

## PERBANDINGAN UNJUK KERJA ANTAR BAHAN PENGISI PADA MENARA PENDINGIN TIPE INDUCED COUNTER FLOW

### *Performance Comparison of Cooling Tower Filler Used in the Induced Counter Flow Type Cooling Tower System*

Yusuf Wibisono

Staf Pengajar Jurusan Teknik Pertanian, FTP – Unibraw  
Email: y\_wibisono@brawijaya.ac.id

#### **ABSTRACT**

*Appropriate postharvest handling of agricultural products is important to maintain the quality. The objectives of the research were to design and to evaluate the performance of cooling tower system, and to compare the characteristics of cooling tower filler i.e. sponge stone and foam rubber sponge, respectively. The induced counter flow type cooling tower was used in this experiment, equipped with a 90 cm height tank made up of fibber glass. Each filler, either arranged in single or multi-layers, was in direct contact with the water and air used as a media in the cooling process.*

*The results showed that the highest range was achieved by the use of a 5 layers foam rubber sponges i.e. 3.2°C at an L/G Ratio of 2.567, maximum cooling power of 2690.6 W and COP 12.9, at temperatures of 26.1°C (dry bulb) and 24.4°C (ambient), and ambient RH of 87%. The dry bulb and wet bulb of the air inlet temperature were 25.5°C and 24.3°C, respectively, while the respective water inlet and outlet temperature 27.4°C and 24.2°C, at L/G ratio of 0.91-2.33 kJ/kg. °C.*

*Key words: induced counter flow, cooling tower, filler, range, L/G ratio*

#### **PENDAHULUAN**

Hasil pertanian, seperti sayuran dan buah-buahan merupakan jaringan hidup, sehingga pada masa pasca panen masih meneruskan proses fisiologis, enzimatik fotosintesis dan respirasi (Pantastico, 1986). Oleh sebab itu, segera setelah masa pasca panen perlu dilakukan usaha-usaha yang bisa menurunkan laju respirasi dan mempertahankan mutu produk selama mungkin, diantaranya dengan pra-pendinginan dan penyimpanan dingin produk hortikultura (Ryal dan Lipton, 1982).

Daerah sentra produksi pertanian, khususnya produk hortikultura, umumnya berada pada daerah dataran tinggi. Udara lingkungan dataran tinggi memiliki suhu yang relatif rendah. Suhu minimum pada malam hari sekitar 10°C, sedangkan pada malam hari sekitar 20°C (BMG, 1991 dalam Trisasiswi, 2000). Kondisi tersebut

dapat digunakan untuk mendinginkan ruang pra-pendinginan hasil hortikultura, dengan mensirkulasikan fluida kerja berupa air murni sebagai pengganti freon.

Pendinginan dengan proses konveksi biasa akan lebih baik jika didukung dengan sistem pendinginan yang tepat. Sistem pendinginan seperti ini dapat dipenuhi oleh sistem pendinginan menggunakan radiasi langit saat malam hari (McVeigh, 1984) dan menara pendingin dengan desain tertentu (Tambunan, 1999<sup>a</sup>).

Prinsip pendinginan radiatif, fluida kerja air murni didinginkan oleh proses pelepasan kalor ke angkasa melalui mekanisme pindah panas radiasi oleh langit malam hari yang emisivitasnya mendekati benda hitam sempurna, *driving force* didapat dari pelepasan panas oleh permukaan kolam air yang berfungsi sebagai radiator ke langit, sehingga sistem pendinginan ini hanya bekerja efektif pada malam hari, saat langit cerah

tidak berawan, sehingga perpindahan panas dari radiator ke langit tidak terhalang.

Beberapa kelemahan sistem pendinginan radiatif harus dikurangi, maka perlu dikombinasikan dengan sistem pendinginan dengan menara pendingin. Dengan system ini, pada siang hari memungkinkan melakukan pendinginan fluida kerja air melalui proses perpindahan massa antara fluida kerja air yang telah menyerap kalor dari ruang pendingin, dengan udara lingkungan yang mempunyai kelembaban relatif rendah. Oleh sebab itu, pemanfaatan pendinginan hibrid menggunakan sistem pendinginan radiatif dan menara pendingin ini merupakan alternatif pendinginan dengan efek pendinginan sepanjang hari yang memiliki beberapa keunggulan dalam penerapannya di lokasi pertanian.

Penelitian mengenai sistem pendinginan kombinasi ini telah dilakukan oleh Boon-Long (1992) di Thailand Utara untuk *pre-cooling* buah dan sayuran untuk menghilangkan *field-heat* menggunakan air dingin dari kolam atap untuk disemprotkan melalui menara pendingin, kemudian udara panas dari dalam ruangan dialirkan ke menara dengan ditarik kipas dan udara dingin keluaran dari menara dialirkan kedalam ruangan. Hal yang sama dilakukan oleh Trisasiwi (2000) di Candikuning, Bali dan Batu, Malang untuk pendinginan beberapa jenis sayuran. Penelitian ini berusaha untuk mendapatkan parameter unggul khususnya dalam sistem pendinginan menara pendingin, sebagai bagian pendukung utama sistem pendinginan hibrid tersebut.

