

PENDIDIHAN (BOILING)

Ir. J. VICTOR TUAPETEL, ST,MT, PhD, IPM, ASEAN Eng
Program Studi Teknik Mesin
INSTITUT TEKNOLOGI INDONESIA

PENDAHULUAN

- Proses Konveksi untuk hal spesifik yaitu dalam bentuk pendidihan (boiling) dan kondensasi/pengembunan (condensation)
- Pendidihan (Boiling): Perubahan fasa cair menjadi fasa uap.
- Kondensasi (Condensation): Perubahan fasa uap menjadi fasa cair.
- Aplikasi:
 - ✓ Pendinginan reactor nuklir dan motor roket.
 - ✓ Pembangkit daya uap (steam power plant) – Boiler dan Kondenser.
 - ✓ Refirigerasi dan air conditioning system – evaporator dan condenser.
 - ✓ Peleburan logam di furnace.
 - ✓ Heat exchanger
 - ✓ Proses pemanasan dan pendinginan, dll.

PROSES BOILING DAN KONDENSASI

- Konsekwensi perubahan fasa dalam proses ini, perpindahan panas ke atau dari fluida dapat terjadi tanpa mempengaruhi perubahan temperatur.
- Besaran dan koefisien perpindahan panas disebabkan oleh panas laten yang terkait dengan perubahan fasa secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan proses konveksi normal (tanpa perubahan fasa).
- Laju perpindahan panas yang tinggi dicapai dengan perbedaan temperatur yang kecil.
- Fenomena tersebut terkait proses boiling dan kondensasi adalah lebih kompleks (dari pada proses konveksi normal) disebabkan beberapa hal:
 - ✓ Pengaruh panas laten
 - ✓ Tegangan permukaan
 - ✓ Karakteristik permukaan dan sifat-sifat lainnyadari system dua fasa.

BOILING HEAT TRANSFER

- Boiling atau pendidihan adalah proses perpindahan panas konveksi yang adalah perubahan fasa dari keadaan cairan menjadi keadaan uap atau proses penguapan pada permukaan padat-cair.
- Hal ini terjadi bila: temperatur permukaan (t_s) lebih besar dari temperatur jenuh atau saturasi yang berhubungan dengan tekanan cairan (t_{sat}).

- Panas yang ditransfer dari permukaan padat ke cairan:

$$Q = h A_s (t_s - t_{sat}) = h A_s \Delta t_e$$

dimana: $\Delta t_e = (t_s - t_{sat})$ disebut temperatur lebih (*excess temperature*)

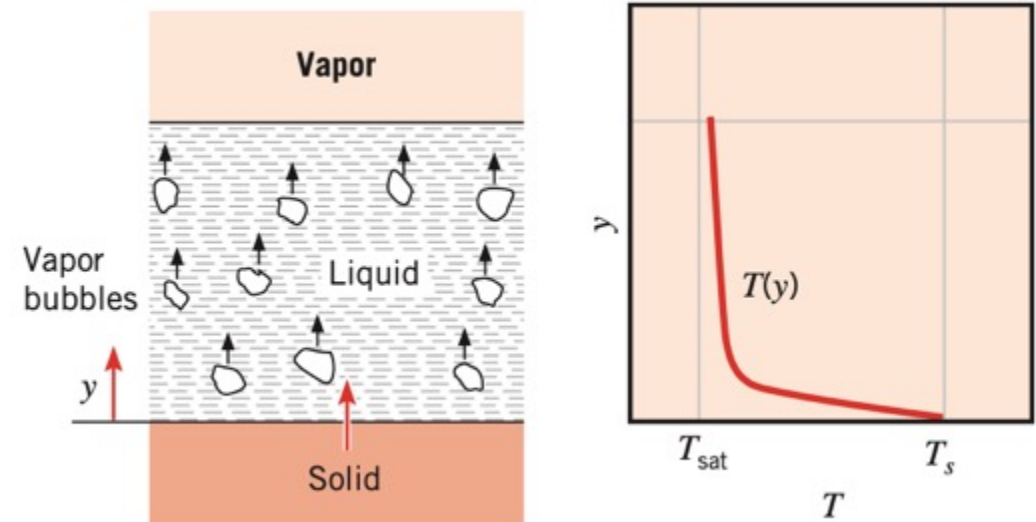
- Aplikasi proses boiling:

- ✓ Produksi uap dalam steam atau nuklir power plant.
- ✓ Absorpsi panas dalam system refrigerasi dan AC.
- ✓ Destilasi dan pengilangan.
- ✓ Konsentrasi, dehidrasi dan pengering makanan dan material.
- ✓ Pendinginan mesin.

