

Satu Kajian Teori Tentang Penyejukan Air di dalam Labu Sayung

A Theoretical Study on the Cooling Effect of Water in an Earthen Water Jug

ZAINUL ABIDIN HASSAN

Department of Physics,

Faculty of Science and Environmental Studies,

Universiti Pertanian Malaysia,

43400 Serdang, Selangor, Malaysia.

Key words: Energy conservation; condensation; saturated vapour pressure.

ABSTRAK

Kajian teori tentang air di dalam labu ini menunjukkan bahawa suhu air di dalam labu lebih sejuk daripada suhu ambien disebabkan oleh penyejukan di permukaan dinding labu. Perbezaan di antara suhu bilik dan ambien bergantung kepada kadar penyejukan yang bergantung pula kepada suhu ambien dan kelembapan udara. Ia juga bergantung kepada ketebalan dinding labu dan jenis tanah liat yang digunakan untuk membuatnya.

ABSTRACT

A theoretical study of water in labu (earthen water jug) shows that the temperature of water in labu is slightly lower than the ambient which is mainly due to evaporation from the wall's surface of labu. The temperature difference between the water temperature and the ambient depends on the rate of evaporation which in turn depends on ambient temperature and humidity. It also depends on thickness of the labu's wall and the type of clay from which it is made.

1. PENGENALAN

Labu sayung ialah sejenis bekas air yang dibuat daripada tanah liat seperti belanga. Ia dipanggil labu sayung kerana industri membuat labu ini berada di sekitar bandar Sayong, iaitu sebuah bandar kecil berhampiran dengan Kuala Kangsar, Perak. Buat masa ini, labu sayung lebih merupakan perhiasan rumah sahaja, kerana ia merupakan satu hasil kraftangan Malaysia yang baik. Dikatakan bahawa air yang disimpan di dalam labu sayung ini lebih sejuk; oleh sebab itu, ia lebih sedap daripada air yang disimpan di dalam bekas-bekas lain. Kertas ini membincangkan secara teori mengapa air di dalam labu itu lebih sejuk dan juga faktor-faktor

yang menentukan kesejukan air itu berbanding dengan suhu bilik.

2. BAGAIMANA PENYEJUKAN BERLAKU (MODEL LABU)

Labu sayung yang dibuat daripada tanah liat, semestinya mempunyai liang-liang yang dapat diserapi air, melalui proses rerambut (capillary action). Ia merupakan titik-titik air yang amat kecil, yang menyebabkan permukaan labu tersebut dirasakan basah, walaupun titik air tersebut tidak kelihatan. Dianggarkan bahawa jejari titik-titik tersebut sama besarnya dengan jejari liang-liang di dalam tanah liat tersebut (*Rajah 1*). Apabila air dituangkan ke

dalam labu, ia akan mengalami proses rerambut sehingga membentuk titik kecil di permukaan labu. Semasa proses ini berlaku, permukaan air tersebut bertambah. Apabila ia sampai ke permukaan labu air tersebut mengalami penyejatan. Oleh itu, secara fiziknya, penyejukan air di dalam labu tersebut dapat berlaku kerana dua proses, iaitu penambahan permukaan bagi air dan penyejatan.

Apabila air sejuk, haba dari luar akan mengalir masuk ke dalam labu sehingga akhirnya sistem tersebut mencapai suatu keseimbangan terma. Apabila keseimbangan ini dicapai, proses penyejukan yang berlaku hanyalah proses penyejukan disebabkan pengembangan permukaan air juga sudah tiada, iaitu permukaan air tersebut sudah mencapai nilai yang stabil. Dengan kata lain, penyejukan labu ini bergantung kepada penyejukan air dari permukaannya. Proses ini samalah dengan proses yang berlaku pada jangka suhu basah di dalam sistem jangka suhu basah dan kering (wet and dry bulb thermometer) untuk mengukur kelembapan udara.

