

ديناميكا حرارية (thermodynamics)

الفصل الثالث

محطّات القدرة البخارية

(Steam Power Plants)

Dr. Osama Mohammed Elmardi Suleiman khayal

د. أسامة محمد المرضي سليمان خيال

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل

عطبرة، السودان

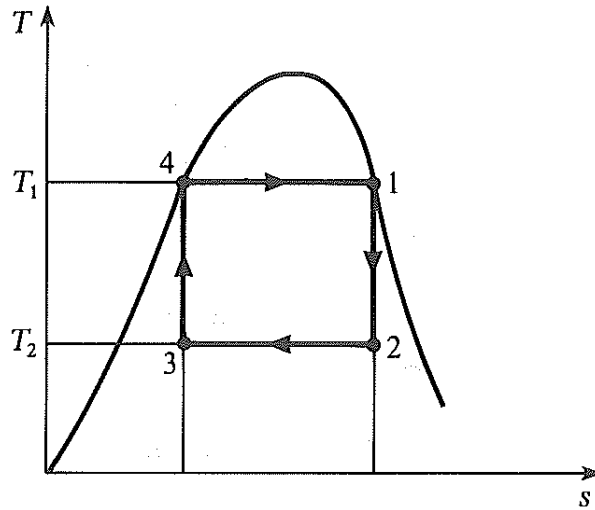
January 2019

الفصل الثالث

محطات القدرة البخارية (Steam Power Plants)

3.1 دورة كارنو: (Carnot Cycle)

هي الدورة الأكبر كفاءة بالنسبة لدرجات حرارة المصدر والعاثس. يمكن تطبيقها في حالة الغازات والبخار. يمكن متابعة دورة كارنو للبخر الرطب في الشكل (3.1) أدناه، الذي يمكن تلخيص الملامح الرئيسية له في الآتي:



شكل (3.1) دورة كارنوت لبخار رطب على مخطط $T - s$

4-1 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط e.g. القيزانات أو الغلايات، المولدات، والمفاعلات النووية.

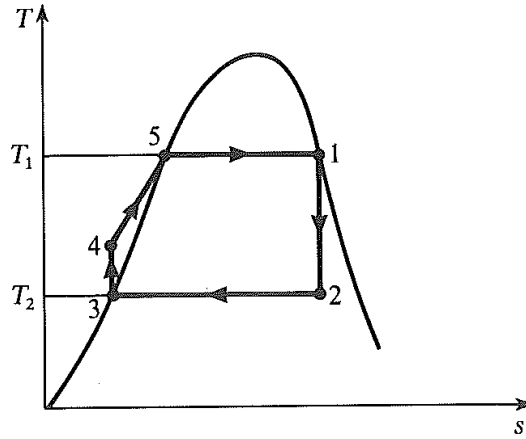
1-2 يتمدد البخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية إلى الضغط المنخفض وبهذا يكون قد أنتج شغلاً وهو الغرض الرئيسي من هذه الدورة. e.g. الآلة البخارية أو التوربين البخاري.

2-3 فقد حراري بالتبريد عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين. e.g. المكثف.

3-4 انضغاط بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من ضغط ودرجة حرارة منخفضة إلى ضغط عالي، e.g. المضخة أو الضاغط. وتتواصل الدورة.

3.2 دورة رانكن: (Rankine Cycle)

يتم توضيح الدورة في الشكل (3.2) أدناه.



شكل (3.2) دورة رانكن للبخار الرطب على مخطط $T - s$

1-4 الغلاية، 4-5 إضافة حرارة (تسخين) بثبات الضغط وباختلاف درجة الحرارة وذلك لتغيير الماء من الحالة 4 (ماء غير مشبع) إلى الحالة 5 (ماء مشبع) حتى يصل إلى درجة الحرارة والضغط اللازمين لدخوله إلى الغلاية.

1-5 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط.

1-2 التوربين، يتمدد البخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الحالة (1) بخار جاف مشبع إلى الحالة (2) بخار رطب.

2-3 المكثف، تكثيف كامل للبخار بالتبريد من الحالة (2) بخار رطب إلى الحالة (3) سائل مشبع لتسهيل عملية ضخه إلى الحالة (4) باستخدام المضخات العادية.

3-4 إنضغاط للبخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الحالة (3) سائل مشبع إلى الحالة (4) سائل غير مشبع. وتتواصل الدورة.

من معادلة طاقة السريان المستقر (steady state flow energy equation) (S.S.F.E.E) أدناه،

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_1 g + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + z_2 g + W \quad (1)$$

إجعل التغير في طاقة السرعة يساوي صفراً i.e. $\frac{C_2^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} = 0$

