

## 5. GAIA

# ENERGIAREN IRAUPENAREN LEGEA: ENERGIA-BALANTZEAK

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Energiaren iraupen legean termino desberdinen artean bereiztea.
2. Energiaren termino entalpikoen eta mekanikoen artean bereiztea.
3. Entalpia-balantze makroskopikoak egitea.

Natura-zientzietan eta ingeniari-tza kimikoan, masaren iraupenaren legearekin batera, oinarritzkoa da energiaren iraupenaren legea. Eragiketa kimikoak egiteko ekipoak diseinatzean, eta, ondorioz, ekipo horien tamaina eta behar energetikoak kalkulatzeko, ezinbestekoa da energiaren analisia egitea. Termodinamikako lehen printzipioaren arabera, "sistema batean, energiak iraun egiten du". Masa ez bezala, energia modu askotara agertzen da (energia potentziala, zinetikoa eta abar).

Sistemak, ikuspegi energetikotik, **irekiak** ala **itxiak** izan daitezke. Lehenak, ingurunearekin masa trukatzeko duten sistemak dira, eta, azkenak, inguruneetik isolatuta dauden sistemak dira (ikus 4.2 irudia). Ingeniaritza kimikoan garrantzi handienekoak sistema irekiak direnez, aurrerantzean horrelako sistemen iraupenaren legea azalduko da. Lehendabizi, defini dezagun energia kontzeptua.

Energia propietate hedagarria da (masa kantitatearen araberkoa), eta masak lana egiteko duen ahalmena da. Ahalmen hori zenbait energia motatan azaltzen da, hemen sailkatzen diren moduan:

(1) **energia mekanikoa**

Horrelakoak dira energia zinetikoa  $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$  eta energia potentziala ( $mgZ$ ), masaren abiadura ( $v$ ) eta posizioaren ( $Z$ ) araberakoak, hurrenez hurren.

(2) **energia elektromagnetikoa**

Eremu elektriko eta magnetikoarekin lotutako energiak, ingeniari-tza kimikoan gutxi azaltzen direnak.

(3) **barne-energia**

Molekula eta atomoen bibrazio-, errotazio- eta translazio-energiak osatua ( $U$ ). Energia horren berri sistemaren tenperaturak ematen du.

## 5.1 ENERGIAREN IRAUPENAREN LEGEA

Energiaren iraupenaren legea edo Termodinamikaren lehen printzipioak hau dio (terminoen unitatea energia/denbora izanik):

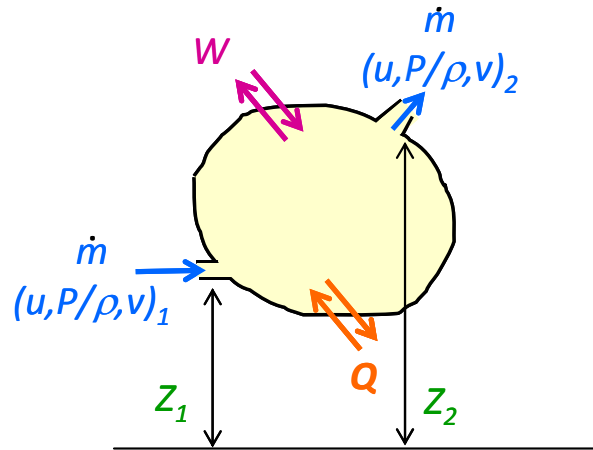
$$\left( \begin{array}{c} \text{Sistemara} \\ \text{SARTZEN den} \\ \text{energia} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Sisteman} \\ \text{SORTZEN den} \\ \text{energia} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Sistemari} \\ \text{EMATEN zaion} \\ \text{beroa} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Sistemak} \\ \text{EGITEN duen} \\ \text{lana} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Sistematik} \\ \text{IRTETEN den} \\ \text{energia} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Sisteman} \\ \text{METATZEN den} \\ \text{energia} \end{array} \right)$$

5.1 irudiko sistema irekian, bi lan mota bereizten dira: (a) masak sistemara sartzeko eta bertatik irteteko egin duen lana, sarrera eta irteerako presio moduan emana ( $P/\rho$ ), eta (b) beste lan guztien batukaria, ingurunearekiko egin duena, ( $W$ ). Sistema gehienetan, ponpa edo irabiagailuak erabiltzen dira sistema osatzen duen masari lana emateko, eta beroa berotzeko bidez trukatzeko du ingurunearekin. Definizioz,  $Q > 0$  da beroa sistemara sartzen denean, eta  $W > 0$  sistemak inguruneari lana ematen dionean.