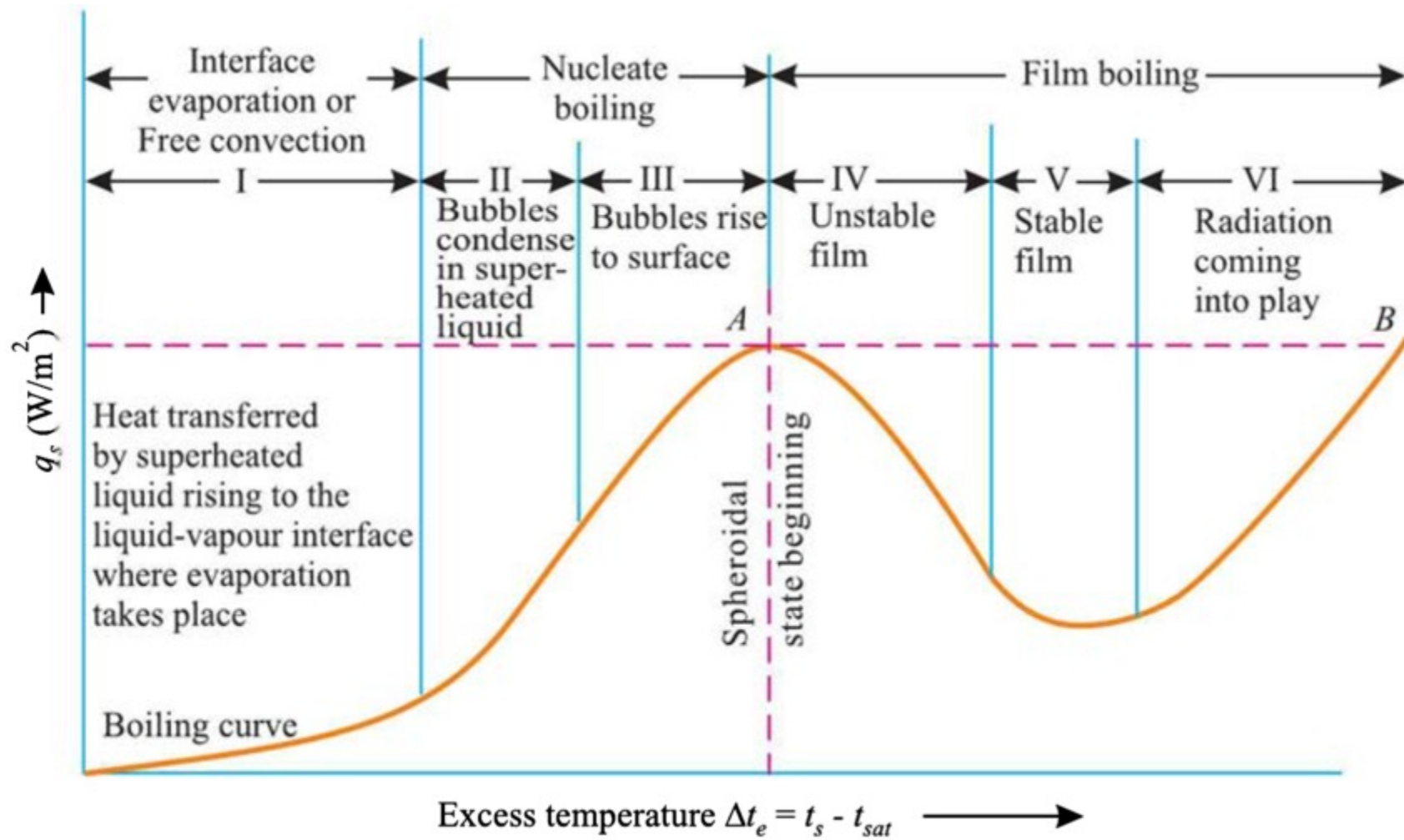
- Jenis fenomena perpindahan panas pendidihan: *pool boiling, forced convection boiling, sub-cooled* atau *local boiling, saturated boiling*.

BOILING REGIMES

- Proses boiling tergantung pada:
 - ✓ Permukaan alami
 - ✓ Sifat-sifat termo-fisik fluida
 - ✓ Dinamika gelembung uap
- Gambar 1 memperlihatkan distribusi temperatur saturated pool boiling dengan interface liquid-vapor.
- Meskipun ada peningkatan tajam suhu cairan di dekat permukaan padat, suhu melalui sebagian besar cairan tetap sedikit di atas saturasi.
- Gelembung yang dihasilkan pada interface (antar muka) cair-padat naik ke interface cair-uap, di mana uap akhirnya melintasi interface.
- Mekanisme fisik dapat diperoleh dengan memeriksa kurva didih.

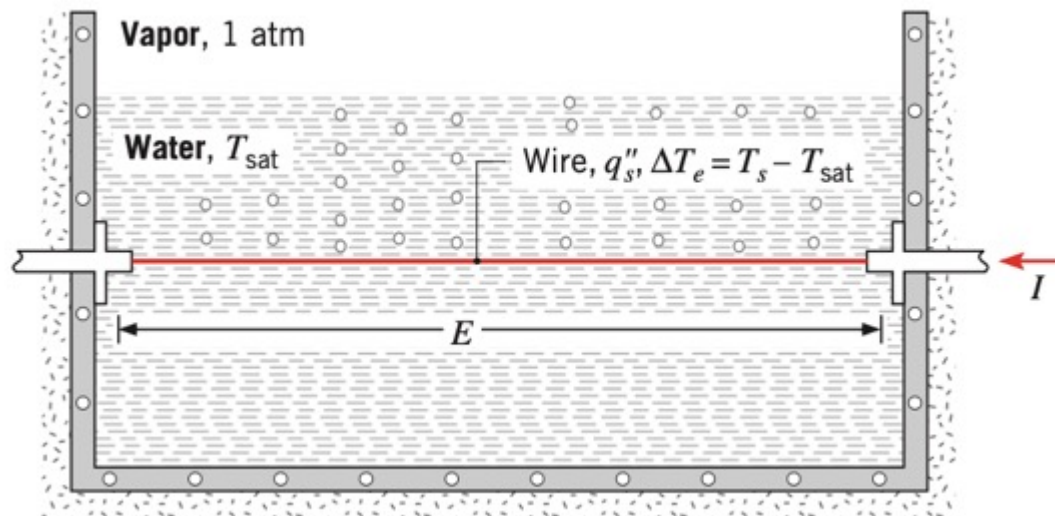


GAMBAR 1. TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SATURATED POOL BOILING WITH A LIQUID–VAPOR INTERFACE.