واجعل التغير في طاقة الوضع يساوي صفراً i.e. $z_2 g - z_1 g = 0$

حيث تصبح المعادلة (1) كالآتي:

$$h_1 + Q = h_2 + W \quad (2)$$

الغلاية: من المعادلة (2)،

$$Q_{sup p} = Q_{541} = (h_1 + h_4) + W$$

$$\therefore Q_{541} = h_1 - h_4, \quad W = 0$$

التوربين: من المعادلة (2)،

$$W_{o/p} = (h_1 - h_2) + Q$$

وبما أن $Q = 0$ ، (تمدد أديباتي انعكاسي)، $S_1 = S_2$

$$\therefore W_{o/p} = W_{12} = h_1 - h_2$$

المكثف: من المعادلة (2)،

$$Q_{rej.} = Q_{23} = (h_2 - h_3) + W$$

وبما أن $W = 0$ ،

$$\therefore Q_{rej.} = Q_{23} = h_2 - h_3$$

المضخة: من المعادلة (2)،

$$W_{i/p} = W_{34} = (h_4 - h_3) + Q$$

وبما أن $Q = 0$ ، (تمدد أديباتي انعكاسي)، $S_3 = S_4$

$$W_{34} = h_4 - h_3$$

$$W_{net\ o/p} = W_{12} - W_{34}$$

صافي الشغل في الدورة،

$$\therefore W_{net\ o/p} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) \quad (3)$$

إذا تم تجاهل شغل مضخة التغذية، نظراً لأن خرج التوربين كبير جداً مقارنة بشغل

المضخة، فإن المعادلة (3) تصبح كالآتي،

$$W_{net\ o/p} = h_1 - h_2$$

$$\eta_R = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{الحرارة المكتسبة في الغلاية}} \quad \text{كفاءة دورة راكن،}$$

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_3) - (h_4 - h_3)} \quad (4)$$

وإذا تم تجاهل شغل مضخة التغذية. $h_4 - h_3 = 0$, i.e. تصبح المعادلة كالآتي:

$$\eta_R = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \quad (5)$$

وإذا تم اعتبار مضخة التغذية،

$$\therefore W_{34} = h_4 - h_1$$

للسوائل غير الانضغاطية، من الحالة (3) إلى الحالة (4)، $v = \text{constant}$

$$\therefore h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3) \quad (6)$$

ولإثبات المعادلة (6) عاليه، من معادلة طاقة اللاسريان،

$$dQ = du + dw$$

ولأي إجراء انعكاسي، $dw = p dv$

وللإجراء الأديباتي الانعكاسي،

$$dQ = du + p dv = 0$$

وبما أن ، $h = u + pv$

بتفاضل المعادلة عاليه نحصل على،

$$dh = du + p dv + v dp$$

وبإعادة ترتيبها $du + p dv = dh - v dp$

$$\therefore dQ = dh - v dp = 0$$

$$\therefore dh = v dp$$

بتكامل المعادلة عاليه فيما بين الحالتين 3 و 4،

$$\int_3^4 dh = v \int_3^4 dp$$

$$\therefore h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

∴ شغل دخل المضخة،

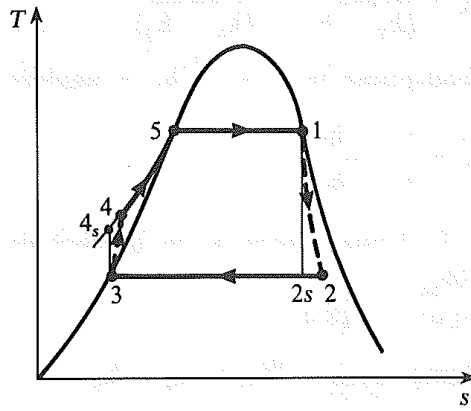
$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

(تؤخذ قيمة v من جداول البخار عند ضغط p_3).

ويمكن أخذها كقيمة متوسطة مساوية لـ $0.001 \text{m}^3/\text{kg}$

نسبة الكفاءة: (Efficiency Ratio)

$$\text{نسبة الكفاءة} = \frac{\text{كفاءة الدورة الفعلية}}{\text{كفاءة دورة رانكن}}$$



شكل (3.3) دورة رانكن موضحة الإجراءات الفعلية على مخطط $T - s$

في الشكل (3.3) عاليه،

يكون التمدد الفعلي لا انعكاسياً (1-2').

ويكون الانضغاط الفعلي لا انعكاسياً (3-4').

بالنسبة لإجراء التمدد، يمكن تعريف كفاءة ثابت القصور الحراري كالتالي:

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين (Isentropic efficiency) =

$$\frac{\text{الشغل الفعلي}}{\text{الشغل ثابت القصور الحراري}}$$

$$\text{i.e. } \eta_{isen,T} = \frac{W'_{12}}{W_{12}} = \frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2}$$

وبالنسبة لإجراء الانضغاط،

كفاءة ثابت القصور الحراري للمضاغط = $\frac{\text{الشغل ثابت القصور الحراري}}{\text{الشغل الفعلي}}$

$$\eta_{isen}, C = \frac{W_{34}}{W'_{34}} = \frac{h_4 - h_3}{h'_4 - h_3}$$

نسبة الشغل: (Work Ratio)

يتم تعريفها كالآتي،

$$WR = \frac{\text{صافي الشغل}}{\text{اجمالي الشغل}} ، \text{نسبة الشغل}$$

الاستهلاك النوعي للبخار: (Specific Steam Consumption)

هو معدّل سريان البخار بالـ kg/h المطلوب لتطوير قدرة مقدارها 1kw.

$$SSC = \frac{\text{معدل سريان البخار}}{\text{الاستهلاك النوعي للبخار}} = \frac{\text{معدل سريان البخار}}{\text{الاستهلاك النوعي للبخار}} = \frac{3600}{W_{net\ o/p}} \text{ kg / kwh}$$

بتجاهل شغل مضخة التغذية،

$$h_4 - h_3 = 0$$

$$\therefore W_{net\ o/p} = h_1 - h_2$$

$$\therefore SSC = \frac{3600}{h_1 - h_2} \text{ kg / kwh}$$

مثال (1):

i/ يتم إمداد بخار جاف مشبع عند ضغط 40bar إلي توربينة حيث يكون ضغط المكثف

0.035bar. إذا كانت المحطة تعمل بدورة رانكن،

أحسب لكل kg من البخار الآتي:

1/ الشغل الناتج متجاهل شغل مضخة التغذية.

