

# Pengaruh Rasio Massa Air dan Udara Terhadap Unjuk Kerja Forced Draft Wet Cooling Sudut Inklinasi Splash Fill Berlubang

Khairul Umurani<sup>1)</sup>, Ahmad Syuhada<sup>2)</sup>, M.I. Maulana<sup>2)</sup>, Zahrul Fuadi<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

<sup>2)</sup>Syiah Kuala University, Banda Aceh 23111, Indonesia

<sup>4)</sup>Department of Mechanical and Industrial Engineering, Universitas Syiah Kuala  
khairulumurani@umsu.ac.id\*, ahmadsyuhada@usk.ac.id

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental kinerja menara pendingin basah paksa dengan menggunakan fill percikan berlubang miring bertingkat. Temperatur air panas diatur pada 60 oC; Packing memiliki sudut kemiringan 15o, 20o, 25o dan rasio perforasi 2,6%, yang terdiri dari lima tingkat isian pelat galvanis. Laju aliran air  $\pm 0,0917$  kg/s, lima variasi laju aliran udara adalah 0,02033, 0,02631, 0,02995, 0,03770, dan 0,04261 kg/s. Temperatur air panas masuk adalah 60 °C. Pada penelitian ini terlihat bahwasanya rasio massa air dan massa udara mempengaruhi kinerja cooling tower.

**Kata kunci:** sudut kemiringan, unjuk kerja, perforsi

## Abstract

This study aims to experimentally analyse the performance of a forced wet cooling tower (WTC) using multilevel inclined perforated splash fill. The hot water temperature is set at 60 C; Packing has an inclination angle of 15o, 20°, 25° and a perforation ratio of 2.6%, which consists of five levels of galvanised plate fill. The water flow rate is  $\pm 0.0917$  kg/s, and the five variations of air flow rate are 0.02033, 0.02631, 0.02995, 0.03770, and 0.04261 kg/s. The inlet hot water temperature is 60 C. In this study, it can be seen that the ratio of water mass and air mass affects the performance of the cooling tower

**Ketwod:** personal computer, automation, future trends, expert systems (keywords 3 to 5 words)

## 1 PENDAHULUAN

Menara pendingin digunakan pada pembangkit listrik, peralatan industri, industri perminyakan, dan industry manufaktur untuk mendinginkan suhu air pendingin dan menghilangkan panas proses. Cooling tower memainkan peran penting digunakan dalam banyak aplikasi proses di industri untuk ketersediaan pasokan energi [1] sehingga keandalan menara ini sangat penting dengan cara yang sesuai dengan persyaratan lingkungan [2] Banyak studi yang telah melakukan evaluasi karakteristik kinerja berdasarkan parameter input, seperti laju aliran air dan udara, ketinggian menara, dan suhu air masuk, faktor lingkungan, faktor desain menara pendingin, menjadi dasar dari banyak penelitian menara pendingin. Kinerja menara pendingin ditunjukkan oleh parameter-parameter seperti Range, efektivitas,  $\epsilon$ , koefisien perpindahan panas dan massa global,  $K_a$ , dan laju penguapan,  $M_{ev}$ . Karakteristik menara [3][4][5][6]

Menara pendingin, beroperasi melalui kontak langsung antara air hangat dan udara tak jenuh, yang menyebabkan perpindahan panas dan perpindahan massa karena perbedaan suhu dan konsentrasi uap [7].

Menara pendingin aliran paksa mekanis menggunakan fill tetesan, film, dan percikan [8]. Jenis fill memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja menara pendingin [9]. Fill gelombang-S 20 mm, gelombang-S 26 mm, dan fill gelombang lipatan miring 30 mm dapat meningkatkan kapasitas pendinginan menara secara signifikan [10]. Aliran berlawanan memberikan kinerja menara yang lebih baik daripada aliran silang [11]. Jarak rusuk mempengaruhi perpindahan panas yang lebih baik [12]. Pemberian lubang perforasi pada Winglet dapat meningkatkan penyerapan kalor oleh udara [13]. Dalam kondisi angin silang, perbedaan suhu pendinginan dan efektivitas pendinginan untuk fill yang tidak seragam lebih besar daripada fill yang seragam [14]. Penggunaan axial fan menunjukkan bahwa kinerja super-large natural draft wet cooling towers (S-NDWCT) meningkat dalam kondisi angin silang dan tidak ada angin [15]. Peningkatan laju aliran udara dalam packing menara menyebabkan penurunan resistansi sehingga kapasitas penampungan cairan meningkat [16]. Pemilihan bahan fill yang tepat dapat mengoptimalkan kinerja sistem [17]. Lemouari et.al [18] melakukan penelitian

