



4 GAIA: BALANTZE TERMIKOAK ERREKUNTZA-PROZESUETAN

IKASMATERIALAK

Maite de Blas Martín
Blanca M^a Caballero Iglesias

Bilboko Ingeniaritza Eskola
Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumenaren Ingeniaritza

BALANTZE TERMIKOAK ERREKUNTZA-PROZESUETAN

4.1. Errekuntzaren etekina

4.2. Etekin termikoa. Etekin termikoa handiagotzea

4.2.1. Berotze-ahalmen handiagoko erregaiak erabiltzea

4.2.2. Garraren tenperatura adiabatikoa handiagotzea

4.2.3. Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

4.2.4. Bero-galerak murriztea

4.3. Balantze termikoak eta Sankey diagramak

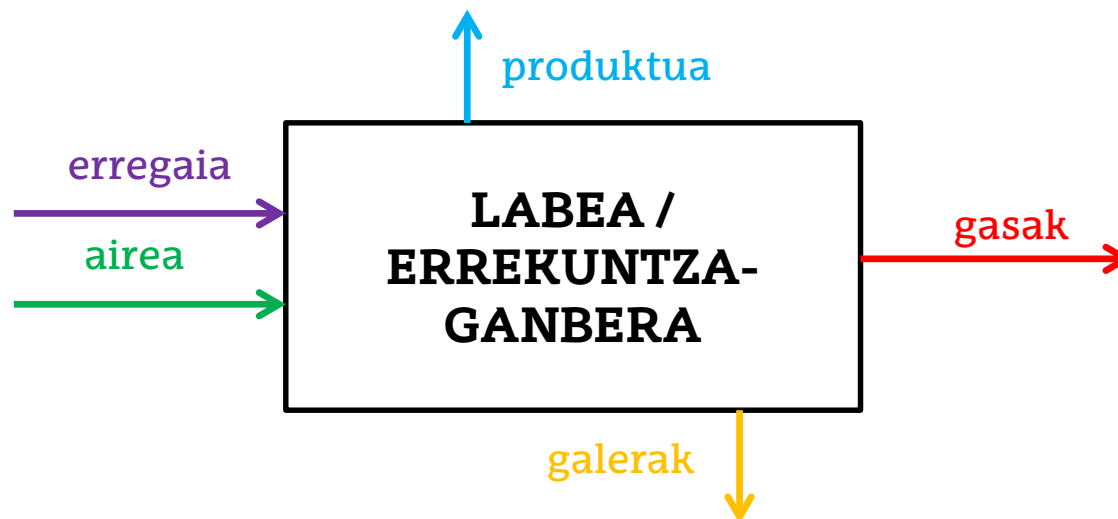
ERREKUNTZAREN ETEKINA

Errekuntzaren etekina (η_c): errekuntza-prozesu baten eraginkortasunaren neurria, labean edota errekuntza-ganberan.

$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = 1 - \frac{Q_h}{Q_c}$$

4.1 ekuazioa

Errekuntza-gasek irteeran duten beroaren (Q_h) eta erregaiak emandako beroaren (Q_c) arteko zatidurak errekuntza-gasen bero-galerak adierazten ditu.



4.1. Irudia. Labearen edota errekuntza-ganberaren fluxu-diagrama. Egileek egindako irudia

ETEKIN TERMIKOA

Etekin termikoa (η_t): errekuntza-instalazio baten eraginkortasun energetikoaren neurria $\rightarrow$ kontsumoaren minimizazioa energia-ustiapen maximoarekin.

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c}$$

4.2 ekuazioa

Instalazioan emandako bero eraginkorraren (produktuari transmititutako beroa, Q_p) eta erregaiak emandako beroaren (Q_c) arteko zatidura. Adibidez, urtze-labe batean produktua aluminioa, beira, etab. izan daiteke; galdara batean, ordea, produktua ur-lurruna da.

