

Studi Eksperimental Penguapan Tetesan: Perbandingan Sir Garam dan Aquades

Bambang Suryawan dan Engkos Achmad Kosasih

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424
e-mail :kosri@eng.ui.ac.id

Abstrak

Desalinasi air laut bermanfaat bagi kebutuhan air bersih. Untuk mendapatkan hasil desalinasi yang efektif maka diperlukan pengetahuan tentang karakteristik penguapan air laut. Air laut disini digantikan oleh air garam. Laju penguapan air; di mana sangat dipengaruhi oleh kelembaban udara, temperatur lingkungan dan kecepatan aliran udara; dapat diakomodir dengan melakukan penelitian penguapan tetesan.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat berupa penyuntik cairan untuk menghasilkan tetesan, pemanas, penghembus udara dan alat kontrol. Tetesan ini berupa air garam dan aquades. Tetesan dijatuhkan pada wire probe thermocouple, udara dialirkan melalui tetesan dengan kecepatan dan temperatur bervariasi. Data berupa gambar perubahan dimensi tetesan direkam, kemudian diolah dengan software. Hasil pengolahan data berupa bilangan tak berdimensi yaitu Nusselt dan Sherwood. Pers. Ranz-Marshall digunakan sebagai pembanding. Terlihat bahwa air garam lebih sulit menguap dibandingkan dengan aquades. Data yang didapat dari penelitian mempunyai kecenderungan selalu berada di atas model analogi Ranz-Marshall.

Kata kunci: Penguapan tetesan, bilangan Nusselt, bilangan Sherwood, Model analogi, Ranz-Marshall

1. Pendahuluan

Peningkatan populasi dunia dan lebih banyaknya perhatian yang diarahkan untuk peningkatan dan diversifikasi produksi makanan, merupakan tuntutan tersendiri untuk memelihara dan melindungi sumber air bersih. Khususnya terjadi pada sebagian besar daerah di bumi, yang mengalami tingginya laju pertumbuhan populasi dan produksi pertanian tergantung pada curah hujan serta kekurangan air bersih. Di sisi positif, daerah seperti itu memiliki lahan yang sangat luas. Bila permasalahan air berkadar garam dapat dipecahkan maka lahan seperti ini cocok untuk dijadikan lahan pertanian.

Perubahan cuaca drastis menyebabkan hujan sedikit sekali turun. Akibatnya sejumlah negara mengalami kekeringan dan kelangkaan air. Di Indonesia, kekeringan melanda di sejumlah wilayah. Akibatnya petani mengalami kegagalan panen karena pendangkalan waduk dan sungai yang merupakan sumber air terbesar bagi irigasi pertanian.

Keterbatasan air tidak hanya terjadi pada daerah yang disebutkan diatas tetapi juga pada daerah dimana bahan-bahan kimia dapat larut dalam air drainase sehingga mencemari air bersih serta meningkatkan kadar garam pada air tersebut. Air yang mengandung garam inilah yang menjadi permasalahan utama terhadap kebutuhan air bersih.

Desalinasi merupakan suatu teknik untuk mengolah air laut (air garam) dan menghasilkan air bersih. Pada proses ini air laut dipanaskan hingga terjadi penguapan. Selanjutnya uap ini dikondensasikan dan menjadi air bersih.

Agar proses desalinasi menjadi efektif dan sesuai dengan yang direncanakan maka dibutuhkan pengetahuan tentang karakteristik laju penguapan air garam. Penguapan tetesan (*droplet evaporation*) adalah salah satu teknik yang dapat dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan pengetahuan tersebut.

Studi eksperimental tentang penguapan tetesan telah dilakukan oleh Ranz W E & Marshall W R, Jr. yang menyimpulkan bahwa proses penguapan tetesan merupakan analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa.

Penggunaan analogi antara proses perpindahan kalor dan perpindahan massa sangat bermanfaat untuk mencari solusi atas permasalahan perpindahan massa. Inti dari analogi ini adalah memanfaatkan hubungan similaritas antara bilangan Nusselt dan bilangan Schmidt, sehingga solusi perpindahan kalor aplikatif terhadap perpindahan massa.