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية.

3/ كمية الحرارة المنتقلة إلي ماء التبريد بالمكثف، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا

كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5 K .

4/ كمية الحرارة المكتسبة.

5/ كفاءة دورة رانكن.

6/ الاستهلاك النوعي للبخار (بتجاهل شغل مضخة التغذية).

ii/ لنفس حالات البخار السابقة، أحسب الآتي:

7/ كفاءة دورة كارنو.

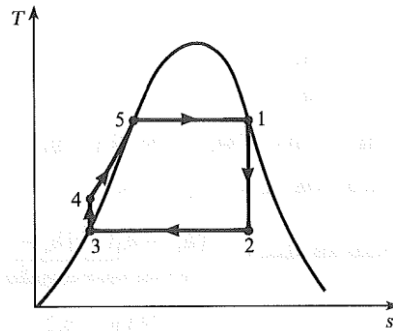
8/ الاستهلاك النوعي للبخار.

لدورة كارنو تعمل في البخار الرطب.

الحل:

من الشكل (3.4) أدناه،

/i



شكل (3.4) مخطط $T - s$ للمثال (3.1)

1/ الشغل الناتج متجاهلاً شغل مضخة التغذية،

$$W_{\text{Gross}} = W_{12} = h_1 - h_2$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_1 = h_g = 2801 \text{ kJ/kg}$$

$$s_g = s_1 = s_2 = 6.07 \text{ kJ/kgK}$$

وعند ضغط 0.035bar،

$$s_2 = s_1 = s f_2 + x_2 s f g_2$$

$$s f_2 = 0.391 \text{ kJ/kgK}, s f g_2 = 8.13 \text{ kJ/kgK}$$

$$\therefore s_2 = s_1 = 6.07 = 0.391 + x_2 (8.13)$$

$$\therefore x_2 = \frac{6.07 - 0.391}{8.13} = 0.699 \approx 0.7$$

$$\therefore h_2 = h f_2 + x_2 h f g_2$$

$$h f_2 = 112 \text{ kJ/kgK}, h f g_2 = 2438 \text{ kJ/kgK}$$

$$\therefore h_2 = 112 + 0.7 \times 2438 = 1818.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore W_{12} = h_1 - h_2 = 2801 - 1818.6 = \underline{\underline{982.4 \text{ kJ/kg}}}$$

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية،

$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

$$= \frac{1}{\rho} (p_4 - p_3) = \frac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = \underline{\underline{4 \text{ kJ/kg}}}$$

3/ كمية الحرارة المنقولة إلى ماء التبريد بالمكثف، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا

كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5K.

$$Q_{\text{rej.}} = Q_{23} = T_2 (s_2 - s_3)$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

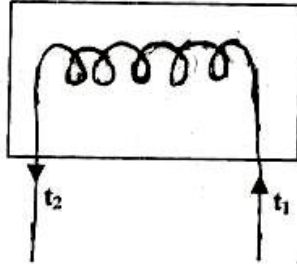
$$T_2 = T_s = 26.7^\circ \text{C} = 26.7 + 273 = \underline{\underline{299.7 \text{ K}}}$$

$$s_2 = s_1 = 6.07 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_3 = s_f = 0.391 \text{ kJ/kgK}$$

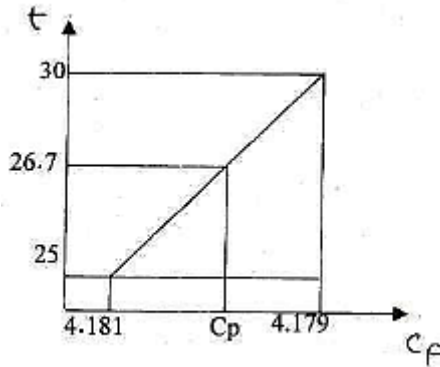
$$\therefore Q_{23} = 299.7(6.07 - 0.391) = \underline{1702 \text{ kJ/kg}}$$

$$Q = m c_p dT \text{ أيضاً}$$



يتم إيجاد c_p من جداول البخار المشبع عند درجة حرارة 26.7°C بأسلوب استخدام

الاستكمال (Interpolation) كالاتي،



$$\therefore c_p = 4.181 + \frac{26.7 - 25}{30 - 25} (4.179 - 4.181) = \underline{4.18 \text{ kJ/kgK}}$$

$$\therefore Q_{23} = 1702 = m \times 4.18 \times 5.5$$

$$\therefore m = \frac{1702}{4.18 \times 5.5} = \underline{74 \text{ kg}}$$

4/ كمية الحرارة المكتسبة،

$$Q_{\text{sup}} = Q_{451} = h_1 - h_4$$

باستخدام المعادلة التالية لإيجاد h_4

$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3) = 4 \text{ kJ/kg}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$h_3 = h_f = 112 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore h_4 = 4 + 112 = 116 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore Q_{\text{supp}} = 2801 - 116 = 2685 \text{ kJ/kg}$$

