



9. GAIA

BERO-TRANSMISIORAKO EKIPOAK: BERO-TRUKAGAILUAK

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Bi jariagaien energia-balantzeak egin.
2. Hodi bikoitzeko bero-trukagailuak diseinatu.
3. Hodia eta ingurunea erako bero-trukagailuak diseinatu.
4. Zikinkeria-faktorea kalkulatu.

Instalazio kimikoetan, maiz, bi jariagaien artean bero-trukea gauzatzen da, energia aprobetxatzearen. Adibidez, 400 °C-an lan egiten duen erreaktoretik irteten den gasaren energia termikoa erabil daiteke destilagailua elikatu behar den nahaste hotza berotzeko. Zentral nuklear batean, erregaiaren fisioak sortzen duen energia ur-lurrina berotzeko erabiltzen da, ondoren turbinan elektrizitatea sortzeko. Gaur egun energia hain garestia izanik, eduki energetiko altuko iturriak ahal den hobekien erabili behar dira haien energia beste sistema batek aprobetxa dezan.

Instalazio kimikoetan, gehienbat, jariagaiekin lan egiten da, likido eta gasekin. Haien berotu edo hoztu egin behar dira prozesuko hainbat urratsetan. Beste batzuetan, fasez aldatu behar dira, kondentsatu edo irakiarazi. Jariagai beroen eta jariagai hotzen energia termikoa (beroa) trukatzeko ekipoari **bero-trukagailu** deritzo.

Bero-trukagailuak bi jariagaien arteko kontaktu termikoa lagundu egin behar du, ahalik eta erresistentzia txikiena eskainiz (hau da, bero-transmisiorako koefiziente globalak $-U-$ ahalik eta handiena izan behar du). Ekipo horien diseinua kritikoa da prozesu baten ekonomian, energiaren aurrezpen optimoa eta tamaina egokiak prozesu baten kostuak asko murrizten baititu.

9.1 JARIAGAIEN ARTEKO BERO-TRUKEA: ENTALPIA ETA BERO SORRA

Jariagai bero bati beroa kentzen zaionean edo jariagai hotz bati beroa ematen zaionean, bi gauza gerta dakizkioke:

- (a) Hoztea, lehenengo kasuan, eta berotzea, bigarren kasuan, hau da, temperatura-aldaketa jasatea. Hori gertatzen denean, esaten da jariagaiak bero sentikorra trukatu (eman edo hartu) duela. Adibidez, ura 20 °C-tik 45 °C-ra berotzen denean edo airea 30 °C-tik 10 °C-ra hoztean, bi jariagaiek temperatura-diferentzia jasan dutenez, bero sentikorra trukatu dutela esaten da.

Jariagai baten \dot{m} emari masikoari T_1 -etik T_2 -ra berotzeko eman behar zaion bero sentikorrek entalpia-aldaketa sortzen du. T_1 eta T_2 tarterako bero espezifikokoaren batez besteko balioa hartzen bada:

$$Q\left(\frac{\text{energia}}{\text{denbora}}\right) = \Delta H = \dot{m} \cdot \bar{C}_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (9.1)$$

- (b) Temperatura-aldaketarik jasan gabe, fasez aldatzea (kondentsatzea edo irakitea). Prozesu horretan izugarriko energia-aldaketak gertatzen dira, eta bero horri bero sor deritzo. Adibidez, 100 °C-an aseta dagoen ur likidoari beroa ematen bazaio, irakin egiten du temperatura aldatu gabe, guztia lurrin bihurtu arte.

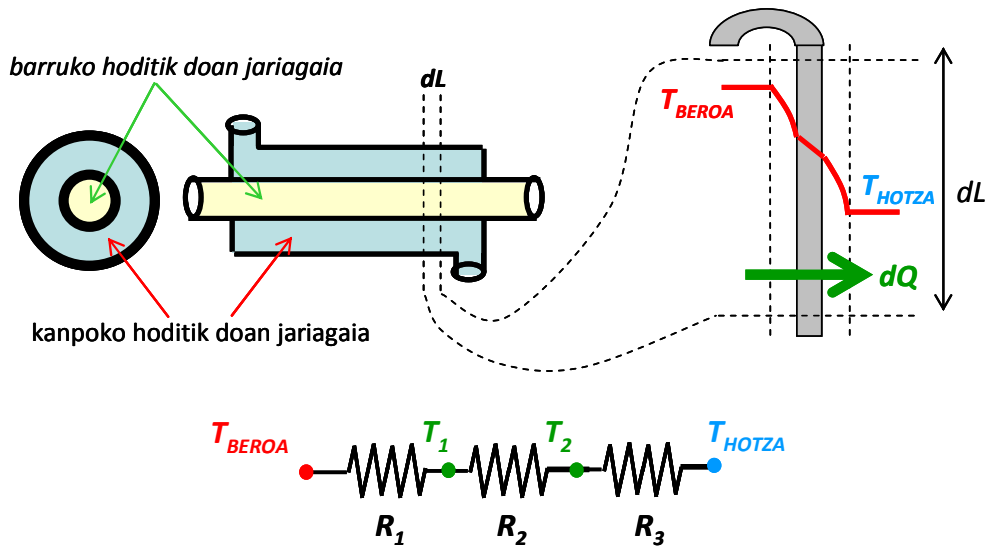
Horrelako egoeran jariagaiak galdu edo irabazi duen beroa fase-aldaketarako erabili du.

$$Q\left(\frac{\text{energia}}{\text{denbora}}\right) = \dot{m} \cdot \lambda \quad (9.2)$$

Adibidez, 100 °C-an asetako kilogramo bat ur irakiteko edo kondentsatzeko, 2.257 kJ bero eman edo kendu behar zaio, hurrenez hurren. λ -ren balioak konposatu eta baldintza anitzetarako taulatuta daude bibliografian.

9.2 HODI BIKOITZEKO BERO-TRUKAGAILUAK

Jariagai bero eta hotz baten artean beroa trukatzeko ekiporik sinpleena hodi bikoitzeko bero-trukagailua da. Eraginkortasun mugatua dutela eta, emari txikien arteko trukerako erabiltzen dira. 9.1 irudian ikusten den bezala, bi hodi zentrokidez eraikia dago. Jariagai bat barruko hoditik dabil; bestea, berriz, bi hodiaren arteko eraztunetik. Hala gertatzen da bien arteko bero-trukea. Barruko hoditik jariagai beroak zein hotzak zirkula dezake. Hala ere, hemendik aurrerako azalpenerako, jariagai beroa barruko hoditik doala hartuko da.