Prozesuaren balantze termikoa eginez (sarrerak = irteerak, eta errekuntzan erabilitako aireak duen beroa mesprezatuz, 4.1. Irudia ikusi):

$$Q_c = Q_p + Q_h + P$$

4.3 ekuazioa

Non P instalazioaren galerak diren (hormak, hozketa, purgak, etab.)

$$\eta_t = \frac{Q_c - Q_h - P}{Q_c} = \frac{Q_p}{Q_c}$$

4.4 ekuazioa

ETEKIN TERMIKOA

4.4. ekuazioa garatuz (etekin termikoa):

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_C} - \frac{T_h \sum_{i=1}^n c_{h,i}(T_h) V_i}{T_A \sum_{i=1}^n c_{h,i}(T_A) V_i} - \frac{P}{Q_C} = 1 - \frac{T_h}{T_A} - \frac{P}{Q_C}$$

↑
Gutxi gorabehera

4.5. ekuazioa

T_h = errekontza-gasen tenperatura

T_A = garraren tenperatura adiabatikoa

$C_{h,i}(T_h), C_{h,i}(T_A)$ = errekontza-gasen bero espezifikoa (T_h eta T_A tenperaturatan)

V_i = errekontza-gasen bolumena

4.5 ekuaziotik ondoriozta daiteke **etekin termikoa handiagotzen dela**:

- ✓ Berotze-ahalmen handiagoko erregaiak erabiliz (Q_C)
- ✓ Garraren tenperatura adiabatikoa handiagotuz (T_A)
- ✓ Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotuz (T_h)
- ✓ Instalazioaren bero-galerak murriztuz (P)

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Berotze-ahalmen handiagoko erregaiak erabiltzea

Erregai bat beste batekin trukatzeko ez da beti posiblea izaten, baina sarritan agregazio-egoera berean dauden erregaiak truka daitezke: berotze-ahalmena handiagotzea → T_A handiagotzea

4.1. Taula. Zenbait erregai solidoren BBA. IDAE-tik moldatua [\[1\]](#)

Erregaiak	BBA(kcal/kg)
Antrazita industrialak	5829
Harrikatz industrialak	5757
Ikatz azpibituminotsua	3194
Lignitoa	3195
Biomasa (oro har)	3382
Zerrautsak eta txirbilak	3780
Enbor-azalak	3650
Pelletak	3940

4.2. Taula. Zenbait erregai likidoren BBA. IDAE-tik moldatua [\[1\]](#)

Erregaiak	BBA(kcal/kg)
Petrolio gordina	10190
PLG	10990
Kerosenoa	10270
Gasolina	10510
Ibilgailuetarako gasolioa	10170
Fuel-olioa	9550
Bioetanola	6449
Biodiesela	8837

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Berotze-ahalmen handiagoko erregaiak erabiltzea

Erregai gaseosoak trukatu ahal izateko gas-familia berekoak izan behar dira (1. familia: gas manufakturatua, 2. familia: gas naturalak, 3. familia: petrolio-gas likidotuak) eta trukagarritasun-irizpideak bete behar dituzte ¹:

4.3. Taula. Zenbait erregai gaseosoren beheko berotze-ahalmena (BBA) eta goiko berotze-ahalmena (GBA). IDAE-tik moldatua [\[1\]](#)

Erregaiak	BBA (kcal/m ³ N)	GBA (kcal/m ³ N)
Propanoa	11063	21800
Butanoa	10723	28300
Gas naturala	-	9667
Findegi-gasa	11820	-
Koke-gasa	-	4540
Labe garaiko gasa	-	6900
Zabortegeko biogasa	-	4775
Araztegeko biogasa	-	6327

¹: informazio gehiago Nazioarteko Gas Elkartearen gidaliburuan [\[2\]](#)

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Garraren temperatura handiagotzea

✓ **Erregai bat beste batekin trukatzea:** berotze-ahalmen handiagoko erregai bat erretzean garraren temperatura adiabatikoa (T_A) handiagoa da.

4.4 Taula. Zenbait erregairen garraren temperatura adiabatikoa. Artikulu zientifikotik moldatua (Florescu et al., 2013) [\[3\]](#)

Erregaia	T_A (°C)
Gas naturala	2070
Kerosenoa	2093
Fuel-olio arina	2104
Bitarteko fuel-olioa	2101
Fuel-olio astuna	2102
Ikatz bituminotsua	2172
Antrazita	2180

✓ **Gehiegizko airea murriztea:** zenbat eta unitatetik gertuago ($n=1$, errekuntza teorikoa), garraren temperatura adiabatikoa handiagoa da.