Sistema honetan energia-sorrerarik ez badago, energiaren iraupenaren legeak itxura hau hartzen du (energia/denbora eran):

$$\dot{m} \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 + \dot{m} \cdot (q) - \dot{m} \cdot (w) = \dot{m} \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 + \frac{d \left[ \dot{m} \left( u + \frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right) \right]}{dt} \quad (5.1)$$

Non  $\dot{m}$  emari masikoa baita;  $u$ , masa unitateko barne-energia;  $P/\rho$ , masa unitateko presioari dagokion lana;  $v_e^2/2$ , masa unitateko energia zinetikoa;  $gZ$ , masa unitateko energia potentziala;  $q$ , masa unitateko ingurunearekin trukutzen duen beroa; eta  $w$ , masa unitateko ingurunearekiko egiten duen lana.  $v_e$  energiarentzako batezbesteko abiadura eraginkorra da, masarentzat definitzen denaren ( $v$ ) desberdina (ikus 6. gaia).



### 5.1 irudia. Energiaren iraupenaren legea sistema irekian.

$U = \dot{m} \cdot u$ ,  $Q = \dot{m} \cdot q$  eta  $W = \dot{m} \cdot w$  denbora unitateko barne-energia, beroa eta lana badira, hurrenez-hurren, egoera iraunkorrean adierazpen hau lortzen da (energia/denbora):

$$\left( U + \dot{m} \cdot \frac{P}{\rho} + \dot{m} \cdot \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} \cdot gZ \right)_1 + Q - W = \left( U + \dot{m} \cdot \frac{P}{\rho} + \dot{m} \cdot \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} \cdot gZ \right)_2 \quad (5.2)$$

Definizioz, hau da masa unitateko **entalpia** ( $h$ ):

$$h = u + \frac{P}{\rho} \quad (5.3)$$

Termino hori 5.1 ekuazioan ordezkatzeko bada, egoera geldikorrean hau lortzen da (energia/denbora):

$$\text{Energia/denbora} \quad \dot{m} \left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 + \dot{m} \cdot (q) - \dot{m} \cdot (w) = \dot{m} \left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 \quad (5.4)$$

Eta  $H = \dot{m} \cdot h$  denbora unitateko entalpia bada:

$$\text{Energia/denbora} \quad \left( H + \dot{m} \cdot \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} \cdot gZ \right)_1 + Q - W = \left( H + \dot{m} \cdot \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} \cdot gZ \right)_2 \quad (5.5)$$

5.4 ekuazioko termino guztiak emari masikoaz zatitzen badira eta ekuazioa berrantolatzen bada, adierazpen hau lortzen da (energia/masa eran):

$$\left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 - \left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 + q - w = 0 \quad (5.6)$$

Sisteman beroa sortuko balitz (erreakzio kimiko exotermikoa dagoelako, adibidez),  $(-\Delta H_r) \cdot (-r')$  terminoa gehitu beharko genuke;  $\Delta H_r$  mol unitateko erreakzio-beroa da, eta  $(-r')$  denbora unitateko erreakzionatu duten errektibo-molen kopurua da.

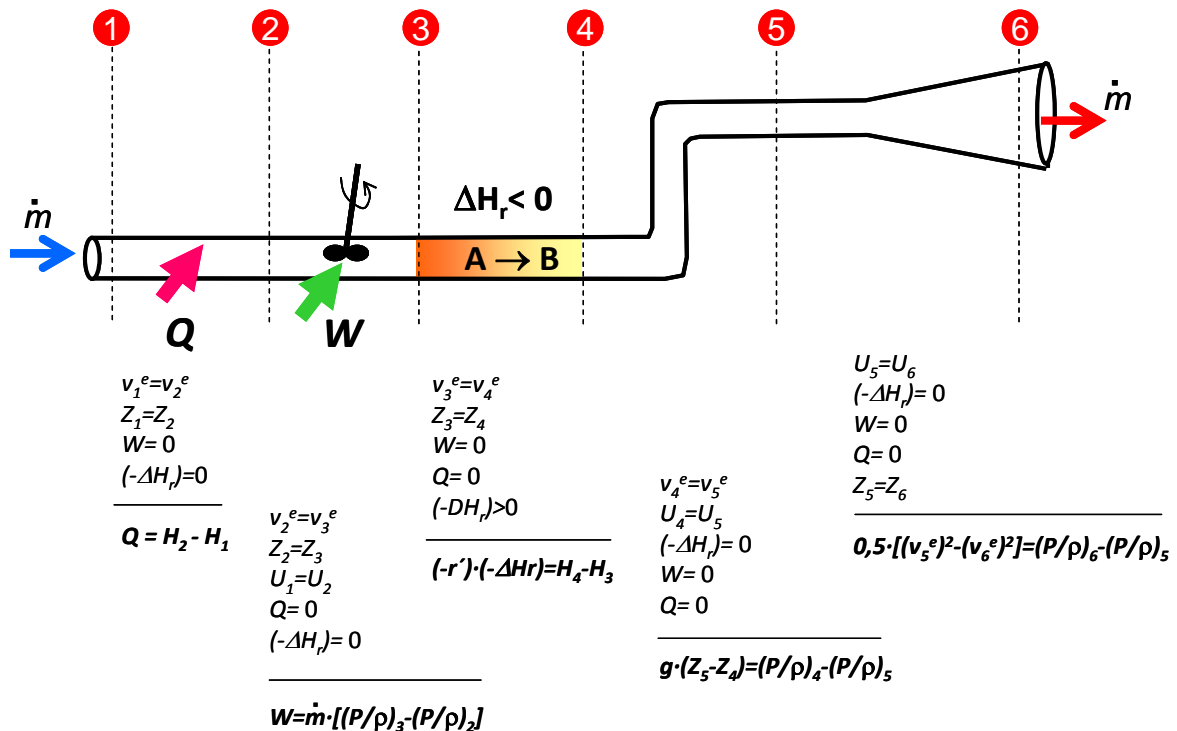
Energia/masa 
$$\left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 - \left( h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 + \frac{(-\Delta H_r) \cdot (r')}{\dot{m}} + q - w = 0 \quad (5.7)$$