9.1 irudia. Hodi bikoitzeko bero-trukagailua, hodiaren barnean dagoen temperatura-gradientea eta bi jariagaien arteko bero-trukerako erresistentziak.

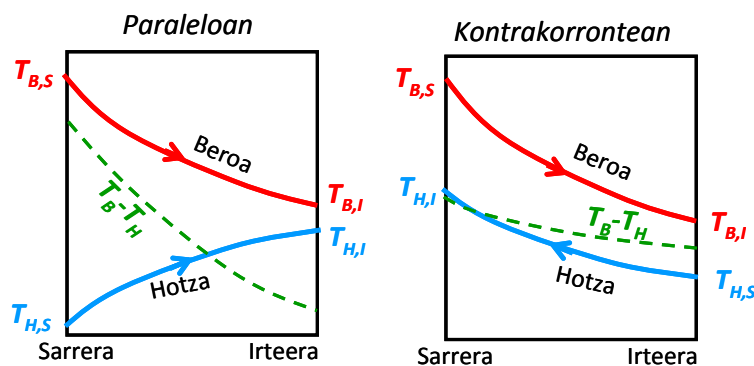
Bi jariagaien arteko bero-trukean, jariagai beroaren munitetik jariagai hotzaren munitera heltzeko, beroak serieran kokatutako hiru erresistentzia gaingitu behar ditu; lehendabizi, barruko hoditik doan jariagaiaren konbexzio-erresistentzia $\left(\frac{1}{h_i \cdot A_i}\right)$; ondoren, barruko hodiaren hormaren eroapen-erresistentzia $\left(\frac{\Delta X}{k \cdot A_{BL}}\right)$; eta, azkenik, bi hodiaren arteko eraztunetik doan jariagaiaren konbexzio-erresistentzia $\left(\frac{1}{h_o \cdot A_o}\right)$, $-A_i$ eta A_o barruko hodiaren barne- eta kanpo-diametroa izanik—.

Bero-trukagailuan, bi jariagaien jarioak bi konfigurazio izan ditzake:

- (1) **Jario paraleloa**, jariagai biak trukagailuko mutur beretik sartu eta irteten direnean. Egitura honekin bi jariagaien arteko tenperaturen hurbilketa mugatua dago, hau da, jariagai beroaren eta hotzaren irteerako tenperaturak, gehienez ere, berdinak izan daitezke (hori gertatzeko, luzera infinituko trukagailua beharko litzateke). 9.2 irudiko ezkerreko egitura izango litzateke.
- (2) **Kontrakorronteko jarioa**, bi jariagaiak kontrako noranzkoan zirkulatzen dutenean, jariagai beroa jariagai hotza irteten den muturretik sartzen denean. Egitura honekin diharduten trukagailuetan bi jariagaien arteko tenperaturen hurbilketa ez da mugatua, hau da, jariagai hotzaren irteerako tenperatura jariagai beroaren irteerako tenperatura baino altuagoa izan daiteke. Jario paralelokoek baino eraginkortasun handiagoa

daukatenez, tamaina txikiagoa behar dute. 9.2 irudiko eskuineko egitura izango litzateke.

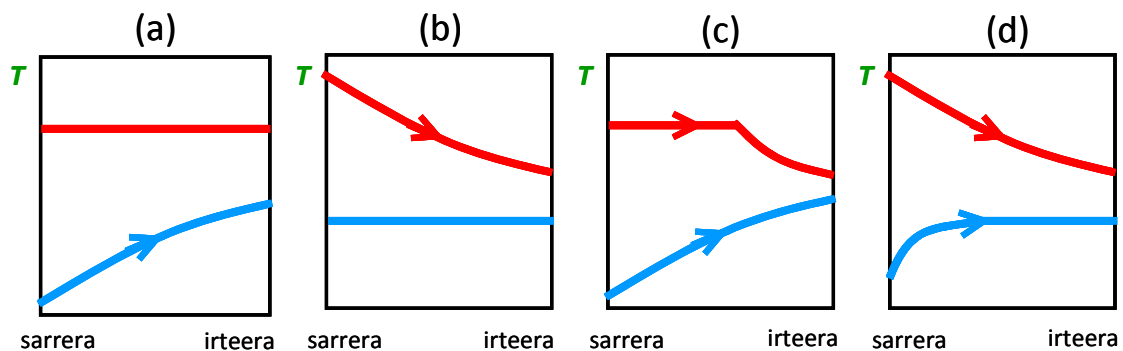
9.2 irudian, egitura horietan lortzen diren temperatura-profilak marrazteaz gainera, indar eragilea ere marrazten da ($T_B - T_H$). Ikusi den bezala, sistema bateko bero-jarioa indar eragilearekiko proportzionala da. Aipagarria da bero-transmisiorako indar eragilea, hau da, jariagai beroaren eta hotzaren arteko temperatura-diferentzia, ez dela konstantea trukagailu osoan zehar. Hori bi egiturekin gertatzen den arren, askoz ere nabarmenagoa da paraleloan diharduen ekipoa. Sarreran, bi jariagaien temperaturak oso desberdinak dira, eta indar eragile handia dago ($T_{B,S} - T_{H,S}$). Horregatik, trukagailuaren sarreran bero-truke handia egingo dute; hala ere, trukagailuan aurrera doazen heinean, bi jariagaien temperaturak berdinuz doaz, eta irteeran daukaten indar eragilea ($T_{B,I} - T_{H,I}$) eta bero-trukea txikiak dira. Beste era batera esanda, bero-trukea ez da uniformeki gertatzen trukagailuan zehar. Kontrakorrantean diharduen trukagailuan indar eragilea berdinagoa da trukagailu osoan zehar.