GAMBAR 2. THE BOILING CURVE OF WATER

- Fenomena boiling yang berhubungan dengan pool boiling atau force circulating boiling terdiri dari 3 daerah pendidihan (Gambar 2) yang terkait dengan peningkatan heat flux secara progresif.
 1. Interface evaporation (penguapan antar muka), proses penguapan tanpa terbentuknya gelembung, terjadi pada zona 1. Temperatur Δt_e sangat kecil $\approx 5^\circ$. Cairan dekat permukaan adalah superheated, aliran konveksi meng sirkulasi cairan dan evaporasi terjadi pada permukaan cairan.
 2. Nucleat boiling (pendidihan nukleat), terjadi pada zona 2 dan 3. Meningkatnya Δt_e dimulainya pembentukan gelembung pada permukaan tertentu di kawat (berdasarkan eksperimen Nukiyama, Gambar 3)



GAMBAR 3. NUKIYAMA'S POWER-CONTROLLED HEATING APPARATUS FOR DEMONSTRATING THE BOILING CURVE.

Kondensasi gelembung dalam cairan tanpa mencapai permukaan cairan.

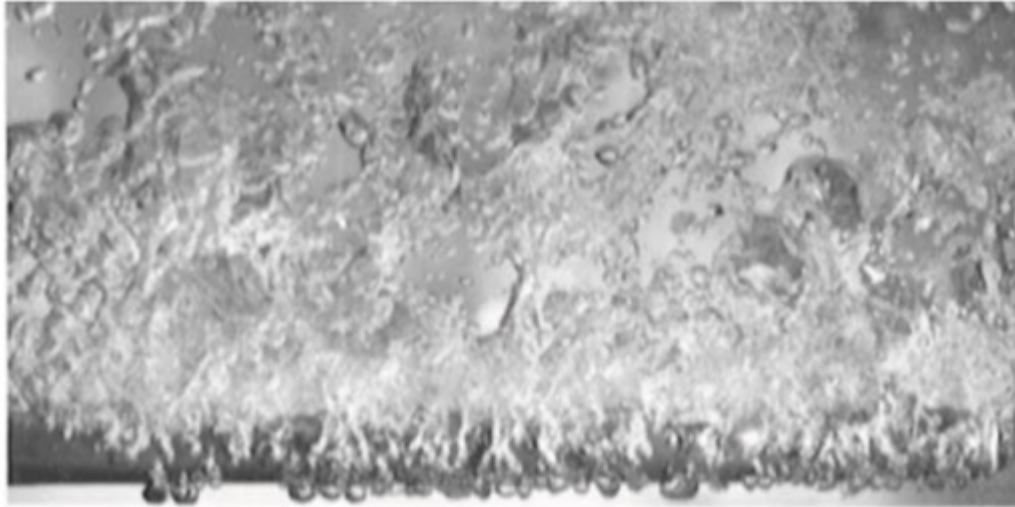
Pada zona II, mulai terjadi pendidihan nukleat. Peningkatan Δt_e lebih lanjut terjadi pembentukan gelembung lebih cepat dan mengarah ke permukaan cairan sehingga menyebabkan evaporasi yang cepat, seperti yang ditunjukkan dengan zona III.

Nukleat boiling dikarakteristikan oleh pembentukan gelembung pada *nucleation site*, dan menghasilkan agitasi cairan. Agitasi (adukan) gelembung berkaitan dengan pencampuran fluida menyebabkan peningkatan *heat flux* dan koefisien perpindahan kalor boiling. Pendidihan nukleat terjadi pada $\Delta t_e \approx 50^\circ$.

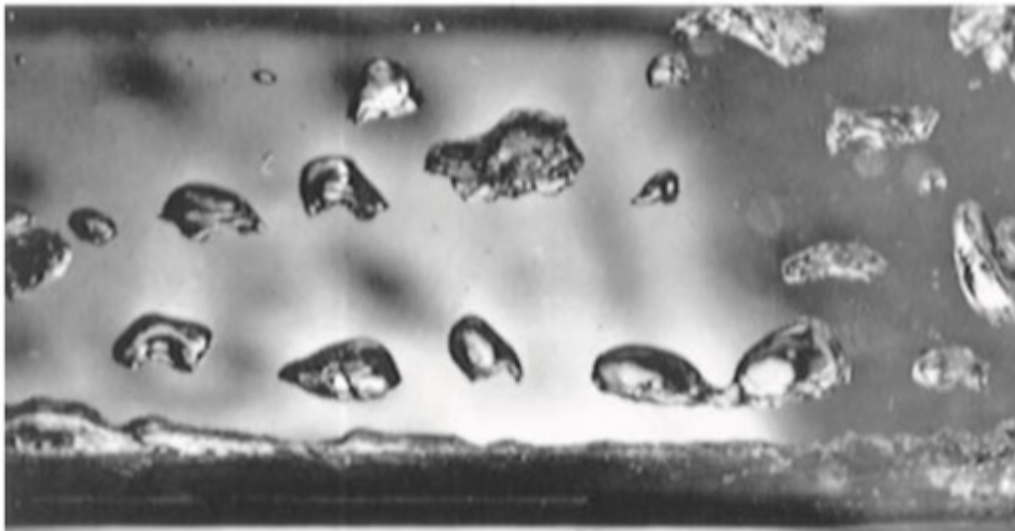
Maksimum *heat flux* diketahui sebagai *heat flux kritis*.