Eta energia/denbora eran:

$$\left( H + \dot{m} \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} gZ \right)_1 - \left( H + \dot{m} \frac{v_e^2}{2} + \dot{m} gZ \right)_2 + (-\Delta H_r) \cdot (r') + Q - W = 0 \quad (5.8)$$

Nola interpretatzen dira ekuazio horiek? Sistema ireki batek ingurunearekin beroa trukatzeko badu, lana trukatzeko badu edo/eta beroa sortzen bada (erreakzio kimikoagatik, adibidez), sistemaren sarrerako eta irteerako energiak desberdinak dira. 5.2 irudian agertzen da sistema bateko zenbait punturen arteko energiaren iraupenaren legea.

1 eta 2 puntuen artean ez dago energia zinetiko eta potentzialaren aldaketarik. Bero-trukagailuaren bidez ingurunearekin trukatu duen beroa entalpia aldatzeko erabiltzen du jariagaiak. 2 eta 3 puntuen artean ponparen bitartez emandako lanak presio-aldaketa eragin du jariagaiarengan. 3 eta 4 puntuen artean erreakzioa gertatu denez, jariagaiaren entalpia aldatu egiten da. 4 eta 5 puntuen artean energia potentziala handitzeak presio-energia txikitzea dakar. Bukatzeko, 5 eta 6 puntuen artean abiadura txikitzeak (hodi zabalagora pasatzen baita) presio-energiaren igoera dakar.



5.2 irudia. Energiaren iraupenaren legea sistema irekian, energia/denbora eran emanda.

### 5.1.1 Balantze entalpikoak

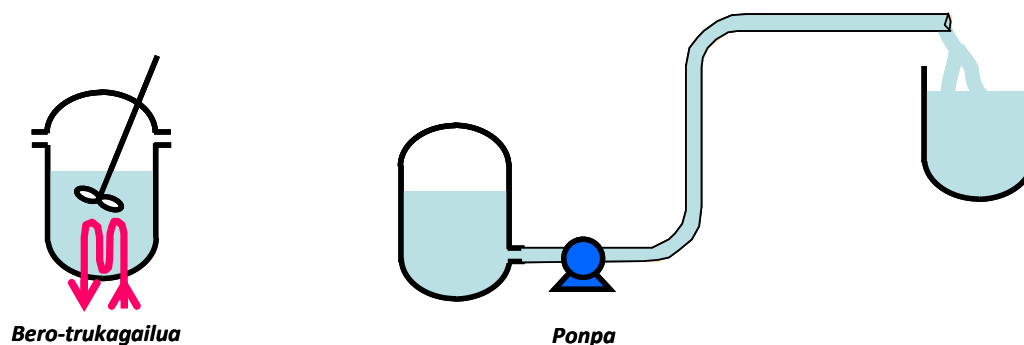
Erreakzio kimikorik gertatzen ez den kasu askotan, sistemaren sarreraren eta irteeraren artean energia potentzialaren eta energia zinetikoaren aldaketa arbuigarria da, eta ingurunearekin ez da lanik trukutzen. Horrelako kasuetan, **termino entalpikoak** baino ez dira erabiltzen:

$$\text{Energia/masa} \quad (h)_2 - (h)_1 = q \quad (5.9)$$

Tenperatura-aldaketa duten sistemak, fase-aldaketa duten sistemak edo/eta bero-trukaketa duten sistemak dira mota horretakoak.

### 5.1.2 Termino mekanikoen balantzeak

Beste hainbat kasutan, termino entalpikoak arbuigarriak dira energia zinetiko edo energia potentzialarekin alderatuta. Hala, isotermikoak (edo ia isotermikoak) diren eta fase-aldaketarik eta bero-trukaketarik ez duten sistemetan, energiaren **termino mekanikoen** balantzeak egiten dira (hodi baten barneko jariagai baten jario isotermikoa, adibidez). Horrelako sistemen energia-balantzeak 6. gaian azaltzen dira, jariagaien jarioa azaltzean.