/5 كفاءة دورة رانكن،

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_3) - (h_4 - h_3)} = \frac{982.4 - 4}{(2801 - 112) - 4} = 0.3644 \approx 36.4\%$$

/6 الاستهلاك النوعي للبخار (بتجاهل شغل مضخة التغذية)

$$ssc = \frac{3600}{W_{\text{net o/p}}}$$

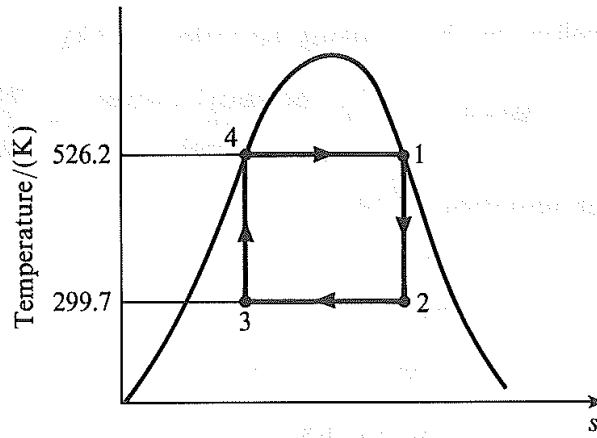
$$W_{\text{net o/p}} = W_{12} - W_{34}$$

بما أن $W_{34} = 0$ ،

$$\therefore W_{\text{net o/p}} = W_{12} = h_1 - h_2 = 982.4 \text{ kJ/kg}$$

$$ssc = \frac{3600}{982.4} = \underline{\underline{3.66 \text{ kg/kwh}}}$$

/ii



شكل (3.5) دورة كارنو في مخطط T - s للمثال (1)

/7 كفاءة دورة كارنو،

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$T_s = T_1 = 250.3^\circ C$$

$$= 250.3 + 273 = 523.3 K$$

$$\therefore \eta_{Carnot} = \frac{523.3 - 299.7}{523.3} = 0.427 \text{ or } 42.7\% \approx \underline{\underline{43\%}}$$

8 / الاستهلاك النوعي للبخار،

$$ssc = \frac{3600}{W_{net\ o/p}}$$

$$W_{net\ o/p} = W_{12} - W_{34} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$$

$$W_{12} = h_1 - h_2 = \underline{\underline{982.4\ kJ/kg}}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_4 = h_f = \underline{\underline{1087\ kJ/kg}}$$

$$s_4 = s_3 = s_f = \underline{\underline{2.797\ kJ/kgK}}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$s_3 = s_4 = 2.797 = sf_3 + x_3 sfg_3$$

$$sf_3 = 0.391\ kJ/kgK, \quad sfg_3 = 8.13\ kJ/kgK$$

$$\therefore 2.797 = 0.391 + x_3(8.13)$$

$$\therefore x_3 = \frac{2.797 - 0.391}{8.13} = \underline{\underline{0.296}}$$

$$\therefore h_3 = hf_3 + x_3 hfg_3$$

$$hf_3 = 112\ kJ/kg, \quad hfg_3 = 2438\ kJ/kg$$

$$h_3 = 112 + 0.296 \times 2438 = 833.65\ kJ/kg$$

$$W_{34} = h_4 - h_3 = 1087 - 833.65 = 253.35\ kJ/kg$$

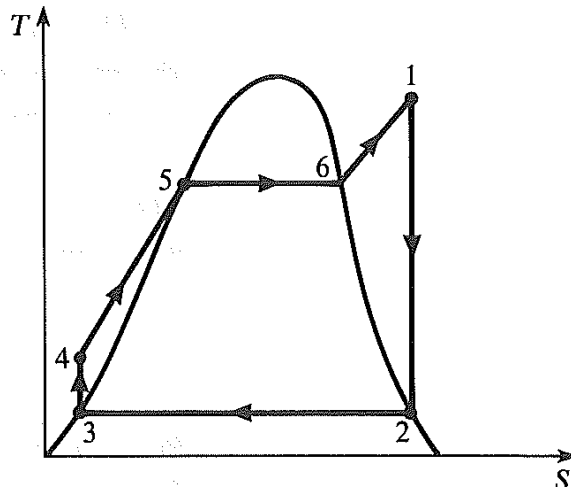
$$W_{net\ o/p} = 982.4 - 253.35 = 729.05\ kJ/kg$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{729.05} = \underline{\underline{4.94}} \text{ kg / kwh}$$

3.3 تعديلات دورة رانكن : (Modifications of Rankine Cycle)

أ/ دورة رانكن مع التحميص : (Rankine Cycle with Superheat)

يمكن زيادة حرارة الحرارة المتوسطة التي يتم إمدادها إلي الغلاية بتحميص البخار ، وذلك بتمرير البخار الجاف المشبع في مجموعة مواسير صغيرة المقطع ليتم تسخينها إضافياً بثبوت الضغط وبتفاوت درجة الحرارة في فرن الغلاية حتى يصل البخار إلي درجة الحرارة المطلوبة لدخوله إلي التوربينة (شكل (3.6)) أدناه،



شكل (3.6) محطة بخار محمص على مخطط T – s

ب/ دورة إعادة التسخين : (The Reheat Cycle)

يتم إعادة تسخين البخار عند ضغط ثابت ودرجة حرارة متغيرة من الحالة (2) إلي الحالة (6) وذلك إما بإعادة البخار إلي الغلاية وتمريره خلال مجموعة من المواسير بالقرب من مواسير التحميص أو باستخدام فرن إعادة تسخين (reheater) يوجد بالقرب من التوربينة.