Beberapa percobaan sudah pernah dilakukan berkaitan dengan penggunaan teknologi menara pendingin untuk hasil pertanian. Hasil pengujian Tambunan, dkk (1999<sup>b</sup>) menunjukkan bahwa hasil kisaran pendinginan air sebesar 0.5-1°C dengan menggunakan model menara pendingin tipe *counter flow* menggunakan sirip-sirip kayu sebagai *baffle* pengganti *packing* menara pendingin. Penelitian yang dilakukan di Bogor ini merekomendasikan agar dilakukan optimalisasi kerja kipas,

pompa air dan nosel, serta memperbaiki sistem isolasi dinding, untuk meningkatkan kinerja sistem.

Percobaan lain dilakukan oleh Trisasiwi (2000) dengan menggunakan *packing* dari *fiberglass* untuk memperbesar luas bidang basah agar persentuhan antara udara dan air menjadi lebih lama sehingga penurunan suhu air lebih besar. Penelitian yang dilakukan di Bogor inipun masih menghasilkan *range* penurunan suhu air maksimum sebesar 1°C. Trisasiwi (2000) juga melakukan percobaan di Malang menggunakan batu apung sebagai *packing* menara pendingin. Namun, *range* yang dihasilkan justru lebih kecil, yaitu nilai maksimumnya sebesar 0.9°C.

Selanjutnya, Wahyunissa (2001) melakukan penelitian dengan menggunakan model menara pendingin yang dipakai Trisasiwi (2000) di Bogor, namun *packing* yang dipakai adalah batu apung sebagai pengganti *fiberglass*, dengan maksud untuk memperluas luasan bidang basah untuk memperlama waktu sentuh udara dan air. Penelitian ini mendapatkan nilai *range* sebesar maksimum 0.8°C dan nilai *approach* 0.1°C. Sedangkan nilai *L/G ratio* yang dihasilkan 0.57 kJ/kg °C dengan nilai karakteristik menara pendingin yang diuji rata-rata sebesar 10.87 W (J/g beda entalpi).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui secara lebih detail karakteristik bahan pengisi menara pendingin dari bahan batu apung dan spons. Penelitian ini menggunakan prototipe menara pendingin tipe *induced counter flow*, dengan menggunakan *packing* dari pecahan batu apung dan bahan pengisi alternatif lainnya, yaitu potongan spons (*foam rubber sponge*) yang disusun dalam kawat kasa untuk memperlama waktu kontak air dan udara, serta mempertahankan agar udara dapat mengalir lancar dan mengenai seluruh permukaan bidang kontak. Disamping itu model menara pendingin ini dibuat berdimensi kecil, supaya dapat dimasukkan dalam suatu ruangan tertutup yang dapat dikontrol suhu dan

kelembabannya, sebagai usaha untuk memperkecil ragam variabel yang mempengaruhi kinerja sistem.

### BAHAN DAN METODE

#### Bahan dan Alat

Tipe menara pendingin yang diteliti adalah *induced counter flow* yang merupakan bagian dari tipe mekanik dengan kipas berada di bagian atas menara yang berfungsi untuk menarik udara dari bawah. Aliran udara dan air sejajar dengan penampang membujur menara.

Menara terbuat dari tangki *fiberglass* dengan ketebalan 0.4 cm, diameter 60 cm, tinggi menara 90 cm, tinggi bak penampung 30 cm, jarak menara dan bak penampung (tinggi lubang udara) 30 cm, jarak antar rak 10 cm yang diisi dengan batu apung atau spons dengan berbagai tingkat ketinggian yaitu 10 cm, 30 cm, dan 50 cm.

Lubang udara ditutup dengan gerai yang terbuat dari lembaran karet. Pada bagian atas menara dipasang kipas aksial dengan diameter 40 cm, 50 Hz, 680 rpm, daya 1.1 kW, 8 Pole, 7.5 A, Model VTOA, seri 6155762. Sedangkan, untuk mengalirkan air digunakan pipa PVC ½ inch, debit air diukur dengan flowmeter, dan air dihamburkan menjadi partikel-partikel kecil melalui shower.

Alat yang digunakan dalam proses pengujian:

1. Pengukur suhu: terdiri dari perekam suhu Hybrid Recorder Model 3880, HR 2500E, Yokogawa Electric Cooperation Japan dan termokopel jenis CC (*Copper/Constantan*) tipe T untuk kisaran suhu -200°C sampai 350°C.
2. Pengukur kecepatan aliran udara: Anemomaster, Model 6011, merk Kanomax, Japan.
3. Pengukur kecepatan aliran air pendingin: Flow meter.
4. Stopwatch: pengukur waktu saat kalibrasi flowmeter.
5. Oil bath: digunakan pada kalibrasi termokopel.

6. Termometer *Beckham*: digunakan pada kalibrasi termokopel.
7. Cold Storage (Ruang ber-AC).
8. Program BASIC Psychrometric Chart untuk menentukan RH dan entalpi berdasarkan hasil pengukuran suhu bola kering dan bola basah pengukuran.
9. Pengukur arus listrik: Heles CR-52 Amperemeter Analog.
10. Pengukur tegangan (*voltage*) listrik: Digital Multimeter, Model 2506 A, Yokogawa Electric Works Japan.

#### Metode

Setelah prototipe menara pendingin siap, maka dipersiapkan alat-alat pengukuran. Parameter yang diukur: suhu air masuk dan keluar menara, suhu bola basah dan suhu bola kering udara masuk menara, suhu bola basah dan suhu bola kering udara keluar menara, suhu bola basah dan suhu bola kering lingkungan, suhu udara di dalam menara pada lapisan atas, tengah dan bawah, suhu packing pada lapisan atas, tengah dan bawah, kecepatan dan debit aliran udara maupun air.