Persamaan Ranz-Marshall tersebut adalah sebagai berikut:

$$Nu = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

dengan

- Nu = bilangan Nusselt
- Re = bilangan Reynold partikel
- Pr = bilangan Prandtl, bernilai 0,7 untuk gas.

Dengan analogi perpindahan panas dan perpindahan massa, didapat:

$$Sh = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (2)$$

dengan:

- Sh = bilangan Sherwood
- Sc = bilangan Schmidt

Sedangkan persamaan laju perpindahan massa adalah:

$$Sh = \frac{k_c \cdot d}{D_{AB}} \quad (3)$$

dengan:

- k_c = koefisien konveksi massa
- d = diameter tetesan [m²]
- D_{AB} = difusi massa [m²/s]

Model analogi mempunyai beberapa persyaratan yang diantaranya adalah [2]:

- Keserupaan profil suhu dan profil konsentrasi, yang berarti bilangan Lewis (Le) harus bernilai sekitar satu. Pada kasus bilangan Lewis 0,83 - 0,84.
- Bilangan Reynolds berkisar 0-200

Dalam beberapa kasus bilangan Lewis tidak bernilai satu, misalnya uap air dalam udara. Juga sering terjadi bahwa gradien temperatur besar sehingga sifat-sifat bervariasi [9].

2. Dasar Teori

Bila dua benda atau lebih terjadi kontak termal maka akan terjadi aliran kalor dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal [7].

Proses perpindahan panas ini berlangsung dalam 3 mekanisme, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Mekanisme konveksi mendominasi pada penelitian tetesan ini.

Dengan tidak mengabaikan radiasi maka koefisien konveksi didapat dari,

$$Q_{\text{radiasi}} = \alpha \cdot \sigma \cdot (T_{\text{udara}}^4 - T_{\text{tetesan}}^4) \cdot A \quad (4)$$

dengan:

- α = absorptivitas, untuk air bernilai 0,95
- σ = konstanta Stefan-Boltzmann
5,67 x 10⁻⁸ [W/m².K⁴]

$$Q_{\text{total}} = \frac{-dm}{dt} \cdot h_{fg} \quad (5)$$

$$Q_{\text{konveksi}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{radiasi}} \quad (6)$$

sehingga,

$$h = \frac{Q_{konveksi}}{A.(T_{udara} - T_{tetesan})} \quad (7)$$

Dari koefisien konveksi tersebut, tentunya bilangan Nusselt dapat diketahui dari pers. dibawah,

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (8)$$

dengan:

h = koefisien konveksi kalor
[W/m².K]

A = luas permukaan tetesan [m²]

k = konduktivitas termal udara [W/m.K]

Udara dianggap sebagai gas ideal karena suhunya cukup tinggi dibandingkan suhu jenuhnya, dan uap air dianggap ideal karena tekanannya cukup rendah dibandingkan dengan tekanan jenuhnya [3]. Sehingga hukum-hukum yang berlaku untuk gas ideal akan berlaku juga pada udara, yaitu

$$PV = mR_a T \quad (9)$$

dengan:

P = tekanan atmosfer udara basah [Pa]

V = volume udara basah [m³]

m = massa udara basah [kg]

R_a = konstanta gas [kJ/kg.K]

T = temperatur udara basah [K]

Dengan demikian tetapan gas untuk udara kering berdasarkan skala karbon C-12 adalah :

$$R_a = \frac{\mathfrak{R}}{M_a} \quad (10)$$

$$R_a = 287,7 \text{ [J/kg.K]}$$

Kelembaban, tekanan, temperatur, entalpi dan volume jenis merupakan sifat termodinamika dari udara basah. Udara basah merupakan campuran biner antara udara kering dengan uap air, sehingga:

$$x_\omega = \frac{\omega}{0,622(1 + \omega)} \quad (11)$$

$$x_o = \frac{P_o}{P_{udara}} \quad (12)$$

dengan:

ω = rasio kelembaban

P_v = tekanan uap jenuh [Pa]

Rasio kelembaban (ω) disebut juga *moisture content* atau *mixing ratio*, adalah perbandingan massa uap air terhadap massa udara kering yang terkandung dalam udara basah pada tekanan dan temperatur tertentu.