3. PERTIMBANGAN MATEMATIK

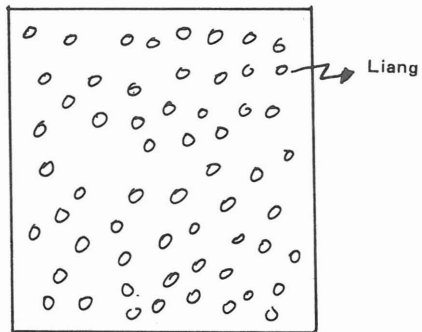
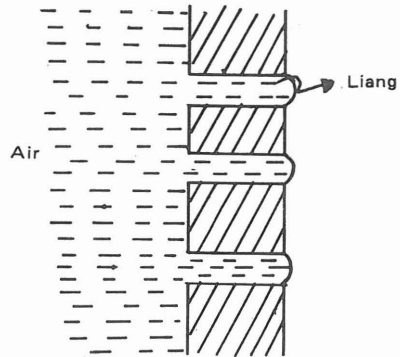
Apabila air dituangkan masuk ke dalam labu yang benar-benar kering, maka berlaku perubahan tenaga disebabkan penyejukan yang dapat ditulis sebagai:

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial A}\right)_{T,h,m} dA + \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{A,h,m} dT + \left(\frac{\partial E}{\partial h}\right)_{T,A,m} dh + \left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)_{T,A,h} dm + \Delta \dots (1)$$

- iaitu A = luas permukaan
- h = tinggi jisim air yang di bawah pertimbangan
- m = jisim air di dalam labu

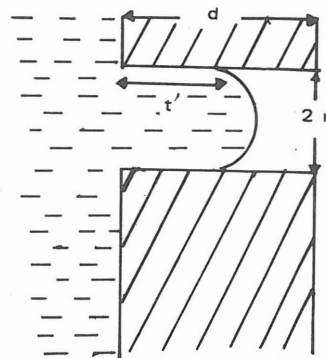
Dalam persamaan (1) perubahan tenaga keupayaan dapat diabaikan kerana terlalu kecil. Untuk sebutan-sebutan lain:

- 1) Perumahan tenaga permukaan (bagi satu rerambut). Ini terdiri daripada dua sebut-



Rajah (1)

an; satu bagi permukaan yang bersentuhan dengan tanah liat, dan satu lagi permukaan yang bersentuhan dengan udara iaitu:



Rajah (2)

$$\left(\frac{\partial E}{\partial A}\right)_{T,h,m} dA = \sigma_a \pi r^2 + \sigma_s 2 \pi r t'$$

σ_a = ketegangan permukaan di antara air dan udara.

PENYEJUKAN AIR DI DALAM LABU SAYUNG

σ_s = ketegangan permukaan di antara air dan tanah liat.

Apabila air dituang ke dalam labu, maka ia akan meresap ke permukaan labu, ini menyebabkan berlakunya pengembangan permukaan. Andainya haba yang masuk lebih kecil daripada penambahan tenaga permukaan maka tenaga penambahan ini akan diambil daripada air, menyebabkan suhu air berkurangan sedikit. Apabila keadaan sudah stabil dan permukaan tidak bertambah lagi, keadaan keseimbangan terma akan wujud. Ini bererti kesan ini akan tamat. Oleh itu jika penyejukan air yang disebabkan oleh kesan ini, penyejukan yang terjadi adalah sementara. Di dalam tempoh yang lama, kesan ini dapat diabaikan.

- 2) Sebutan no. 2 (tenaga dalam), no. 4 (penyejukan) dan no. 5 (haba masuk)

Apabila keadaan sudah stabil, semua liang di dalam dinding labu sudah diisi, maka terjadi penyejukan; oleh itu

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{A,h,m} dT + \left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)_{T,A,H} dm + \Delta \dots (2)$$

untuk keadaan yang mantap $\frac{dE}{dt} = 0$, maka

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{A,h,m} \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)_{T,A,H} \frac{dm}{dt} + \frac{d\Delta}{dt} = 0$$