### 5.3 irudia. Energiaren termino entalpikoak (ezkerrean) eta termino mekanikoak (eskuinean).

Bi energia-balantzeen arteko aldea ikusteko, adibide pare bat aztertuko dugu (ikusi 5.3 irudia). Irabiatutako ontzi handi batean, ura bero-trukagailuz berotzen da. Sistema honetan, irabiatzaileak marruskaduraz berotzen duena guztiz arbuigarria da, bero-trukagailuz berotzen denarekin alderatuta. Beraz, termino mekanikoak (irabiaketa) guztiz arbuigarriak dira, eta balantze entalpikoa egingo da. Bestalde, beste adibidean, jariagaia lekuz aldatzen da hodi batekin, tanga batetik garaiago dagoen beste tanga batera ponpatuz. Hemen, marruskadurak sortzen duen beroa guztiz arbuigarria da jariagaiak jasaten duen presioaren edo energia zinetikoaren diferentziarekin alderatuta. Horren ondorioz, termino entalpikoak arbuigarriak dira, eta termino mekanikoen balantzea egingo da. Beste kasu batzuetan, ordea, energia osoaren balantzea egin behar da, termino guztiek antzeko ordena baitute.

Ondorengo ataletan, entalpia-balantzeak baino ez dira azalduko, termino mekanikoen balantzeak 6. gaian azaltzen baitira.

## 5.2 ENTALPIA-BALANTZE MAKROSKOPIKOAK

Prozesuen entalpia-balantzeak ebazteko, aurretik masa-balantzeak ebatzita egon behar du. Energia mekanikoen terminoak arbuigarriak badira, energia/masa eran,

$$(h)_2 - (h)_1 = q \quad (5.10)$$

edo energia/denbora eran,

$$H_2 - H_1 = Q \quad (5.11)$$

Adierazpen hori erabil daiteke  $H$  entalpia izanik eta  $Q$  beroa izanik. **Bero sentikorra** bada (hau da, temperatura aldatzen bada):

Erreakzio kimikorik ez badago:

$$Q = (H_2 - H_1) = \dot{m} \cdot \bar{C}_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (5.12)$$

Erreakzio kimikoak gertatzen badira:

$$Q = (H_2 - H_1) + \sum_{\text{erreakzioak}} (-\Delta H_r \cdot r') \quad (5.13)$$

Ingurunearekin trukutzen duen energia **Bero sorra** bada, ez da igartzen temperatura-diferentziarik. Hori fase-aldaketetan gertatzen da. Horrelako kasuetan, erlazio hau erabili behar da:

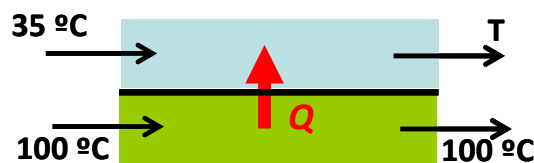
$$Q = \dot{m} \cdot \lambda \quad (5.14)$$

Non  $\lambda$  fase-aldaketaren bero sorra baita (fasez aldatutako osagaiaren mol (edo kg) bakoitzeko askatzen (edo xurgatzen) den energia). Balio horiek taulatan jasota daude, bibliografian, ohiko sustantzientzat.

### Adibidea 5.1 adibidea

Bero-trukagailu batean 35 °C-an sartzen den olioaren berotu egiten da. Horretarako, 100 °C-an asetako ur-lurruna erabiliko da. Berotu behar den olioaren emari masikoa 10<sup>4</sup> kg/h da, eta kondentsatzen ari den lurrunaren emaria, 550 kg/h. Kalkula dezagun zer temperaturatan irteten den olioaren berotututik.

Datuak: olioaren batezbesteko bero espezifikoa = 2,5 kJ/kg°C. Lurrunaren bero sorra = 2.260 kJ/kg.



#### Ebazpena

Ur-lurruna aseta dagoenez, kondentsatzen denean, beroa askatzen du, bere temperatura aldatzen ez den arren (likido eran irtengo da, temperatura berean, 100 °C-an).

Lurrunak ematen duen beroa 5.11 ekuazioak ematen du.

( $\Delta E_{\text{zinetikoa}}$ ,  $\Delta E_{\text{potentziala}}$ ,  $\Delta E_{\text{presioa}} \approx 0$  dira ur-lurrunarentzako)

$$Q = (550) \cdot (2260) = \underline{1,24 \cdot 10^6 \text{ kJ/h (ematen duen beroa)}}$$

Lurrunak ematen duen beroa olioak bereganatzen du, berotzeko. Kasu horretan, olioak temperatura-diferentzia nabaritzen duenez:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

( $\Delta E_{\text{zinetikoa}}, \Delta E_{\text{potentziala}}, \Delta E_{\text{presioa}} \approx 0$  dira olioarentzako)

$$Q = \Delta H = (10.000) \cdot (2,5) \cdot (T - 35) = 2,5 \cdot 10^4 \cdot (T - 35) \text{ kJ/h (eman behar zaion beroa)}$$

Bi adierazpenak berdinduz:  $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.2.1 Entalpien kalkulua

Entalpia absolutuak ezin daitezke kalkulatu, eta, beti, erreferentzia-egoera batekiko (tenperatura eta fasea finkatuz) aldaketak kalkulatu dira. Hori dela eta, egoera bateko entalpia kalkulatzeko, kontuan hartu behar dira erreferentzia-egoerarekiko duen tenperatura-diferentzia edo egon daitezkeen fase-aldaketak.

