



4: BALANTZE TERMIKOAK ERREKUNTZA-PROZESUETAN

JARDUERA PRAKTIKOAK, EBAZPENA II

Maite de Blas Martín
Blanca M^a Caballero Iglesias

Bilboko Ingeniaritza Eskola
Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumenaren Ingeniaritza

BALANTZE TERMIKOAK ERREKUNTZA-PROZESUETAN

JARDUERA PRAKTIKOEN EBAZPENA (II)

I) Balantze termikoen buruketak:

4.3.1 eta 4.3.2 buruketak



Lizentzia publikoan Pixabay
webgunean argitaraturiko
irudia [\[1\]](#)

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (I)

a) Aire teorikoaren kalkulua:

Erregai gaseosoa denez, erreferentzia moduan $100 \text{ m}^3\text{N}$ erregai hartuko da. Taulan erregaiaren konposizioa eta errektuntza osoaren erreakzioak biltzen dira:

Konposizioa	% bolumenean	Errekuntza-erreakzioa
CH_4	87,2	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
C_2H_6	5,9	$\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
C_3H_8	3,0	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$
N_2	2,7	Inertea
CO_2	1,2	Inertea

$$\frac{87,2 \text{ m}^3\text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N CH}_4} = 1,744 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$\frac{5,9 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{7/2 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_2\text{H}_6} = 0,207 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$\frac{3,0 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3\text{N gas}} \cdot \frac{5 \text{ m}^3\text{N O}_2}{1 \text{ m}^3\text{N C}_3\text{H}_8} = 0,150 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

$$O_T = 2,101 \frac{\text{m}^3\text{N O}_2}{\text{m}^3\text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (II)

$$2,101 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{100 \text{ m}^3 \text{N aire}}{21 \text{ m}^3 \text{N O}_2} = 10,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \longrightarrow A_T = 10,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Errekuntza-gasen kalkulua (errekuntza teorikoa)

$$\frac{87,2 \text{ m}^3 \text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N CH}_4} = 0,872 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{5,9 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6} = 0,118 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{3,0 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{3 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8} = 0,090 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{1,2 \text{ m}^3 \text{N CO}_2}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} = 0,012 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Erregaiaren CO₂ konposatua

$$V_{\text{CO}_2} = 1,092 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (III)

$$\frac{2,7 \text{ m}^3 \text{N N}_2}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} = 0,027 \frac{\text{m}^3 \text{N N}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

↓
Erregaiaren N₂ konposatua

$$10,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{79 \text{ m}^3 \text{N N}_2}{100 \text{ m}^3 \text{N aire}} = 7,900 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

↓
Airearen N₂ konposatua

$$V_{\text{N}_2} = 7,927 \frac{\text{m}^3 \text{N N}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$V_T(\text{lehorrak}) = 1,092 + 7,927 = 9,02 \frac{\text{m}^3 \text{N errekontza - gas}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

b) Gehiegizko airea. Airearen eta errekontza-gasen bolumena

CO₂ eta CO konposatuen balantzea: $\frac{(\% \text{CO}_2 + \% \text{CO})}{100} V_0 = (V_{\text{CO}_2})_{\text{errekontza-teorikoa}}$

$$\frac{7,3 + 0,5}{100} V_0 = 1,092 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}} \longrightarrow V_0 = 14,00 \frac{\text{m}^3 \text{N errekontza - gas}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (IV)

Nitrogenoa diferentziaz lortzen da: $N_2 = 100 - 7,3 - 0,5 - 7,2 = 85 \%$

$$N_2\text{-balantzea: } \frac{\% N_2}{100} \cdot V_0 = \frac{79}{100} \cdot n \cdot A_T + (N_2)_{\text{erregaia}}$$

$$\frac{85}{100} \cdot 14,00 = \frac{79}{100} n \cdot 10,00 + 0,027 \rightarrow n = 1,50$$

$$A_0 = n \cdot A_T = 1,50 \cdot 10,00 \rightarrow A_0 = 15,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