Karena laju perpindahan panas yang tinggi dan koefisien konveksi dikaitkan dengan nilai kecil dari suhu berlebih (*excess temperature*), maka banyak perangkat teknik dioperasikan dalam zona didih nukleat.

3. *Film Boiling* (Pendidihan lapisan film). *Film boiling* mencakup zona IV, V dan VI (Gambar 2). Kecendrungan peningkatan *heat flux* karena meningkatnya temperatur lebih dari zona III dan IV (disebut zona *film boiling*). Hal ini disebabkan pembentukan gelembung sangat cepat dan menyelimuti permukaan pemanasan dan mencegah datangnya *fresh liquid*. Perpindahan panas dari permukaan ke cairan terjadi secara konduksi dan radiasi melalui uap. Leidenfrost-lah yang pada tahun 1756 mengamati bahwa tetesan air yang didukung oleh lapisan uap perlahan-lahan mendidih saat bergerak di sekitar permukaan yang panas. Ketika suhu permukaan meningkat, radiasi melalui film uap menjadi lebih signifikan dan fluks panas meningkat dengan meningkatnya Δt_e .



(a)



(b)

GAMBAR 4. BOILING OF METHANOL ON A HORIZONTAL TUBE. (a) NUCLEATE BOILING IN THE JETS AND COLUMNS REGIME. (b) FILM BOILING. (PHOTOGRAPHS COURTESY OF PROFESSOR J. W. WESTWATER, UNIVERSITY OF ILLINOIS AT CHAMPAIGN-URBANA.)

Pada range temperatur $50^{\circ}\text{C} < \Delta t_e < 150^{\circ}\text{C}$, keadaan antara nukleat dan *film boiling* disebut pendidihan transisi (*transition boiling*), *film boiling* yang tidak stabil atau *partial film boiling* (zona IV).

Dengan meningkatnya Δt_e film uap (*vapor film*) menjadi stabil dan pemanasan permukaan secara keseluruhan oleh selimut uap (*vapor blanket*) dan *heat flux* lebih rendah dalam zona V.

Temperatur permukaan yang tinggi diperlukan untuk mempertahankan lapisan film tetap stabil dan pada keadaan ini terjadi kerugian panas yang terukur oleh permukaan yang mengalami radiasi (zona VI).

Critical heat flux atau *bornout point* (titik A pada Gambar 2) adalah titik maksimum *heat flux* pada kurva pendidihan (*boiling curve*) dimana transisi dari nukleat ke awal terjadinya *film boiling*.

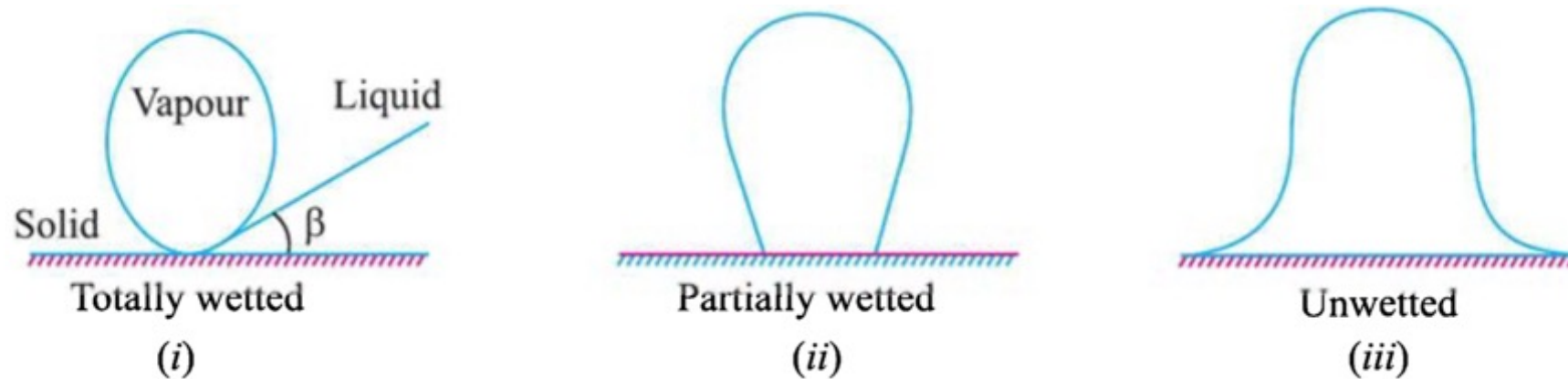
Temperatur pada titik B secara ekstrim tinggi dan secara normal di atas titik pencairan solid.

Jadi pemanasan permukaan logam tidak terbatas pada titik A, hal ini memungkinkan karena logam tidak terpengaruh atau bahkan melebur (*melting*).

BENTUK DAN UKURAN GELEMBUNG

- Besarnya perpindahan panas dalam *nucleate boiling* sangat dipengaruhi oleh keadaan dan natural permukaan pemanasan dan tegangan permukaan dari *interface solid-liquid* (bentuk, ukuran dan inklinasi gelembung, karena itu tidak banyak berpengaruh pada laju perpindahan panas).
- Tegangan permukaan signifikan dengan kemampuan membasahi permukaan dengan cairan (mis: tegangan permukaan rendah, permukaan yang dibasahi tinggi).
- Jika permukaan terkontaminasi, karakteristik pembasahan (*wetting*) terpengaruh yang akhirnya berpengaruh pada ukuran dan bentuk gelembung uap (*vapor bubble*).