Debit udara didalam menara [**G**] (*l/mt*) diukur ditempat udara masuk dan udara keluar menara, lalu dirata-rata. Debit air [**L**] (*l/mt*) diukur pada pipa air sebelum melewati shower.

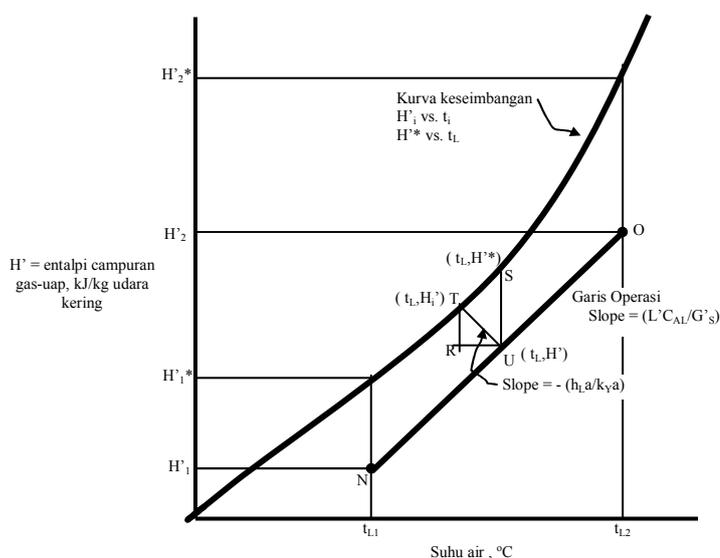
Pengukuran dilakukan pada siang hari, dengan kriteria pengukuran pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Pengukuran

Kondisi input air ke menara pendingin	Jenis dan tebal <i>packing</i>	
Tanpa beban pemanasan	Batu apung	5 lapis
		3 lapis
		1 lapis
Dengan beban pemanasan	Spons	5 lapis
	Batu apung	5 lapis
		3 lapis
		1 lapis
	Spons	5 lapis
		3 lapis
		1 lapis

Treyball (1969) menyebutkan bahwa air yang telah dipanaskan setelah melewati penukar panas (*heat exchangers*), kondensor, dan lainnya, harus didinginkan terlebih dulu sebelum digunakan ulang dengan mengontakkannya dengan udara atmosfer. Panas laten air begitu besar sehingga hanya sejumlah kecil penguapan yang dihasilkan oleh efek pendinginan yang besar. Setelah diketahui bahwa pindah massa rata-rata yang terjadi biasanya kecil, tingkat suhu yang secara umum rendah, dan hubungan Lewis yang dapat diterapkan secara layak bagi sistem air-udara.

*Driving force* total menunjukkan beda entalpi untuk fase cair tetapi dinyatakan dengan  $H'$  seperti jarak vertical SU pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Operasi untuk Pendingin Air (Treyball, 1969).

### Analisis

Hasil pengukuran digunakan dalam menganalisis kinerja menara pendingin antara lain untuk :

- Mengetahui kisaran (*range*) dan hampiran (*approach*) menara pendingin pada dua jenis bahan pengisi.
- Mengetahui karakteristik menara pendingin.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Rancangan Fungsional dan Struktural

Sistem terdiri dari tangki pendingin terbuat dari kaca serat (*fiberglass*), pompa air listrik dengan debit 12–25 liter/menit, shower, packing digunakan pecahan batu apung dan spons potongan kubus 5 cm yang diatur dalam susunan kawat kassa, dan keran air.

Tangki *fiberglass* berfungsi sebagai model menara pendingin. Air dari bak sumber didinginkan dalam tangki.

Pompa listrik berfungsi untuk memompa air dari bak penampung melalui pipa pralon ukuran ½ inchi dan shower.

Shower untuk menyemprotkan air dan mengabutkan air bertekanan karena efek pengecilan diameter permukaan yang dilewati. Semakin kecil butiran air semakin bagus untuk memperluas permukaan kontak air dan udara pendingin yang ditarik oleh kipas. Kipas listrik berfungsi untuk menyedot udara dari bawah, kemudian mengalirkannya yang akan mendinginkan air dan membuang udara panas dari air keluar.

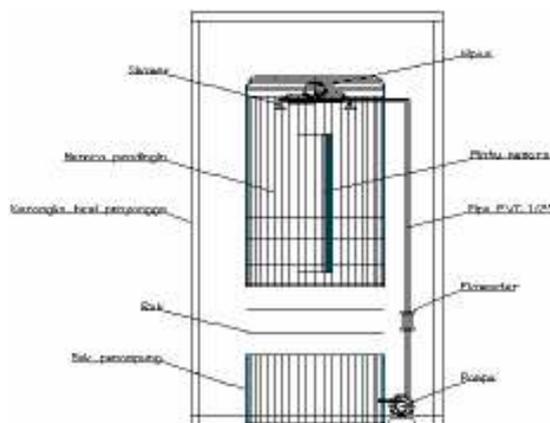
*Packing* dari batu apung atau spons (*foam rubber sponge*) dengan ukuran seragam diatur letaknya dalam tangki dengan membuat ruas-ruas wadah dari kawat kassa. Ketebalan *packing* perlu diperhatikan untuk memperpanjang waktu kontak udara dan air. Penempatan *packing* sedemikian rupa sehingga udara bisa lewat dengan leluasa.