من مخطط $T - s$ أدناه (3.7) ومن المخطط الوظيفي للمحطة شكل (3.8)، يمكن

توضيح الآتي:

1-2 تمدد انعكاسي بثبوت القصور الحراري في التوربين ذو الضغط العالي.

2-6 إعادة تسخين البخار بثبوت الضغط وبتفاوت درجة الحرارة.

6-7 تمدد انعكاسي بثبوت القصور الحراري في التوربين ذو الضغط المنخفض.

دواعي استخدام دورة إعادة التسخين:-

1/ تخفيض الرطوبة عند مخرج التوربين بحيث لا تتعدى نسبتها 10%.

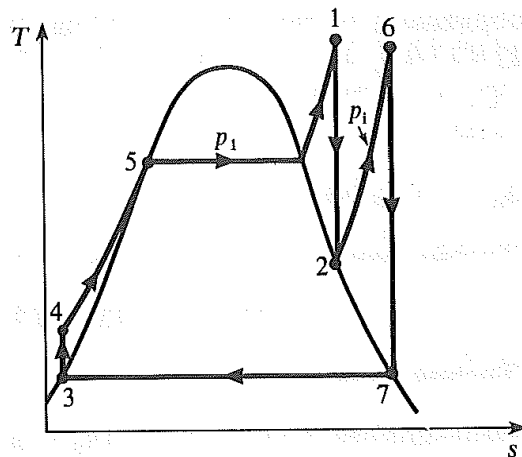
2/ إمكانية استخدام غلايات ذات ضغط عالي لزيادة الكفاءة وتقليل حجم المحطة. وذلك

لأنَّ التمدد إذا تم في مرحلة واحدة فإنَّ البخار الخارج من التوربين سيحتوي على رطوبة،

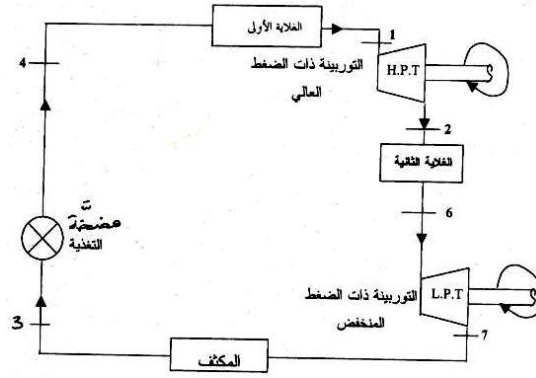
عليه سيتم التمدد على مرحلتين.

3/ تحسين الاستهلاك النوعي للبخار.

يتم توضيح المخطط الكتلي لدورة إعادة التسخين في الشكل (3.8) أدناه.



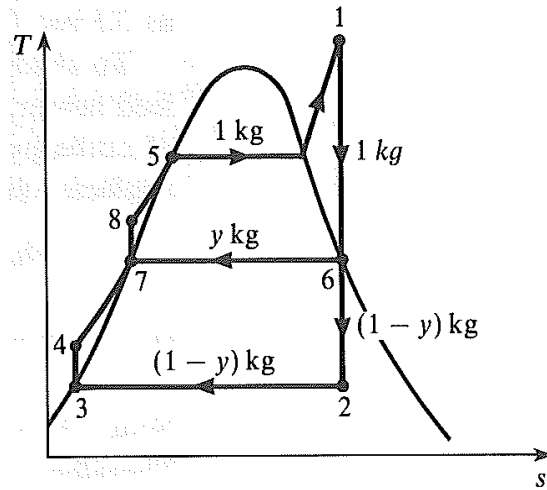
شكل (3.7) مخطط $T - s$ موضعاً دورة إعادة تسخين البخار



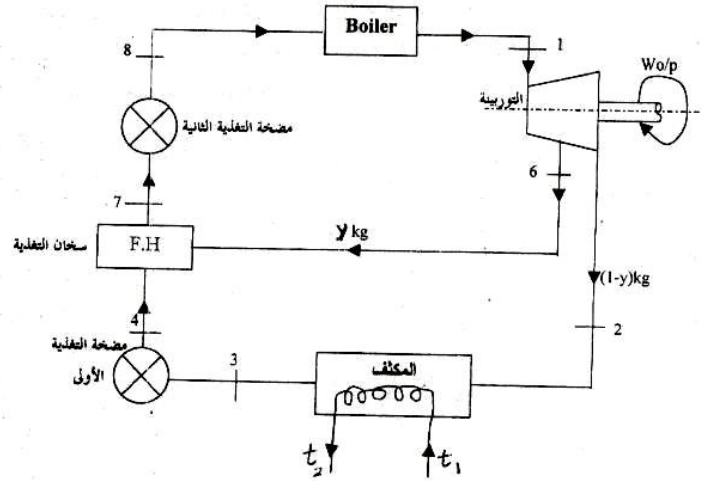
شكل (3.8) مخطط دورة إعادة التسخين

ج/ دورة الاسترجاع (Regenerative Cycle) أو الدورة التجديدية:

هي الدورة التي يتم فيها زيادة درجة حرارة الماء الداخلة إلي الغلاية وذلك بتنظيف بعض البخار عند ضغط وسيط من داخل التوربينة وخلطه مع الماء الخارج من المكثف في سخان تغذية أو خلاط (feed heater or mixer). يتم توضيح مخطط $T - s$ والمخطط الكتلي الوظيفي للدورة في الأشكال (3.9) و (3.10) على الترتيب.