pengaruh dua rezim operasi kontak udara/air di dalam menara, yaitu Rezim Pellicular (PR) dengan laju aliran air yang rendah dan Rezim Gelembung dan Dispersi (BDR). dengan laju aliran air yang relatif lebih besar. Rezim BDR memberikan efisiensi yang lebih tinggi daripada Rezim Pellicular. Metode gabungan merkel dan poppe dan pengaturan aliran balik serta aliran paralel memberikan prediksi akurat untuk suhu air dan udara keluar [19]. Penggunaan fluida nano meningkatkan kinerja menara pendingin dibandingkan dengan air [20]. Suhu air masuk yang lebih tinggi dan laju aliran air yang lebih rendah menghasilkan peningkatan efisiensi pendinginan [21]. *Range cooling tower* menentukan potensi menara untuk mengakomodasi beban panas. Oleh karena itu, bila *approach* menurun, memaksa kipas harus menghasilkan aliran udara yang relatif lebih banyak hal ini akan meningkatkan laju penguapan air [22]. Tinggi *packing* mempengaruhi kinerja pendinginan dibandingkan dengan peningkatan koefisien resistansinya [23]. Selanjutnya unjuk kerja dapat ditingkatkan dengan meningkatkan ketinggian *cooling tower* dan menggunakan *eliminator* dengan desain yang benar sehingga berbagai jenis kerugian dapat dikurangi [24]. Mengoptimalkan kapasitas pendinginan dan kebisingan percikan air, meningkatkan rasio jumlah tetesan air 3mm dapat mengurangi suhu air keluar sebesar 0,22 °C, sementara *sound pressure level* (SPL) tetap tidak terpengaruh [25]. Penurunan suhu air merupakan parameter yang paling penting untuk mengevaluasi kinerja menara pendingin [26]. Susunan *fill* yang tidak seragam meningkatkan kinerja pendinginan dalam kondisi tanpa angin dan arah angin yang berlawanan [27]. Kenaikan bilangan Merkel dan penurunan suhu air keluar menara, memiliki dampak yang signifikan pada pengoperasian pembangkit listrik yang hemat biaya dan aman [28]. Penggunaan *fill inclined-corrugated contact elements* (ICCE) memberikan efisiensi pendinginan maksimum, karena memberikan nilai koefisien perpindahan panas dan massa yang relatif lebih tinggi serta penurunan tekanan yang lebih rendah [29]. Lee, Chien & Wang, Yu Jen [30] mengusulkan sebuah metode analitis baru dan akurat untuk menghitung suhu bola basah berbanding terbalik dari kelembaban relatif (atau suhu titik embun) dan suhu udara dengan kesalahan absolut rata-rata sebesar 0,025 °C. Ramkumar dan Ragupath [31] menunjukkan bahwa metode Taguchi dapat digunakan dalam optimalisasi kinerja menara pendingin aliran balik dengan andal. Pra-pendinginan udara masuk umumnya memainkan peran yang lebih besar dalam meningkatkan kinerja termal menara di bawah angin silang. [32]. Dari paparan diatas ada banyak fator yang mempengaruhi kinerja *wet cooling*

*tower*. Dari beberapa factor tersebut terlihat bahwa *fill* merupakan salah satu komponen yang mempengaruhi kinerja *cooling tower*. Kritisal review yang telah dilakukan pada beberapa penelitian terkait *fill* pada *cooling tower* serta konstruksi *cooling tower*, namun tidak satu pun dari studi yang disebutkan di atas melakukan penelitian eksperimental unjuk kerja sistem pelat terjun berlubang multi tingkat. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa secara eksperimental kinerja *forced draft wet cooling tower* diwujudkan oleh tiga parameter penting seperti range, tingkat, penguapan air, dan efektivitas yang dipengaruhi kecepatan udara, sudut kemiringan *fill* dengan menggunakan *packing* berlubang.