Kran air berfungsi untuk mengatur aliran air melalui pipa pralon dan shower, kemudian akan masuk ke menara. Flowmeter berfungsi untuk mengukur debit air yang mengalir di dalam pipa untuk mengetahui pengaruh laju air terhadap hasil pendinginan.

Heater berfungsi untuk memanaskan air yang diasumsikan sebagai air yang keluar dari *precooling* setelah mendinginkan ruangan pada kondisi sebenarnya. Termostat berfungsi untuk menjaga agar suhu air yang dipanaskan tetap konstan, berkisar sekitar 26 °C.

Menara pendingin ditempatkan dalam ruang tertutup yang terkendali untuk mengontrol suhu lingkungan dan kelembabannya. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi ragam variabel yang berpengaruh dalam proses pendinginan dengan menara pendingin.

Menara pendingin tipe *induced counter flow* dibuat dari *fiberglass* setebal 4 mm, diameter 60 cm, tinggi menara 60 cm, tinggi bak penampung 30 cm, tinggi lubang udara 30 cm, *packing* berupa potongan batu apung dan spons yang disusun dalam rak-rak kawat kasa setinggi 10 cm dengan ketinggian *packing* antara lain setinggi 10 cm, 30 cm dan 50 cm. Menara dilapisi spons setebal 2 cm. Dasar menara terbuat dari pelat baja dengan tebal 0.8 cm yang berlubang-lubang sebagai tempat udara masuk dan air keluar. Lubang udara masuk dibuat dari lembaran karet yang disusun seperti gerai, untuk menampung percikan air, namun udara tetap bisa lewat. Bagian atas menara dipasang kipas aksial dengan ukuran diameter 12 inchi. Untuk mengalirkan air digunakan pompa. Menara ditopang oleh kerangka besi siku agar bisa berdiri dengan sempurna.

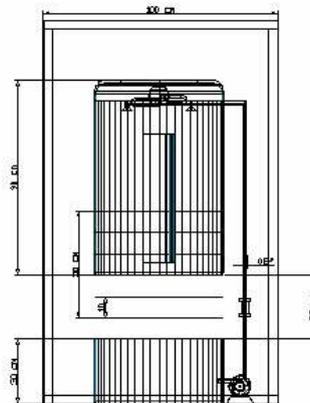


Gambar 2. Menara pendingin *Induced Counter Flow* yang diuji.

Berikut adalah dimensi menara pendingin secara lengkap :

- Tinggi menara = 90 cm
- Diameter menara = 60 cm
- Tinggi bak penampung = 30 cm

- Tinggi lubang udara masuk = 30 cm
- Tinggi rak total = 50 cm (10 cm/rak)
- Spesifikasi kipas :  $\phi = 12$  inchi ; 220 V ; 0,45 A ; 1400 rpm ; 1Ph ; 50 Hz
- Spesifikasi pompa : 220 V ; 50 Hz ; Hmax = 42 m ; 0,1 kW ; 1,2 A
- Diameter kritis Bt. Apung = 56,57 mm
- Dimensi Spons = 50 mm x 50 mm x 50 mm
- Volume Batu Apung =  $94,74 \text{ cm}^3$
- Volume Spons =  $125 \text{ cm}^3$
- Berat Batu Apung (rata-rata) = 82,5 gr
- Berat Spons (rata-rata) = 1,5 gr
- Jumlah rak 5 tingkat (@ 4 kolom), maka jumlah kolom total = 20 kolom
- Volume kosong/rak =  $0,024176 \text{ m}^3$
- Jumlah Batu Apung/rak = 80 bh
- Jumlah Spons/rak = 60 bh
- Volume Batu Apung/rak =  $7579,2 \text{ cm}^3$
- Volume Spons/rak =  $7500 \text{ cm}^3$
- Volume ruang sisa udara/rak (Batu Apung) =  $17038,4 \text{ cm}^3$
- Volume ruang sisa udara/rak (Spons) =  $17117,6 \text{ cm}^3$
- Void Ratio* Batu Apung = 2,248
- Void Ratio* Spons = 2,282



Gambar 3. Ukuran menara pendingin *Induced Counter Flow* yang diuji

### Hasil Pengujian

Pengujian menara pendingin dilakukan pada siang hari, dilakukan pada kondisi ruang yang tertutup (*indoor*) untuk menjaga suhu dan kelembaban lingkungan. Pengujian pertama dilakukan tanpa memberikan beban pemanasan, jadi air disirkulasikan secara terus menerus untuk

mengetahui besarnya penurunan suhu secara berkelanjutan.

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan pemanasan tambahan sebagai input air masuk menara sebagaimana air pendingin yang keluar dari gudang pendingin (*cold storage*). Air dipanaskan dengan heater dan dikontrol menggunakan termostat dengan metode kontrol *on-off*, pada suhu sekitar 26°C.

Kedua macam pengukuran, baik yang dilakukan tanpa beban pemanasan, dimana air disirkulasikan secara terus-menerus, maupun yang dilakukan dengan memanaskan air yang akan dimasukkan ke dalam menara pendingin, pengujian dilakukan pada dua jenis bahan *packing* yaitu batu apung dan spons. Dengan menggunakan dua jenis bahan *packing* tersebut, pengujian dilakukan dalam berbagai tingkatan tinggi bahan yaitu 1 lapis/rak (10 cm), 3 lapis/rak (30 cm) dan 5 lapis/rak (50 cm).