شكل (3.9) محطة بخار ذات دورة تجديدية على مخطط $T - s$



شكل (3.10) مخطط دورة تجديدية

يتمدد البخار من الحالة (1) إلى الحالة (2) خلال التوربين. وعند ضغط وسيط p_6 يتم استنزاف كمية من البخار من التوربينة بمقدار y kg لكل kg من البخار ويتم إمداده إلى سخان التغذية (F.H). المتبقي من البخار يكمل إجراء التمدد في التوربينة ويخرج منها عند الحالة (2) حيث يتم تكثيفه في المكثف حتى الحالة (3) التي عندها يتم ضخه بواسطة مضخة التغذية الأولى إلى الحالة (4) (ماء غير مشبع)، وبعدها يتم تمريره إلى سخان التغذية عند نفس ضغط البخار المستنزف حيث يتم خلطه مع البخار المستنزف لرفع درجة حرارة الماء ليصبح ماءً مشبعاً عند الحالة (7) التي عندها يتم ضخه بواسطة مضخة التغذية الثانية إلى الحالة (8) (ماء غير مشبع)، بعدها يدخل إلى الغلاية ليتم تسخينه بضغط ثابت.

يتم حساب درجة حرارة النزيف بالمعادلة،

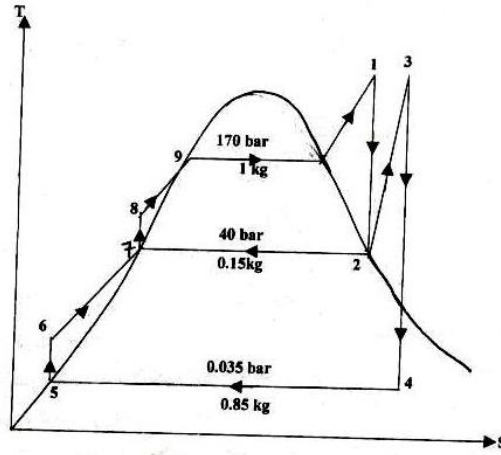
$$t_{bleed} = \frac{t_5 - t_2}{2} ، \text{ درجة حرارة النزيف}$$

مثال (2):

محطة توليد قدرة كهربائية تعطي خرجاً مقداره 200MW. يكون الضغط المحمّص الخارج من الغلاية هو 170bar ودرجة حرارة 600°C. بعد التمدد خلال توربينة المرحلة الأولى إلي ضغط 40bar، يتم استنزاف 15% من البخار إلي سخان التغذية، والمتبقي يتم إعادة تسخينه إلي درجة حرارة 600°C ومن بعد يتمدد خلال توربينة المرحلة الثانية لضغط مكثف مقداره 0.035bar. للحسابات الأولية افترض أنّ الدورة الفعلية لها نسبة كفاءة مقدارها 70%، وتكون الكفاءة الميكانيكية والكهربائية هي 95%. أحسب أقصى معدّل سريان إلي الغلاية بالـ kg/h.

الحل:

$$P_{o/p} = 200 \text{ MW} = 200 \times 10^6 \text{ W}$$
$$= \underline{\underline{200 \times 10^3 \text{ kW}}}$$



من جداول البخار المحمّص عند ضغط 170bar ودرجة حرارة 600°C،

$$h_1 = 3564 \text{ kJ/kg}$$

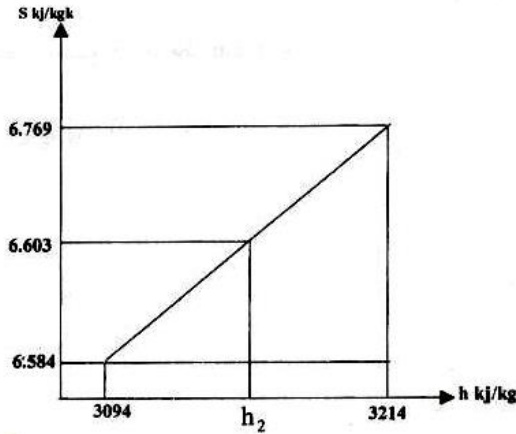
$$s_1 = 6.603 \text{ kJ/kgK} = s_2$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$s_g = 6.07 \text{ kJ/kgK} < s_2$$

عليه سيكون البخار محمّصاً عند الحالة (2).