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Garraren tenperatura handiagotzea

- ✓ **Airea oxigenoan aberastu** (% 25-30 arte): errekontza-gasen bolumena txikiagotzen da, baina airea oxigenoan aberasteak muga ekonomikoak ditu eta segurtasun-neurri gehigarriak behar ditu.
- ✓ **Erregaia aldeztik aurretik birsorgailuetan berotu**, errekontza-gasek duten beroa trukatzuz → efektua bikoitza da ($T_A \uparrow$ eta $T_h \downarrow$, *14. eta 15. orrialdeak*)
 - Berotze-ahalmen txikiko erregai gaseoek bero-ekarpen gehigarria behar dute sutze-tenperatura lortzeko
 - Erregai likido astunak aldeztik aurretik berotzen dira, horien biskositatea txikiagotzeko eta lurrunketa errazteko, beharrezkoa baita errekontza gertatzeko. Helburu nagusia T_A handiagotzea ez den arren, lortzen da baita ere.
- ✓ **Airea aldeztik aurretik birsorgailu edo berreskuragailuetan berotu**, errekontza-gasek duten beroa trukatzuz → efektua bikoitza da ($T_A \uparrow$ eta $T_h \downarrow$, *11-15. orrialdeak*)

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen temperatura txikiagotzea

Labetik edota errekontza-ganberatik datozen keen temperatura 1000 °C ingurukoa izaten da. Errekuntza-gasen beroa **errekuntzarako airea** edo **erregaia aldez aurretik berotzeko, ur-lurruna sortzeko** erabil daiteke.

Ihes-gasen temperaturaren azpiko muga ihintz-temperaturaren arabera da, kondentsazio bidezko korrosioa saihesteko, eta baita tximiniatik keak kanporatzeko beharrezkoa den temperaturaren arabera ere, tximiniaren tiroaren arabera.

Erabilitako bero-trukagailuen motak:

- ✓ **Berreskuragailuak.** Errekuntza-gasen eta airearen arteko bero-transferentzia, erradiazio edo konbektzio bidez, jarraitua da hormetan zehar, baina fluidoak fisikoki banandurik dauden hodietatik igarotzen dira.
- ✓ **Birsorgailuak.** Errekuntza-gasen eta airearen arteko bero-transferentzia aldizkakoa da, fluidoak hodi beretik igarotzen dira, baina txandaka.

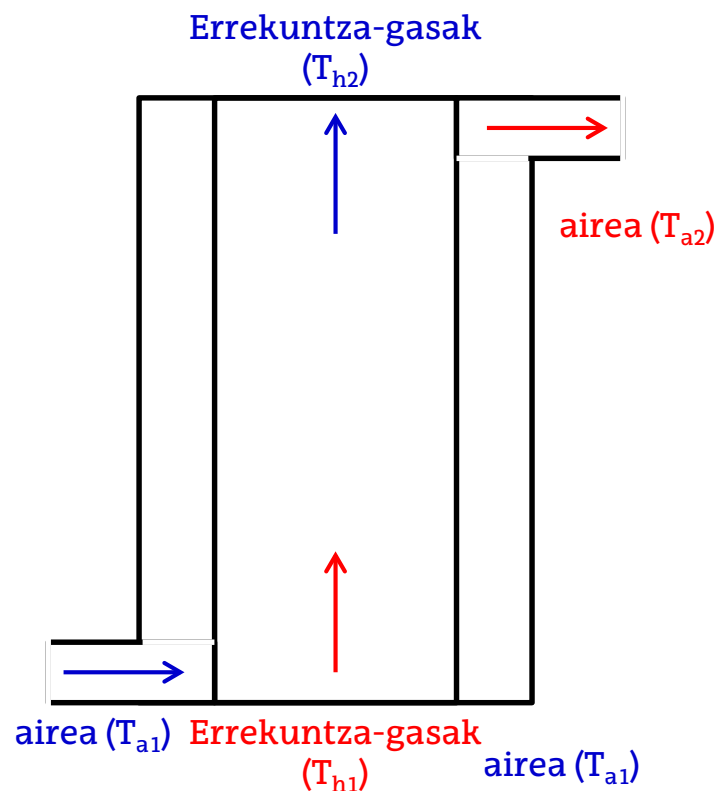
ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

Erradiazio bidezko berreskuragailuak

- ✓ Erradiazio bidezko bero-transferentzia errekontza-gasen tenperatura 1000 °C gorakoa denean gertatzen da. Zenbat eta tenperatura txikiagoa izan, eraginkortasuna txikiagoa da.
- ✓ Zentrokideak diren hodiak dira, posizio bertikalean jarrita. Ez da tiro gehigarriarik behar eta karga-galera txikia da. Errekuntza-gasak barneko hoditik igarotzen dira ($T_{h1} > T_{h2}$) eta airea kanpoko hoditik ($T_{a1} < T_{a2}$).

* T_{h1} , T_{h2} eta T_{a1} , T_{a2} errekontza-gasen eta airearen arrera- eta irteera-tenperaturak dira hurrenez hurren.