Har ditzagun  $\psi_1$  eta  $\psi_2$  egoerak, 1 eta 2 faseak direla (5.4 irudian). Fase-aldaketarik ez badago (ezkerreko irudia,  $\psi_1$ ) eta presio konstantean lan egiten bada:

$$h_{T_2} = h_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT \tag{5.15}$$

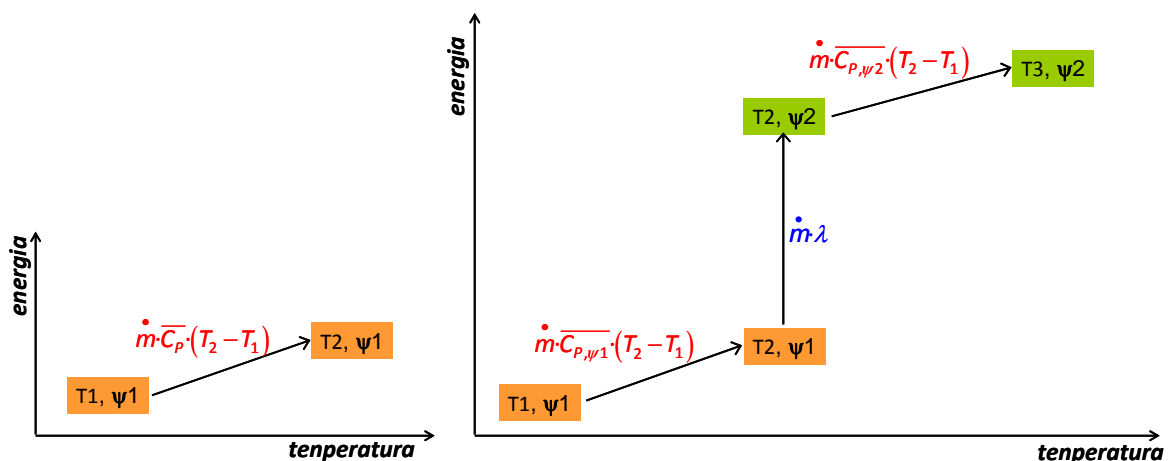
[ $T_1, T_2$ ] tarte osoan bero espezifikokoaren batez besteko balioa hartzen bada ( $\bar{C}_p$ ):

$$H_{T_2} = H_{T_1} + \dot{m} \cdot \bar{C}_p \cdot (T_2 - T_1) \tag{5.16}$$

1 egoera erreferentzia egoera da. Ohartu gaitzen 5.15 adierazpenak masa unitateko entalpiak erabiltzen dituela, eta 5.16 ekuazioak, berriz, energia unitatea duela.

Sisteman fase-aldaketa badago (eskuineko irudian,  $\psi_1$ -etik  $\psi_2$ -rako fase-aldaketa), entalpia-aldaketa osoak hiru termino izango lituzke: lehena,  $\psi_1$  fasearen bero sentikorra,  $T_1 \rightarrow T_2$  aldaketarako; ondoren, fase-aldaketarako  $T_2$  tenperaturaren  $\psi_1 \rightarrow \psi_2$  fase-aldaketa gertatzen denez, bero sorra; eta, bukatzeko,  $\psi_2$  fasearen bero sentikorra,  $T_2 \rightarrow T_3$  aldaketarako.

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_{p,\psi_1} \cdot dT + \lambda_{\psi_1 \rightarrow \psi_2} + \int_{T_2}^{T_3} C_{p,\psi_2} \cdot dT \tag{5.17}$$



5.4 irudia. Fase-aldaketarik gabeko eta fase-aldaketa duen sistema baten beroa.

5.4 irudiari erreparatzen badiogu, fase-aldaketari dagokion beroa oso handia izan oi da, eta bero sentikorra baino askoz ere nabarmenagoa izan daiteke.

Adibidez, 1 kg ur 90 °C-tik 100 °C-ra berotzeko (bero sentikorra) 42,1 kJ eman behar zaio; 100 °C-an asetako 1 kg ur irakiteko 2.257 kJ behar dira.

Arestian erabili diren ekuazioetan, bi tenperaturen arteko bero espezifikokoaren batezbesteko balioak erabili dira, propietate hori tenperaturaren arabera baita. Temperatura-diferentzia oso zabala ez bada, batezbestekoa erabiltzea hurbilketa egokia da, baina temperatura-aldea zabala bada, erroreak handiegiak izan daitezke. Orduan, adierazpen hau erabili beharko litzateke:

$$h_{T_2} = h_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) \cdot dT \quad (5.18)$$

Konposatu kimiko gehienen bero espezifikokoak ( $C_p$ ) tenperaturarekin bigarren ordenako polinomioa betetzen duela har daiteke:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (5.19)$$

Hainbat konposaturen  $a$ ,  $b$  eta  $c$  konstanteak bibliografian aurkitzen dira.