c) Giro-airea

Errekuntza-airearen ur-lurrunaren kalkulua: $w_0 = \frac{\varphi P_{\text{sat}}(T)}{P - \varphi P_{\text{sat}}(T)} A_0$

$$w_0 = \frac{(0,70 \cdot 23,78) \text{ mmHg}}{(745 - 0,70 \cdot 23,78) \text{ mmHg}} 15,00 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \rightarrow w_0 = 0,343 \frac{\text{m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Aire hezea baldintza normaletan: $A_R = A_0 + w_0$

$$A_R = 15,00 + 0,343 \rightarrow A_R = 15,34 \frac{\text{m}^3 \text{N aire heze}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (V)

Giro-aria (giro-baldintzatan): $\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}$

$$\frac{760 \text{ mmHg} \cdot 15,34 \frac{\text{m}^3 \text{N aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}}{273 \text{ K}} = \frac{745 \text{ mmHg} \cdot V}{(25 + 273) \text{ K}} \longrightarrow V = 17,08 \frac{\text{m}^3 \text{ giro - aire}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

d) Errekuntza-gasen bolumena eta konposizioa

Errekuntza-gas lehorren analitik osagai bakoitzaren bolumena lortzen

da:

$$\frac{7,3}{100} \cdot 14,00 = 1,022 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{0,5}{100} \cdot 14,00 = 0,070 \frac{\text{m}^3 \text{N CO}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{7,2}{100} \cdot 14,00 = 1,008 \frac{\text{m}^3 \text{N O}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$\frac{85}{100} \cdot 14,00 = 11,900 \frac{\text{m}^3 \text{N N}_2}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$V_0 = 14,00 \frac{\text{m}^3 \text{N gases lehor}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (VI)

Ur-lurrunaren kalkulua:

- Airearen hezetasuna: $w_1 = 0,343 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$
- Erregaiak ez du hezetasunik: $w_2 = 0$
- Erregaiaren hidrogenoaren errekontzatik sortutako ur-lurruna:

$$\left. \begin{aligned} \frac{87,2 \text{ m}^3 \text{N CH}_4}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{2 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N CH}_4} &= 1,744 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \\ \frac{5,9 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{3 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_2\text{H}_6} &= 0,177 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \\ \frac{3,0 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8}{100 \text{ m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{4 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{N C}_3\text{H}_8} &= 0,120 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \end{aligned} \right\} w_3 = 2,041 \frac{\text{m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

Batuketa eginez: $w = 2,384 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{N gas}$

$$V_R = V_0 + w = 14,00 + 2,384 = 16,38 \frac{\text{m}^3 \text{N errekontza - gas}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (VII)

Konposizioa aurkitzeko: $\% i = \frac{V_i}{V_R} \cdot 100$

Adibidez: $\% \text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_R} \cdot 100 = \frac{1,022}{16,38} \cdot 100 = \% 6,2$

Errekuntza-gasak	Konposizioa (%)
% CO ₂	6,2
% CO	0,4
% O ₂	6,2
% N ₂	72,6
% H ₂ O	14,6

e) Errekuntza-gasen ihintz-tenperatura

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = y_w \cdot P = \frac{V_w}{V_R} \cdot P = \frac{2,384 \text{ m}^3 \text{N H}_2\text{O}}{16,38 \text{ m}^3 \text{N gases}} \cdot 745 \text{ mmHg} = 108,3 \text{ mmHg}$$

3.1. Taula: $T_{\text{ihintz}} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.1. BURUKETA. EBAZPENA (VIII)

f) Berotze-ahalmena

$$GBA = \sum_{i=1}^n y_i GBA_i = 0,872 \cdot 9530 + 0,059 \cdot 16700 + 0,030 \cdot 23770 = 10009 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

$$2,041 \frac{\text{m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{22,4 \text{ m}^3 \text{NH}_2\text{O}} \cdot \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 1,640 \frac{\text{m}^3 \text{NH}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{N gas}} \leftarrow \text{Erregaiaren hidrogenoaren errekontzan sortutako ur-lurruna}$$