## 2 LANDASAN TEORI

### Perforasi

Perforasi adalah rasio mencerminkan seberapa banyak luas lubang yang menempati luasan pada sebuah pelat, yang dinyatakan dalam persen. Dalam penitian ini diameter lubang adalah  $d = 10$  mm jumlah lubang ( $n$ ) = 72 buah, Lebar pelat = 470 mm panjang pelat = 500 mm. maka perforasi = 2,4%. Susunan lubang adalah selang-seling (*staggered*)

$$P = \frac{n \frac{\pi}{4} d^2}{pl} \times 100\%$$

### (1) Range

Kinerja WCT akan dianalisis secara rinci, dan dengan demikian beberapa variabel harus diperhatikan. Range, seperti yang didefinisikan oleh persamaan 2 sebagai perbedaan antara suhu air masuk ( $T_{wi}$ ) dan suhu air keluar ( $T_{wo}$ ), adalah salah satu parameter utama yang menggambarkan kinerja *wet cooling*.

$$Range = T_{wi} - T_{wo}$$

### (2) Laju kehilangan penguapan air

Massa air yang menguap bersama udara harus diperiksa karena pendinginan evaporatif adalah fenomena perpindahan panas utama dalam menara pendingin; Laju penguapan air  $m_{ev}$  dapat dihitung dengan dari persamaan (3) dimana  $m_a$  adalah laju aliran massa udara  $\omega_o$  kelembaban mutlak udara keluar menara dan  $\omega_i$  adalah kelembaban mutlak udara masuk menara.

$$m_{ev} = m_a (\omega_o - \omega_i)$$

### (3) Efektivitas

Efektivitas menara pendingin menggambarkan sebagai rasio range aktual terhadap *range* ideal atau sebagai perbedaan antara range aktual dan

approach. Nilai efektivitas *cooling tower* ( $\varepsilon$ ) ditentukan dari persamaan (4) juga digunakan untuk menunjukkan efisiensi yang menentukan batas pendinginan menara.

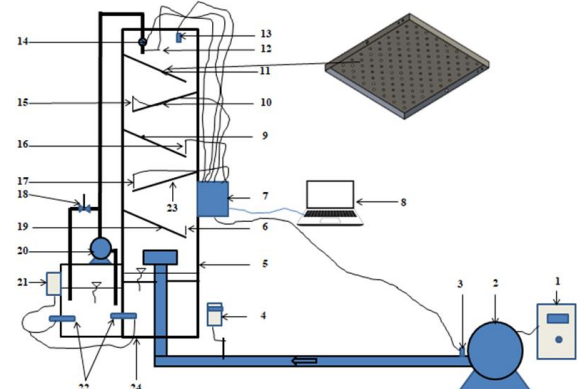
$$e = \frac{T_{wi} - T_{wo}}{T_{wi} - T_{wb1}} \quad (4)$$