Pengujian dilakukan dalam 60 kali pencatatan terhadap titik-titik suhu yang akan diukur dengan selang waktu pengulangan 5 menit, 3 menit atau 1 menit. Sedangkan kecepatan aliran udara dan air diukur dalam 6 kali pencatatan dengan selang waktu pengulangan 30 menit atau 1 jam.

Kinerja menara pendingin dipengaruhi oleh beberapa parameter, antara lain suhu bola basah lingkungan, kapasitas air yang disirkulasikan, suhu air yang akan didinginkan, dan target suhu air yang ingin dihasilkan, yang juga berhubungan dengan *range* (kisaran) dan *approach* (hampiran) yang ingin dicapai. Semua parameter tersebut sangat erat kaitannya dengan lama-tidaknya waktu kontak antara udara dan air, tinggi dan ukuran menara serta nilai *L/G Ratio*.

Kisaran tertinggi dihasilkan oleh bahan pengisi spons 5 lapis dengan nilai *range* 3.2°C, kemudian berturut-turut oleh bahan *packing* batu apung 5 lapis, spons 3 lapis, spons 1 lapis, batu apung 3 lapis dan terakhir batu apung 1 lapis. Jadi secara umum terbukti, sesuai dengan pengujian awal terhadap bahan *packing* sebelum dipakai dalam menara pendingin,

bahwa bahan spons mempunyai kemampuan mendinginkan air lebih banyak dibanding batu apung. Hal ini terjadi karena penampakan pori-pori spons lebih kecil dan teratur sehingga waktu kontak antara udara dan air dalam bahan tersebut terjadi lebih lama, dan memungkinkan terjadinya pindah panas dan massa yang lebih besar. Besar dan jumlah pori bahan *packing* dalam penelitian ini belum bisa diukur secara tepat, sehingga perlu penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh porositas bahan ini terhadap pendinginan air. Kemudian, jenis unsur bahan *packing*-pun bisa menyebabkan perbedaan kemampuan dalam pendinginan, khususnya batu apung karena tersusun atas unsur kapur yang relatif panas dan daya ikat terhadap partikel airnya rendah, sehingga kemungkinan akan berpengaruh dalam kemampuan pendinginan air dibandingkan dengan spons sintesis.

Pengukuran dengan menggunakan beban pemanasan, menggambarkan kondisi yang serupa dengan kondisi sebenarnya di dalam penerapan di lapangan. Air dengan suhu tinggi yang masuk kedalam menara diasumsikan sama dengan fluida kerja air yang keluar dari gudang pendingin (*cold storage*). Oleh sebab itu, analisis hasil pengujian kinerja menara pendingin akan lebih banyak membahas hasil pengukuran dengan menggunakan beban pemanasan.

Kisaran terbesar dihasilkan pada pengukuran dengan beban pemanasan yang serupa dengan kondisi sebenarnya, yaitu terjadi pada *packing* 5 lapis spons yaitu sebesar senilai 3.2°C pada *L/G Ratio* 2.567, dengan daya pendinginan maksimum sebesar 2690.6 W dan COP sebesar 12.9, dan dengan kondisi lingkungan dengan suhu bola kering 26.1°C, suhu bola basah 24.4°C dan kelembaban 87% (kondisi ruang tertutup). Sementara udara masuk dengan suhu bola kering 25.5°C dan suhu bola basah 24.3°C. Air masuk kedalam menara dengan suhu 27.4°C dan keluar dengan suhu 24.2°C.

Kemudian berurutan mulai dari kisaran yang terbesar yaitu 3 lapis spons,

5 lapis batu apung, 1 lapis spons, 3 lapis batu apung dan terakhir 1 lapis batu apung. Kisaran yang terkecil terjadi pada *packing* 1 lapis batu apung senilai 0.9°C terjadi pada *L/G Ratio* sebesar 0.739, pada lingkungan dengan suhu bola kering 27.4°C dan suhu bola basah 25.4°C. Udara masuk dengan suhu bola kering 27.4°C dan suhu bola basah 26.4°C. Air masuk dengan suhu 28.4, dengan kapasitas pendinginan 819.9 W dan nilai 3.9 untuk COP.

Menara pendingin disimpan dalam ruangan tertutup dimaksudkan untuk menghindari fluktuasi suhu dan kelembaban yang terlalu ekstrim. Suhu lingkungan yang terjadi selama pengujian berkisar antara 25.7°C sampai dengan 31.1°C. Fluktuasi suhu masih cukup besar, sekitar 6°C, kemungkinan disebabkan karena letak ruangan tempat pengujian berada di bawah atap langsung, sehingga walaupun radiasi sinar matahari tidak masuk secara langsung, namun konduksi panas matahari oleh dinding dan atap ke dalam ruangan tetap terjadi, di sisi lain AC yang digunakan untuk mengkondisikan udara ruangan juga kurang besar kemampuannya, sehingga suhu udara ruangan sedikit banyak masih dipengaruhi oleh lingkungan luar. Hal ini juga dapat dilihat pada kelembaban relatif (RH) ruangan dengan nilai berkisar antara 77% sampai dengan 94%, atau rata-rata sebesar 87%. Suhu bola basah lingkungan berkisar antara 22.5°C dan 29.4°C. Sedangkan suhu air yang masuk ke dalam menara berkisar antara 21.8°C dengan 31.2°C, dan suhu air yang keluar dari menara pendingin sebesar 21.2°C hingga 29.6°C.