9.2 irudia. Paraleloan eta kontrakorrantean diharduten hodi bikoitzeko bero-trukagailuetako jariagaien temperatura-profila, trukagailuan zehar. Nomenklatura:

- Jariagai beroaren sarrerako temperatura: $T_{B,S}$
- Jariagai beroaren irteerako temperatura: $T_{B,I}$
- Jariagai hotzaren sarrerako temperatura: $T_{H,S}$
- Jariagai hotzaren irteerako temperatura: $T_{H,I}$

Bi jariagaietako batek fase-aldaketa jasango balu, temperatura profilak bestelakoak izango lirateke, 9.3 irudian agertzen den bezala.



9.3 irudia. Hodi bikoitzeko bero-trukagailuko temperatura-profilak fase-aldaketa dagoenean: (a) lurruna kondentsatzen ari da, (b) likidoa irakiten ari da, (c) trukagailuaren lehen zatian lurruna kondentsatzen ari da, eta dena likido eran dagoenean, hoztu egiten da, (d) trukagailuaren lehen zatian likidoa berotu egiten da irakin arte.

9.3 HODI BIKOITZEKO BERO-TRUKAGAILUAREN ENERGIA-BALANTZEAK

Bero-trukagailuan, energiaren iraupen-legeko termino mekanikoak (energia potentziala eta zinetikoa) baztergarriak dira termino entalpikoen aldean (5.5 ekuazioan). Gainera, erreakzio kimikorik ez badago eta ponpaketarik ez bada erabiltzen, jariagaiak irabazten edo galtzen duen beroa entalpia aldatzeko erabiltzen du.

$$Q = \Delta H \quad (9.3)$$

Jariagai beroaren entalpia-balantzea:

Bero sentikorra trukutzen badu:

$$Q \left(\frac{\text{energia}}{t} \right) = \dot{m}_B \cdot \overline{C}_{p,B} \cdot (T_{B,S} - T_{B,I})^* \quad (9.4)$$

Bero sorra trukutzen badu:

$$Q \left(\frac{\text{energia}}{t} \right) = \dot{m}_B \cdot \lambda_B \quad (9.5)$$

Jariagai hotzaren entalpia-balantzea:

Bero sentikorra trukutzen badu:

$$Q \left(\frac{\text{energia}}{t} \right) = \dot{m}_H \cdot \overline{C}_{p,H} \cdot (T_{H,I} - T_{H,S}) \quad (9.6)$$

Bero sorra trukutzen badu:

$$Q \left(\frac{\text{energia}}{t} \right) = \dot{m}_H \cdot \lambda_H \quad (9.7)$$

Egoera geldikorrean trukagailua ideala bada, hau da, ingurunera berorik galtzen ez bada, jariagai beroak emandako beroa jariagai hotzak bereganatzen du.

9.4 HODI BIKOITZEKO BERO-TRUKAGAILUAREN DISEINUA

Ekipo hauen diseinua egitean, trukatu behar den bero-jariorako (Q) beharrezkoa den trukagailuaren azalera (A) kalkulatu da. Diseinua errazteko, hurbilketa hauek egingo dira:

1. Trukagailuak egoera geldikorrean dihardu.
2. Ingurumenean galtzen den beroa baztergarria da.
3. Bi jariagaien bero espezifikoak konstante mantentzen dira trukagailuan zehar, sarrera eta irteerako baldintzen batez besteko balioan ($\overline{C}_{p,B}$ eta $\overline{C}_{p,H}$).

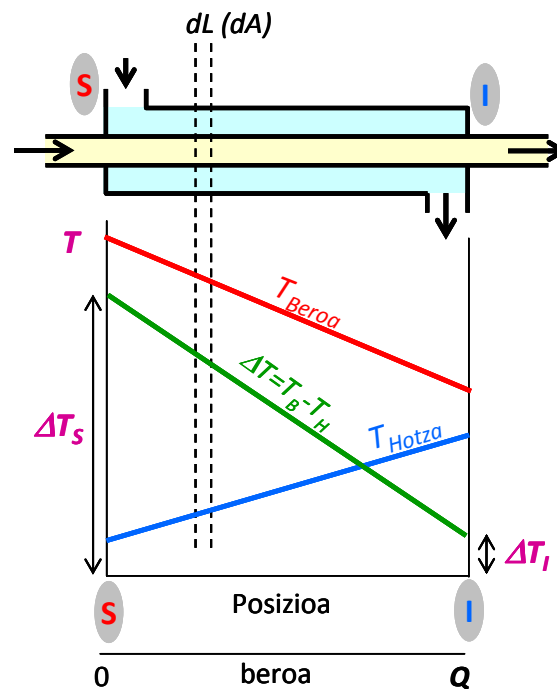
Hirugarren hurbilketak trukagailuan zeharreko tenperatura-profilak lerro zuzenak izatea ahalbidetzen du. Bero-trukagailuaren diseinu-ekuazioa lortzeko, paraleloan diharduen ekipoa hartuko da, nahiz eta kontrakorrontean diharduenarekin helburu bera lortu.

Demagun trukagailuan bero-transmisiorako koefiziente globala U dela (mementoz ez da bereiziko kanpoko ala barruko azalerarekiko den). 9.4 irudian ikusten den bezala, trukagailu osoan zehar indar eragilea ($T_B - T_H$) posizioarekin aldatzen denez, azterketa egiteko dL

* Oharra: zeinu positiboa izateko, horrela erabiliko da, nahiz eta ($T_{B,I} - T_{B,S}$) den era zehatza.

luzerako zati estu bat hartuko da, bero-trukerako dA azalerakoa. Zati estu horretan, jariagai beroaren eta hotzaren tenperaturak konstantetzat har daitezkeenez, hau da bien arteko bero-trukea:

$$dQ = U \cdot dA \cdot (T_B - T_H) = U \cdot dA \cdot \Delta T \quad (9.8)$$



9.4 irudia. Hodi bikoitzeko bero-trukagailuko indar eragilearen profila, posizioarekiko eta trukatzeko den beroarekiko.

9.4 irudian ikusten den bezala, indar eragilea ($\Delta T = T_B - T_H$) posizioarekin eta trukatzeko beroarekin linealki aldatzen da. ΔT vs. Q lerroaren malda kalkulatu bada:

$$\frac{d\Delta T}{dQ} = \frac{\Delta T_S - \Delta T_I}{Q} \quad (9.9)$$

ΔT_S eta ΔT_I trukagailuaren sarrera- eta irteera-puntuetako indar eragileak dira, eta Q , trukagailu osoan trukatu behar den beroa.