Dimana  $T_{wbi}$  suhu bola basah udara lingkungan

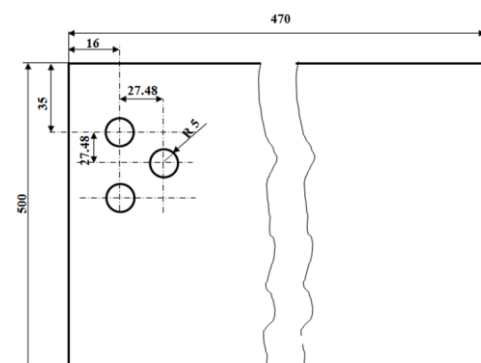
### 3 METODOLOGI PENELITIAN

Tahap pertama dari penelitian ini melibatkan pengumpulan data eksperimen untuk setiap variasi sudut inklinasi, L/G yang dipasang di dalam menara pendingin *forced draft*. *Fill* terbuat dari plat galvalum dengan ukuran panjang 500 mm lebar 470 mm tebal 0.3 mm. Mengacu pada Gambar 2. pelat dibuat berlubang dengan ukuran diameter lubang 10 mm dengan susunan selang seling (*staggered*) jumlah lubang 72.. Kemiringan sudut *fill* dapat diatur sebesar 15°, 20°, 25°. Tinggi menara 3000 mm, tinggi tiap tingkat 500 mm. Mengacu pada Gambar 1. mula-mula, air di dalam tangki (24) dipanaskan oleh heater (22) kapasitas 5000 Watt hingga mencapai suhu  $60 \pm 1,5$  C suhu ini dipertahankan selama percobaan melalui pengontrol suhu digital (21). Setelah suhu air tercapai, pompa sirkulasi air (20) dan *blower* sentrifugal (2) dinyalakan. Air panas kemudian dimasukkan dari atas menara pendingin suhu air panas diukur menggunakan termokopel (12) sebagai data suhu air panas masuk menara dan didistribusikan tiap tingkat menara melewati *fill* tingkat 1(11) *fill* tingkat 2 (10) *fill* tingkat 3(9) *fill* tingkat 4 (23) dan terakhir ke *fill* tingkat 5 (19) dan suhu air keluar tingkat pertama, kedua, ketiga, keempat, kelima diukur menggunakan termokopel (15, 16, 17, 6,) sebagai data suhu air keluar tiap tingkat *fill*. Laju aliran massa air,  $m_w$  diukur dengan menggunakan YF-S201 *water flow sensor* (14) dengan akurasi 10% dan dipertahankan sebesar  $\pm 5.5$  liter/menit dengan mengatur katup bypass (18). Air tersebut bersentuhan dengan udara yang dihisap dari bagian bawah menara pendingin yang dialirkan oleh *blower* sentrifugal dengan diameter *eye impeller* 120 mm 1 HP 3 Fasa putaran maksimum 1440 rpm, variasi putaran diatur oleh pengatur frekwensi (1). Kondisi udara pada saat masuk menara direkam menggunakan sensor kelembaban relatif dht 11 (3) data yang direkam adalah suhu bola kering dan kelembambaban relatif yang diambil sebagai data udara masuk menara. Saat udara bergerak ke atas udara akan melewati setiap tingkat *fill* kemudian udara akan dipanaskan dan dilembabkan. Udara hangat yang lembab selanjutnya dialirkan keatas menara dan suhu serta kelembaban relative diukur menggunakan dht 11(13) data yang

direkam adalah suhu bola kering dan kelembambaban relatif yang diambil sebagai data udara keluar menara dan udara hangat tersebut dibuang ke lingkungan sekitar. Suhu Air yang turun pada tingkat kelima diukur menggunakan termokopel (6) sebagai data suhu air keluar menara pendingin. Air yang telah didinginkan ditampung ke tangki penampungan (24) kemudian dipanaskan kembali kemudian dialirkan lagi ke menara. Suhu, laju aliran air, kelembaban dan suhu udara pada kondisi masuk dan keluar di semua lokasi yang relevan direkam menggunakan Arduino Mega board (7) bersama dengan sistem akuisisi data yaitu PLX-DAQ kemudian data direkam menggunakan personal computer (8). Sedangkan, laju aliran massa udara,  $m_a$  diukur dengan menggunakan Hot wire Anemometer Benetech tipe GM8903 (4) dengan akurasi  $\pm 3\% \pm 0,1$  dan lima tingkat laju aliran massa udara dipertahankan 0.02033, 0.02631, 0.02995, 0.03770, dan 0.04261 kg/s. Sudut kemiringan *fill* ditata sebesar 15, 20, 25 derajat. Sensor kelembaban dht 11 (3,13) ini memiliki rentang jarak pengukuran kelembaban relative (RH) 20% - 90% dengan keakurasian sensor kelembaban  $\pm 5\%$ , rentang jarak pengukuran suhu 0 - 50 °C akurasi sensor suhu  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Data suhu *wet bulb*, entalpi, kelembaban mutlak udara masuk dan keluar diperoleh dari table. Setelah data penelitian dikumpulkan, berbagai parameter kinerja seperti (range, laju penguapan dan, efektivitas) dihitung dan dianalisa.