Tetapi $\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{A,h,m} = m C_v$ iaitu C_v = muatan haba tentu bagi air.
 dan $\left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)_{T,A,h} = L$ L = haba pendam terpengewapan bagi air. (latent heat of vaporization)

oleh sebab itu kadar pertukaran haba yang dialami oleh sistem tersebut ialah

$$m C_v \frac{dT}{dt} + L \frac{dm}{dt} + \frac{d\Delta}{dt} = 0$$

Kadar peralihan haba, boleh ditulis dalam bentuk:

$$\frac{d\Delta}{dt} = -KA\Delta T \quad k = \text{Jumlah pekali pemindahan haba untuk sistem tersebut.}$$

ΔT = perbezaan di antara suhu ambien dengan suhu air di dalam labu.

$$m C_v \frac{dT}{dt} + L \frac{dm}{dt} - KA\Delta T = 0 \dots (3)$$

untuk keadaan yang stabil, iaitu tidak ada perubahan suhu pada sistem tersebut ($t \rightarrow \infty$), maka $\frac{dT}{dt} \rightarrow 0$

Oleh itu persamaan di atas boleh ditulis sebagai:

$$L \frac{dm}{dt} - KA \Delta T = 0$$

dan $\frac{dm}{dt} = \Sigma$, kadar penyejukan dari per-

$$\therefore L \Sigma - KA \Delta T = 0$$

$$\therefore \Delta T = \frac{L \Sigma}{KA} \dots (4)$$

Perhatian I: Dari persamaan (4), suhu air di dalam labu lebih rendah dari suhu ambien, dan ia bergantung pada kadar penyejukan dari permukaan.

Oleh itu mana-mana sistem yang mempunyai air yang mengalami penyejukan akan mempunyai suhu yang lebih rendah daripada suhu ambien. Ini bererti air yang bertakung lebih sejuk daripada suhu bilik.

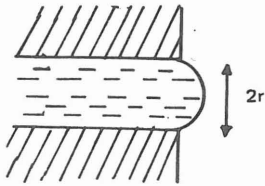
3.1 Kadar Penyejukan

Penyejukan dari permukaan labu ditulis dalam bentuk

$$\frac{dm}{dt} = \Sigma = \mu A'$$

iaitu $A' =$ luas permukaan di tempat penyejatan berlaku (effective surface area of evaporation).
 $=$ kadar penyejatan bagi satu unit permukaan.

perhatian satu liang di dinding labu tersebut (Rajah 3)



Rajah (3)

diandaikan bahawa titik tersebut berbentuk hemisfera dengan luas permukaan bagi titik

$$a = 2\pi r^2$$

$$\therefore A' = Na = 2\pi r^2 N$$

iaitu $N =$ bilangan liang di permukaan labu.

Tetapi isipadu liang (rongga)

$$V_L = \pi r^2 Nd$$

apabila $d =$ tebal dinding labu

$$\therefore \pi r^2 N = \frac{V_L}{d}$$

dari situ

$$A' = 2 \frac{V_L}{d}$$

daripada persamaan untuk penyejatan dari permukaan labu iaitu daripada persamaan (4)

$$\Delta T = \frac{L\Sigma}{KA} = \frac{2V_L \mu L}{KA d}$$

Tapi $Ad = V_s$ iaitu isipadu bagi dinding labu

$$\therefore \Delta T = 2 \frac{\mu L V_L}{K V_s}$$

Takrifkan $V_L = \xi V_s$ iaitu keliangan (porosity)

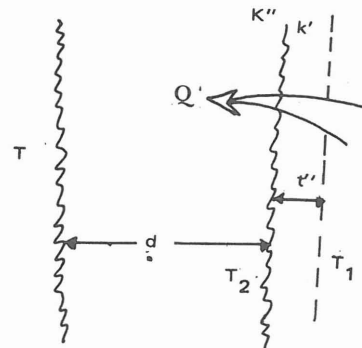
$$\therefore \Delta T = 2 \frac{\mu L \xi}{K} \dots \dots \dots (5)$$

Perhatian II: Perbezaan suhu ΔT , bergantung pada keliangan, iaitu satu pemalar tanah liat. Semakin besar keliangan maka makin besarlah perbezaan suhu.