4.2. Irudia. Erradiazio bidezko berreskuragailuaren eskema. Egileek egindako irudia

Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

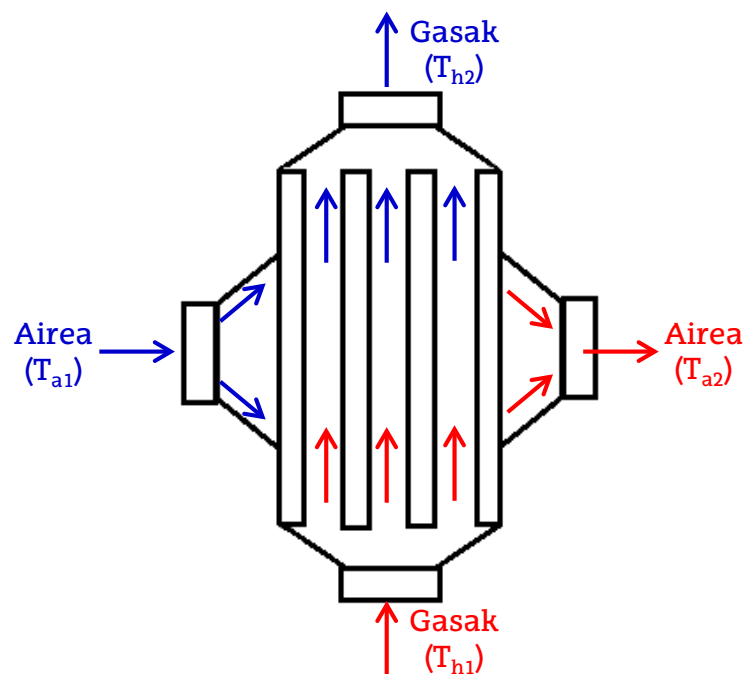
- ✓ Konbekzio bidezko bero-transferentzia errekontza-gasen tenperatura 1000 °C beherakoa denean gertatzen da.
- ✓ Mota honetako berreskuragailuetan material zeramikoak dira erabilienak gaur egun. Posizio horizontalean, bertikalean edo inklinatuan jartzen diren hodi-sortaz osaturik daude.
- ✓ Posizio desberdinak fluxuaren noranzkoaren arabera:



4.3. Irudia. Konbekzio bidezko berreskuragailuen eskemak fluxuaren arabera: paraleloa edo kide-korrontean (ezkerraldean) eta kontra-korrontean (eskuinaldean), $T_{h1} > T_{h2}$ eta $T_{a2} > T_{a1}$. Egileek egindako irudia

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen temperatura txikiagotzea



4.4. Irudia. Konbektzio bidezko eta fluxu konbinatuko berreskuragailuaren eskema, $T_{h1} > T_{h2}$ eta $T_{a2} > T_{a1}$. Egileek egindako irudia



4.5. Irudia. Bero-trukagailuak. Repsolek egindako argazkia, Flickr webgunean argitaraturikoa CC BY-NC-SA 2.0 lizentziapean[4]

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

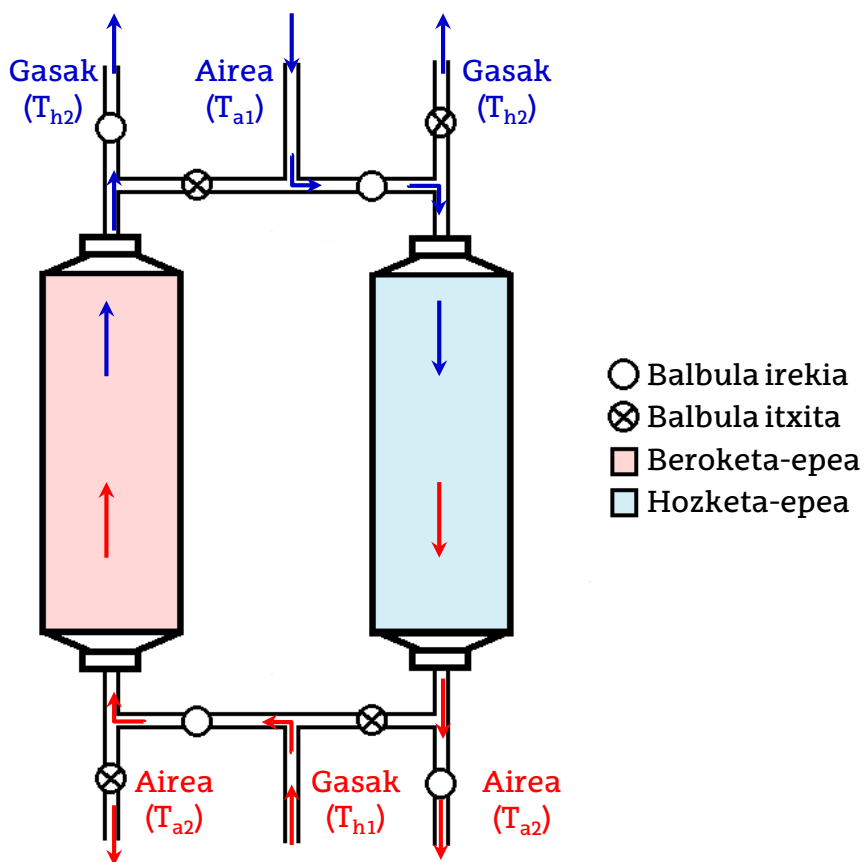
Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