Gambar1. Research test rig

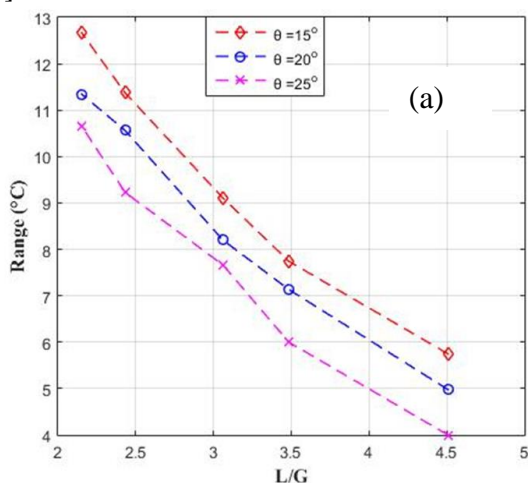


Gambar 2. Desain *fill*

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Range

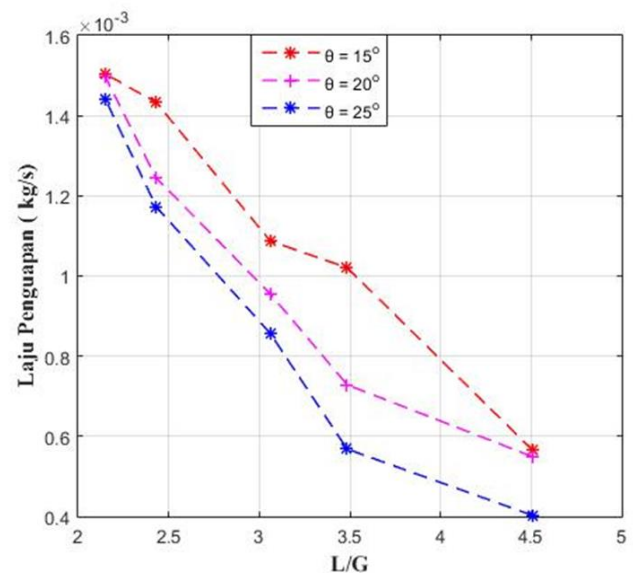
Gambar. 3 menunjukkan trend range untuk variasi L/G dan konfigurasi sudut inklinasi fill 15°, 20°, 25°. Range cooling tower merupakan kemampuan menara untuk mendinginkan air panas menjadi air dingin didefinisikan sebagai perbedaan antara suhu air masuk dan air keluar menara. Pada sudut inklinasi 15° L/G = 4.51 range minimum sebesar 5.02 C range maksimum terjadi pada L/G 2.15 sebesar 11.45 C. Pada sudut inklinasi 20° L/G = 4.51 range minimum sebesar 4.12 C range maksimum terjadi pada L/G 2.15 sebesar 10.49 C. Pada sudut inklinasi 25° L/G = 4.51 range minimum sebesar 3.18 C range maksimum terjadi pada L/G 2.15 sebesar 9.56 C. Range air meningkat secara gradual dengan peningkatan laju aliran udara dengan laju aliran air yang tetap atau penurunan rasio L/G untuk semua sudut inklinasi fill. Perubahan tren ini dimungkinkan karena terjadinya perpindahan panas yang disebabkan kontak langsung air panas yang mengalir dari atas menara dengan aliran massa udara yang menuju keatas menara. Peningkatan laju aliran udara memungkinkan udara masuk lebih besar untuk kontak dengan air di dalam menara pendingin dan peningkatan resistensi perpindahan panas pada sisi air meningkatkan efek perpindahan panas kontak dan perpindahan panas penguapan pada saat yang bersamaan yang dapat dikaitkan dengan nilai kejenuhan udara. Setiap penurunan nilai laju aliran massa udara terlihat dari meningkatnya nilai L/G maka beda suhu air masuk dan suhu air keluar dari wet cooling tower (range) untuk setiap sudut inklinasi fill mempunyai trend yang semakin menurun. Range maksimum terjadi pada L/G 2.15 dan sudut inklinasi 15°. Alasan ini dikarenakan area permukaan kontak frontal yang lebih besar antara udara dan air. memungkinkan transfer panas yang lebih efisien dan range lebih signifikan yang sama juga dikemukakan oleh [9].