Penambahan zat terlarut pada zat pelarut, menyebabkan zat pelarut mengalami penurunan fraksi mol sehingga terjadi penurunan tekanan uap, kenaikan titik didih, penurunan titik beku dan tekanan osmotik larutan. Ini merupakan sifat koligatif larutan, yaitu sifat fisis larutan yang tidak tergantung dari jenis zat terlarut tapi hanya tergantung pada jumlah partikel zat terlarut.

$$\varphi = \frac{m_{\text{garam}}}{m_{\text{tetesan}}} = \frac{0,1 \times \frac{4}{3} \pi r_1^3 \times \rho}{\frac{4}{3} \pi r_{\text{rata-rata}}^3 \times \rho} \quad (13)$$

$$Y = \frac{0,1 \times 2 \varphi}{\left(2 \varphi + 0,9 \times \frac{58,5}{18}\right)} \quad (14)$$

$$P_o = (1 - Y) \cdot P_v \quad (15)$$

dengan:

- φ = fraksi massa garam
- Y = fraksi mol garam
- P_v = tekanan uap jenuh air [Pa]
- P_o = tekanan uap jenuh air di dalam larutan [Pa]
- ρ = ρ_{air} [kg/m³]

Uap air mengalami difusi dalam udara. Laju penguapan atau laju difusi molal didapat dari persamaan berikut:

$$N = \frac{-dm/dt}{18 \cdot A} \quad (16)$$

Untuk koefisien konveksi massa :

$$k_c = \frac{N(1 - x_0)}{C(x_0 - x_\infty)} \quad (17)$$

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{\mathfrak{R}T} \quad (18)$$

dengan:

$$\mathfrak{R} = 8314,5 \text{ [J / kg.mol.K]}$$

Dengan demikian bilangan Sherwood dapat diketahui dari persamaan 3. Bilangan Schmidt digunakan untuk menentukan karakter aliran fluida bila terjadi momentum secara simultan dan difusi massa selama proses konveksi. Persamaannya adalah:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (19)$$

dengan:

- ν = viskositas kinematik [m²/s]
- D_{AB} = difusi massa [m²/s]

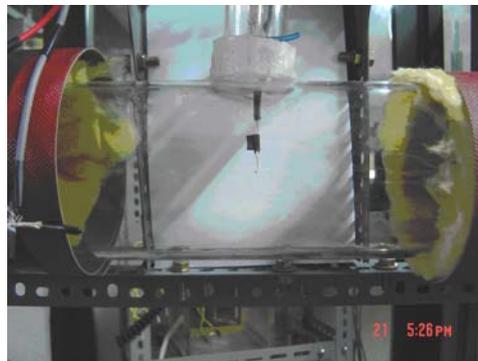
3. Metode Penelitian

Penelitian digunakan dengan menggunakan alat sebagai berikut.



Gambar 1. Sistem pengujian

Terdapat *blower* yang membantu menghembuskan udara. Inverter digunakan sebagai pengatur frekuensi listrik sehingga kecepatan aliran fluida dapat dikendalikan. Pemanas dengan daya 3 kW difungsikan sebelum *test section*. Suhu keluaran dari pemanas dikendalikan oleh pengendali digital, untuk mendapatkan keadaan yang tunak. *Test section* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. *Test section*

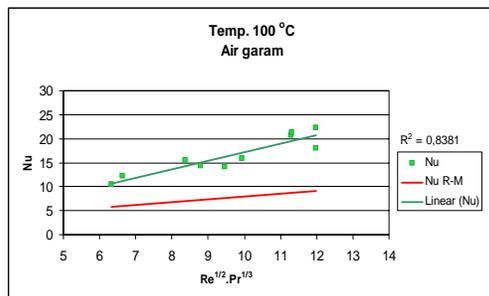
Tetesan dibentuk oleh suntikan dan dijatuhkan tepat pada *hot wire thermocouple*. Temperatur tetesan dapat dibaca pada *display*. Dimensi tetesan berubah terhadap waktu. Untuk mengetahui perubahan ini maka digunakan *handycam* untuk mencitrakan gambar. Selanjutnya gambar tersebut diolah dengan *software* sehingga didapat perubahan dimensi tersebut. Berikut adalah contoh tetesan.