$$BBA = GBA - m_{\text{ur-lurrun}} \cdot \lambda_{\text{kondentsazio}} = 10009 - 1,640 \cdot 598,3 = 9028 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{N gas}}$$

g) Garraren temperatura adiabatikoa

Airea eta erregaia ez dira aldeez aurretik berotzen ($Q_a = Q_f = 0$), Q_c ($GBA = 10009 \text{ kcal/m}^3 \text{N}$), c_m ($0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T \text{ kcal/m}^3 \text{N} \cdot ^\circ \text{C}$) eta V_R ($16,38 \text{ m}^3 \text{N/m}^3 \text{N}$):

$$T_A = \frac{Q_c + Q_a + Q_f}{c_m V} = \frac{10009}{(0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_A) \cdot 16,38}$$

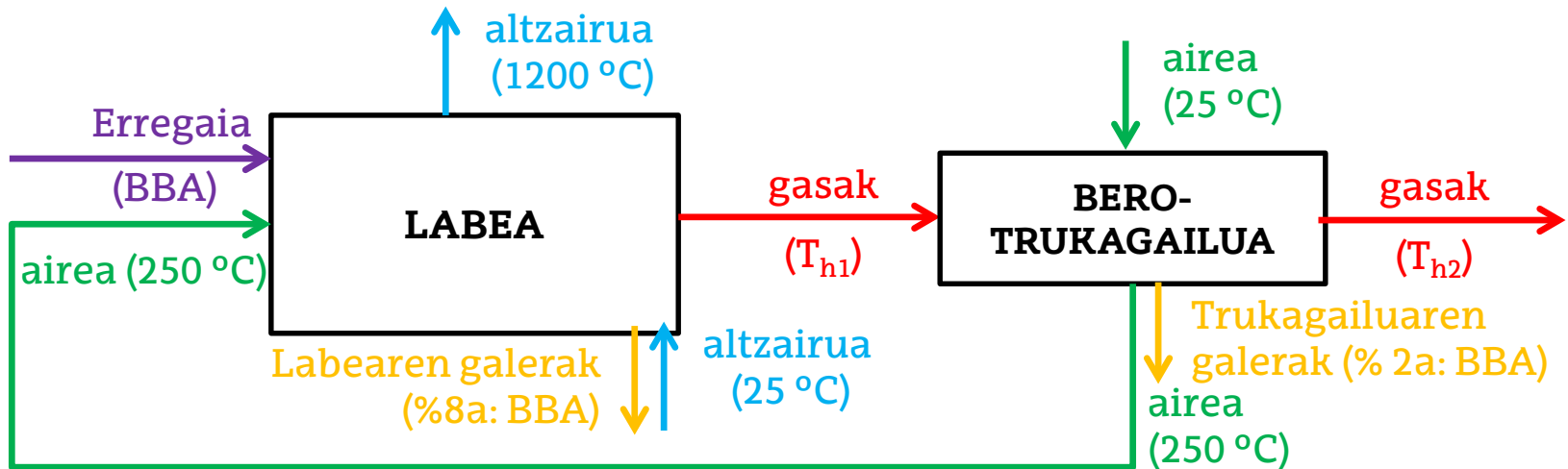
Ekuazioa ebatziz gero: $5,08 \cdot 10^{-4} T_A^2 + 5,24 T_A - 10009 = 0 \rightarrow T_A = 1647 \text{ } ^\circ \text{C}$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (I)

a) Prozesuaren etekin termikoa: labea eta bero-trukagailua

Prozesuaren bero-fluxuaren diagrama:



Labearen balantze termikoa (1 m³N de gas, altzairuaren bero-ekarpena 25 °C-an mesprezaten da):

$$Q_c + Q_a = Q_p + Q_{h1}(T_{h1}) + P_h$$

↑
↑
 altzairua erradiazio-galerak labean

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (II)