Bi ekuazioak konbinatzen badira eta sarrera- eta irteera-tartean integratzen bada:

$$\int_{\Delta T_S}^{\Delta T_I} \frac{d\Delta T}{U \cdot \Delta T} = \frac{\Delta T_S - \Delta T_I}{Q} \cdot \int_0^A dA = \frac{(\Delta T_S - \Delta T_I) \cdot A}{Q} \quad (9.10)$$

Integrala ebazteko, U -ren eta ΔT -ren arteko erlazioa jakin behar da. Bi egoera aztertuko dira:

1- U konstantea bero-trukagailu osoan

U konstantea bada, integraletik kanpora atera daiteke, eta diseinu-ekuazio hau lortzen da, non $(\Delta T)_{BL}$ trukagailuaren sarreran eta irteeran dauden indar eragileen batezbesteko logaritmikoa baita:

$$Q = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{BL} \quad (9.11)$$

$$(\Delta T)_{BL} = \frac{\Delta T_s - \Delta T_l}{\ln\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_l}\right)} \quad (9.12)$$

2- U aldakorra bero-trukagailuan

U konstantea ez bada, integraletik ezin daiteke atera, eta ΔT -rekin duen erlazioarekin ordezkatu behar da. Adibidez, linealki aldatuko balitz:

$$U = a + b \cdot \Delta T \quad (9.13)$$

Integrala ebaztean, adierazpen hau lortuko litzateke:

$$Q = A \cdot \frac{U_i \cdot \Delta T_s - U_s \cdot \Delta T_l}{\ln\left(\frac{U_i \cdot \Delta T_s}{U_s \cdot \Delta T_l}\right)} \quad (9.14)$$

U_s eta U_l bero-transmisiorako koefiziente globalaren sarrera eta irteerako balioak izanik.

Adierazpen horietan ez dira bereizi U_i eta U_o . Jakinaenez, lortutako bi ekuazioetan hodiaren barruko azalera erabiltzen bada (A_i), beretzat definitutako koefizientea (U_i) erabili behar da, eta A_o erabiltzen bada, U_o erabili behar da.

Adibidea 9.1 adibidea

Hodi bikoitzeko trukagailu batean, 7500 kg/h etilenglikol ($\bar{C}_p = 2,56$ kJ/kgK) hozten da 70 °C-tik 35 °C-ra, 20 °C-an dagoen 8000 kg/h ur ($\bar{C}_p = 4,18$ kJ/kgK) erabiliz.

Kalkula dezagun (a) zenbat bero trukutzen duten, (b) uraren irteerako temperatura, (c) trukagailuak zer azalera izan behar duen.

Datuak: $U_o = 1700$ kJ/hm²K da, eta trukagailu osoan konstantea dela har daiteke.

Ebazpena

(a) Etilenglikolaren eta uraren entalpia-balantzea eginez, trukutzen duten beroa kalkulatu da.

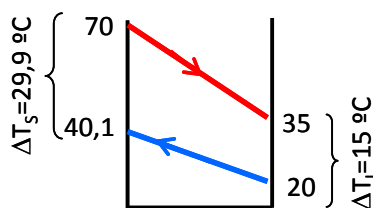
Etilenglikola: $Q = (7500 \text{ kg/h}) \cdot (2,56 \text{ kJ/kgK}) \cdot (70 - 35)^\circ\text{C} = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$

Bero hori jariagai hotzak bereganatzen du:

(b) Ura: $Q = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = (8000 \text{ kg/h}) \cdot (4,18 \text{ kJ/kgK}) \cdot (T - 20)^\circ\text{C}$

Hortik, uraren irteerako temperatura kalkulatu da: $T = 40,1^\circ\text{C}$

(c) Ez da aipatzen paraleloan edo kontrakorrontean zirkulatu duten. Bi jariagaien sarrera eta irteerako temperaturak behatuta, ohartzen gara uraren irteerako temperatura (40,1 °C) etilenglikolaren irteerako temperatura (35°C) baino altuagoa dela.



Paraleloan lan eginez ezin daiteke hori lortu, bai ordea kontrakorrontean lan eginez (kontuan izan paraleloan jariagai hotzaren irteerako temperaturak ezin duela jariagai beroaren irteerako temperatura gainditu).

Diseinu-ekuazioan erabili beharreko $(\Delta T)_{BL} = 21,6^\circ\text{C}$ bada:

$$Q = U \cdot A \cdot (\Delta T)_{BL} = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = 1700 \cdot A_o \cdot 21,6$$

Eta hortik: $A_o = 18,3 \text{ m}^2$

Trukagailuaren barruko hodiaren kanpo-azalera $18,3 \text{ m}^2$ -koa izan behar du tenperatura horiek lortu ahal izateko.

Adibidea

9.2 adibidea

Hodi bikoitzeko bero-trukagailu batean, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ -an dagoen 7500 kg/h etilenglikol ($\overline{C}_p = 2,56 \text{ kJ/kgK}$) $70 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra berotu nahi da, $104 \text{ }^\circ\text{C}$ -an kondentsatzen ari den lurruna erabiliz. Kalkula dezagun (a) zenbat bero trukutzen duten, (b) zer lurrun-emari kondentsatzen den, (c) trukagailuak zer azalera behar duen.

Datuak: $U_o = 2600 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$; lurrunaren kondentsatze-beroa: $\lambda = 2230 \text{ kJ/kg}$

Ebazpena

Jariagai beroa kondentsatzen ari den lurruna denez, bero sorra trukutzen du.

(a) Etilenglikolaren entalpia-balantzea eginez:

$$Q = (7500 \text{ kg/h}) \cdot (2,56 \text{ kJ/kgK}) \cdot (70 - 35)^\circ\text{C} = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$$

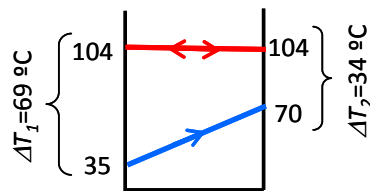
Bero hori lurrunak ematen dio:

(b) Lurrunaren energia-balantzetik:

$$Q = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = (\dot{m} \text{ kg/h}) \cdot (2230 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{m} = 301,3 \text{ kg/h} \text{ kondentsatzen ari den lurrun-emaria.}$$

(c) Jariagai beroaren tenperatura aldatzen ez denez, paraleloan zein kontrakorrantean egitura bera du.