- Jika tegangan permukaan cairan rendah maka cenderung membasahi permukaan sehingga gelembung mudah didorong oleh cairan dan bertambah. Cairan menggeser gelembung sehingga membentuk globular atau oval seperti Gambar 5 (i).
- Cairan yang mempunyai tegangan permukaan antara (*partially wetted surface*) kesetimbangan sesaat terjadi antara gelembung dan permukaan solid sehingga memungkinkan terbentuk gelembung yang lebih besar sebelum gaya apung (*buoyant force*) melepaskan gelembung dari permukaan. Bentuk gelembung seperti pada Gambar 5 (ii).
- Pada permukaan yang tidak dibasahi seperti pada Gambar 5 (iii), gelembung menyebar membentuk *wedge* antara air dan permukaan yang dipanasi, oleh karena gaya hidrostatis yang menghambat daya apung.
- Pembentukan gelembung seperti Gambar 5 (i) menyebabkan perpindahan panas yang tinggi dibandingkan bentuk gelembung (ii) dan (iii).



Gambar 5. Bentuk-bentuk gelembung uap (*steam bubbles*)

BUBBLE GROWTH AND COLLAPSE

- Eksperimen menunjukkan gelembung (*bubble*) tidak selamanya berada dalam kesetimbangan termodinamik dengan cairan sekitarnya.
- Uap di dalam bubble adalah tidak mungkin mempunyai temperatur yang sama dengan cairan.
- Seperti gaya-gaya yang bekerja pada *spherical vapor bubble* seperti pada Gambar 6, gaya-gaya tekanan pada bubble diseimbangkan dengan tegangan permukaan pada *vapour-liquid interface*.

▪ Jadi: $\pi r^2 (p_v - p_l) = 2\pi r \sigma$

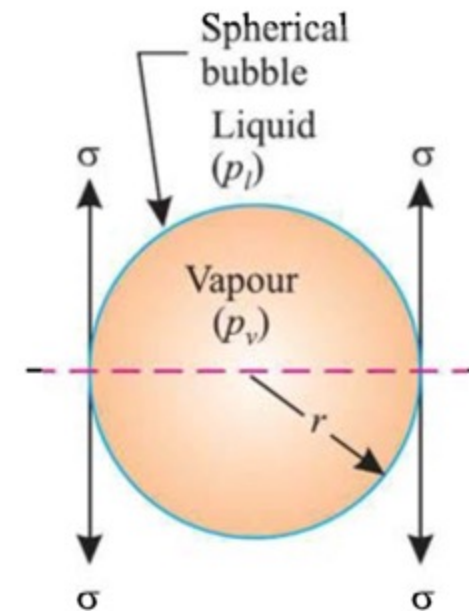
$$P_v - P_l = \frac{2\sigma}{r} \quad \dots(9.2)$$

dimana:

p_v = Vapour pressure inside the bubble,

p_l = Liquid pressure over the surface of bubble, and

σ = Surface tension of vapour-liquid interface.



GAMBAR 6. KESETIMBANGAN GAYA PADA SPHERICAL VAPOR BUBBLE.

- Uap dapat dianggap sebagai perfect gas dimana digunakan persamaan Clayperon:

$$\frac{dp}{p} = \frac{h_{fg}}{RT^2} dT \quad \dots(9.3)$$

where,

h_{fg} = Latent heat of vaporisation.

From perfect gas law: $\frac{p}{RT} = \rho_v$

[where, R = Gas or vapour constant; ρ_v = Density of vapour formed]

Substituting the above equation in eqn. (9.3) and rearranging, we get

$$\frac{dp}{dT} = \frac{h_{fg} \cdot \rho_v}{T}$$

or,
$$\frac{p_v - p_t}{T_v - T_{sat}} = \frac{h_{fg} \cdot \rho_v}{T_{sat}} = \frac{p \cdot h_{fg}}{R T_{sat}^2} \quad \dots(9.4)$$

where, T_v = Vapour temperature inside the bubble, and

T_{sat} = Saturation temperature of vapour inside the bubble at p_v .

From eqns. (9.2) and (9.4), we get

$$T_v - T_{sat} = \frac{2\sigma}{r} \left[\frac{R}{p} \cdot \frac{T_{sat}^2}{h_{fg}} \right] \quad \dots(9.5)$$

The above equation suggests that if $(T_l - T_{sat}) > (T_v - T_{sat})$, the bubble of radius r will grow otherwise it will collapse. Here T_l is the temperature surrounding the bubble.

DIAMETER KRITIS BUBBLE

- Diameter maksimum bubble terbentuk pada permukaan yang dipanasi dimana tergantung dari parameter berikut:

σ_{lv} = Tension between liquid and vapour

σ_{ls} = Tension between liquid and solid surface

σ_{vs} = Tension between vapour and solid surface

β = Angle formed by the bubble as shown in Gambar 7.

d_c = Maximum or critical diameter of bubble.

$g (\rho_l - \rho_v)$ = Buoyancy force.