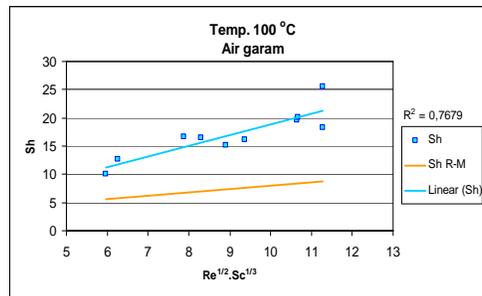
Gambar 3. Tetesan

4. Hasil dan analisa

Grafik berikut didapat dari langkah-langkah perhitungan, terlihat bahwa Nusselt (Nu) hasil pengujian berada diatas garis pers. Ranz-Marshall dengan tingkat kemiringan garis (gradien) yang berbeda pula.



Gambar 4. , Air garam pada 100°C



Gambar 5. Air garam pada 100°C

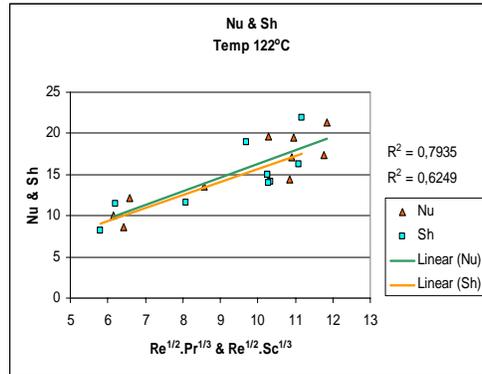
Dengan kecepatan aliran udara yang divariasikan (naik) maka bilangan Reynolds (Re) berangsur naik. Kenaikan Re menyebabkan Nu bertambah besar.

Grafik diatas menggambarkan bilangan Sherwood (Sh), berhubungan dengan perpindahan massa. Nilai Sh dan Nu pada kondisi pengujian ini berbeda 0,5-3 angka. Pada kondisi aliran fluida maksimum (1,48 m/s) maka nilai Sh menjadi lebih besar daripada Nu.

Gradien garis Nu hasil pengujian semakin melandai ketika temperatur divariasikan (naik). Tetapi dari pengujian yang dilakukan, pada temperatur 100 °C dan 122 °C tidak terjadi perubahan Nu yang signifikan, perubahan baru dapat dilihat pada temperatur 146 °C. Hal seperti ini terjadi juga pada bilangan Sherwood. Dari kemiripan nilai Nu dan Sh dapat diketahui bahwa perpindahan kalor dan perpindahan massa merupakan analogi.

Untuk Nu pers. Ranz-Marshall (Nu R-M) relatif sama untuk temperatur 50°C; 75 °C; 100 °C dan juga pada temperatur 122 °C; 146 °C. Sedangkan Sh pers. Ranz-Marshall (Sh R-M) relatif sama untuk seluruh variasi temperatur.

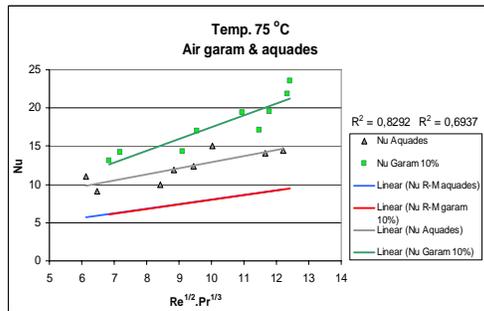
Perbandingan nilai Nu R-M dan Sh R-M relatif sama untuk satu temperatur tertentu. Sementara nilai Nu dan Sh terlihat mirip sekali pada temperatur 122 °C. Analogi ini dapat dilihat pada gambar dibawah.