Perhatikan bahawa $\xi \leq 1$. $\xi = 1$ apabila sistem tersebut tidak mempunyai dinding, contohnya ialah titik-titik air yang terapung di udara seperti kabut. Oleh itu suhu air di dalam kabut lebih sejuk daripada suhu udara apabila titik-titik air kabut tersebut sejat.

3.2 Jumlah Pekali Pemindahan Haba (K)

Pekali pemindahan haba (K) daripada persamaan (4) ialah pekali pemindahan haba bagi keseluruhan sistem tersebut.



Rajah (4)

Pertimbangkan proses pengaliran haba bagi sistem labu ini. Haba terpaksa mengalir melalui dinding labu daripada tanah liat yang tebalnya d dan satu lapisan udara bercampur wap air yang tidak bergerak disebabkan terperangkap oleh permukaan labu yang dari segi mikroskopiknya mempunyai

gunung-gunung dan lembah-lembah. Katakan tebal lapisan ini (dinamakan lapisan sempadan) t . Maka pengaliran haba boleh ditulis sebagai:

$$dQ = k' A' \frac{(T - T_2)}{d} + k'' A'' \frac{(T_1 - T_0)}{t''}$$

iaitu k' = pekali pemindahan haba bagi tanah liat

k'' = pekali pemindahan haba bagi lapisan sempadan.

andaikan $A' = A''$

$$\therefore k = \frac{k'(T - T_2)}{d(T - T_0)} + \frac{k''(T_1 - T_0)}{t''(T - T_0)}$$

$$K = \frac{k'(T - T_2)}{dT} + \frac{k''(T_1 - T_0)}{t''\Delta T}$$

Perhatikan sebutan pertama, makin besar d , iaitu semakin tebal labu, maka sebutan ini menjadi lebih kecil, ini bererti k' menjadi lebih kecil. Begitu juga untuk sebutan kedua, makin besar t'' , semakin kecil nilai k bagi ΔT yang malar:

Perhatian III: Daripada persamaan (5)

$$\Delta T = \frac{2 \mu L 5 \xi}{K}$$

Ini bererti perbezaan suhu semakin bertambah besar apabila k' semakin kecil. K pula bergantung kepada ketebalan dinding labu dan lapisan sempadan. Semakin tebal labu, semakin kecil k' , maka makin sejuklah air yang disimpan di dalamnya. Begitu juga makin tebal t'' , makin sejuklah air. Ketebalan labu dapat diubah-ubah sesuai dengan kehendak sipembuat labu, sementara ketebalan t'' dapat ditambah dengan mengadakan permukaan labu yang lebih kasar, ini dapat dicapai dengan mengadakan garisan-garisan lorek yang indah-indah sebagai perhiasan di permukaan labu tersebut.

Kesimpulan I:

Daripada perhatian-perhatian di atas bolehlah disimpulkan bahawa perbezaan suhu ΔT , bergantung pada jenis tanah liat yang digunakan, ketebalan labu dan lorekan-lorekan di permukaan labu. Ia tidak bergantung pada saiz dan bentuk labu serta jumlah air di dalamnya.

4. KADAR PENYEJUKAN

Persamaan (3) boleh ditulis di dalam bentuk $\frac{dE}{dt} = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right) \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial E}{\partial m}\right) \frac{dm}{dt} - KA(T_0 - T)$

Andaikan $\frac{dE}{dt} = 0$ iaitu sepanjang penyejukan berlaku, tenaga keseluruhan sistem tersebut tidak berubah maka persamaan di atas boleh ditulis dalam bentuk

$$mc_v \frac{dT}{dt} + L\bar{\epsilon} - kA(T_0 - T) = 0$$

Apabila persamaan di atas dikamirkan terhadap masa, maka

$$T = (T_0 - \frac{L\bar{\epsilon}}{kA})(1 - e^{-kAt/mc_v}) + T_0 e^{-kAt/mc_v} \dots (6)$$

yang dsesuai dengan keadaan di mana

apabila $t = 0$, $T = T_0$ iaitu ketika awal percubaan dan $t \rightarrow \infty$

$$T = T_0 - \frac{L\bar{\epsilon}}{kA} \Rightarrow \Delta T = \frac{L\bar{\epsilon}}{kA}$$

iaitu perbezaan suhu selepas waktu yang lama sama seperti persamaan (4). (*Rajah 4*).