Gambar 3. Pengaruh L/G terhadap Range

### 4.2 Laju kehilangan penguapan air

Gambar 4 menunjukkan pengaruh rasio L/G dan variasi sudut inklinasi fill terhadap laju kehilangan penguapan air. Pada L/G = 4.51 laju kehilangan penguapan air sebesar 0.00057 kg/s untuk L/G = 2.15 laju kehilangan penguapan air sebesar 0.0015 kg/s untuk sudut inklinasi fill 15°. Untuk sudut inklinasi 20° L/G = 4.51 menghasilkan laju kehilangan penguapan air sebesar 0.00055 kg/s untuk L/G = 2.15 laju kehilangan penguapan air sebesar 0.0015 kg/s. Kehilangan laju penguapan air pada sudut inklinasi 25° pada L/G = 4.51 adalah sebesar 0.00040 kg/s sedangkan untuk L/G = 2.15 laju penguapan air 0.00144 kg/s. Meningkatnya kecepatan udara atau penurunan rasio L/G cenderung meningkatkan laju penguapan air, karena massa udara yang bersentuhan dengan air akan lebih tinggi. Hal ini, pada gilirannya, meningkatkan penguapan air. Hal yang sama juga dikemukakan oleh [9],[32],[34]. Pengaruh L/G menunjukkan fakta bahwa ketika L/G meningkat beban laten dan sensible air di menara menurun. Energi sensible air akan ditransfer ke udara dan air menguap dengan menyerap panas laten sehingga suhu air akan menurun tetapi akan menaikkan kelembaban dan temperature udara keluar menara. Laju penguapan air maksimum terjadi pada sudut inklinasi 15° dan L/G = 2.15



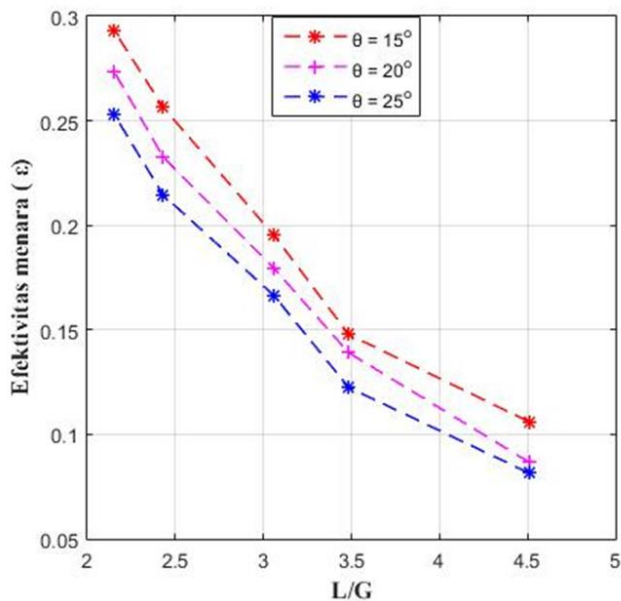
Gambar 4. Pengaruh L/G terhadap laju penguapan air

### 4.3 Efektivitas

Kemampuan fill untuk mendinginkan air secara efektif ditunjukkan oleh efektivitas pendinginannya. Hasil uji coba menunjukkan bahwa range meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan udara. Efek variasi rasio laju aliran massa air terhadap dan laju aliran massa udara (L/G) pada efektivitas,  $\epsilon$  dapat



dilihat pada Gambar 5. Seperti yang disajikan, efektivitas ( $\epsilon$ ) tampak menurun dengan menurunnya laju aliran massa udara atau meningkatnya L/G. Setiap kenaikan L/G dari 2.15 menjadi 4.16 atau kenaikan 109.5% akan menyebabkan penurunan efektivitas dari 0.32 menjadi 0.14 atau 56.3% untuk sudut inklinasi 15°, untuk kondisi L/G yang sama untuk sudut inklinasi 20° terjadi penurunan efektivitas dari 0.31 menjadi 0.12 atau 60.87% dan untuk sudut inklinasi 25° penurunan efektivitas dari 0.28 menjadi 0.08 atau 67.35%. Dengan mengacu pada persamaan (6) terlihat bahwa efektivitas,  $\epsilon$  berbanding lurus dengan range, dan berbanding terbalik dengan approach, jadi trennya sama dengan tren range. Tren serupa ini juga sama seperti yang dilaporkan K.Singh [33]. Tren ini berlaku untuk ketiga jenis sudut inklinasi *fill*.