Oso presio garaietarako izan ezik,  $N$  konposatuz osatutako gas nahastearen bero espezifikoa honela kalkulatzen da,  $x_i$  osagaiaren masa edo frakzio molarra izanik (bero espezifikoa masa edo mol unitateko denerako, hurrenez hurren):

$$\sum_{i=1}^N x_i \cdot C_{p,i} \quad (5.20)$$

## Adibidea 5.2 adibidea

Kalkula dezagun (a) 1 kg ur, likido egoeran, 30 °C-tik 60 °C-ra berotzeko eman behar den beroa, (b) 1 kg ur 30 °C-tik 150 °C-ra berotzeko eman behar den beroa, 1 atm-ko presioan.

Datuak:  $C_p$  (J/molK) =  $a + b \cdot T + c \cdot T^2$  T(K)

$$\lambda_{\text{Likido} \rightarrow \text{lurrun}} = 40,656 \text{ kJ/mol}$$

	$a$	$b$	$c$
Ura, likido-egoera	68,6342	$2,2902 \cdot 10^{-2}$	$-6,1406 \cdot 10^{-6}$
Ura, lurrun-egoera	33,4312	$-3,9892 \cdot 10^{-3}$	$1,5220 \cdot 10^{-5}$

### Ebazpena

Entalpia-balantzearen arabera, kasu guztietan,  $Q = \Delta H$  da.

(a) Likido-egoeran besterik ez dagoenez,

$$Q = \Delta h = \int_{303}^{333} (68,6342 + 2,2902 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,1406 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) dT = 5296,97 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H = Q = (55,56 \text{ mol}) \cdot (5296,97 \text{ J/mol}) = 294,28 \text{ kJ}$$

(b) Orain, fase-aldaketa kontuan hartu beharra dago:



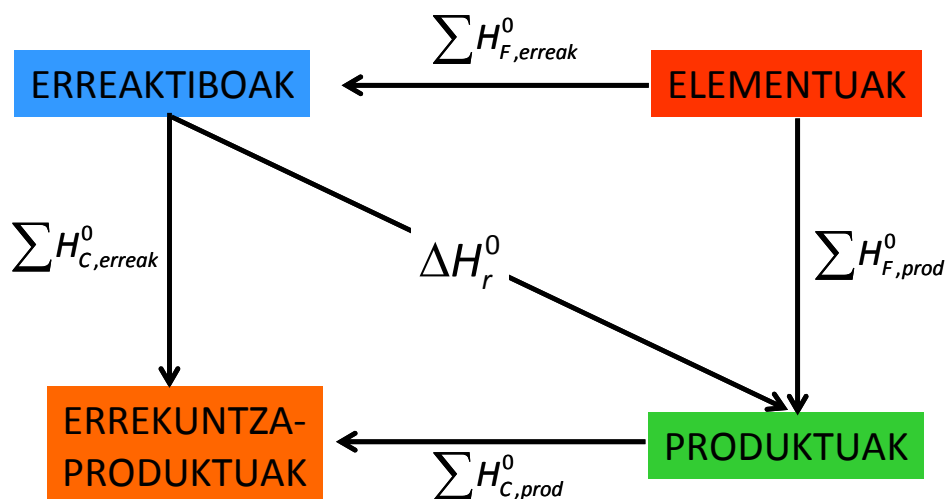
$$\Delta h = \int_{303}^{373} (68,6342 + 2,2902 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,1406 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) dT + 40,656 \cdot 10^3 +$$

$$+ \int_{373}^{423} (33,4312 - 3,9892 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,5220 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) dT = 47,665 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H = Q = (55,56 \text{ mol}) \cdot (47,665 \text{ kJ/mol}) = 2648,27 \text{ kJ}$$

### 5.2.2 Erreakzio-beroaren kalkulua

Erreakzio kimiko guztietan entalpia-aldaketa gertatzen da. Erreakzioak endotermikoak edo exotermikoak izan daitezke: erreakzio endotermikoetan, beroa xurgatzen da ( $Q = \Delta H_r > 0$ ), eta erreakzio exotermikoetan, beroa askatzen da ( $Q = \Delta H_r < 0$ ). Entalpia horiek erreakzioan parte hartzen duten banakako osagaien formazio-bero estandarrekin ( $\Delta H_F^0$ ) edo errekontza-bero estandarrekin ( $\Delta H_C^0$ ) kalkula daitezke (5.5 irudia). Egoera estandarra 25 °C eta 1 atm da.



### 5.5 irudia. Erreakzio-beroa kalkulatzeko bideak: formazio-beroa eta errekontza-beroa (Hess-en legea).

$$\Delta H_r^0 = \sum n_{i,prod} \cdot H_{F,prod}^0 - \sum n_{i,erreak} \cdot H_{F,erreak}^0 \quad (5.21)$$

$$\Delta H_r^0 = \sum n_{i,erreak} \cdot H_{C,erreak}^0 - \sum n_{i,prod} \cdot H_{C,prod}^0 \quad (5.22)$$

Beste tenperatura baten erreakzio-beroa neurtzeko, adierazpen hau erabiliko da:

$$\Delta H_{R,T}^0 = \Delta H_{R,298}^0 + \int_{298}^T \nabla C_p \cdot dT \quad (5.23)$$

$$\nabla C_p = \sum n_{i,prod} \cdot C_{p,prod} - \sum n_{i,erreak} \cdot C_{p,erreak} \quad (5.24)$$

$n_i$  osagaiaren koefiziente estekiometrikoa izanik.

