

به نام خدا

ترمودینامیک مهندسی شیمی

جلسه بیست و هفتم

توربین‌ها (انبساط دهنده‌ها): (کاهش فشار)

در توربین‌ها معمولاً تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و همچنین انتقال حرارت نادیده گرفته می‌شود.

$$\dot{W}_s = \dot{m} \Delta H = \dot{m}(H_2 - H_1) \longrightarrow W_s = \Delta H = H_2 - H_1$$

معمولاً دما و فشار ورودی و همچنین فشار خروجی معلوم هستند.

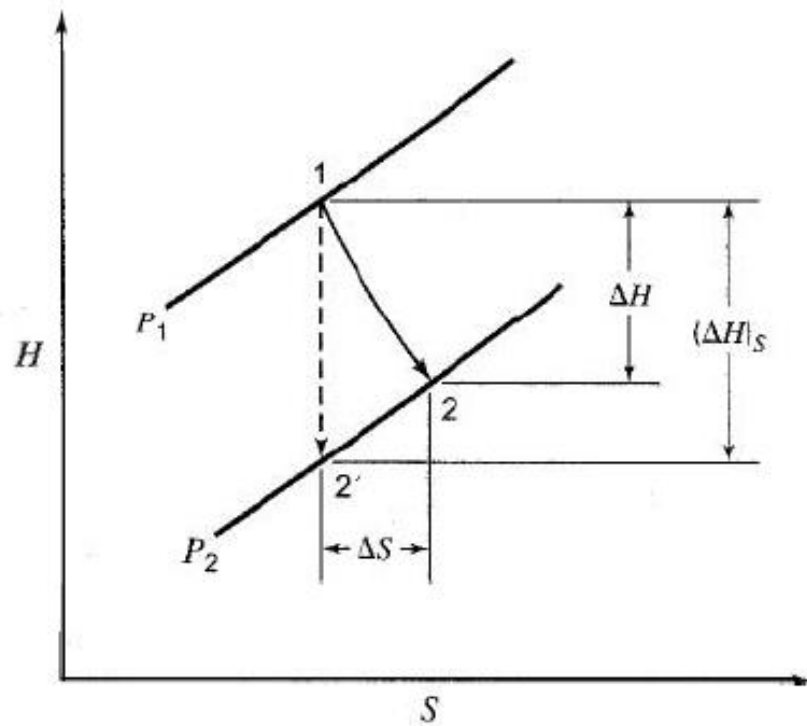
با داشتن دما و فشار ورودی، آنتالپی ورودی مشخص می‌شود. اما آنتالپی خروجی و W_s مجهول هستند. اگر در توربین فرآیند انبساط برگشت‌پذیر و آدیاباتیکی روی سیال انجام شود، آن گاه فرآیند آنتروپی ثابت شده و $S_1 = S_2$ خواهد بود و در نتیجه حالت نهایی سیال و آنتالپی خروجی قابل محاسبه هستند و می‌توان نوشت:

$$W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_s$$

کار بدست آمده از این معادله از نظر عددی بیشترین مقداری است که از یک توربین آدیاباتیکی با شرایط ورودی و فشار خروجی داده شده می‌توان بدست آورد. از توربین‌های واقعی کار کم‌تری تولید می‌شود زیرا فرایند انبساط واقعی برگشت‌ناپذیر است.

بازده توربین:

$$\eta \equiv \frac{W_s}{W_s(\text{isentropic})} \quad \text{or} \quad \eta = \frac{\Delta H}{(\Delta H)_s}$$



مثال: یک توربین بخار با ظرفیت اسمی 56400 kW با بخار آب در شرایط ورودی 8600 kPa و 500 °C کار می‌کند. و بخار را به داخل چگالنده‌ای در فشار 10 kPa می‌فرستد. با فرض بازده 75٪، حالت بخار آب در خروجی و سرعت جریان جرمی بخار آب را محاسبه کنید.

8600 kPa @ 500 °C $\xrightarrow{\text{Steam table}}$ $H_1 = 3391.6 \text{ kJ kg}^{-1}$ $S_1 = 6.6858 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

اگر انبساط به 10 kPa آنتروپی ثابت باشد: $S'_2 = S_1 = 6.6858$. آب در این شرایط به حالت دوفازی است، پس باید کیفیت را محاسبه کنیم.

$$S'_2 = S_2^l + x'_2(S_2^v - S_2^l) \quad \Rightarrow \quad 6.6858 = 0.6493 + x'_2(8.1511 - 0.6493) \quad \Rightarrow \quad x'_2 = 0.8047$$

