



ارزیابی عملکرد گرمایی و فرصتهای ذخیره‌ی انرژی یک کارخانه سیمان در اندونزی

مترجمان:

مصطفی مهین روستا

شیما پيله ور

استاد راهنما:

آقای دکتر اله وردی

مرجع:

M.G. Rasul, W. Widiyanto, B. Mohanty; "Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia", Applied Thermal Engineering 25 (2005) 2950-2965.

خرداد ۸۹

چکیده

مدلی ساده برای ارزیابی عملکرد گرمایی یک کارخانه‌ی سیمان، جهت بهبود بهره‌وری کارخانه ارائه می‌شود. مدل بر اساس موازنه‌ی جرم، انرژی و آگزرژی توسعه می‌یابد و برای صنعت سیمان پرتلند در اندونزی به کار می‌رود. داده‌های به دست آمده از صنعت نشان می‌دهد که بازدهی عمل پخت و بازدهی قانون دوم ترمودینامیک برای سامانه‌ی کوره به ترتیب $52/07\%$ و $57/07\%$ می‌باشد. بازدهی خنک‌کن و بازدهی بازیافت گرما به ترتیب $47/75\%$ و $51/2\%$ می‌باشد. اتلاف حرارتی محاسبه شده در سامانه‌ی کوره $1/85\%$ و برای سامانه‌ی خنک‌کن 19% است. اتلاف در خنک‌کن به طور عمده به علت اتلاف همرفتی و تشعشعی از خنک‌کن عایق نشده می‌باشد. بازگشت‌ناپذیری سامانه در حدود 20% است که به علت تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی می‌باشد. فرصت‌های ذخیره‌ی انرژی گرمایی شناسایی شدند. این تحقیق نشان می‌دهد که از طریق جایگزین کردن نفت- دیزل با گرمای اتلافی بازیابی شده از خروجی کوره و خروجی خنک‌کن برای خشک کردن مواد خام و سوخت، و پیش گرم کردن هوای احتراق، کارخانه‌ی سیمان اندونزی می‌تواند در حدود $10^5 \times 264 / 1$ دلار در هر سال صرفه‌جویی کند.

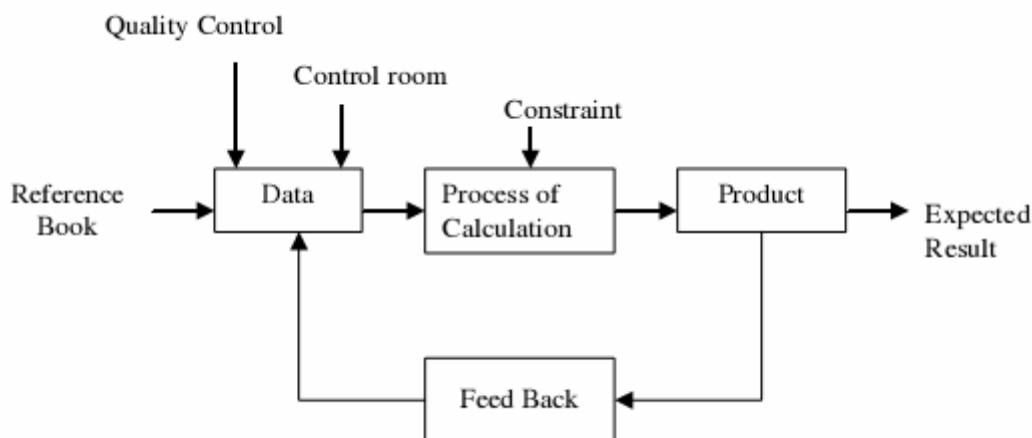
فهرست علائم

(kg)	هوای اولیه‌ی ورودی به ازای یک کیلوگرم کلینکر	A_1
(Nm ³)	حجم هوای ثانویه به ازای یک کیلوگرم کلینکر	A_2
(Nm ³)	حجم هوای ثالثیه به ازای یک کیلوگرم کلینکر	A_3
(kg)	جرم هوای خنک‌کننده به ازای یک کیلوگرم کلینکر	A_c
(Nm ³)	حجم گاز خروجی از خنک‌کن	A_s
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی هوا	C_a
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی دی‌اکسیدکربن	C_{CO_2}
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی غبار	C_d
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی سوخت	C_f
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی مواد خام	C_m
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی کلینکر	C_{cl}
(kJ/kg K)	گرمای ویژه‌ی بخار	C_{steam}
(kJ/kg)	آنتالپی	H
(kJ/kg)	ارزش کالری پایین‌تر	LCV
(t/h)	تولید کلینکر در ساعت	m_{cl}
(kJ/kg)	ارزش حرارتی خالص	NHV
(kW)	نرخ انتقال حرارت از کوره	Q
(kJ)	گرمای نهان آب	r
(kJ/kg K)	آنتروپی	S
(°C)	دمای مواد خام ورودی	T_2
(°C)	دمای ورودی هوای اولیه	T_3
(°C)	دمای ورودی هوای خنک‌کن	T_4
(°C)	دمای کلینکر تولیدی	T_5
(°C)	دمای خروجی هوای خنک‌کننده	T_6
(°C)	دمای گاز خروجی از کوره	T_7
(°C)	دمای متوسط سطح کوره	T_8
(°C)	دمای محیط	T_a
(°C)	دمای هوای اولیه‌ی پیش‌گرم شده	T_{a1}
(°C)	دمای هوای ثانویه	T_{a2}
(°C)	دمای هوای ثالثیه	T_{a3}
(°C)	دمای هوای پیش‌گرم شده	T_{ac}