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian pengukuran suhu udara dan bahan *packing* dalam setiap bagian melintang dalam menara pendingin. Pengukuran bagian melintang menara ini diwakili oleh udara dan bahan *packing* pada rak 1 (paling bawah), rak 3 (bagian tengah) dan rak 5 (paling atas). Data pengujian menunjukkan bahwa secara umum baik udara maupun bahan *packing* pada rak paling bawah (rak 1) mempunyai

suhu yang lebih kecil dibanding rak-rak yang ada di atasnya.

Nilai hampiran, hanya bisa diukur pada pengujian dengan pemanasan. Dari pengujian tersebut didapatkan hasil bahwa hampiran yang terjadi berkisar antara 0°C sampai dengan 3.5°C. Pada hampiran = 0°C, berarti seluruh panas yang dibawa oleh partikel air dipindahkan dan diambil oleh partikel udara. Kondisi ini merupakan kondisi yang sangat ideal dan sangat jarang terjadi.

Kapasitas pendinginan sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai kisaran. Semakin besar kisaran maka semakin besar pula kapasitas pendinginan yang bisa dicapai oleh menara pendingin, sehingga prestasi kerjanya-pun (COP) akan semakin besar. Pada pengujian nilai kapasitas pendinginan menara terhitung antara 15.3 W sampai dengan yang terbesar yaitu 4337.1 W. Sedangkan nilai COP berkisar antara 0.1 sampai dengan 20.8.

Tabel 2. Hasil pengukuran *range* dan *L/G ratio* pada menara pendingin

Kondisi input air	Jenis dan tebal <i>packing</i>	<i>Range</i> (°C)		<i>L/G Ratio</i>
		Rata	Max	
Tanpa beban pemanasan	Batu apung 5 lps	-	2.9	1.55
	Batu apung 3 lps	-	1.2	2.07
	Batu apung 1 lps	-	2.4	1.68
	Spons 5 lps	-	1.5	2.20
Dengan beban pemanasan	Batu apung 5 lps	1.0	2.4	1.54
	Batu apung 3 lps	0.4	1.5	1.35
	Batu apung 1 lps	0.3	0.9	0.91
	Spons 5 lps	1.7	3.2	2.33
	Spons 3 lps	1.3	2.7	1.69
	Spons 1 lps	1.4	2.1	1.57

Terlihat bahwa secara umum nilai *L/G Ratio* akan semakin tinggi pada ketebalan bahan *packing*. Nilai *L/G Ratio* tertinggi pada spons 5 lapis dan terendah pada batu apung 1 lapis masing-masing 2.33 dan 0.91. Diagram operasi pendinginan air menunjukkan kinerja menara pendingin pada beberapa kondisi.

Tabel 3. Perbandingan parameter-parameter utama menara pendingin dengan berbagai variabel: jenis bahan pengisi, ketinggian dan ada tidaknya pemanasan.

Kondisi input air ke menara pendingin	Jenis dan tebal <i>packing</i>	<i>L/G Ratio</i>	<i>Qmp (W)</i>	<i>COP</i>	$\frac{hcA}{Cp}$ (W/kJ/Kg beda H)	<i>KY</i> (kg/dt. m <sup>2</sup> .dY')	
Tanpa beban pemanasan	Batu	5 lapis	1.55	4347.1	20.8	0.63	0.046
	apung	3 lapis	2.07	1869.7	8.9	0.51	0.021
		1 lapis	1.68	3071.5	14.7	0.28	0.105
	Spons	5 lapis	2.20	2403.4	11.5	0.63	0.015
Dengan beban pemanasan	Batu	5 lapis	1.54	2049.8	9.8	0.76	0.031
	apung	3 lapis	1.35	1323.4	6.3	0.16	0.009
		1 lapis	0.91	819.9	3.9	0.11	0.008
	Spons	5 lapis	2.33	2690.6	12.9	2.18	0.047
		3 lapis	1.69	2390.5	11.4	0.25	0.016
	1 lapis	1.57	1744.5	8.3	0.18	0.031	

Di dalam diagram tersebut antara lain terdapat garis kerja udara jenuh, yaitu garis yang menghubungkan suhu air yang masuk ke menara dan suhu air yang keluar dari menara pendingin. Sedangkan nilai *L/G Ratio* merupakan kemiringan/*gradien* dari garis operasional pada diagram. Nilai tersebut adalah nilai yang menunjukkan banyaknya air yang dapat didinginkan oleh udara dengan cara persentuhan yang terjadi dalam menara pendingin.

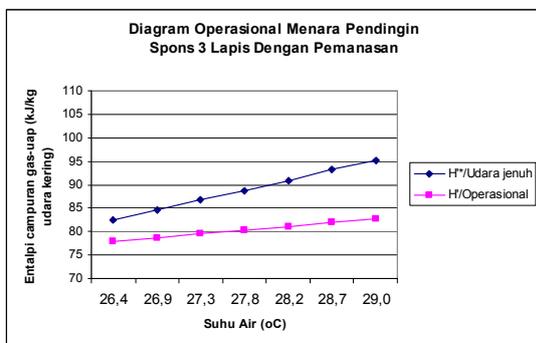
Garis kerja udara menunjukkan kerja udara saat udara bertemu dengan air, kemudian terjadi pertukaran panas dan massa dari air ke udara. Jika ditarik garis vertikal dari saat dimulainya garis kerja udara menuju garis kerja air, akan diketahui batas garis jenuh, yaitu kondisi pada saat udara dan air telah mengalami kontak persentuhan dan terjadi perpindahan panas dari air ke udara sehingga udara menjadi jenuh karena percampurannya dengan air, sementara air menjadi dingin karena kehilangan panas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *driving force* terbesar ditunjukkan oleh 30 cm lapisan spons sebagai bahan *packing* dengan pemanasan (Gambar 4), kemudian berturut-turut 30 cm batu apung dengan pemanasan, 50 cm batu apung tanpa pemanasan, spons 50 cm, dan

batu apung 30 cm. Pada pengujian batu apung 1 lapis tanpa pemanasan, terjadi perpotongan garis kerja air dan kurva udara jenuh, kemungkinan terjadi kesalahan pengukuran pada awal masuknya air kedalam menara pendingin. Kapasitas pendinginan dan COP pada kondisi kisaran tertinggi dapat dilihat pada Tabel 3.

