,2 W/m² menit ke 60 nilai energi bergunanya adalah 154,21 W; 126,60 W; 262,09 W; dan 300,02 W masing-masing pada *staggered turbulators* 2,5 cm, *staggered turbulators* 3,5 cm, *crimp turbulators* 2,5 cm dan *crimp turbulators* 3,5 cm. Pada bentuk *turbulators* dan intensitas radiasi yang sama *crimp turbulators* dengan jarak 3,5 cm memiliki nilai energi berguna lebih tinggi dibandingkan dengan jaraknya yang 2,5 cm. Pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60 perbandingan hasil energi bergunanya pada jarak yang 3,5 cm mencapai 1,2 kali lebih besar daripada pada jarak yang 2,5 cm. Hal ini berkaitan dengan adanya peningkatan intensitas turbulensi aliran dikarenakan meningkatnya energi kinetik turbulensi (Komolafe dkk., 2019). Seiring dengan meningkatnya energi kinetik turbulensi maka aliran fluida akan menjadi lebih turbulen. Aliran turbulensi dalam *solar air heater* dapat meningkatkan laju ekstraksi panas dari pelat *absorber* (Nurseto, 2017). Sehingga dapat meningkatkan perpindahan panas dari pelat *absorber* ke fluida kerja. Bertambahnya jarak *turbulators* pada bentuk *crimp turbulators* membuktikan bahwa *reattachment point* fluida kerja yang tercipta akan semakin optimal.

Namun tidak semua jarak yang lebih

panjang akan meningkatkan intensitas turbulensi aliran fluida dan menciptakan *reattachment point* fluida kerja yang lebih optimal. *Staggered turbulators* dengan jarak 2,5 cm memiliki nilai energi berguna yang lebih tinggi dibandingkan dengan jaraknya yang 3,5 cm. Pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60 dengan jarak antar *turbulator* 2,5 cm menghasilkan energi berguna 1,2 kali lebih besar dibandingkan pada jarak 3,5 cm. Hal ini terjadi dikarenakan tidak semua jarak yang lebih besar akan menciptakan aliran yang lebih turbulen sehingga menghasilkan *reattachment point* yang optimal. Maka terdapat nilai jarak *turbulators* yang optimal adalah jarak antar *turbulators* yang telah memungkinkan terjadinya *reattachment point* fluida kerja di dekat *turbulators* selanjutnya (Yadav dan Bhagoria, 2014). Maka aliran fluida yang terjadi akan terdefleksi ke atas dan diharapkan dapat memicu *instabilitas boundary layer* serta mempercepat transisi aliran menjadi turbulen. Transisi aliran yang terjadi lebih awal diharapkan mampu meningkatkan turbulensi aliran sehingga lokasi separasi dapat lebih mundur (Putra dkk., 2019). Sehingga area *wake* yang tercipta akan lebih kecil dan *reattachment point* fluida kerja dapat tercipta menjadi lebih optimal.

Kemudian pada analisis selanjutnya adalah analisis efisiensi terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk



Gambar 9. Grafik hubungan efisiensi terhadap karakter intensitas radiasi berdasarkan bentuk *turbulators*

turbulators. Berikut analisisnya dalam bentuk grafik sesuai yang ditunjukkan Gambar 9.

Temperatur *ambient solar air heater* akan naik dan/atau turun selaras dengan radiasi yang diberikan. Seiring dengan turunnya intensitas radiasi maka temperatur udara sekitar akan turun dikarenakan *heat loss* (Sudhakar dan Cheralathan, 2017). Pada setiap bentuk *turbulators* selisih nilai efisiensi pada intensitas radiasi 675,6 W/m² sampai 730,2 W/m²; nilainya terlihat lebih kecil dibandingkan dengan yang lain. Hal ini dikarenakan selisih intensitas radiasi yang digunakan lebih kecil daripada yang lainnya yaitu senilai 54,6 W/m². Pada intensitas radiasi yang lainnya yaitu 577 W/m² sampai 675,6 W/m² nilai selisihnya adalah 98,6 W/m². Sedangkan pada intensitas radiasi 730,2 W/m² sampai 881,2 W/m² nilai selisihnya adalah 151 W/m².

Bentuk *crimp turbulators* memiliki kecenderungan nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk *staggered turbulators*. Hal ini selaras dengan hasil energi bergunanya karena besar efisiensi berbanding lurus dengan kalor yang diterima udara dan berbanding terbalik dengan radiasi yang diterima pelat *absorber* (Ali, 2017). Rata-rata nilai efisiensi *crimp turbulators* pada seluruh karakter intensitas radiasi yang digunakan di menit ke 60 mencapai 50 % dan bentuk *staggered turbulators* mencapai 25 %. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja *solar air heater* untuk bentuk *crimp turbulators* mencapai dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk *staggered turbulators*. Hal ini sesuai dengan hasil nilai energi berguna. Kecenderungan nilai energi berguna *crimp turbulators* adalah 2 kali lebih tinggi daripada *staggered turbulators* pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60.