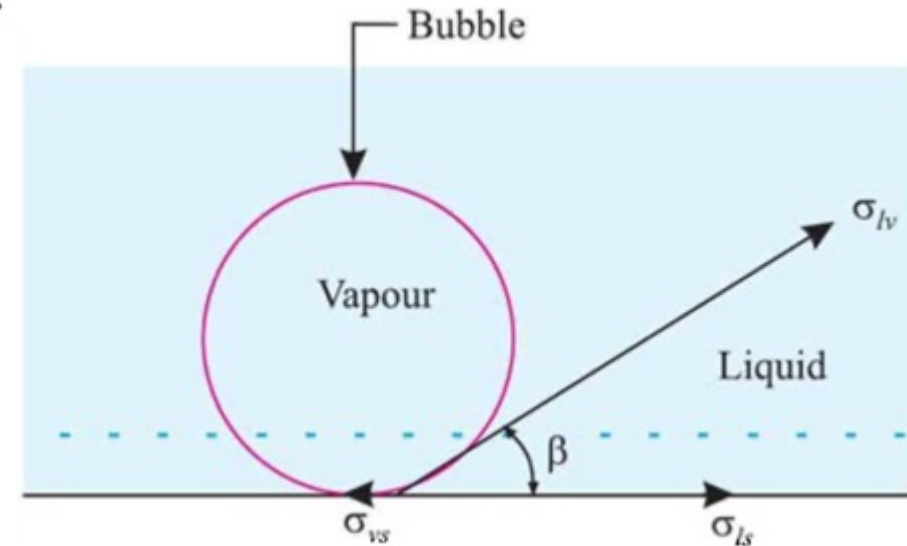
$$\text{Thus } d_c = f \left[\beta, \sigma_{lv}, g (\rho_l - \rho_v), \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ls}} \right]$$

By the use of the dimensional analysis technique, we get

$$d_c = C \cdot \beta \left(\frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ls}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{lv}}{g (\rho_l - \rho_v)}} \dots (9.6)$$

where C is constant which is generally calculated by experimental results.

The value of $C = 0.0148$ for water bubbles.



GAMBAR 7. DIAMETER KRITIS BUBBLE

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI NUCLEAT BOILING

- 1. Jenis material, bentuk dan keadaan permukaan yang dipanasi.**
- 2. Sifat-sifat cairan (Liquid Properties)**
- 3. Tekanan (Pressure)**
- 4. Penadukan mekanis (Mechanical Agitation)**

BOILING CORRELATIONS

In boiling heat transfer, a *driving force is the excess temperature*, which is given by:

$$\Delta t_e = t_s - t_{sat} \quad \dots(9.7)$$

For the boiling process the governing equation is

$$Q = hA \Delta t_e$$

where h is the *boiling film coefficient*.

NUCLEATE POOL BOILING

(i) For nucleate pool boiling, Rosenhow has recommended the following correlation:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{c_{pl} \cdot \Delta t_e}{C_{sl} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l^n} \right]^3 \quad \dots(9.8)$$

where,

q_s = Surface heat flux, W/m²;

μ_l = Liquid viscosity, kg/ms;

h_{fg} = Enthalpy of vaporisation, J/kg;

ρ_l = Density of saturated liquid, kg/m³;

ρ_v = Density of the saturated vapour, kg/m³;

σ = Surface tension of the liquid-vapour interface, N/m;

c_{pl} = Specific heat of saturated liquid, J/kg K;

$\Delta t_e = (t_s - t_{sat})$ = excess temperature;

C_{sl} = Surface fluid constant (determined from experimental data);

n = Another constant which depends upon the liquid and the surface; for water $n = 1$, while for other liquids $n = 1.7$.

C_{sl} dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai C_{sl} untuk pool boiling

<i>S.No.</i>	<i>Liquid-surface</i>	C_{sl}
1.	Water - copper	0.013
2.	Water - brass	0.060
3.	Water - platinum	0.013
4.	Water - ground and polished stainless steel	0.008
5.	Water - mechanically polished stainless steel	0.013
6.	Benzene - chromium	0.010
7.	Ethanol - chromium	0.0027
8.	n-pentane - chromium	0.0150
9.	n-butanol - copper	0.003
10.	Isopropyl alcohol - copper	0.00225

(ii) Jacob has proposed the following correlation for nucleate boiling at atmospheric pressure on a flat plate and with low heat fluxes :

$$Nu = 0.16 (Gr \cdot Pr)^{0.33} \quad \dots(9.9)$$

(iii) For the nucleate boiling on a vertical flat plate, Jacob correlation is of the form:

$$Nu = 0.61 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad \dots(9.10)$$

HEAT FLUX KRITIS UNTUK NUCLEATE POOL BOILING

On the boiling curve the critical heat flux is an important point. It is always desirable to operate a boiling process close to this point. Zuber (1958) predicted the following expression, for such a case:

$$q_{sc} = 0.18 (\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad \dots(9.11)$$

The expression given above is independent of fluid viscosity, conductivity and specific heat.

FILM POOL BOILING

In *stable film boiling*, the heat transfer is due to both convection and radiation. Bromley (1950) has suggested the following correlation for film boiling from the outer surface of horizontal tubes:

$$(h)^{4/3} = (h_{conv.})^{4/3} + h_{rad.} (h)^{1/3} \quad \dots(9.12)$$

The equation (9.12) being tedious to solve, could be written within $\pm 5\%$ of error as

$$h = h_{conv.} + \frac{3}{4} h_{rad.} \quad \dots(9.13)$$

The convective coefficient, $h_{conv.}$ (in the absence of radiation), is given by

$$h_{conv.} = 0.62 \left[\frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.4 c_{pv} \Delta t_e)}{\mu_v D \Delta t_e} \right]^{1/4} \quad \dots(9.14)$$

where, D is the outer diameter of the tube. The vapour properties in the above equation are evaluated at the arithmetic mean of the surface and saturation temperatures.