با داشتن کیفیت میتوان آنتالپی حالت آنتروپی ثابت را نیز بدست آورد:

$$H'_2 = H_2^l + x'_2(H_2^v - H_2^l) \quad \Rightarrow \quad H'_2 = 191.8 + (0.8047)(2584.8 - 191.8) = 2117.4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow (\Delta H)_s = H'_2 - H_1 = 2117.4 - 3391.6 = -1274.2 \text{ kJ kg}^{-1}$$

حال میتوان با استفاده از بازدهی، آنتالپی واقعی را بدست آورد:

$$\Delta H = \eta(\Delta H)_s = (0.75)(-1274.2) = -955.6 \text{ kJ kg}^{-1} \quad \rightarrow \quad H_2 = H_1 + \Delta H = 3391.6 - 955.6 = 2436.0 \text{ kJ kg}^{-1}$$

آب در این شرایط نیز به حالت دوفازی است، کیفیت در حالت واقعی را محاسبه می کنیم.

$$2436.0 = 191.8 + x_2(2584.8 - 191.8) \quad \rightarrow \quad x_2 = 0.9378$$

$$S_2 = 0.6493 + (0.9378)(8.1511 - 0.6493) = 7.6846 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

بدست آوردن دبی جرمی:

$$\dot{W}_s = \dot{m} \Delta H = \dot{m}(H_2 - H_1) \quad \rightarrow \quad W_s = -56\,400 = \dot{m}(2436.0 - 3391.6) \quad \rightarrow \quad \dot{m} = 59.02 \text{ kg s}^{-1}$$

فرآیندهای تراکم: (افزایش فشار)

کمپرسورها:

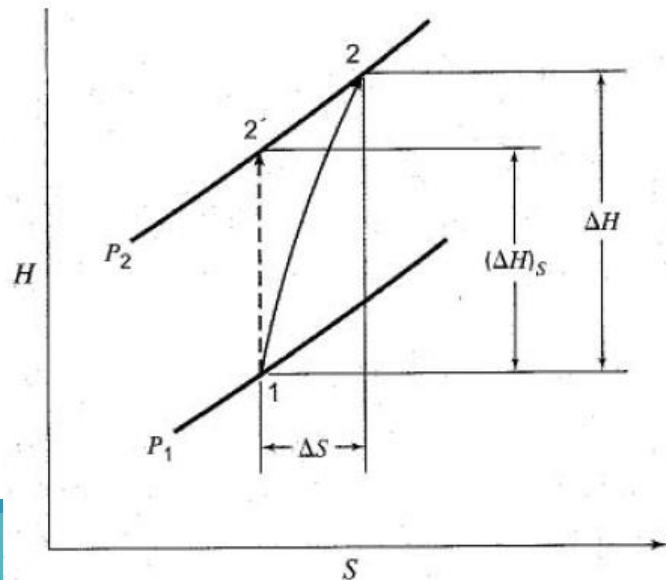
در کمپرسورها نیز معمولاً تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و همچنین انتقال حرارت نادیده گرفته می شود.

$$\dot{W}_s = \dot{m} \Delta H = \dot{m}(H_2 - H_1) \longrightarrow W_s = \Delta H = H_2 - H_1$$

$$W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_s$$

در یک فرآیند تراکم، کار آنتروپی ثابت کمترین کار محوری لازم برای تراکم یک گاز از شرایط اولیه مشخص به شرایط خروجی مشخص دیگر می باشد. به

این ترتیب بازدهی کمپرسور بصورت زیر تعریف می شود:



$$\eta \equiv \frac{W_s(\text{isentropic})}{W_s} \quad \text{or} \quad \eta \equiv \frac{(\Delta T)_s}{\Delta T}$$

مثال: بخار آب به صورت بخار اشباع در 100 kPa ($T^{\text{sat}}=99.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$) به طور آدیاباتیکی تا فشار 300 kPa متراکم می‌شود. اگر بازده کمپرسور 75% باشد، کار لازم و خواص جریان خروجی چقدر است؟

بخار اشباع در 100 kPa

$$s_1 = 7.3598 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad H_1 = 2675.4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

تراکم آنتروپی ثابت تا 300 kPa

$$s'_2 = s_1 = 7.3598 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

جدول بخار فوق گرم در فشار 300 kPa

$$H'_2 = 2888.8 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\rightarrow (\Delta H)_s = 2888.8 - 2675.4 = 213.4 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\Delta H = \frac{(\Delta H)_s}{\eta} = \frac{213.4}{0.75} = 284.5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\rightarrow H_2 = H_1 + \Delta H = 2675.4 + 284.5 = 2959.9 \text{ kJ kg}^{-1}$$