Pada bentuk *turbulators* yang sama terdapat perubahan nilai efisiensi dengan berubahnya jarak antar *turbulators*. *Crimp turbulators* dengan jarak antar *turbulators* 3,5 cm memiliki kecenderungan nilai efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan jaraknya yang 2,5 cm. Pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60 *crimp turbulators* 3,5 cm dapat mencapai nilai rata-rata efisiensi 10 % lebih tinggi dibandingkan *crimp turbulators*, dimana nilai efisiensi *crimp turbulators* 3,5 cm adalah 55 % dan *crimp turbulators* 2,5 cm adalah 45 %. Hal ini membuktikan bahwa pada

crimp turbulators seiring dengan bertambahnya jarak antar *turbulators* maka nilai efisiensinya akan meningkat.

Namun berbeda pada *staggered turbulators*. Pada *staggered turbulators* 3,5 cm memiliki kecenderungan nilai efisiensi lebih rendah dibandingkan *staggered turbulators* 2,5 cm. Pada seluruh karakter intensitas radiasi menit ke 60 rata-rata nilai efisiensi *staggered turbulators* 3,5 cm dapat mencapai 5 % lebih kecil dibandingkan *staggered turbulators* 2,5 cm, dimana nilainya adalah 28 % dan 23 % masing-masing pada *staggered turbulators* 3,5 cm dan *staggered turbulators* 2,5 cm. Pada *staggered turbulators* dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya jarak antar *turbulators* nilai efisiensinya akan semakin rendah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Abdullah dkk (2018) *staggered turbulators* dapat ditingkatkan koefisien perpindahan panasnya dengan menambahkan jarak antar *turbulator*. Sehingga intensitas turbulensi akan naik dan penggabungan kembali aliran/*reattachment point* yang tercipta akan semakin optimal.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan serta pengolahan dan analisis data yang telah dilaksanakan terdapat beberapa kesimpulan. Adapun poin-poin kesimpulan dari penelitian ini disajikan sebagai berikut.

- Solar air heater* dengan bentuk *turbulators staggered* cenderung menghasilkan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan *turbulators* berbentuk *crimp*. Hal ini menunjukkan bahwa *turbulators* berbentuk *crimp* dapat mengoptimalkan penyerapan kalor oleh fluida kerja yang diterima pelat *absorber*. Penerapan *turbulators* berbentuk *crimp* pada *solar air heater* juga dapat menciptakan aliran fluida kerja lebih turbulen. Sehingga laju ekstraksi panas dari pelat *absorber* dapat lebih ditingkatkan.
- Pada bentuk *staggered turbulators* semakin panjang jarak *turbulators-nya* semakin rendah kecenderungan nilai efisiensinya. Namun pada bentuk *crimp turbulators* semakin panjang jarak tiap *turbulators-nya* maka kecenderungan nilai efisiensi *solar air heater* semakin tinggi.

Hal ini dipengaruhi oleh sifat aliran fluida di dalam *solar air heater*. Sifat aliran fluida berbeda-beda berdasarkan bentuk *turbulators* yang digunakan. Aliran fluida yang lebih turbulen dapat menciptakan area *wake* yang lebih kecil diantara *turbulator* agar dapat menciptakan *reattachment point* yang lebih optimal guna meningkatkan koefisien perpindahan panas pada *solar air heater*