Daripada persamaan (6) di atas, maka

$$\Delta T = \frac{L\bar{\epsilon}}{kA}(1 - e^{-KAt/mc_v})$$

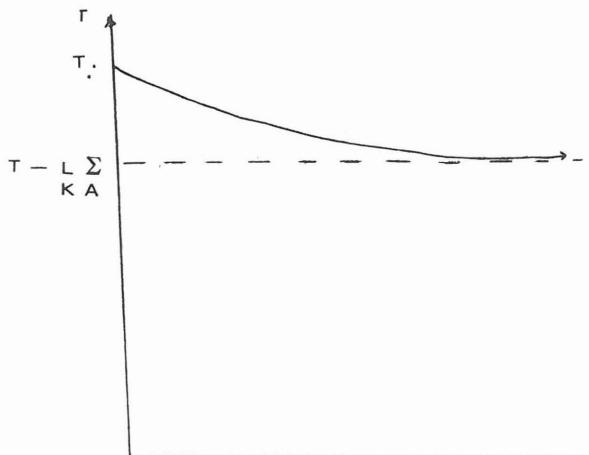
$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{L\bar{\epsilon}}{mc_v} e^{-kAt/mc_v}$$

gantikan sebutan

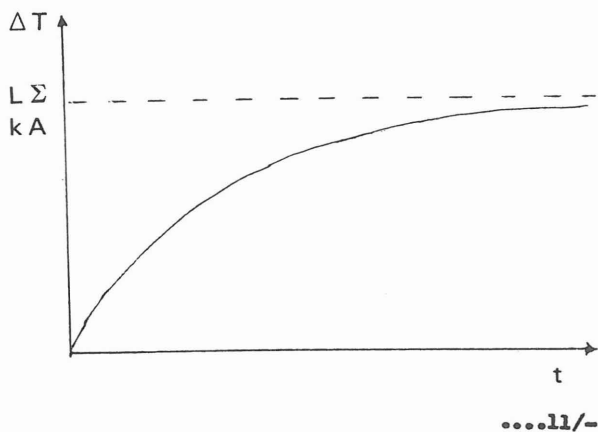
$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{L \mu A'}{C_v m} \exp\left(\frac{-kt}{C_v} \frac{A}{m}\right)$$

tapi $m = \text{isipadu} \times \text{ketumpatan air}$

$$\frac{d \Delta T}{dt} = \frac{L \mu A'}{C_v \rho v} \exp\left(-\frac{kt}{C_v} \frac{A}{\rho v}\right) \dots\dots (7)$$



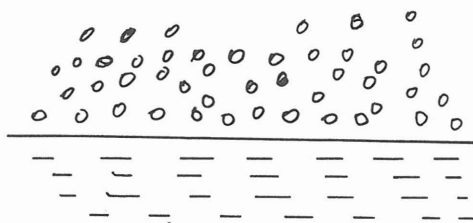
Rajah (6)



Rajah (5)

5. HUBUNGAN DENGAN SUHU BILIK

Pertimbangkan satu proses penyejukan daripada permukaan air; (Rajah 6), iaitu di atas permukaan air tersebut ada molikul air di dalam bentuk wap.



Rajah (7)

Perhatian IV: Kadar penyejukan bergantung kepada nisbah A/V , permukaan melawan isipadu, oleh sebab itu ia bergantung pada bentuk dan saiz labu, makin besar permukaan berbanding dengan isipadu makin cepatlah sejuknya. Di samping itu ia juga bergantung pada jumlah pekali pemindahan haba, semakin besar K , semakin cepatlah sejuknya, sebaliknya semakin banyak air di dalamnya semakin lambatlah sejuknya.