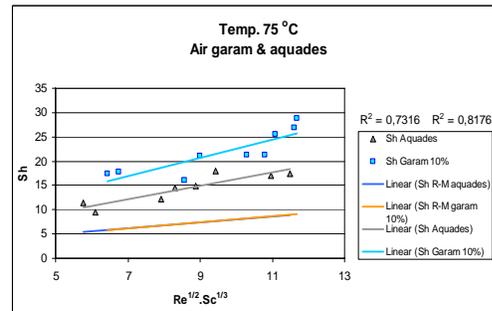
Gambar 6. Air garam pada 122°C.

Dari grafik diatas terlihat bahwa nilai Nu air garam berada diatas Nu aquades, dengan gradien yang berbeda. Garam merupakan ikatan ion Na^+ dan Cl^- , dapat dilarutkan dalam pelarut polar yaitu air. Keberadaan garam dalam air menyebabkan fraksi mol air terhadap larutan turun sehingga tekanan uap jenuh air menjadi turun. Turunnya tekanan uap jenuh ini menyebabkan titik didih tinggi sehingga air membutuhkan kalor yang lebih banyak untuk menguap.

Temperatur permukaan tetesan air garam lebih tinggi dibandingkan temperatur permukaan aquades, pada kondisi yang sama. Hal ini terjadi karena energi (kalor laten) yang dilepaskan berkurang.



Gambar 7. Air garam dan aquades pada 75°C.



Gambar 8. Air garam dan aquades pada 75°C.

5. Kesimpulan

- Nilai data hasil pengujian memiliki kecenderungan berada diatas nilai pers. Ranz-Marshall.
- Larutan garam membutuhkan kalor yang lebih banyak untuk menguapkan air yang berarti juga bahwa air pada larutan garam lebih sulit untuk menguap dibandingkan dengan aquades.
- Perpindahan massa mempengaruhi perpindahan panas.
- Analogi perpindahan kalor dengan perpindahan massa terlihat jelas ketika temperatur aliran udara 122°C.

Daftar Pustaka

- Bennett C.O., Myers J.E. *Momentum, Heat and Mass Transfer*, (New York: McGraw Hill, 1982)
- Bird R. B. et al., *Transport Phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 2003 pp.681, 689.
- Cengel, Yunus A., Michael A.Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, (New York: McGraw Hill, 1994)
- Fox, Robert W., Alan T.Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics*, (New York: John Wiley & Sons, 1978).
- Geankoplis, Christie J. (2005), 8 April. "Principles of Momentum Transfer and Applications". Diakses tanggal 21 Mei 2007 dari Pearson Education, Prentice Hall PTR.

- <http://www.phptr.com/articles/article.asp?p=349046&rl=1>
- Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, (Singapore : McGraw Hill, 2001)
- Holman , J.P., *Perpindahan Kalor*, terj.E.Jasjfi (Jakarta: Erlangga, 1991).
- Incropera, Frank P., David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (New York: John Wiley & Sons, 1996).
- Kosasih, EA., “Perpindahan Panas dan Massa Dalam Proses Penguapan Tetesan : Suatu Pendekatan Baru pada Model Film Stagnan”, Sinopsis Disertasi, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Fakultas Teknik UI, Depok, 2006.
- M. J. Lee, et al., 2001. “Effects of watery vapor concentration on droplet evaporation in hot environment”. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 109-115. Diakses 21 Mei 2007, dari Korea Institute of Science and Technology.
http://society.kisti.re.kr/~Eksae/ notes/data/pdf/v2n3_4.pdf
- McMahon, Niall. (2003), 8 Agustus. “The Mechanics of Drug Dissolution - An adventure in fluid mechanics”. Diakses tanggal 21 Mei 2007 dari School of Computer Applications, Dublin City University.
<http://student.dcu.ie/~mcmahon4/postgraduateseminar1.html>
- Reid, Robert C., et al, *The Properties of Gases & Liquids* (Singapore : McGraw Hill, 1987).
- Reynolds, William C., Henry Perkins, *Termodinamika Teknik*, terj.Filino Harahap (Jakarta: Erlangga, 1991).