$(\Delta T)_{BL} = 49,5 \text{ }^\circ\text{C}$ izanik, diseinu-ekuazioan ordezkatur, zer azalera behar duen kalkulatu da:

$$Q = U_o \cdot A_o \cdot (\Delta T)_{BL} = 6,72 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = 2600 \cdot A_o \cdot 49,5. \text{ Eta hortik: } A_o = 5,2 \text{ m}^2$$

Adibidea

9.3 adibidea

Altzairuzko hodi bikoitzeko bero-trukagailu batean, 5000 kg/h etilbentzeno berotu nahi da $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -tik $80 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra, $110 \text{ }^\circ\text{C}$ -an asea dagoen ur-lurruna erabiliz (barruko hoditik igarotzen da).

Kalkula dezagun: (a) zer luzera izan behar duen trukagailuak, (b) ur-lurrunaren zer emari erabili behar den.

Datuak: Barruko hodia: $D_i = 5 \text{ cm}$ $D_o = 5,5 \text{ cm}$;
 $h_i = 10000 \text{ kcal/hm}^2\text{ }^\circ\text{C}$; $k_{\text{altzairua}} = 35 \text{ kcal/hm}^2\text{ }^\circ\text{C}$;
 $\overline{C}_{p, \text{etilb}} = 0,46 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ $\lambda_{\text{lurruna}} = 531 \text{ kcal/kg}$

Etilbentzenoaren alderako h_o ($\text{kcal/hm}^2\text{ }^\circ\text{C}$):

($20 \text{ }^\circ\text{C}$ -an dagoen muturrean) = 600

($80 \text{ }^\circ\text{C}$ -an dagoen muturrean) = 1200

Linealki aldatzen dela har daiteke.

Ebazpena

Lehenik eta behin, bero-transmisiorako koefiziente globala (U_i) kalkulatu da, trukagailuaren bi muturretarako:

Etilbentzenoa 20 °C-an dagoen muturrean (S):

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{10000} + \frac{0,0025 \cdot 0,05}{35 \cdot 0,0525} + \frac{0,05}{600 \cdot 0,055} = \frac{1}{10000} + \frac{1}{14700} + \frac{1}{660}; U_i = 660 \text{ kcal/hm}^2\text{K}$$

Etilbentzenoa 80 °C-an dagoen muturrean (I):

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{10000} + \frac{0,0025 \cdot 0,05}{35 \cdot 0,0525} + \frac{0,05}{1000 \cdot 0,055} = \frac{1}{10000} + \frac{1}{14700} + \frac{1}{1100}; U_i = 1100 \text{ kcal/hm}^2\text{K}$$

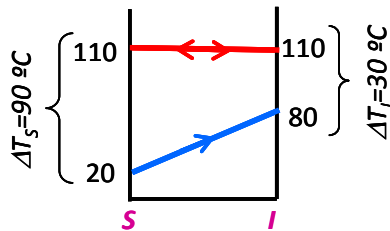
Bi jariagaiek trukatu behar duten beroa etilbentzenoaren energia-balantzea ebaztean lortuko da:

$$Q = 5000 \cdot 0,46 \cdot (80 - 20) = 1,35 \cdot 10^5 \text{ kcal/h}$$

Erabili behar den ur-lurrun emaria energia-balantzea ebaztean lortuko da:

$$Q = 1,35 \cdot 10^5 \text{ kcal/h} = \dot{m}_{Lurruna} \cdot 531 \quad ; \quad \dot{m}_{Lurruna} = 254 \text{ kg/h}$$

Trukagailuaren azalera kalkulatzeko, diseinu-ekuazioa erabiliko da:



S muturrean	I muturrean
-------------	-------------

(ΔT) _S = 90 °C	(ΔT) _I = 30 °C
-------------------------------------	-------------------------------------

$U_{i,S} = 660 \text{ kcal/hm}^2\text{K}$	$U_{i,I} = 1100 \text{ kcal/hm}^2\text{K}$
---	--

$$Q = 1,35 \cdot 10^5 \text{ kcal/h} = A_i \cdot \frac{U_i \cdot \Delta T_s - U_s \cdot \Delta T_l}{\ln\left(\frac{U_i \cdot \Delta T_s}{U_s \cdot \Delta T_l}\right)} = A_i \cdot \frac{1100 \cdot 90 - 660 \cdot 30}{\ln\left(\frac{1100 \cdot 90}{660 \cdot 30}\right)}$$

$A_i = 2,74 \text{ m}^2.$

Hodien luzera: $A_i = 2,74 \text{ m}_2 = \pi \cdot D_i \cdot L = \pi \cdot 0,05 \text{ m} \cdot L.$

$L = 17,5 \text{ m}$ luzerako hodiak behar dira.

9.5 ZIKINKERIA-FAKTOREA

Bero-trukagailua, erabili ahala, zikinduz eta zahartuz doa, jariagaiek daramaten zikinkeria ezarri egiten delako (adibidez, urak daramatzan kaltzio- eta magnesio-gatzak prezipitatu egiten dira hormaren inguruan, eta karezko geruza osatzen da) edo, jariagai korrosiboak badira, hodiak herdoildu eta hondatu egiten dituztelako. Horregatik, trukagailua berria zenean zituen ezaugarriekin alderatuz, zahartzean edo zikintzean bero-transmisiorako erresistentzia handitu egiten da, seriean dagoen erresistentzia handitzen delako. Erresistentzia horri **zikinkeria-erresistentzia** deritzo (R_z), eta kontuan hartu behar da bero-

transmisiorako koefiziente globalean. Erresistentziari dagokion koefizientea **zikinkeria-faktorea** da (h_z), konbekzio-koefizientearen dimentsio berekoa.