Birsorgailuak

- ✓ Errekuntza-aria berotu behar den instalazioetan erabiltzen da. Noizean behin berotze-ahalmen txikiko erregai gaseosoak, gasogeno-gasa esaterako, aldeztu aurretik berotzeko erabiltzen dira. Honela, garraren tenperatura altuak lortzen dira, adibidez, beira urtzeko labeetan.
- ✓ Birsorgailu-bikoteen lan-sekuentziak bi urrats ditu:
 - 1) **Beroketa-epea:** errekuntza-gas beroak gorantz igarotzen dira hodietan zehar. Beraz, hoztu egiten dira eta birsorgailuak beroa biltegitzen du.
 - 2) **Hozketa-epea:** aria edo erregai hotzak beherantz igarotzen dira hodietan zehar. Beraz, berotu egiten dira birsorgailuak biltegituriko beroaz.
- ✓ Pilaturiko **material erregogorrez** eraikitzen dira, bero-ahalmen eta erresistentzia termiko handikoak direnak.

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea



4.6. Irudia. Birsorgailuak, $T_{h1} > T_{h2}$ eta $T_{a2} > T_{a1}$
Egileek egindako irudia Thermopedia
gidaliburutik moldatua [5]



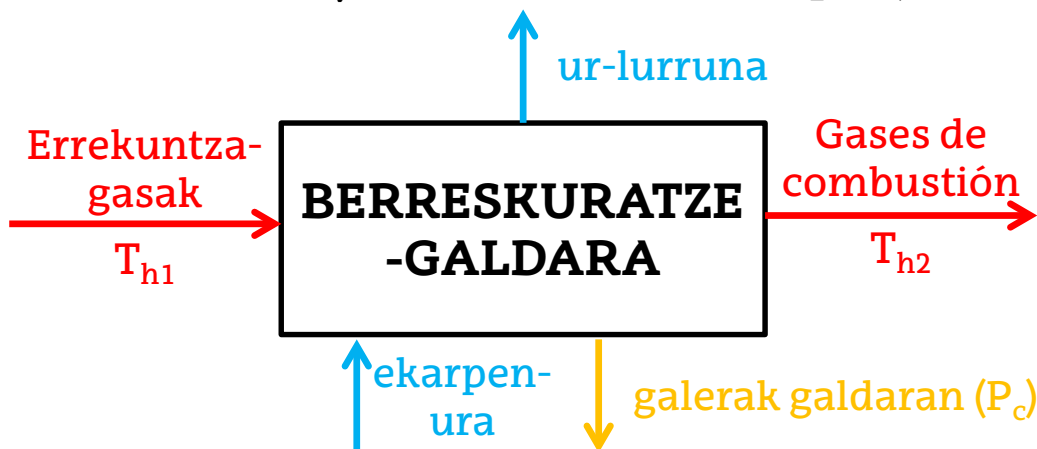
4.7. Irudia. Adreilu
erregogorak. Byrev
egileren argazkia, Pixabay
webgunean CC0
lizentziapean
argitaraturikoa [6]

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

Berreskuratze-galdarak

- ✓ Errekuntza-gasen tenperatura birsorgailu / berreskuragailuaren irteeran 500 °C baino handiagoa den instalazioetan erabiltzen da. Airea / erregaia aldez aurretik berotzea beharrezkoa ez denean erabiltzen dira baita ere.
- ✓ Balantze termikoa berreskuratze-galdaran: $Q_{ura} + Q_{h1} = Q_v + Q_{h2} + P_c$
Ur-lurrunari emandako beroa: $Q_v = m_v H_v$, non, m_v : sortutako ur-lurrunaren kantitatea eta H_v : ur-lurrunaren entalpia (T eta P jakinetan)