من جداول البخار المحمّص عند ضغط 40bar وقصور حراري 6.603 kJ/kgK وباستخدام طريقة الاستكمال،



$$h_2 = 3094 + \left(\frac{6.603 - 6.584}{6.769 - 6.584} \right) \times (3214 - 3094) = 3106.3 \text{ kJ/kg}$$

لإيجاد قيمة h_3 ، من جداول البخار المحمّص عند الضغط 40bar ودرجة حرارة 600°C ،

$$h_3 = 3674 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = s_4 = 7.368 \text{ kJ/kgK}$$

من جداول البخار عند ضغط 0.035bar،

$$s_g = 8.521 \text{ kJ/kgK} > s_4$$

سيكون البخار رطباً عند الحالة (4)،

$$s_4 = s f_4 + x_4 s f g_4$$

$$7.368 = 0.391 + x_4 (8.13)$$

$$\therefore x_4 = \frac{7.368 - 0.391}{8.13} = 0.86$$

$$\begin{aligned} \therefore h_4 &= hf_4 + x_4 hfg_4 \\ &= 112 + 0.86 \times 2438 = \underline{2208.7} \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

أيضاً من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$h_5 = h_f = \underline{112} \text{ kJ/kg}$$

شغل مضخة التغذية الأولي،

$$\begin{aligned} W_{56} &= h_6 - h_5 = v(p_6 - p_5) \\ &= \frac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = 4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\therefore h_6 = W_{56} + h_5 = 4 + 112 = 116 \text{ kJ/kg}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_7 = h_f = 1087 \text{ kJ/kg}$$

شغل مضخة التغذية الثانية،

$$\begin{aligned} W_7 &= h_8 - h_7 = v(p_8 - p_7) \\ &= \frac{0.001(170 - 40) \times 10^5}{10^3} = 13 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_8 = W_{78} + h_7 = 13 + 1087 = \underline{1100} \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_R = \frac{W_{net \ o/p}}{Q_{sup.}}$$

$$\begin{aligned} W_{net \ o/p} &= W_{12} + W_{34} - (W_{56} - W_{78}) \\ &= 1(h_1 - h_2) + 0.85(h_3 - h_4) - 0.85(h_6 - h_5) - 1(h_8 - h_7) \\ &= 1(3564 - 3106.3) + 0.85(3674 - 2208.7) - 0.85 \times 4 - 1(13) = \underline{1686} \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{sup.} &= 1(h_1 - h_8) + 0.85(h_3 - h_2) \\ &= 1(3564 - 1100) + 0.85(3674 - 3106.3) \\ &= 2946.55 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_g = \frac{1686.8}{2946.55} = 0.572 \text{ or } \underline{57.2\%}$$

$$0.7 = \frac{\text{كفاءة الدورة الفعلية}}{\text{كفاءة دورة رانكن}} = \text{نسبة الكفاءة}$$

$$\text{كفاءة الدورة الفعلية } \eta_{act.} = 0.7 \times \eta_R = 0.7 \times 0.572 = 0.4 \text{ أو } 40\%$$

صافي الشغل الفعلي في الدورة،

$$W_{net o/p} act = \eta \cdot Q_{sup p} = 0.4 \times 2964.55 = 1178.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{act.W_{net o/p}} = \frac{3600}{1178.6} = 3.054 \text{ kg/kWh}$$

$$\text{معطي } \eta_{mech.,elec.} = 0.95$$

$$\therefore p_{i/p} = \frac{P_{o/p}}{\eta_{mech.,elec.}} = \frac{200 \times 10^3}{0.95} = 210.53 \times 10^3 \text{ kW}$$

بالتحليل البعدي، معدّل السريان إلي الغلاية \dot{m} ،

$$\dot{m} = p_{o/p} \times ssc = \text{kW} \times \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = \text{kg/h}$$

$$= 210.53 \times 10^3 \times 3.054 = 643 \times 10^3 \text{ kg/h}$$

$$= \underline{\underline{643000 \text{ kg/h}}}$$

3.4 مسائل: (Problems)

1/ يتم إمداد بخار لتوربينة ذات مرحلتين عند 40bar و 350°C، يتمدد البخار في التوربينة الأولى حتى يصبح جافاً مشبعاً عندها يتم إعادة تسخينه إلي 350°C ومن ثم يتمدد خلال توربينة المرحلة الثانية.

يكون ضغط المكثف 0.035bar. أحسب شغل الخرج والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار للمحطة، مفترضاً إجراءات مثالية ومتجاهلاً شغل مضخة التغذية. أحسب أيضاً الإستهلاك النوعي للبخار وكفاءة الدورة.

Ans. (1290 kJ; 3362kJ; 2.79 kg/kWh; 38.4%)

2/ إذا كانت لإجراءات التمدد في التوربينات للمسألة (1) كفاءات ثابتة قصور حراري مقدارها 84% و 78% على الترتيب، في المرحلتين الأولى والثانية.

أحسب شغل الخرج والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار، الكفاءة الحرارية والاستهلاك النوعي للبخار. قارن الكفاءات واستهلاكات الوقود النوعية المتحصل عليها من المسائل (1) و(2). قارن أيضاً رطوبة البخار المغادر للتوربينة في كل حالة.

Ans. (1026kj ; 3311kj ; 31.1% ; 3.51kg/kWh)

3/ توربينة بخار تعمل على دورة استرجاع بسيطة. يتم إمداد بخار جاف مشبع عند 40bar، ويستنفذ إلى مكثف عند 0.07bar. يتم ضخ البخار المتكثف إلى ضغط 3.5bar الذي عنده يتم خلطه مع البخار المستنزف من التوربينة عند 3.5bar. يتم من بعد ضخ الماء الناتج الذي يكون عند درجة حرارة التشبع إلى الغلاية. للدورة المثالية متجاهلاً شغل مضخة التغذية، أحسب،

a/ مقدار البخار المستنزف المطلوب لكل kg من بخار الإمداد.

b/ الكفاءة الحرارية للمحطة.

c/ الاستهلاك النوعي للبخار.