Definizioz, elementu kimikoen formazio-bero estandarra zero (0) dela hartzen da. Hala, edozein konposatu kimikoren formazio-bero estandarra kalkula daiteke.

### Adibidea 5.3 adibidea

Erreaktore jarraitu batean,  $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$  erreakzioa gauzatzen da gas-fasean, eta  $\text{SO}_2$ -aren bihurtze-maila 0,8 da. Erreaktorea  $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{SO}_2 = 82,8/11/8$  kmol/h nahasteaz elikatzen da 673 K-ean. Kalkula dezagun zer tenperaturatan dagoen erreaktore-irteerako korrontea, erreakzioa adiabatikoki gauzatzen bada.

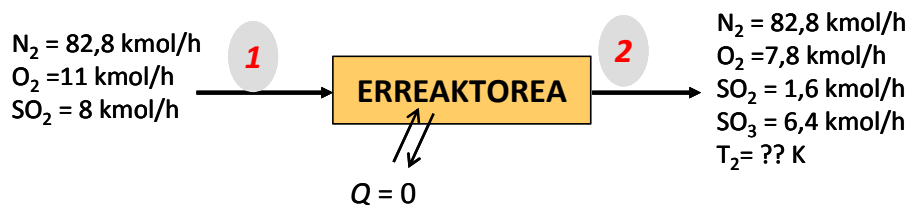
Datuak:

Batezbesteko bero espezifikoak,  $C_p(\text{J/molK})$   $\text{SO}_2/\text{SO}_3/\text{O}_2/\text{N}_2 = 45,6/63,6/31,0/29,7$

$\Delta H_F^0(298\text{K})(\text{kJ/mol})$   $\text{SO}_2/\text{SO}_3 = -296,8/-394,9$

*Ebazpena*

Lehenik eta behin, masa-balantzea ebatziko da, korronte bakoitzaren emaria eta konposizioa kalkulatzeko (4. gaiko 3 adibidean ebatzia).



Energiaren iraupenaren legearen arabera, termino mekanikoak arbuigarriak dira termino entalpikoekin alderatuta, beraz:

Sartzen den beroa + Sortzen den beroa = Irteten den beroa

Sartu	Sortu	Irtten	(kJ/mol)
$82,8 \cdot 29,7 \cdot (673 - T_{erref}) (\text{N}_2) +$			
$11 \cdot 31,0 \cdot (673 - T_{erref}) (\text{O}_2) +$			
$8 \cdot 45,6 \cdot (673 - T_{erref}) (\text{SO}_2)$			
	+ So	=	
		$82,8 \cdot 29,7 \cdot (T_2 - T_{erref}) (\text{N}_2) +$	
		$7,8 \cdot 31,0 \cdot (T_2 - T_{erref}) (\text{O}_2) +$	
		$1,6 \cdot 45,6 \cdot (T_2 - T_{erref}) (\text{SO}_2) +$	
		$6,4 \cdot 63,6 \cdot (T_2 - T_{erref}) (\text{SO}_3)$	

Sartu,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  eta  $\text{SO}_2$ -arekin (1) korrontean:  $S = 3,16 \cdot 10^3 \cdot (673 - T_{erref})$  kJ/h

Irtten,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$  eta  $\text{SO}_3$ -arekin (2) korrontean:  $I = 3,18 \cdot 10^3 \cdot (T_2 - T_{erref})$  kJ/h

Sortu (kJ/h):

$\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$  erreakzio exotermikoa gertatzen denez,  $\Delta H_{r,298} = -98,1$  kJ/mol  $\text{SO}_2$ .

Erreakzioan 6,4 kmol  $\text{SO}_2$ /h desagertzen direnez:  $S_o = 98,1 \cdot 6,4 = 6,29 \cdot 10^5$  kJ/h

Erreferentzia-egoera gisa gas faseko 298 K aukeratzten bada:  $T_2 = 868$  K

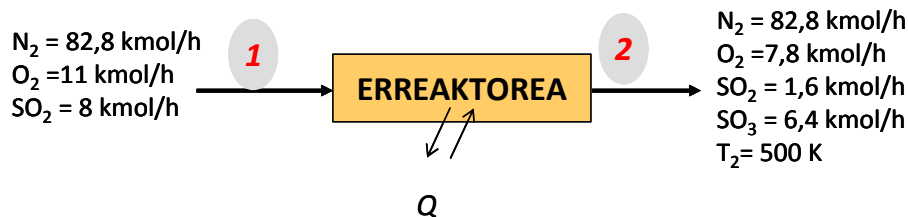
### Adibidea 5.4 adibidea

Erreaktore jarraitu batean,  $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$  erreakzioa gauzatzen da gas fasean, eta  $\text{SO}_2$ -aren bihurtze-maila 0,8 da. Erreaktorea  $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{SO}_2 = 82,8/11/8$  kmol/h nahasteaz elikatzen da 673 K-ean. Kalkula dezagun zenbat bero trukatu behar duen erreaktoreak ingurunearekin, irteerako korrontea 500 K-ean egon dadin.