Hodiaren barne-gainazalean eta kanpo-gainazalean zikinkeria dagoenean, erresistentziak hauek dira:

$$R_{z,i} = \frac{1}{h_{z,i} \cdot A_i} \quad (9.15)$$

eta

$$R_{z,o} = \frac{1}{h_{z,o} \cdot A_o} \quad (9.16)$$

Zikinkeria barrualdetik zein kanpoaldetik doan jariagaiak sor dezakeenez, $R_{z,i}$ eta $R_{z,o}$ bereizi behar dira. U_o erabiltzen denean hodiaren bi aldeetan zikinkeria badago:

$$\frac{1}{U_{o,ZIKINA}} = \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + R_{z,i} + \frac{\Delta X \cdot D_o}{k \cdot D_{BL}} + R_{z,o} + \frac{1}{h_o} \quad (9.17)$$

Trukagailua berria denean eta garbia dagoenean dituen ezaugarriekin alderatuz, $U_{ZIKINA} < U_{GARBIA}$ dela ohartu gaitzke. Ondorioz, zikina edota zaharkitua dagoen trukagailu batek bero-trukerako erresistentzia handiago du, eta azalera berean bero gutxiago trukatu du.

$$\frac{1}{U_{o,ZIKINA}} = \frac{1}{U_{o,GARBIA}} + R_z \quad (9.18)$$

Zikinkeria-erresistentzien ohiko balioak 9.1 taulan agertzen dira.

9.1 Taula. Zikinkeria-faktorearen ohiko balioak.

Jariagai mota	R_z (m^2K/W)
Itsasoko ura	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Galdaretako ur tratatua	$2 \cdot 10^{-4}$
Hozte-likidoa	$2 \cdot 10^{-4}$

Adibidea 9.4 adibidea

Hodi bikoitzeko bero-trukagailu batean, 7500 kg/h etilenglikol ($\bar{C}_p = 2,56$ kJ/kgK) hozten da 70 °C-tik 35 °C-ra, kontrakorrantean, 20 °C-an dagoen 8000 kg/h ur ($\bar{C}_p = 4,18$ kJ/kgK) erabiliz. Denbora luzean lanean jardun ondoren, ohartzen gara etilenglikolaren irteerako tenperatura 45 °C dela. Kalkula dezagun (a) U_o -ren balioa egoera horretan, (b) zikinkeria-faktorea.

Datuak: $U_{o,GARBIA} = 1700$ kJ/hm²K

Ebazpena

Trukagailu berri eta garbiaren ebazpena 9.1 adibidean egin da, eta ikusi da $A_o = 18,3$ m²-ko azalera behar duela.

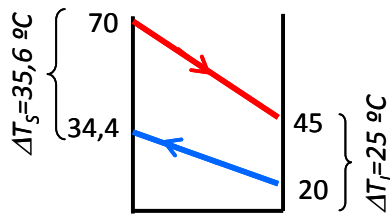
Oraingo baldintzetan, energia-balantzea askatzen bada:

Jariagai beroa: $Q = (7500 \text{ kg/h}) \cdot (2,56 \text{ kJ/kgK}) \cdot (70 - 45)^\circ\text{C} = 4,8 \cdot 10^5$ kJ/h

Ohar gaitezen garbia zegoenean baino bero gutxiago trukatu duela.

Jariagai hotza: $Q = 4,8 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = (8000 \text{ kg/h}) \cdot (4,18 \text{ kJ/kgK}) \cdot (T - 20)^\circ\text{C}$

$T = 34,4 \text{ }^\circ\text{C}$



Diseinu-ekuazioa:

$\Delta T_{BL} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ lortzen da.

$Q = 4,8 \cdot 10^5 \text{ kJ/h} = U_{o,ZIKINA} \cdot 18,3 \text{ m}^2 \cdot 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$U_{o,ZIKINA} = 875 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$

$$\frac{1}{U_{o,ZIKINA}} = \frac{1}{U_{o,GARBIA}} + R_z ; R_z = \frac{1}{875} - \frac{1}{1700} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ hm}^2\text{K/kJ}$$

9.6 BERO-TRUKAGAILU MOTAK

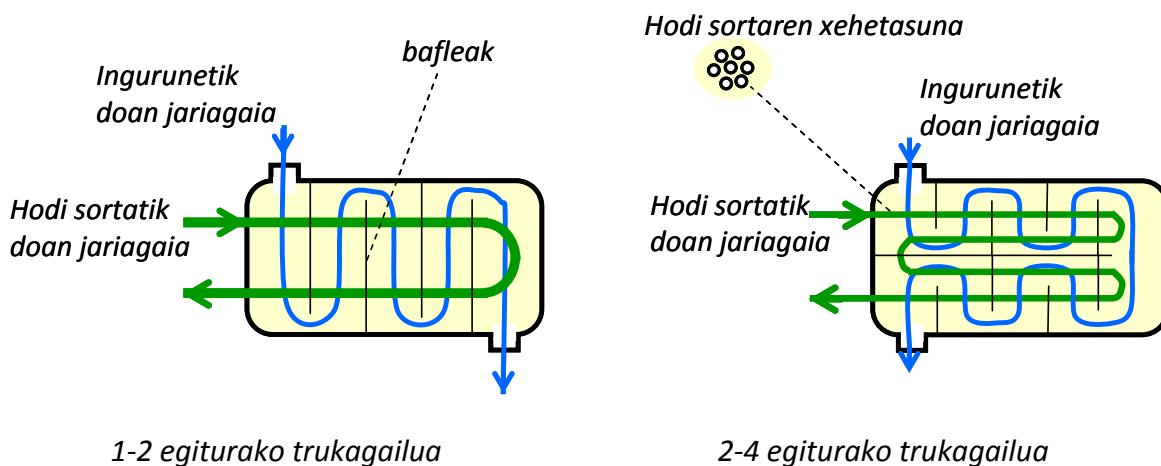
Hodi bikoitzeko bero-trukagailuak gutxi erabiltzen dira industrian, eraginkortasun txikia baitute. Jariagai beroaren eta hotzaren arteko kontaktu termikoa laguntzen duten azalera handiagoko trukagailu eraginkorragoak erabiltzen dira industrian.