Sarrerak (1 m³N gas):

$$Q_c = 9028 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

$$Q_a = A_R \cdot c_a \cdot T_a$$

3.4. Taula: interpolazio lineala

$$c_a(250 \text{ }^\circ\text{C}) = \sum_{i=1}^n y_i c_i(250 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,978 \cdot 0,316 + 0,022 \cdot 0,369 = 0,317 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\text{N }^\circ\text{C}}$$

Ur-lurrunaren eta airearen frakzio molarrek: $y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,343}{15,34} = 0,022$; $y_a = \frac{15,00}{15,34} = 0,978$

$$Q_a = 15,34 \text{ m}^3\text{N aire/m}^3\text{N gas} \cdot 0,317 \text{ kcal/m}^3\text{N gas }^\circ\text{C} \cdot 250 \text{ }^\circ\text{C} = 1216 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Irteerak (1 m³N gas):

$F = 11 \text{ kg altzairu/m}^3\text{N gas}$, $C_{\text{altzairu}} = 0,175 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$

$$Q_p = F \cdot c_{\text{altzairu}} \cdot T_{\text{altzairu}} = 11 \text{ kg/m}^3\text{N} \cdot 0,175 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C} \cdot 1200 \text{ }^\circ\text{C} = 2310 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

$$Q_{h1} = V_R \cdot c_h(T_{h1}) \cdot T_{h1} = 16,38 \cdot [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_{h1}] \cdot T_{h1} \text{ (kcal/m}^3\text{N)}, \quad T_{h1} \text{ ezezaguna}$$

$$P_h = 0,08 \cdot 9028 = 722 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Labearen balantze termikoan ordezkatzuz, aldagai ezezagun bakarra errekontza-gasen beroa labearen irteeran da: $Q_{h1} = 7212 \text{ kcal/m}^3\text{N}$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (III)

Keen tenperatura labearen irteeran Q_{h1} -etik abiatuz kalkulatu daiteke:

$$Q_{h1} = 16,38 [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} T_{h1}] T_{h1} = 7212 \text{ (kcal/m}^3\text{N)}$$

Ekuazioa ebatziz: $5,08 \cdot 10^{-4} T_{h1}^2 - 5,24 T_{h1} - 7212 = 0 \longrightarrow T_{h1} = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$

Etekinen kalkulua:

$$\eta_t = \frac{Q_p}{Q_c} = \frac{2310}{9028} = 0,256 \longrightarrow \eta_t = \% 25,6$$

$$\eta_c = \frac{Q_c - Q_h}{Q_c} = 1 - \frac{7212}{9028} = 0,201 \longrightarrow \eta_c = \% 20,1$$

Balantze termikoa bero-trukagailuan (1 m³N gas):

$$Q_{h1} (T_{h2}) = Q_a + Q_{h2} (T_{h2}) + P_i$$

25 °C-an dagoen airearen bero-ekarpena mesprezitzen da eta bergalerak erregaiaren BBA-aren % 2a dira ($P_i = 0,02 \cdot 9028 = 181 \text{ kcal/m}^3\text{N}$).

Ezezagun bakarra errekontza-gasen beroa trukagailuaren irteeran da:

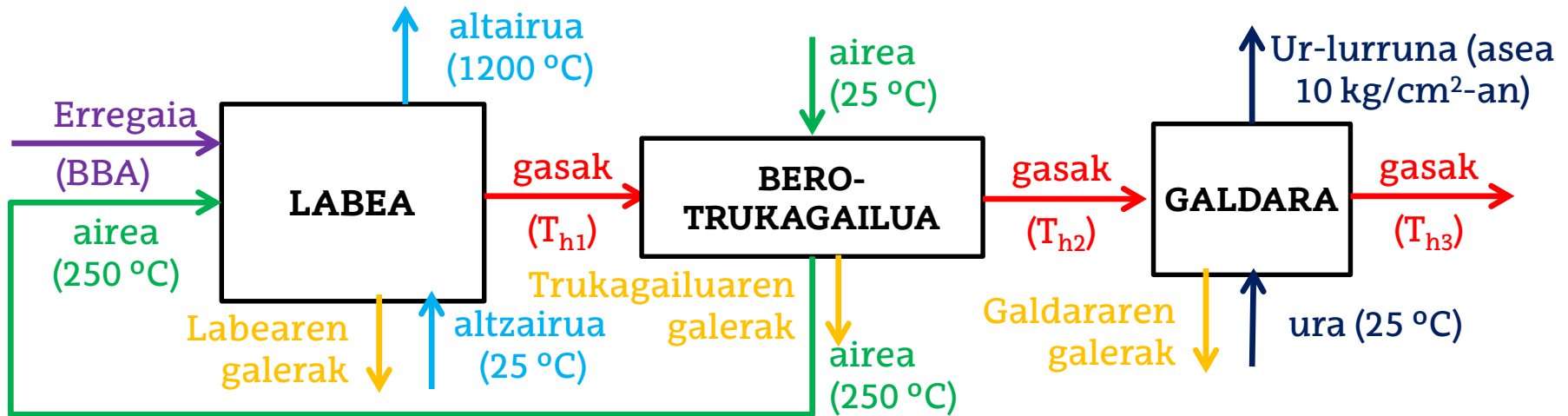
$$Q_{h2} = 5815 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (IV)

b) Etekin termikoa: labea, bero-trukagailua eta galdara

Prozesuaren bero-fluxuaren diagrama:



Galdararen balantze termikoa (1 m³N gas, uraren bero-ekarpena 25 °C-an mesprezitzen da):

$$Q_{h2} = Q_v + Q_{h3} + P_c$$

Errekuntza-gasak ondoko tenperaturaraino hozten dira: $T_{ihintz} + 200 \text{ °C} = 53 + 200 = 253 \text{ °C}$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (V)

Errekuntza-gasen beroa galdararen irteeran:

$$Q_{h3} = V_R \cdot C_h(T_{h3}) \cdot T_{h3} = 16,38 [0,32 + 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 253] \cdot 253 = 1359 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Errekuntza-gasek emandako beroaren % 85a aprobetxatzen da. Beraz, galdararen galerak errekuntza-gasek emandako beroaren % 15a da:

$$P_c = 0,15 \cdot [Q_{h2} - Q_{h3}] = 0,15 \cdot (5815 - 1359) = 668 \text{ kcal/m}^3\text{N}$$

Galdararen balantze termikoan ordezkatzuz, ezezagun bakarria ur-lurrinari emandako beroa da: $Q_v = 3788 \text{ kcal/m}^3\text{N}$

Ekoiztutako ur-lurrunaren kantitatea:

Ur-lurrun asearen entalpia 10 kg/cm^2 -an 664 kcal/kg ur-lurrun da:

$$Q_v = m_v H_v$$

$$3788 \text{ kcal/m}^3\text{N} = m_v 664 \text{ kcal/kg ur-lurrun} \longrightarrow m_v = 5,70 \text{ kg ur-lurrun/m}^3\text{N}$$

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (VI)

c) Etekin termikoa: labea, bero-trukagailua eta galdara

Altzairuari eta ur-lurrunari emandako beroa kontuan hartuz:

$$\eta_t = \frac{Q_p + Q_v}{Q_c} = \frac{2310 + 3788}{9028} = 0,675 \longrightarrow \eta_t = \% 67,5$$

Etekin termikoa nabarmenki handitu da berreskurapen-galdara jartzearekin (% 25,6tik, % 67,5era)

Balantze termikoa

(1 m³N gas)

Sarrerak	Q (kcal)	Irteerak	Q (kcal)	%
Erregaia	9028	Altzairua	2310	22,5
Airea	1216	Galerak labean	722	7,0
		Airea	1216	11,9
		Galerak trukagailuan	181	1,8
		Ur-lurruna	3788	37,0
		Galerak galdaran	668	6,5
		Gasak	1359	13,3
Totala:	10244	Totala:	10244	100,0

BALANTZE TERMIKOEN BURUKETAK

4.3.2. BURUKETA. EBAZPENA (VII)

Sankey diagrama
(1 m³N gas)