Proses penyejukan ialah satu proses dinamik, iaitu bilangan molekul air yang bertukar menjadi wap tolak bilangan molekul wap yang melanggar permukaan air dan menjadi air, merupakan proses penyejukan ataupun kondensasi. Andainya bilangan zarah-zarah wap yang bertukar menjadi cecair lebih banyak daripada bilangan zarah-zarah cecair yang bertukar menjadi wap maka ia dinamakan kondensasi dan proses sebaliknya pula dinamakan penyejukan. Oleh sebab itu kadar penyejukan dari permukaan boleh ditulis sebagai:

$$\mu = \alpha - \phi$$

iaitu μ = kadar penyejatan dari permukaan
 α = bilangan zarah-zarah yang mening-
 katkan permukaan cecair
 ϕ = bilangan zarah-zarah wap yang ber-
 bentuk menjadi cecair.

Tetapi untuk tekanan wap tepu, penyejatan
 dari permukaan ialah sifar iaitu $\mu = 0$, untuk
 keadaan begini:

$$\alpha = \phi_0$$

di mana ϕ_0 = bilangan zarah-zarah wap tepu
 yang bertukar menjadi cecair:
 $\mu = \phi_0 - \phi \dots (8)$

Kalaulah diandaikan bahawa wap dapat di-
 hampirkan dengan gas unggul, maka daripada
 pertimbangan mekanik statistik, bilangan zarah
 yang melanggar unit permukaan ialah

$$\phi = \frac{1}{4} n \bar{V}$$

iaitu n = bilangan zarah/isipadu
 \bar{V} = purata halaju

Daripada pertimbangan taburan maxwell
 untuk gas

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{KT}{m}}$$

di mana k adalah pemalar Boltzmann

Daripada persamaan (6)

$$\mu = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{m\pi}} (n_0 - n)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} n_0 (1 - \Sigma)$$

iaitu n_0 = bilangan zarah/isipadu di dalam wap
 tepu.

di mana $\Sigma = \frac{n}{n_0}$, iaitu kelembapan bagi udara.

Tetapi

$$p_0 = n_0 T$$

$$n_0 = p_0 / T$$

di mana p_0 ialah tekanan wap tepu, yang me-
 rupakan fungsi suhu semata-mata.

$$\therefore \mu = \sqrt{\frac{k}{2\pi m T}} p_0 (1 - \Sigma)$$

Perbezaan suhu untuk labu sayung boleh
 ditulis sebagai

$$\Delta T = \frac{2 L \xi p_0 (1 - \Sigma)}{K} \sqrt{\frac{k}{2\pi m T}} \dots (9)$$

Perhatian V: Daripada persamaan (9), ia me-
 nunjukkan bahawa semakin lembab udara, maka semakin ku-
 ranglah perbezaan suhu. Oleh itu, sebaik-baik tempat untuk
 menyimpan labu sayung ialah di
 kawasan yang kering.

Kalaulah andaian penghampiran wap ke-
 pada gas unggul adalah benar, maka daripada
 ungkapan Classius – Clayperon.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \Delta V}$$

maka tekanan bagi wap tepu sebagai gas unggul
 ialah

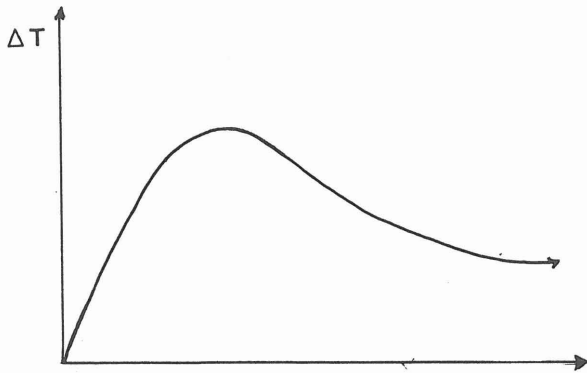
$$P_0 = p' e^{-L/RT}$$

di mana P' adalah satu pemalar, dan R = pe-
 malar gas sejagat.