Bestelako bero-trukagailuen artean, hauek aipa daitezke, garrantzi industrialaren arabera:

9.6.1 Hodia eta ingurunea erako bero-trukagailuak.

Jariagai baten jarioa ingurune baten barruan dagoen hodi sorta batean banatzen da. Beste jariagaia ingurunetik doa, hodi sorta inguratuz. Horrelako egiturak izugarri handitzen duenez bero-trukerako azalera, hodi bikoitzekoak baino eraginkorragoak dira.

Ingurunetik doan jariagaiaren alderako konbekzio-koefizientea handitzeko, eta, beraz, U handitzeko, zurrumbiltasuna eragiten da baffleak edo pantailak ezarriz (ikusi 9.5 irudia).



9.5 irudia. 1-2 eta 2-4 egiturako hodia eta ingurunea erako bero-trukagailuak, baffle eta hodi sortaren xehetasunekin.

Horrelako trukagailuetan, hodi sortatik doan jariagaiak hainbat aldiz zeharkatu dezake trukagailua, joan-etorriak eginez; ingurunetik doan jariagaiak ere behin baino gehiagotan zeharkatu dezake trukagailua. Era horretako trukagailuak izendatzeko, N-M erako nomenklatura erabiltzen da.

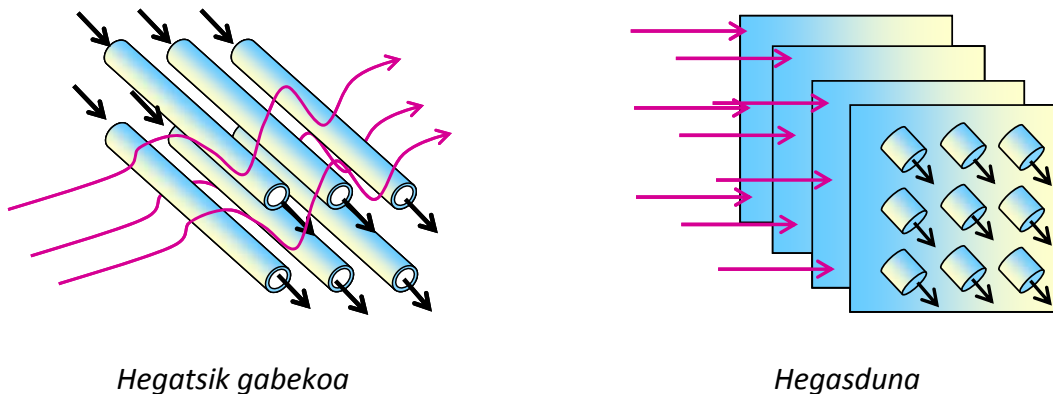
N: ingurunetik doan jariagaiak trukagailua zenbat aldiz zeharkatzen duen

M: hodi sortatik doan jariagaiak trukagailua zenbat aldiz zeharkatzen duen

9.5 irudian agertzen dira 1-2 eta 2-4 egiturako bero-trukagailuen eskema.

9.6.2 Jario gurutzatuko bero-trukagailuak.

Jariagai bat hodi sortaren barrutik doa, eta beste jariagaiak kanpotik zirkulatzen du, aurrekoarekiko perpendikularrean. Normalean, gas eta likidoen arteko trukerako erabiltzen da; likidoa hodietatik zirkularazten da, eta gasa kanpotik doa. Kanpoaldetik doan jariagaia bideratzeko, hegatsak erabil daitezke. 9.6 irudian agertzen dira trukagailu hegasdunen eta hegatsik gabekoak.



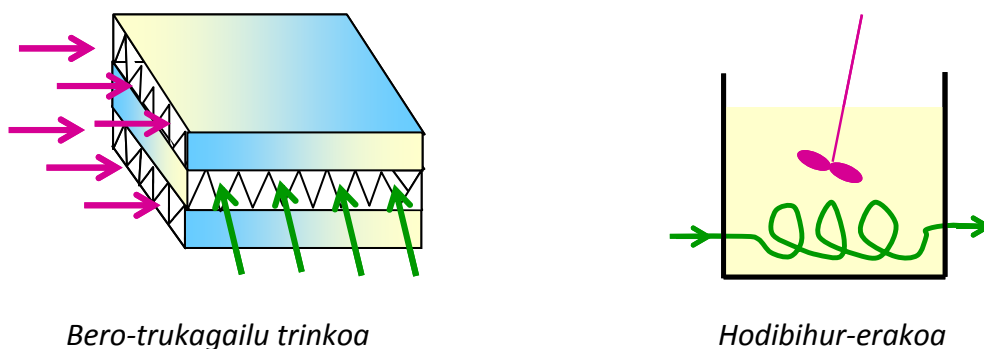
9.6 irudia. Jario gurutzatuko bero-trukagailuak.

9.6.3 Bero-trukagailu trinkoak.

Bolumen unitateko bero-trukerako azalera handiena eskaintzen dutenak dira ($700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ -raino). Xafla uzurtuz osatutako matrizez eratzen dira, eta bi jariagaien jarioak gurutzatuak dira. 9.7 irudian agertzen da ekipo hauen eskema.

9.6.4 Hodibihur-erako bero-trukagailuak.

Tangetako likidoak berotu edo hozteko erabiltzen dira. Hozteko edo berotzeko erabiltzen den jariagaia zilindrikoki biribildutako (hodibihurra) hodiaren barrutik doa, eta hodibihurra tanga barruan sartuta dago. Tanga-erako errektore kimikoen temperatura kontrolatzeko maiz erabiltzen den sistemaren eskema agertzen da 9.7 irudian.



9.7 irudia. Bero-trukagailu trinkoa eta hodibihur-erako bero-trukagailua.