4.8. Irudia. Berreskuratze-galdararen fluxu-diagrama. Egileek egindako irudia

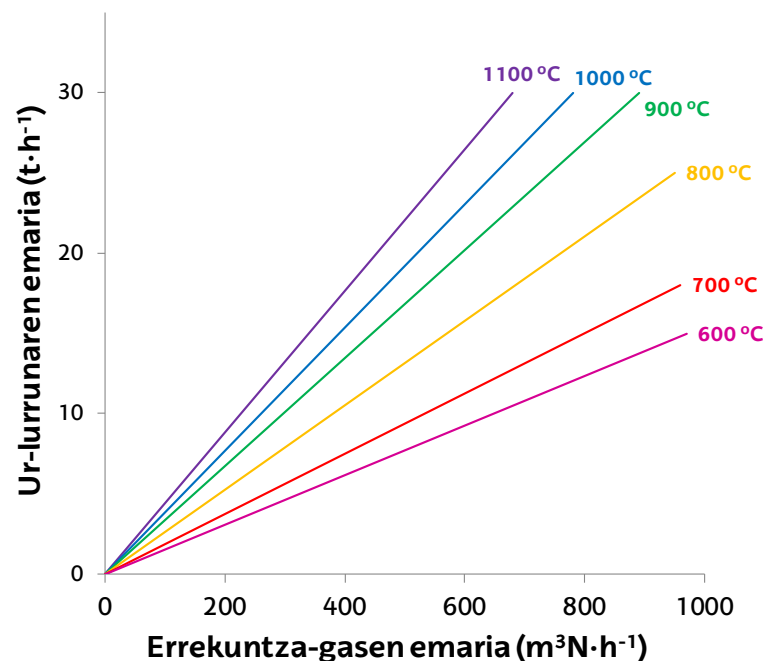
ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen tenperatura txikiagotzea

Berreskuratze-galdarak

- ✓ Errekuntza-gasen hondar-beroa **ur-lurruna** ekoizteko aprobetxatzen da. Ur-lurruna instalazioan bertan erabil daiteke, adibidez, lurrun turbina batean energia elektrikoa sortzeko.
- ✓ Berreskurapen-galdaretan bero-transferentzia (konbekzioz) astiro gertatzen da, ohiko galdaretan (erradiazioz) gertatzen den bero-transferentzia azkarragoarekin alderatuz. Izan ere, zenbat eta T_h handiagoa izan, bero-transferentzia eraginkorragoa da.

4.9. Irudia. Ekoiztutako ur-lurruna vs. errekuntza-gasen emaria zenbait tenperaturatan. Egileek egindako irudia

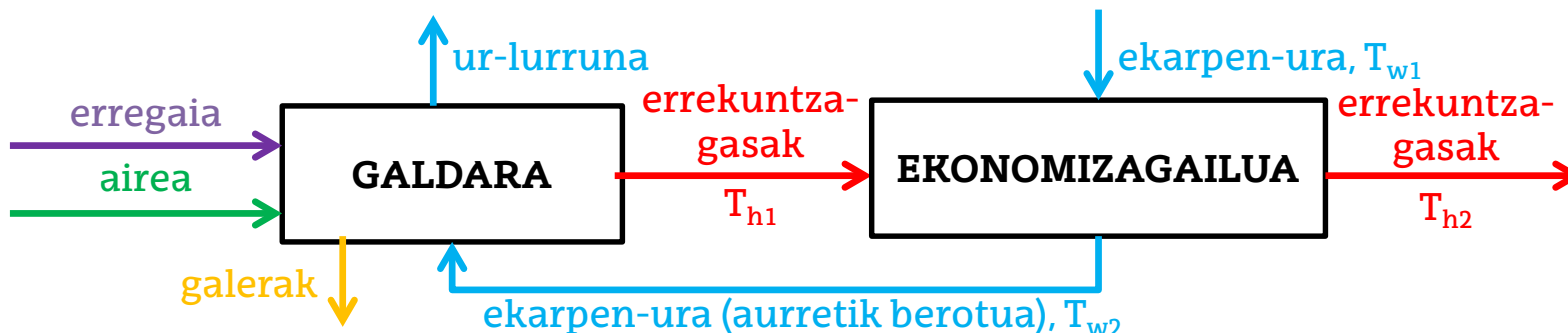


ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Errekuntza-gasen temperatura txikiagotzea

Karga aldeaz aurretik berotzea. Labe jarraituetan errektuntza-gasen beroa karga (txatarra esaterako) aldeaz aurretik berotzeko aprobetxatu daiteke.