Radiative heat transfer coefficient

$$h_{rad} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_s^4 - T_{sat}^4)}{(T_s - T_{sat})} \quad \dots(9.15)$$

where ϵ is the emissivity of solid.

CONTOH SOAL

Contoh 1:

Suatu kawat berdiameter 1,2 mm dan panjang 200mm berada dalam air secara horizontal pada tekanan 7 bar. Kawat dialiri arus listrik 135 A dengan tegangan 2,18 V. Jika permukaan kawat mempunyai temperatur 200 °C, hitunglah:

- (i) Heat flux
- (ii) Koefisien boiling heat transfer

Solution. Given : $d = 1.2 \text{ mm} = 0.0012 \text{ m}$, $l = 200 \text{ mm} = 0.2 \text{ m}$, $I = 135 \text{ A}$, $V = 2.18 \text{ V}$, $t_s = 200^\circ\text{C}$.

(i) The heat flux, q :

The electrical energy input to the wire is given by

$$Q = VI = 2.18 \times 135 = 294.3 \text{ W}$$

Surface area of the wire, $A = \pi dl$

$$= \pi \times 0.0012 \times 0.2 = 7.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \therefore q &= \frac{Q}{A} = \frac{294.3}{7.54 \times 10^{-4}} \\ &= 0.39 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = \mathbf{0.39 \text{ MW/m}^2} \text{ (Ans.)} \end{aligned}$$

(ii) The boiling heat transfer coefficient, h :

Corresponding to 7 bar, $t_{sat} = 164.97^\circ\text{C}$, and

$$q = h (t_s - t_{sat})$$

$$\text{or, } h = \frac{q}{(t_s - t_{sat})} = \frac{0.39 \times 10^6}{(200 - 164.97)}$$

$$= \mathbf{11133.3 \text{ W/m}^2\text{C}} \text{ (Ans.)}$$

Contoh 2:

Suatu kawat listrik berdiameter 1,25 mm dan panjang 250 mm diletakkan secara horizontal di dalam air pada tekanan atmosfer. Kawat mempunyai tegangan 18 V dan arus listrik 45 Ampere.

Hitunglah:

- (i) Heat flux
- (ii) Koefisien boiling heat transfer

Korelasi untuk water boiling:

$$h = 1.58 \left(\frac{Q}{A} \right)^{0.75} = 5.62 (\Delta t_e)^3, W / m^2 \text{ } ^\circ C$$

Solution. Given : $d = 1.25 \text{ mm} = 0.00125 \text{ m}$, $l = 250 \text{ mm} = 0.25 \text{ m}$, $V = 18 \text{ V}$, $I = 45 \text{ A}$.

(i) **The heat flux, q :**

Electrical energy input to the wire, $Q = VI = 18 \times 45 = 810 \text{ W}$

Surface area of the wire, $A_s = \pi dl = \pi \times 0.00125 \times 0.25 = 9.817 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$\therefore q = \frac{Q}{A} = \frac{810}{9.817 \times 10^{-4}} = 0.825 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = \mathbf{0.825 \text{ MW/m}^2} \text{ (Ans.)}$$

(ii) **The excess temperature, Δt_e :**

Using the correlation,

$$1.58 \left(\frac{Q}{A} \right)^{0.75} = 5.62 (\Delta t_e)^3$$

or, $1.58 (0.825 \times 10^6)^{0.75} = 5.62 (\Delta t_e)^3$

$$\Delta t_e = \left[\frac{1.58 (0.825 \times 10^6)^{0.75}}{5.62} \right]^{0.333} = \mathbf{19.68^\circ C \text{ (Ans.)}}$$

Contoh 3:

Kawat nikel berdiameter 1 mm dan panjang 400 mm, berada di dalam bak air yang terbuka dengan tekanan yang sama dengan tekanan atmosfer. Tentukanlah voltage pada *burnout point* jika pada titik ini kawat mengalir arus listrik 190 A.

Solution. Given : $d = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$; $l = 400 \text{ mm} = 0.4 \text{ m}$, $I = 190 \text{ A}$

The thermo-physical properties of water and vapour at 100°C are:

$$\rho_l = (\rho_f) = 958.4 \text{ kg/m}^3, \rho_v = 0.5955 \text{ kg/m}^3, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, \sigma = 58.9 \times 10^{-3} \text{ N/m}.$$

Voltage at the burnout point, V_b :

At burnout *i.e.*, the points of critical heat flux, the correlation is

$$\begin{aligned} q_{sc} &= 0.18(\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} && \dots[\text{Eqn. (9.11)}] \\ &= 0.18 (0.5955)^{1/2} \times 2257 \times 10^3 [9.81 \times 58.9 \times 10^{-3} (958.4 - 0.5955)]^{1/4} \\ &= 1.52 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 1.52 \text{ MW/m}^2 \end{aligned}$$

Electric energy input to the wire,

$$Q = V_b \times I$$

or,

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{V_b \times I}{A} = q_{sc}$$

or,

$$V_b = \frac{A \times q_{sc}}{I} = \frac{\pi dl \times q_{sc}}{I} = \frac{\pi \times 0.001 \times 0.4 \times (1.52 \times 10^6)}{190}$$

or,

$$V_b = \mathbf{10.05 \text{ V}}$$

Contoh 4:

Air dididihkan pada rate 25 kg/h di di dalam panci yang berdiameter 280 mm, tekanan atmosfer. Dengan asumsi keadaan nucleat boiling, hitunglah temperatur permukaan bawah panci.