maka persamaan (9) boleh ditulis di dalam
 bentuk:

$$\Delta T = \frac{2 L \xi p' e^{-L/RT} (1 - \Sigma)}{K}$$

$$\sqrt{\frac{k}{2\pi m T}} \dots (10)$$



Rajah (8)

Persamaan di atas menunjukkan bahawa ΔT mempunyai nilai maksimum.

$$\text{iaitu } \frac{d(\Delta T)}{dT} = 0 \dots (10)$$

kalau diselesaikan persamaan (10), maka nilai maksimum bagi T jatuh pada $T = \frac{2L}{R}$, iaitu

satu nilai T yang amat besar; dan persamaan (9) tidak lagi mempunyai makna bagi keadaan begini. Oleh itu untuk keadaan bilik biasa, semakin tinggi suhu bilik, semakin besarlah ΔT , ini disebabkan tekanan wap tepu bertambah dengan cepat bagi setiap perubahan suhu.

KESIMPULAN

Dari segi teorinya, air di dalam labu sayung lebih sejuk daripada suhu bilik. Faktor utama yang menyebabkan ini berlaku ialah proses penyejatan dari permukaan labu. Perbezaan suhu di antara air di dalam labu sayung dan suhu bilik tidak bergantung kepada saiz dan bentuk labu, tetapi ia bergantung kepada jenis tanah liat dan ketebalan dinding labu. Ia juga bergantung pada kadar penyejatan dari permukaan, yang bergantung kepada kelembapan udara dan suhu bilik.

PENGHARGAAN

Saya ingin merakamkan terima kasih kepada ahli-ahli Jabatan Fizik, UPM yang memberi teguran dan tunjuk ajar terutamanya Dr. Mansor Hashim.

Tatatanda

- A = Luas permukaan labu
- A' = Luas permukaan penyejatan berlaku
- C_v = muatan haba tentu bagi air
- d = tebal labu
- K = jumlah pekali muatan haba untuk sistem labu sayung.
- k = pemalar boltzman
- k' = pekali pemindahan haba bagi tanah liat
- k'' = pekali pemindahan haba bagi lapis sempadan
- L = haba pendam pengewapan bagi air
- m = jisim air di dalam labu
- n = bilangan zarah/isipadu
- n_o = bilangan zarah wap tepu/isipadu
- N_o = bilangan liang di permukaan labu
- P_o = Tekanan wap tepu
- R = pemalar gas sejagat
- r = Jejari liang
- T = Suhu air di dalam labu
- T_o = Suhu ambien
- t = masa dari waktu air dituang masuk ke dalam labu
- t'' = tebal lapisan sempadan
- V = Isipadu air
- V_L = Isipadu liang
- V_s = Isipadu bagi dinding labu
- α = bilangan zarah-zarah yang meninggalkan permukaan cecair
- φ = bilangan zarah-zarah yang bertukar menjadi cecair
- φ_o = bilangan zarah-zarah wap tepu yang bertukar menjadi cecair
- ΔT = Perbezaan di antara suhu ambien dengan suhu air di dalam labu
- Σ = Kadar penyejatan dari permukaan labu
- μ = Kadar penyejatan per unit luas
- ξ = Keliangan
- ρ = Ketumpatan air
- Σ = Kelembapan udara
- u_a = ketegangan permukaan di antara air dan udara
- σ_s = ketegangan permukaan di antara air dan tanah liat

RUJUKAN

- MA, S.K. (1985): Statistical Mechanics World Scientific, Philadelphia, Singapore.

NELKON, M., P. PARKER (1968): Advanced Level Physics (2nd edition). Heinemann Educational Books Ltd. London.

PIPPARD, A.B. (1979): The Elements of Classical Thermo Dynamics. Cambridge University Press.

RIEF, F. (1979): Fundamental of Statistical and Thermal Physics. Mc. Graw-Hill series in fundamentals of Physics.

SPIEGEL, M.R. (1968): Mathematical Handbook of formulas and tables. Schaum's outline series, Mc. Graw-Hill.

(Received 4 July, 1986)