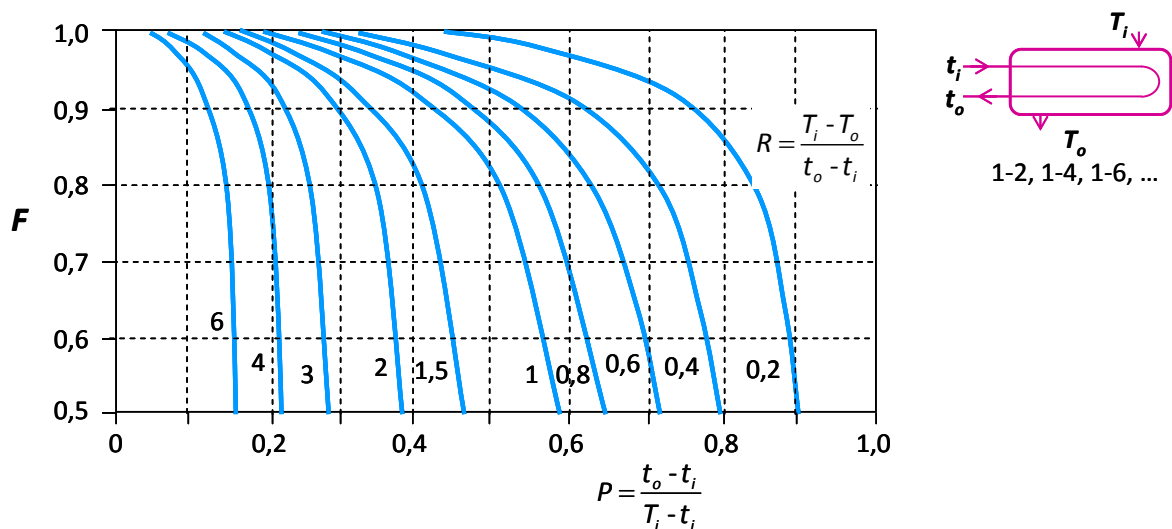
9.7 BESTELAKO BERO-TRUKAGAILUEN DISEINUA

Hodi bikoitzeko bero-trukagailuen diseinuan, trukagailuaren sarrera eta irteerako indar eragilearen batezbesteko logaritmikoa erabiltzen da. Ekipu hauen egitura dela eta, oso zaila da indar eragilearen batez besteko balioa jakitea. Horregatik, ekipu hauen diseinua egiteko orduan, hodi bikoitzeko bero-trukagailuan kontrakorrontean zirkulatuko balute izango luketen batez besteko indar eragilea (ΔT_{BL}^*) erabiltzen da, zuzenketa-faktore (F) batez zuzendua.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{BL}^* \cdot F \quad (9.19)$$

$$F = \frac{\text{benetako } \Delta T}{\Delta T_{BL}^*} \quad (9.20)$$

F -ren kalkulua esperimentalki egiten da, eta bibliografian, grafiko eran jasota dago trukagailu motaren arabera. 9.8 irudian hodia eta ingurunea egiturako 1-2, 1-4, 1-6... konfigurazioko trukagailuen F kalkulatzeko grafikoa azaltzen da.



9.8 irudia. 1-2, 1-4, 1-6... egiturako hodia eta ingurunea erako bero-trukagailuen F zuzenketa-faktorea kalkulatzeko grafikoa.

Adibidea 9.5 adibidea

1-4 egiturako hodia –eta ingurunea erako bero-trukagailu batean, 2,5 kg/s ur berotu behar da 15 °C-tik 85 °C-ra. Horretarako, 160 °C-an sartzen den olio beroa 5,2 kg/s-ko emariarekin zirkularaziko da ingurunetik. Bero-transmisioko koefiziente globalaren batez besteko balioa $U_o = 350 \text{ W/m}^2\text{K}$ bada, kalkula dezagun (a) bero-trukagailuak izan behar duen azalera, (b) hodian luzera.

Datuak: ura eta olioaren batez besteko $\overline{C_p}$ (kJ/kg K): ura = 4,18; olio = 2,35

Hodi sorta bakoitzean 15 hodi daude, eta bakoitzaren kanpo-diametroa $D_o = 25 \text{ mm}$ da.

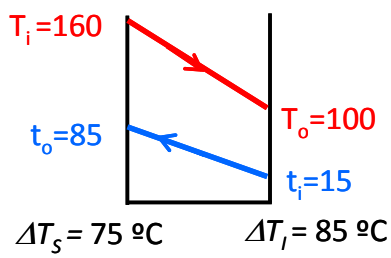
Ebazpena

Urarentzako energia-balantzea:

$$Q = (2,5 \text{ kg/s}) \cdot (4,18 \text{ kJ/kgK}) \cdot (85 - 15)^\circ\text{C} = 7,315 \cdot 10^5 \text{ W}$$

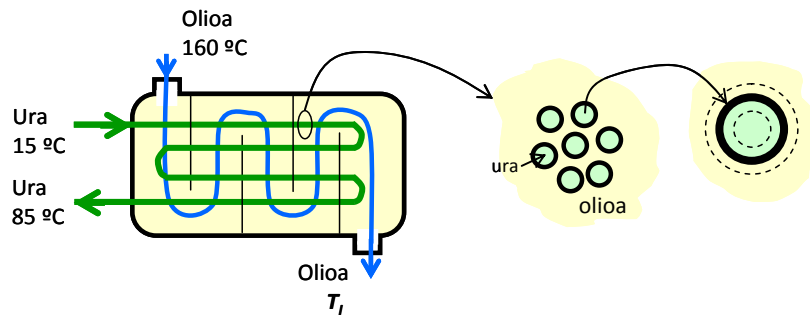
Olioaren energia-balantzea:

$$Q = 7,315 \cdot 10^5 \text{ W} = (5,2 \text{ kg/s}) \cdot (2,35 \text{ kJ/kgK}) \cdot (160 - T_i)^\circ\text{C}$$



$$T_i = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{BL} \cdot F = 7,315 \cdot 10^5 \text{ W}$$



$$\Delta T_{BL} = 79,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R = (160 - 100) / (85 - 15) = 0,86$$

$$P = (85 - 15) / (160 - 15) = 0,48$$

9.8 irudiko grafikoan begiratzuz, $F \approx 0,87$ lortzen da.

Diseinu-ekuazioa:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{BL} \cdot F = 7,315 \cdot 10^5 \text{ W} = 350 \text{ (W/m}^2\text{K)} \cdot A_o \cdot 79,9 \text{ (}^\circ\text{C)} \cdot 0,87$$

$$A_o = 30 \text{ m}^2$$

$$(b) 30 \text{ m}^2 = 15 \cdot \pi \cdot D_o \cdot L = 15 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot L; L = 25 \text{ m}$$