Sementara itu, koefisien pindah massa dihitung untuk mengetahui efektifitas jenis *packing* menara yang dipilih, dengan ragam ketinggian yang telah ditetapkan, untuk memindahkan massa dari air ke udara yang masuk ke menara. Nilai karakteristik menara pendingin berkisar antara 0.11 sampai 2.18 W/kJ/Kg beda entalpi. Nilai karakteristik menara pendingin merupakan pola aliran udara dan dinamika tetesan air di dalam menara pendingin. Sedangkan koefisien pindah massa menara pendingin digunakan untuk menentukan tinggi *packing* menara pendingin yang optimal untuk mendinginkan sejumlah tertentu air.

Dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa secara umum spons merupakan bahan pengisi yang lebih baik dibandingkan dengan batu apung, walaupun pada pengujian tanpa beban pemanasan nilainya sedikit lebih rendah. Namun hal ini belum bisa dianggap bahwa *packing* spons

merupakan bahan pengisi yang terbaik, karena masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jenis *packing* lain yang mempunyai karakteristik dan kinerja yang lebih baik dibandingkan spons.



Gambar 4. Diagram operasional menara pendingin dengan *packing* 3 lapis spons dengan pemanasan

Nilai *L/G Ratio* lebih banyak dipengaruhi oleh laju aliran air yang masuk ke menara pendingin, dibandingkan dengan aliran udara yang masuk. Namun, pada penelitian ini laju aliran udara cukup besar karena pemakaian rak-rak kawat kasa sehingga udara bisa bebas bergerak, dibandingkan jika *packing* dibiarkan tertumpuk tanpa rak-rak pembatas.

Dalam penerapan di lapangan, nilai *L/G Ratio* ini harus dipertahankan pada suatu kondisi yang dapat menunjukkan kinerja pendinginan yang besar, namun disisi lain efektivitasnya tetap dijaga, dengan meminimalkan input energi yang dibutuhkan. Untuk penerapan menara pendingin di daerah beriklim tropis seperti Indonesia, mempertahankan nilai *L/G Ratio* sebesar 2.33, yang teruji menghasilkan kisaran terbesar, merupakan langkah yang tepat, disamping harus dikombinasikan dengan sistem pendinginan radiatif, sehingga dapat diterapkan sepanjang hari. Hal ini tentu saja berbeda dengan penerapan di daerah gurun yang terbukti efektif menghasilkan kisaran yang besar pada *L/G Ratio* sebesar 1.5°C.

Sementara itu, secara umum koefisien pindah massa hasil pengukuran sedikit

lebih besar dibandingkan koefisien pindah massa ideal, dengan tingkat perbedaan sebanyak 1 sampai 3 kali lipat, kecuali pada pengukuran menggunakan *packing* batu apung 1 dan 3 lapis dengan beban pemanasan yang sedikit lebih kecil (50%), dan pada pengukuran menggunakan *packing* batu apung 1 tanpa beban pemanasan yang menghasilkan nilai 8 kali lebih besar. Khusus untuk yang terakhir ini terjadi karena *driving force* yang terjadi pernah mencapai nilai negatif sehingga mempengaruhi besarnya nilai koefisien pindah massa. Berdasarkan hasil berikut, khususnya pada pengukuran dengan menggunakan beban pemanasan, nilai koefisien pindah massa teoritis secara umum relatif lebih kecil dibandingkan dengan nilai koefisien pindah massa terukur/nyata. Hal ini terjadi karena besarnya *driving force* yang terjadi pada saat pengukuran, yang dicerminkan juga dengan besarnya kisaran, yang besarnya berbanding lurus dengan nilai koefisien pindah massa terukur/nyata.

Tabel 4. Perbandingan koefisien pindah massa secara teoritis dan hasil terukur menara pendingin.

Kondisi input air	Jenis dan tebal <i>packing</i>	<i>kY</i> (kg/dt.m <sup>2</sup> .dY')		
		Teori	Terukur	
Tanpa beban panas	Batu apung	5 lps	0.015	0.046
		3 lps	0.014	0.021
	Spons	1 lps	0.013	0.105
		5 lps	0.014	0.015
Dengan beban panas	Batu apung	5 lps	0.014	0.031
		3 lps	0.016	0.009
	Spons	1 lps	0.018	0.008
		5 lps	0.011	0.047
		3 lps	0.012	0.016
		1 lps	0.013	0.031

Dari kedua jenis pengukuran ini didapatkan kesimpulan yang menarik. Disatu sisi, pengujian tanpa beban pemanasan akan menghasilkan nilai selisih suhu yang semakin lama semakin kecil sampai mendekati 0°C (*equilibrium line*).