Ekonomizagailuak. Galdararen ekarpen-ura berotzeko bero-trukagailuak dira.



4.10. Irudia. Ekonomizagailua duen galdararen fluxu-diagrama. Egileek egindako irudia

Gainberogailuak. Bero-trukagailuak dira, non ur-lurruna berotzen den, bai galdararen etekina hobetzeko edo baita ur-lurrunaren kondentsazioa ekiditeko (adibidez, ur-lurruna turbina batean erabiliko den kasuan).

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Bero-galerak murriztea

Instalazioetan, bero-galerak hormetan zehar, erradiazioz, irekiguneetatik, etab. gerta daitezke.

Bestelako galera batzuk, batez ere aldizka lan egiten duten instalazioetan, edukiontzietan zein estalduretan biltegiraturiko beroari zor dakizkioke.



4.11. Irudia. Indukzio-labea galdategi batean. Wikimedian domeinu publikoan argitaraturiko argazkia [7]

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Bero-galerak murriztea

Azalera eta hormetan zehar gertatzen diren bero-galerak.

Material isolatzaileak (esaterako, beira-zuntza) erabiliz murriztu daitezke. Hala ere, materialak hondatuz doazen heinean bero-galerak handituz doaz. Hurrengo araberakoak dira:

- Gainazaleraren kanpoko aldearen eta giro-airearen tenperatura
- Gainazalaren materiala
- Gainazalaren posizioa. Bero-galerak handiagoak dira gainazal horizontalen goiko aldean, gainazal bertikaletan baino eta gainazal horizontalen beheko aldean baino.

4.12. Irudia. Beira-zuntza. Rkit egileak egindako argazkia, Pixabay webgunean domeinu publikoan argitaraturikoa [\[8\]](#)



ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Bero-galerak murriztea

Erradiazio- eta hozketa-galerak

Tenperatura altuetan dauden zonak (labea, esaterako) material isolatzailez estaliz gero babestu daitezke,. Horrela, barnealdearen eta kanpoaldearen arteko tenperatura-gradientea txikiagotu daiteke. Ura edo airea fluido hoztaile moduan erabiltzen duen sistema hoztailea erabiltzea ere posiblea da.

Galera hauek tenperatura-gradientearen arabera estimatu ohi dira. Fluido hoztailea erabiliz gero, haren emariaren eta sarrera- eta irteera-tenperaturen arabera estimatzen dira.

4.13. Irudia. Isolatzaile termikoa mantak erabiliz. Wikimedian argitaraturiko argazkia CC BY-SA 3.0 lizentziapean [\[9\]](#)



ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Bero-galerak murriztea

Galerak kanpoaldera: irekiguneetatik, arrakaletatik, ihesak, etab.

Erradiazioz kanpoaldera gertatzen diren galerak, horma / elementuaren lodieraren, tenperaturaren, irekigunearen formaren, etab. arabera estimatu ohi dira.

Gasen irteeraren edo sarreraren ondorioz gertatzen diren galerak, gasen irteera- edo infiltrazio-emariaren arabera edo presioaren (P) arabera estimatzen dira:

$P_{\text{barrualdean}} > P_{\text{kanpoaldean}}$: ihesa

$P_{\text{barrualdean}} < P_{\text{kanpoaldean}}$: infiltrazioa



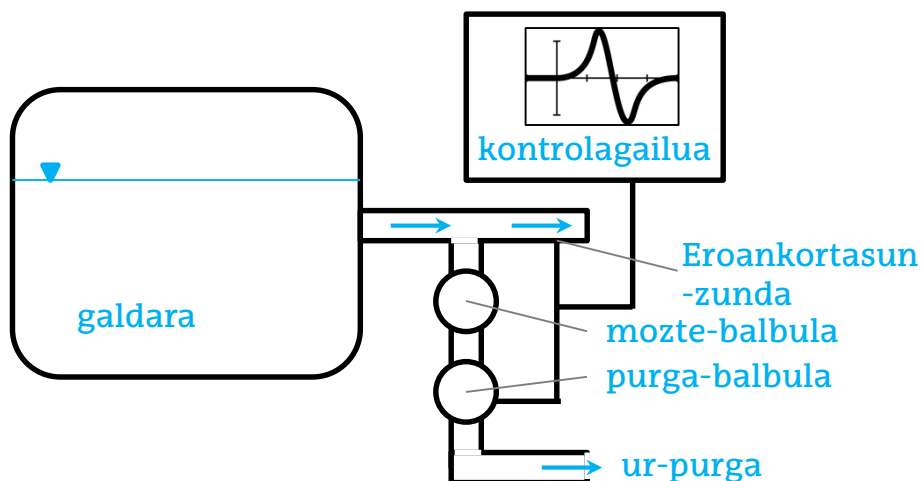
4.14. Irudia. Amoniako-ihesaren konponketa ongarririk egiteko instalazioan. Wikimedian argitaraturiko argazkia CC BY-SA 3.0 lizentziapean [\[10\]](#)