Solution. *Given:* $m = 25 \text{ kg/h}$; $D = 280 \text{ mm} = 0.28 \text{ m}$

The properties of water at atmospheric pressure are:

$t_{sat} = 100^\circ\text{C}$; $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$; $\rho_v = 0.5955 \text{ kg/m}^3$; $c_{pl} = 4220 \text{ J/kg K}$; $\mu_l = 279 \times 10^{-6}$;

$Pr_l = 1.75$; $h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$; $\sigma = 58.9 \times 10^{-3} \text{ N/m}$; $n = 1$ (for water)

The temperature of the bottom surface, t_s :

Excess temperature $\Delta t_e = t_s - t_{sat}$

For nucleate boiling (assumed), the following correlation holds good:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{c_{pl} \cdot \Delta t_e}{C_{sl} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l^n} \right]^3 \quad \dots[\text{Eqn. (9.8)}]$$

For polished copper pan, $C_{sl} = 0.013$

or,
$$\Delta t_e = \left[\frac{q_s}{\mu_l \cdot h_{fg}} \left\{ \frac{\sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right\}^{0.5} \right]^{0.333} \left[\frac{C_{sl} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l}{c_{pl}} \right]$$

Here,
$$q_s = \text{Surface heat flux} = \frac{Q}{A} = \frac{m h_{fg}}{A}$$

(where, m = Rate of water evaporation)

or,
$$q_s = \frac{25 \times (2257 \times 10^3)}{3600 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 0.28^2 \right)} = 254544 \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta t_e &= \left[\frac{254544}{279 \times 10^{-6} \times 2257 \times 10^3} \left\{ \frac{58.9 \times 10^{-3}}{9.81 (958.4 - 0.5955)} \right\}^{0.5} \right]^{0.333} \left[\frac{0.013 \times 2257 \times 10^3 \times 1.75}{4220} \right] \\ &= [404.23 \times 0.0025]^{0.333} \times 12.16 = 12.2 \end{aligned}$$

i.e.,
$$\Delta t_e = t_s - t_{sat} = 12.2$$

or,
$$t_s = 12.2 + t_{sat} = 12.2 + 100 = \mathbf{112.2^\circ\text{C (Ans.)}}$$

Contoh 5:

Air pada tekanan atmosfer dididihkan di dalam panci yang berdiameter 350 mm dan temperatur dipertahankan pada 115 °C. Hitunglah:

- (i) Daya pembakar.
- (ii) Besar nilai evaporasi dalam kg/h.
- (iii) Critical heat flux untuk keadaan ini.

Solution. *Given* : $D = 350 \text{ mm} = 0.35 \text{ m}$, $t_s = 115^\circ\text{C}$, $t_{sat} = 100^\circ\text{C}$

The thermo-physical properties of water (from table) at 100°C are:

$$\rho_l (= \rho_f) = 958.4 \text{ kg/m}^3; \rho_v = 0.5955 \text{ kg/m}^3; c_{pl} (= c_{pf}) = 4220 \text{ J/kg K};$$

$$\mu_l (= \mu_f) = 279 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$Pr_l (= Pr_f) = 1.75; h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}; n = 1; \sigma = 58.9 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

The excess temperature, $\Delta t_e = t_s - t_{sat} = 115 - 100 = 15^\circ\text{C}$

(i) Power of the burner to maintain boiling:

As per boiling curve, for $\Delta t_e = 15^\circ\text{C}$, nucleate pool boiling will occur and for this the following correlation holds good:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{c_{pl} \cdot \Delta t_e}{C_{sl} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l^n} \right]^3 \quad \dots[\text{Eqn (9.8)}]$$

For polished copper pan, $C_{sl} = 0.013$

...Refer table 9.1

Substituting the values in the above eqn. we get

$$\begin{aligned} q_s &= 279 \times 10^{-6} \times (2257 \times 10^3) \left[\frac{9.81 (958.4 - 0.5955)}{58.9 \times 10^{-3}} \right]^{0.5} \left[\frac{4220 \times 15}{0.013 \times 2257 \times 10^3 \times 1.75} \right]^3 \\ &= 629.7 \times 399.4 \times 1.873 \\ &= 471.06 \times 10^3 \text{ W/m}^2 = 471.06 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

The boiling heat transfer rate (power of the burner) is given by

$$Q = 471.06 \times \frac{\pi}{4} \times (0.35)^2 = \mathbf{45.32 \text{ kW (Ans.)}}$$

(ii) Rate of evaporation, m_w :

Under steady state conditions, all the heat added to the pan will result in evaporation of water.

Thus,

$$Q = m_w \times h_{fg}$$

or,
$$m_w = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{45.32 \times 10^3}{2257 \times 10^3} = 0.02 \text{ kg/s} = \mathbf{72 \text{ kg/h (Ans.)}}$$

(iii) Critical heat flux, q_{sc} :

$$\begin{aligned} q_{sc} &= 0.18 (\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} && \dots[\text{Eqn. 9.11}] \\ &= 0.18 (0.5955)^{1/2} \times 2257 \times 10^3 [9.81 \times 58.9 \times 10^{-3} (958.4 - 0.5955)]^{1/4} \\ &= 1.52 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = \mathbf{1.52 \text{ MW/m}^2 \text{ (Ans.)}} \end{aligned}$$

TERIMA KASIH

LANJUT KONDENSASI.....