Ans. (0.1906; 37%; 4.39kg/kWh)

4/ يتم إمداد بخار لتوربينة ذات مرحلتين عند 40bar و 500°C. يتمدد البخار في المرحلة الأولى بإجراء ثابت القصور الحراري إلى ضغط 3.0bar الذي يتم عنده استخلاص 2500kg/h من البخار لشغل العملية. يتم إعادة تسخين المتبقي إلى 500°C ومن بعد يتمدد بإجراء ثابت القصور الحراري إلى 0.06bar. يتطلب أن تكون قدرة الناتج الثانوي

للمحطة 6000kW أحسب مقدار البخار المطلوب من الغلاية، والحرارة المكتسبة بالـ
.kW. تجاهل شغل مضخة التغذية، وافترض أنّ البخار المستنزف يعود عند درجة حرارة
التشبع ليختلط أديباتياً مع البخار المتكثف من المكثف.

Ans. (15,000 kg/h; 15620 kW)

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية:

1. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).
2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).
3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).
4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنش ، جامعة لموصل ، الجمهورية العراقية ،(1988م).

الكتب والمراجع الإنجليزية

1. T. D. Eastop and A. McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineers and Technologists", Longman Singapore Publishers, 1994.
2. Eastop T. D. and Craft D. R., "Energy Efficiency", Longman, 1990.
3. Douglas J. F., Gasiorek J. M. and Swaffield J. A., "Fluid Mechanics", 2nd Edition, Longman, 1986.
4. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer", 4th Edition, Longman, 1992.
5. National Engineering Laboratory, "Steam Tables", HMSO, 1964.

6. Haywood R. W., "Analysis of Engineering Cycles", Pergamon, 1991.
7. Walker G., "Stirling Engines", Oxford University Press, 1980.
8. Harker J. H. and Bachurst J. R., "Fuel and Energy", Academic Press, 1981.
9. Hickson D. C. and Taylor F. R., "Enthalpy – Entropy Diagram for Steam", Basil Blackwell, 1980.
10. Eastop T. D. and Watson W. E., "Mechanical Services for Buildings", Longman, 1992.
11. Cohen H., Rogers G. F. C. and Saravanamuttoo H. I. H., "Gas Turbine Theory", 3rd Edition, Longman, 1987.
12. Shapiro A. H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Flow", Volumes 1 and 2, Kreiger, 1983.
13. Dixon S. L., "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery", 3rd Edition, Pergamon, 1978.
14. Kearton W. J., "Steam Turbine Theory and Practice", Pitman, 1960.
15. Heywood J. B., "Thermal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
16. Taylor C. F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", Volumes 1 and 2, MIT Press, 1977.
17. Watson N. and Janota M. S., "Turbo charging the IC Engines", Macmillan, 1984.
18. Dossat R. J., "Principles of Refrigeration", 2nd Edition, Wiley, 1990.
19. Reay D. A. and McMichael D. B. A., "Heat Pumps", 2nd Edition, Pergamon, 1987.

20. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Thermodynamics and Transport Properties of Fluids", 4th Edition, Basil Blackwell, 1987.
21. Kemp D. D., "Global Environmental Issues", Routledge, 1990.
22. Threlkeld J. L., "Thermal Environmental Engineering", 2nd Edition, Prentice, 1970.
23. Jones W. P., "Air Conditioning Engineering", 3rd Edition, Edward Arnold, 1985.
24. Welty J. R., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1984.
25. Craft D. R. and Lilley D. G., "Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations", Pavic Publications, 1986.
26. Incropera F. P. and De Witt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1990.
27. Eckert E. R. and Drake R. M., "Analysis of Heat and Mass Transfer", Taylor and Francis, 1971.
28. Kern D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw – Hill, 1950.
29. Walker G., "Industrial Heat Exchangers", 2nd Edition, McGraw – Hill, 1990.
30. Kays W. M. and London A. L., "Compact Heat Exchangers", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1984.
31. McAdams W. H., "Heat Transmission", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1954.
32. Dunn P. D., "Renewable Energies: Sources, Conversion, and Applications", Peter Peregrines, 1986.
33. Culp(jr) A. R., "Principles of Energy Conversion", McGraw – Hill, 1980.

34. Mohammed Elmardi Osama, "Solution of Problems in Heat Transfer, Transient Conduction or Unsteady Conduction", Lambert Academic Publishing, 2017.
35. Mohammed Elmardi Osama, "Further Experimental research work on water Current Turbines, Case Study on Atbara Water Turbine", Lambert Academic Publishers, 2015.

نبذة عن المؤلف:



أسامة محمد المرضي سليمان وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية - عطبرة في العام 1990م. تحصّل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا - الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من

جامعة وادي النيل - عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م. قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لأكثر من ثلاثين كتاباً باللغة العربية ولعشرة كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لخمسين ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية - جامعة وادي النيل. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخرطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخرطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.