Gambar 5 Pengaruh L/G terhadap efektivitas

## 5 SIMPULAN

Darft forced wet colling tower dibangun dengan perforated inclined splash fill percobaan dilakukan dengan memvariasikan kecepatan udara, sudut inklinasi. Dari hasil percobaan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: sebagai berikut:

1. Range air pendingin, R, menurun dengan peningkatan rasio aliran massa air-udara, L/G. Nilai R maksimum terjadi pada sudut inklinasi 15°
2. Laju kehilangan penguapan air meningkat dengan menurunnya rasio L/G. Laju penguapan maksimum terjadi pada sudut inklinasi 15o

3. Efektivitas cooling tower meningkat dengan menurunnya rasio L/G. Efektivitas maksimum terjadi pada sudut inklinasi 15o

## KEPUSTAKAAN

- [1] R. McElveen, K. Lyles, B. Martin, and W. Wasserman, "Reliability of Cooling Tower Drives: Improving Efficiency with New Motor Technology," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–19, 2012, doi: 10.1109/MIAS.2012.2210090.
- [2] Z. Zhang, M. Gao, Z. Dang, S. He, and F. Sun, "An exploratory research on performance improvement of super-large natural draft wet cooling tower based on the reconstructed dry-wet hybrid rain zone," *Int. J. Heat Mass Transf. J.*, vol. 142, pp. 1–13, 2019.
- [3] C. G. Cutillas, J. R. Ramírez, and M. L. Miralles, "Optimum design and operation of an HVAC cooling tower for energy and water conservation," *Energies*, vol. 10, no. 3, pp. 1–27, 2017, doi: 10.3390/en10030299.
- [4] R. K. Singla, K. Singh, and R. Das, "Tower characteristics correlation and parameter retrieval in wet-cooling tower with expanded wire mesh packing," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 96, pp. 240–249, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.063>.
- [5] A. Zargar et al., "Numerical analysis of a counter-flow wet cooling tower and its plume," *Int. J. Thermofluids*, vol. 14, no. February, 2022.
- [6] B. K. Naik and P. Muthukumar, "A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 121, pp. 14–26, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.042>.
- [7] P. Navarro, J. Ruiz, A. S. Kaiser, and M. Lucas, "Effect of fill length and distribution system on the thermal performance of an inverted cooling tower," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 231, p. 120876, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120876>.
- [8] K. Singh and R. Das, "An experimental and multi-objective optimization study of a forced draft cooling tower with different fills," *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 417–430, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.080.
- [9] S. Shetty, S. S. Salins, and S. Kumar, "Influence of packing configuration and flow rate on the performance of a forced draft wet cooling tower," *J. Build. Eng. j*, vol. 72, no. February, pp. 1–20, 2023.