ETEKIN TERMIKOA HANDIAGOTZEA

Bero-galerak murriztea

Purgen bidezko galerak

Galdaretan, beharrezkoa da ur-purgak egitea, gazitasuna eta suspentsio-solidoak balio onargarrietan mantentzeko eta inkrustazioak saihesteko. Ohiko prozedura, eroankortasuna neurtzean eta geroko purgatzean datza. Izan ere, eroankortasuna uraren gazitasunaren adierazlea da.



4.15. Irudia. Galdara baten ur-purgaren sistema. Egileek egindako irudia Pixabay webgunean argitaraturiko bektoretik [\[11\]](#)



4.16. Irudia. Inkrustazioak dituen hodiaren zeharkako ebakidura. Wikimedian argitaraturiko irudia domeinu publikoetan [\[12\]](#) 23

BALANTZE TERMIKOAK ETA SANKEY DIAGRAMAK

BALANTZE TERMIKOA: prozesuaren energia-sarreraren eta energia-irteeren banakapena, denboraren edo produktuaren unitate bakoitzeko: kcal/h, kcal/t produktu, kcal/kg erregai, etab.

SARRERAK

- Q_c : erregaiaren energia kimikoa (BBA)
- Q_A : errekontza-airearen bero sentikorra
- Q_F : erregaiaren edo kargaren (adibidez txatarra, ekarpen-ura, etab.) bero sentikorra

* Q_A eta Q_F mesprezatu daitezke (Q_c terminoaren balioarekin alderatuz) airea edota erregaia giro-tenperaturan elikatzen badira. Balantzean kontuan hartu behar dira, erregaia edo karga aldez aurretik berotzen direnean.

IRTEERAK

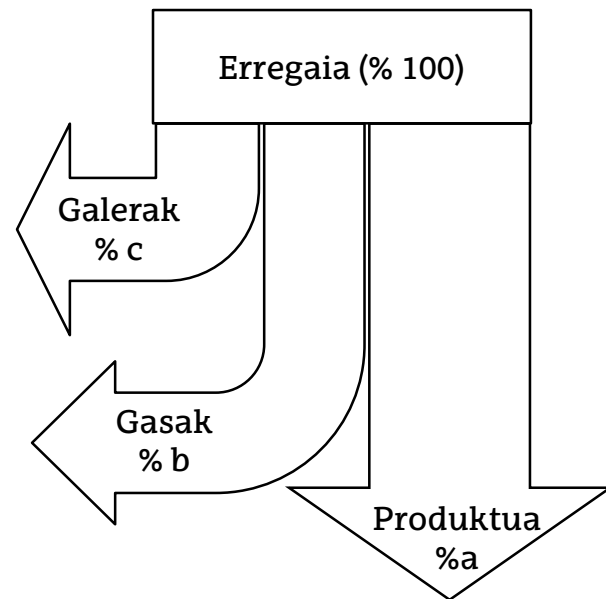
- Q_p : produktuari emandako bero erabilgarria
- Q_v : ur-lurrunari emandako bero erabilgarria
- Q_h : errekontza-gasen bero sentikorra
- P: bero-galerak

BALANTZE TERMIKOAK ETA SANKEY DIAGRAMAK

Balantze termikoa taula baten bidez (4.5. Taula) edo grafikoki (4.17. Irudia) adierazi daiteke. Balantze termikoaren adierazpen grafikoa **Sankey diagrama** da. Energia-fluxua banden bidez adierazten da. Banden zabalera bertatik igarotzen den bero-energiarekiko proportzionala den.

4.5. Taula. Balantze termiko baten adibidea (produktuaren tona bakoitzeko)

Sarrerak	kcal	Irteerak	kcal	%
Erregaia	Q_c	Produktua	Q_u	a
		Gasak	Q_h	b
		Galerak	P	c
TOTALA		TOTALA		100%



4.17. Irudia. 4.5. Taulako adibideari dagokion Sankey diagrama. Egileek egindako irudia.