جدول بخار فوق گرم در فشار 300 kPa

$$\rightarrow T_2 = 519.25 \text{ K} (246.1^{\circ}\text{C}) \quad s_2 = 7.5019 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$W_s = \Delta H = 284.5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

اگر فرض گاز ایده‌آل صادق باشد، می‌توان از روابط گاز ایده‌آل به صورت زیر استفاده کرد:

$$\Delta S = \langle C_P \rangle_S \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \xrightarrow{\text{تراکم آنتروپی ثابت } (\Delta S=0)} T_2' = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/\langle C_P \rangle_S}$$

$$(\Delta H)_S = \langle C_P' \rangle_H (T_2' - T_1) \longrightarrow W_s(\text{isentropic}) = \langle C_P' \rangle_H (T_2' - T_1) \longrightarrow W_s = \frac{W_s(\text{isentropic})}{\eta}$$

$$\Delta H = \langle C_P \rangle_H (T_2 - T_1) \longrightarrow T_2 = T_1 + \frac{\Delta H}{\langle C_P \rangle_H}$$

اگر گاز ایده‌آل با ظرفیت گرمایی ثابت داشته باشیم:

$$\langle C_P' \rangle_H = \langle C_P \rangle_H = \langle C_P' \rangle_S = C_P \longrightarrow T_2' = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_P}$$

$$W_s(\text{isentropic}) = C_P (T_2' - T_1) \longrightarrow W_s(\text{isentropic}) = C_P T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_P} - 1 \right] \longrightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_2' - T_1}{\eta}$$

مثال ۷-۱۳ کتاب (اگر متان بطور آدیاباتیکی از 200 °C و 140 kPa) مطالعه شود. (شماره مثال در ویراست‌های مختلف کتاب ممکن است متفاوت باشد)

پمپ‌ها به منظور انتقال مایعات به کار برده می‌شوند. معادلاتی که برای کمپرسورها به کار برده شد در مورد پمپ‌ها نیز صادق هستند. اما باید توجه داشت که در محاسبات مربوط به پمپ‌ها به آنتالپی مایع مادون سرد نیاز داریم که در صورت دسترسی به جدول مایع مادون سرد به راحتی قابل دستیابی می‌باشد. در صورت عدم دسترسی به جدول مایع مادون سرد می‌توانید از روابط زیر استفاده کنید:

$$dH = V dP \quad (\text{const } S) \quad \longrightarrow \quad W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_S = \int_{P_1}^{P_2} V dP$$

معمولا در مایعات حجم مستقل از فشار در نظر گرفته می‌شود. پس:

$$W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_S = V(P_2 - P_1)$$

$$\begin{aligned} dH &= C_P dT + V(1 - \beta T) dP \\ dS &= C_P \frac{dT}{T} - \beta V dP \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \Delta H &= C_P \Delta T + V(1 - \beta T) \Delta P \\ \Delta S &= C_P \ln \frac{T_2}{T_1} - \beta V \Delta P \end{aligned}$$

مثال: آب در 45°C و 10 kPa وارد یک پمپ آدیاباتیک شده و در فشار 8600 kPa خارج می‌شود. بازده پمپ را 75% فرض کنید. کار پمپ، تغییر دما و تغییر آنترופی را محاسبه کنید.

برای آب اشباع در 45°C $V = 1010\text{ cm}^3\text{ kg}^{-1}$ $\beta = 425 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ $C_P = 4.178\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$

$$W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_s = (1010)(8600 - 10) = 8.676 \times 10^6\text{ kPa cm}^3\text{ kg}^{-1}$$

Since $1\text{ kJ} = 10^6\text{ kPa cm}^3$

$$W_s(\text{isentropic}) = (\Delta H)_s = 8.676\text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\Delta H = \frac{(\Delta H)_s}{\eta} = \frac{8.676}{0.75} = 11.57\text{ kJ kg}^{-1}$$

$$W_s = \Delta H = 11.57\text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\Delta H = C_P \Delta T + V(1 - \beta T)\Delta P \quad \rightarrow \quad 11.57 = 4.178 \Delta T + 1010[1 - (425 \times 10^{-6})(318.15)] \frac{8590}{10^6} \quad \rightarrow \quad \Delta T = 0.97\text{ K}$$

$$\Delta S = C_P \ln \frac{T_2}{T_1} - \beta V \Delta P \quad \rightarrow \quad \Delta S = 4.178 \ln \frac{319.12}{318.15} - (425 \times 10^{-6})(1010) \frac{8590}{10^6} = 0.0090\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$$