- [10] J. Yang, Z. Jia, H. Guan, S. He, and M. Gao, "Influence of three different pitches fillings on the cooling performance of wet cooling towers under crosswind," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 220, p. 119760, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119760>.
- [11] P. J. Grobbelaar, H. C. R. Reuter, and T. P. Bertrand, "Performance characteristics of a trickle fill in cross- and counter- flow configuration in a wet-cooling tower," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, pp. 475–484, 2013.
- [12] Umurani, K., Rudi Nasution, A., & D. I. (2021). Perpindahan Panas Dan Penurunan Tekanan Pada Saluran Segiempat Dengan Rusuk V 90 Derajat. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 4(1), 37–46.
- [13] Umurani, K., & Muharnif, M. (2019). Pengaruh Diameter Lubang Pembangkit Vorteks Winglet Melengkung Terhadap Unjuk Kerja Apk Tipe Kompak Studi Eksperimental. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 2(1), 84–93. <https://doi.org/10.30596/rmme.v2i1.3072>
- [14] Y. Zhou, K. Wang, M. Gao, Z. Dang, S. He, and F. Sun, "Experimental study on the drag characteristic and thermal performance of non-uniform fillings for wet cooling towers under crosswind conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 140, no. May, pp. 398–405, 2018.
- [15] Y. Zhou, M. Gao, G. Long, Z. Zhang, Z. Dang, and S. He, "Experimental study regarding the effects of forced ventilation on the thermal performance for super-large natural draft wet cooling towers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 155, no. March, pp. 40–48, 2019.
- [16] Z. Cui, Q. Du, J. Gao, and R. Bie, "Optimum design of a deep cooling tower for waste heat and water recovery from humid flue gas," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 49, no. May, p. 103317, 2023, doi: [10.1016/j.csite.2023.103317](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103317).
- [17] S. Kumar et al., "Estimation of performance parameters of a counter flow cooling tower using biomass packing," *Therm. Sci. Eng. Prog. J.*, vol. 44, no. February, pp. 1–11, 2023.
- [18] M. Lemouari, M. Boumaza, and A. Kaabi, "Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 6, pp. 1610–1617, 2009, doi: [10.1016/j.enconman.2009.02.002](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.02.002).
- [19] P. Navarro, J. Ruiz, M. Hernández, A. S. Kaiser, and M. Lucas, "Critical evaluation of the thermal performance analysis of a new cooling tower prototype," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, no. January, p. 118719, 2022, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118719](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118719).
- [20] P. Imani-mofrad, Z. Heris, and M. Shanbedi, "Experimental investigation of filled bed effect on the thermal performance of a wet cooling tower by using ZnO / water nanofluid," *Energy Convers. Manag. J.*, vol. 127, pp. 199–207, 2016.
- [21] K. Singh and R. Das, "A feedback model to predict parameters for controlling the performance of a mechanical draft cooling tower," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 105, pp. 519–530, 2016, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.03.030](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.030).
- [22] S. T. Dehaghani, H. Ahmadikia, and H. Ahmadikia, "Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet / dry approach," *Appl. Therm. Eng.*, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.069>.
- [23] B. Yang, X. Liu, Z. Zhao, J. Song, and C. Chen, "The analysis of the influence of packing and total pressure on cooling performance of the cooling tower," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 170, no. 3, pp. 1–8. doi: [10.1088/1755-1315/170/3/032020](https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/3/032020).
- [24] J. Liao, X. Xie, H. Nemer, D. E. Claridge, and C. H. Culp, "A simplified methodology to optimize the cooling tower approach temperature control schedule in a cooling system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. June, p. 111950, 2019, doi: [10.1016/j.enconman.2019.111950](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111950).
- [25] L. Jiang et al., "The effects of water droplet diameter distribution in the rain zone on the cooling capacity and water-splashing noise for natural draft wet cooling towers," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 164, no. August 2020, 2021, doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2021.106875](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106875).
- [26] Z. Zhang, D. Zhang, Q. Han, F. Wu, M. Gao, and S. He, "Numerical simulation on the three kinds of water droplet diameter treatments in rain zone of wet cooling towers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 170, pp. 1–11, 2021.
- [27] D. Lyu, F. Sun, and Y. Zhao, "Impact mechanism of different fill layout patterns on the cooling performance of the wet cooling tower with water collecting devices," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 1389–1400, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.190>.
- [28] K. Chen, F. Sun, L. Zhang, X. Chen, and X. Zhang, "A sensitivity-coefficients method for

predicting thermal performance of natural draft wet cooling towers under crosswinds,” vol. 206, no. August 2021, 2022.

- [29] A. V Dmitriev, I. N. Madyshev, V. V Kharkov, O. S. Dmitrieva, and V. E. Zinurov, “Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 22, p. 100835, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100835>.
- [30] C. Lee and Y. J. Wang, “A novel method to derive formulas for computing the wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 128, pp. 271–275, 2018, doi: [10.1016/j.measurement.2018.06.042](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.042).
- [31] R. Ramkumar and A. Ragupathy, “Optimization of cooling tower performance with different types of packings using Taguchi approach,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 929–936, 2015, doi: [10.1007/s40430-014-0216-1](https://doi.org/10.1007/s40430-014-0216-1).
- [32] H. Ma, L. Cai, F. Si, and J. Wang, “Exploratory research on annular-arranged moist media to improve cooling capacity of natural draft dry cooling tower and thermo-flow characteristics of its radiators,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 172, p. 121123, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121123>.
- [33] K. Singh and R. Das, “An experimental and multi-objective optimization study of a forced draft cooling tower with different fills,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 417–430, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.080>.
- [34] B. K. Naik, V. Choudhary, P. Muthukumar, and C. Somayaji, “Performance Assessment of a Counter Flow Cooling Tower - Unique Approach,” in *Energy Procedia*, 2017, vol. 109, no. November 2016, pp. 243–252. doi: [10.1016/j.egypro.2017.03.056](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.056).
- [35] H. Ma, L. Cai, and F. Si, “Numerical study on the effects of layout compactness of the annular-aligned moist media on thermo-hydraulic performance of an indirect dry cooling tower,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, p. 118649, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118649>.