Pengujian seperti ini di lapangan, dapat dilakukan dengan mensirkulasikan air secara terus-menerus sampai kondisi terdingin, baru kemudian disalurkan ke gudang pendingin, sehingga air yang masuk ke gudang pendingin lebih rendah suhunya dibandingkan jika air hasil menara pendingin langsung disalurkan ke gudang pendingin. Pada pengujian dengan menggunakan beban pemanasan, dapat dilihat fluktuasi selisih suhu yang dihasilkan oleh kerja menara pendingin dari waktu ke waktu, sehingga mampu menggambarkan kestabilan sistem dalam mendinginkan air.

### KESIMPULAN

Kesimpulan yang bisa diambil yaitu:

- 1) Rancangan memakai rak-rak penyusunan *packing*, untuk memudahkan sirkulasi udara, sehingga kontak air dan udara dapat berlangsung dengan maksimal dan menghasilkan kisaran serta kinerja pendinginan lebih besar,
- 2) Kisaran terbesar dihasilkan pada pengukuran dengan beban pemanasan yang serupa dengan kondisi sebenarnya, yaitu pada *packing* 5 lapis spons sebesar  $3.2^{\circ}\text{C}$  pada *L/G Ratio* 2.567, daya pendinginan maksimum 2690.6 W dan COP sebesar 12.9, dan kondisi lingkungan dimana suhu bola kering  $26.1^{\circ}\text{C}$ , suhu bola basah  $24.4^{\circ}\text{C}$ , dan kelembaban 87% (kondisi ruang tertutup), serta suhu bola kering dan bola basah udara masuk masing-masing  $25.5^{\circ}\text{C}$  dan  $24.3^{\circ}\text{C}$ , dan suhu air masuk  $27.4^{\circ}\text{C}$  dan keluar menara pendingin dengan suhu  $24.2^{\circ}\text{C}$ ,
- 3) Nilai *L/G Ratio* yang diuji berkisar antara 0.91–2.33 kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$  dan yang tepat untuk kondisi iklim Indonesia harus dipertahankan pada nilai 2.33 seperti pada hasil pengujian,
- 4) Nilai karakteristik menara yang diuji dengan beban pemanasan sebesar 0.11 sampai 2.18 W/kJ/Kg beda entalpi yaitu kapasitas pendinginan pada kondisi sama maksimum sebesar 2690.6 W dengan nilai COP rata-rata sebesar 8.7,
- 5) Koefisien pindah massa nyata yang teruji pada kondisi dengan beban pemanasan berkisar antara 0.008–0.047 kg/dt.m<sup>2</sup>. $\Delta Y'$ ,
- 6) Secara

umum bahan *packing* spons cenderung menampakkan kinerja yang lebih baik dibanding bahan batu apung, namun belum bisa dianggap bahwa *packing* spons merupakan bahan pengisi yang terbaik, karena masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jenis *packing* lain yang mempunyai karakteristik dan kinerja yang lebih baik dibandingkan spons.

Selain itu, juga bisa disarankan bahwa, perlu penelitian lebih lanjut mengenai porositas dan unsur bahan pengisi (*packing*), sehingga dapat ditemukan bahan pengisi yang paling baik kinerjanya, khususnya untuk mencapai kisaran maksimal dengan ketinggian *packing* yang optimal dan untuk penerapan menara pendingin di daerah tropis seperti Indonesia, disarankan mempertahankan nilai *L/G Ratio* sebesar 2.33 yang teruji menghasilkan kisaran terbesar, disamping harus dikombinasikan dengan sistem pendinginan radiatif, sehingga dapat diterapkan sepanjang hari. Disamping itu, pengembangan operasional sistem dengan penggunaan kontrol, khususnya pada pengaturan *L/G Ratio* yang dapat berubah sesuai kondisi lingkungan yang ekstrim, sangat disarankan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Boon-Loong, P. 1992. Nocturnal Cooling. In : Solar Air Conditioning and Refrigeration. Pp. 175-202. Edited by : Sayigh, A.M.M., and J.C.McVeigh. Pergamon Press. Oxford.
- McVeigh, J.C. 1984. Solar Cooling and Refrigeration. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France. Ambient Press Limited. London. UK.
- Pantastico, E.B. et al. 1986. Penyimpanan dan Operasi Penyimpanan Secara Komersial di dalam E.B. Pantastico, (ed.). Fisiologi Pasca Panen Penanganan dan Pemanfaatan Buah-buahan dan Sayur-sayuran Tropika dan Subtropika terjemahan. Universitas Gajahmada.
- Ryall, A.L., dan W.J. Lipton. 1982. Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables. AVI

- Publishing Company, Inc. Westport. Connecticut.
- Tambunan, A.H.. 1999<sup>a</sup>. Sistem Pendinginan Evaporatif untuk Hasil Pertanian. Makalah Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Tambunan, A.H. dkk. 1999<sup>b</sup>. Penerapan Sistem Pendinginan Evaporatif untuk Penanganan Pasca Panen Hasil Pertanian. Jurnal Keteknikan Pertanian Vol 13, No 1, April 1999.
- Treyball, R.E. 1969. Mass Transfer Operations, Second Edition. Kogakusha Company, Ltd., Tokyo.
- Trisasiwi, W. 2000. Sistem Pendinginan Radiatif dan Menara Pendingin Menggunakan Fluida Kerja Air di Dataran Tinggi untuk Penyimpanan Sayuran. Disertasi. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Wahyunissa, R. 2001. Uji Performansi Menara Pendingin Tipe *Induced Counter Flow*. Skripsi. Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.