- c. Nilai efisiensi bentuk *turbulators crimp* mencapai 2 kali lebih besar dibandingkan bentuk *turbulators staggered* pada rata-rata seluruh karakter intensitas radiasi. Kecenderungan nilai efisiensi optimum *solar air heater* dicapai pada penerapan *turbulators* dengan bentuk *crimp* pada jarak tiap *turbulators*-nya yaitu 3,5 cm pada karakter intensitas radiasi yang terendah. Sedangkan kecenderungan nilai efisiensi minimum *solar air heater* dicapai pada penerapan *turbulators* berbentuk *staggered* dengan jarak tiap *turbulator*-nya yaitu 3,5 cm di intensitas radiasi yang tertinggi. Nilai karakter intensitas radiasi yang tinggi dapat menciptakan lebih banyak *heat loss* pada *solar air heater* dibandingkan menggunakan nilai karakter intensitas radiasi yang lebih rendah. Sehingga efisiensi yang dicapai akan semakin rendah seiring bertambahnya nilai karakter intensitas radiasi yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A.S., M.M.A. Al-sood, Z.M. Omara, M.A. Bek, dan A.E. Kabeel. 2018. Performance evaluation of a new counter flow double pass solar air heater with turbulators. *Solar Energy*. 173(2018): 398-406.
- A.Cengel, Y. 2003. *Heat Transfer A Practical Approach 2nd Edition*.
- A.Komolafe, C., I.O. Oluwaleye, O. Awogbemi, dan C.O. Osueke. 2019. Experimental investigation and thermal analysis of solar air heater having rectangular rib roughness on the absorber plate. *Thermal Engineering* 14: 1-9.
- Ali, Sulaiman. 2017. Studi Simulasi Numerik dan Eksperimental Pengaruh Penambahan *Fins* Berbentuk Setengah Silinder Disusun Secara *Staggered* terhadap Kinerja Kolektor Surya Pemanas Udara dengan Plat Penyerap *V-Corrugated Absorber*. *Skripsi*. Surabaya: Fakultas Industri Institut Teknologi Sepuluh November.
- Alvarez, G., J. Arce, L. Lira, dan M.R. Heras. 2004. Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminium cans. *Solar Energy*. 77(2004): 107-113.
- Bhagoria, J.L., Saini, J.S. dan Solanki, S.C. 2002. Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate, *Renewable Energi*. 25: 341-369.
- Dewi, N. H., A. G. Safitra, dan L. Diana. Studi eksperimen *solar air heater* dengan variasi sudut gelombang bentuk-v. *Jurnal Mekanika dan Energi Pens* 1: 24-29.
- Gawande, V.B., dkk. 2016. Experimental and CFD investigation of convection heat transfer in solar air heater with reverse L-shaped ribs. *Solar Energy*. Vol. 131: 275-295
- Holman, J. P. 1986. *Heat Transfer*. Sixth Edition. Jakarta: Erlangga. Terjemahan oleh E. Jasifi. 1995. *Perpindahan Kalor*. Cetakan Keenam. Jakarta: Erlangga.
- Hosseini, S. S., A. Ramiar, dan Ali A. R. 2017. Numerical investigation of rectangular fin geometry effect on solar chimney. *Energy and Buildings*. Vol 155: 296-307
- Incropera at all. "Fundamentals of Heat and Mass transfer 5th Edition "Wiley.
- Jalil, M. Jalal., dkk. 2018. Performance study of solar air heater with thermally conducted multi v shaped baffles and ribs. University of Technology. Iraq.
- Kabeel, A. E., A. Khalil, dan M.E. Zayed. 2016. Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM as thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*. 113: 264-272.

- Kalogirou, S., Y. Tripanagnostopoulos, dan M. Souliotis. 2005. Performance of solar systems employing collectors with colored absorber. *Energy and Buildings*. Vol. 37: 824-835
- Karwa, R., S.C. Solanki, dan J.S. Saini. 2001. Thermo-hydraulic performance of solar air heaters having integral chamfered rib roughness on absorber plates. *Energy*. Vol. 26: 161-176
- Komolafe, C. A., dkk. 2019. Experimental investigation and thermal analysis of solar air heater having rectangular rib roughness on the absorber plate. *Elsevier Ltd*. Vol. 14: 1-9.
- Latifah, N. L. 2015. *Fisika Bangunan 1*. Jakarta: Griya Kreasi (Penebar Swadaya Grup).
- Murali, G., K. R. K. Reddy, M. T. S. Kumar, J. SaiManikanta, dan V. N. K. Reddy. 2018. Performance of solar aluminium can air heater using sensible heat storage. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 9(4): 145-155.
- Nurseto, Aji. 2017. Simulasi Numerik Pengaruh Kekasaran Permukaan *Chamfered Continuous Rib* terhadap Perpindahan Panas Pada *Solar Air Heater*. Skripsi. Solo: Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
- Putra, P. R., B. Amin, dan N. Hidayat. 2019. Karakteristik aliran pada saluran udara dengan penambahan square dan circular turbulator di dekat silinder sirkular tunggal. *Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi (INVOTEK)*. 19(1): 1-8.
- Saxena, A., dan V. Goel. 2013. Solar air heater with thermal heat storages. *Chinese Journal of Engineering* 2013: 1-11.
- Sharma, Sanjay K., dan Vilas R. K. 2017. Experimental and numerical investigation of forced convective heat transfer in solar air heater with thin ribs. *Solar Energy*. Vol. 147: 277-291.
- ShazibUddin, Md., MasudParvez, dan Md. EnamulHaque. 2016. Construction and performance study of a rock bed integrated green house type solar air heater with solar dryer. *IOSR-JESTFT*. 10(5): 30-36.
- Stoecker, W.F. dan W.J. Jones. 1996. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Edisi 2. Jakarta: Erlangga.
- Sudhakar, P., dan M. Cheralathan. 2017. Experimental study on solar air heater using sensible thermal storage system. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 8(12): 388-346.
- Yadav, A.S., and Bhagoria, J.L. 2014. A CFD Based Thermo-hydraulic Performance Analysis of an Artificially Roughened Solar Air Heater Having Equilateral Triangular Sectioned Rib Roughness on the Absorber Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 70: 1016-1039.
- Universitas Jember. 2016. Buku Pedoman Penulisan Karya Ilmiah. Jember: UPT Penerbitan Universitas Jember.