Datuak: (5.3 adibidekoak)

## Ebazpena

5.3 adibidea ebatzita izanik,



Energia-balantzetik:

$$S + S_o = I + Q \text{ (Trukatu)}$$

Erreferentzia-tenperatura gisa 298 K aukeratu da.

<u>Sartu</u>	<u>Sortu</u>	<u>Irten</u>	<u>(kJ/mol)</u>
82,8·29,7·(673-298) (N <sub>2</sub> ) + 11·31,0·(673-298) (O <sub>2</sub> ) + 8·45,6·(673-298) (SO <sub>2</sub> )	+ S <sub>o</sub>	=	82,8·29,7·(500-298) (N <sub>2</sub> ) + 7,8·31,0·(500-298) (O <sub>2</sub> ) + 1,6·45,6·(500-298) (SO <sub>2</sub> ) + 6,4·63,6·(500-298) (SO <sub>3</sub> )

Sartu, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> eta SO<sub>2</sub>-arekin (1) korrontean:  $S = 1,187 \cdot 10^6$  kJ/h

Irten, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> eta SO<sub>3</sub>-arekin (2) korrontean:  $I = 6,426 \cdot 10^5$  kJ/h

Sortu (kJ/h):

$\Delta H_{r,298} = -98,1$  kJ/mol SO<sub>2</sub> ;

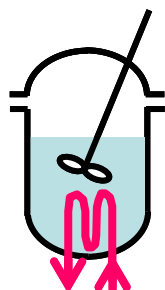
6,4 mol SO<sub>2</sub>/h desagertzen direnez erreaktorean:  $S_o = 98,1 \cdot 6,4 = 6,29 \cdot 10^5$  kJ/h

$Q = 1,173 \cdot 10^6$  kJ/h-ko beroa kendu behar da (hoztu egin behar da).

### Adibidea 5.5 adibidea

Tanga batean 10<sup>4</sup> kg ur dago 20 °C-an. Berogailu batekin, 5·10<sup>2</sup> kJ/s abiaduraz berotzen bada, kalkula ezazu ordubete ondoren tangako urak izango duen tenperatura.

Datuak: uraren  $C_p = 68,6342 + 2,2902 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,1406 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$  J/mol °C



Bero-trukagailua

## Ebazpena

Energia-balantzea eginez, eta termino entalpikoak nagusiak izanik:

$S = 0$  ;  $I = 0$  ;  $S_0 = 0$  ;  $Q = \text{Metatu}$

Tangako ur-masa =  $10^4 \text{ kg} = 555,56 \cdot 10^3 \text{ mol}$

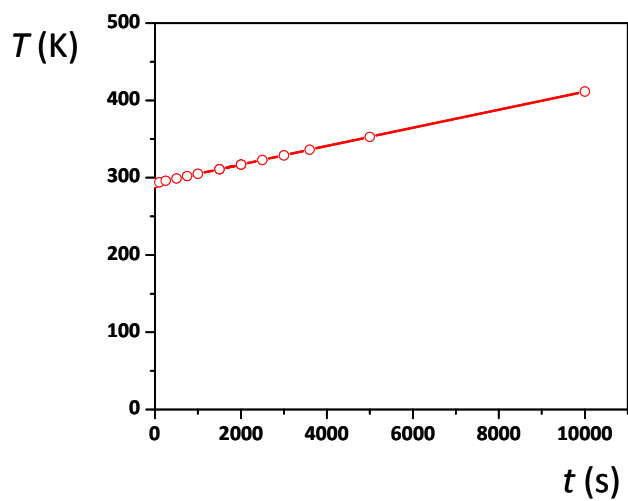
$$Q = m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = 10^4 \text{ J/s} \quad \therefore \int_{293}^T c_p \cdot dT = \frac{Q}{m} \int_0^t dt = \frac{10^4 W}{(555,56 \cdot 10^3 \text{ mol})} \cdot t$$

$$\int_{293}^T (68,6342 + 2,2902 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,1406 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) \cdot dT = 0,9 \cdot t(s)$$

Integratzean, balio hauek lortzen dira denboraren arabera:

$$t(s) = -2,338 \cdot 10^4 + 7,626 \cdot 10^1 \cdot T + 1,272 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 2,274 \cdot 10^{-6} \cdot T^3$$

$t$ (s)	$T$ (K)
0	293,0
100	294,2
250	296,0
500	299,0
750	302,0
1000	305,0
1500	311,0
2000	317,0
1500	311,0
2000	317,0
2500	323,0
3000	328,9
3600	336,1
5000	352,7
10000	411,5



Beraz, 1 orduren buruan, 336,1 K izatera heldu da.