$(^{\circ}C)$	دمای کلینکر در ورودی خنک‌کن	T_{cl1}
$(^{\circ}C)$	دمای کلینکر در خروجی خنک‌کن	T_{cl2}
$(^{\circ}C)$	دمای سوخت	T_f
$(^{\circ}C)$	دمای گاز خروجی از پیش‌گرمکن سیکلونی	T_g
$(^{\circ}C)$	دمای سطح کوره	T_{ks}
$(^{\circ}C)$	دمای گاز خروجی از خنک‌کن	T_s
$(^{\circ}C)$	دمای آب	T_w
$(^{\circ}C)$	دمای مرجع	T_0
(kg)	جرم دی‌اکسیدکربن	w_{CO_2}
(kg)	جرم غبار پخش شده	w_d
(kg)	مصرف سوخت به ازای یک کیلوگرم کلینکر	w_f
(kg)	جرم خوراک خام خشک به ازای یک کیلوگرم کلینکر	w_m
(/.)	محتوای رطوبت خوراک خام	w_r
(kg)	جرم بخار حاصل از کائولن	w_{steam}
(/.)	درصد وزنی آب در سوخت	W
(-)	جزء مولی در هر کیلوگرم سوخت	X
(kJ)	گرمای تبخیر	Z

سیمان یک صنعت به شدت مصرف کننده انرژی می باشد که انرژی در حدود ۴۰٪-۳۰٪ هزینه تولید را به خود اختصاص می دهد [۱]. مصرف بالای انرژی، این بخش را در یک وضعیت مهم از نقطه نظر اجتماعی- اقتصادی قرار می دهد. بدون شک انرژی یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی عملکرد گرمایی هر کارخانه سیمان می باشد. بهسازی بازدهی انرژی در صنعت سیمان، یک موضوع مهم پژوهشی می باشد [۲-۴]. یک تحلیل در مورد عملکرد گرمایی بایستی انجام شود تا به اهداف اصلی رسید که مانند حداکثر کردن تولید کارخانه، حداقل کردن موادخام، حداقل کردن مصرف انرژی، و بهبود عملکرد در بار جزئی می باشد [۵].

قیدها و محدودیتها مانند کیفیت محصولات و سوخت و نکه داشتن دمای گاز خروجی از کوره در یک سطح مشخص، برای رسیدن به این اهداف باید لحاظ شود [۶]. کیفیت محصول به پارامترهای مختلفی مانند کیفیت مواد خام و زغال سنگ، میزان احتراق هوا و سامانه ی سرد کردن هوا و غیره بستگی دارد [۷]. می توان از طریق بهینه سازی مصرف انرژی کارخانه به این اهداف رسید. ضروری است تا ابزاری برای تحلیل انرژی کلی کارخانه بر حسب زمان واقعی توسعه داده شود. می توان از طریق لحاظ کردن سامانه ی کوره به عنوان یک "جعبه سیاه" و با به کار بردن مفهوم مدل ورودی-خروجی با استفاده از قانون اول و دوم ترمودینامیک به این هدف رسید. با به دست آوردن داده های مورد نیاز از حسگرهای نصب شده در نقطه ی خاصی در کوره و لحاظ کردن واکنشهای شیمیایی مختلف و جهت جریانهای انرژی، می توان اتلافهای مختلف انرژی گرمایی و کیفیت محصول را تخمین زد. علاوه بر استفاده ی بهینه از انرژی برای عملیات کارخانه، به جنبه ی اقتصادی نیز که به سود بالاتر برای کارخانه و سود کلی برای کشور می انجامد باید توجه کرد. برنامه تحلیل عملکرد گرمایی می تواند در یک میکرو کامپیوتر نصب شود و الگوریتمهای بازگشتی می تواند برای کنترل پارامترهای عملیاتی مانند نرخ تهیه ی زغال سنگ، مقدار هوای اولیه و ثانویه، شدت تزریق مواد خام، و غیره به کار رود [۸]. اساس تحلیل عملکرد گرمایی در هر کارخانه سیمان، حتی در هر صنعت فرآیندی، می تواند از طریق نمودار نشان داده شده در شکل (۱) ارائه شود.



شکل (۱) نمودار اساس تحلیل عملکرد گرمایی.

صنایع فرآیندی باید تنوعی از معیارهای ذخیره‌ی انرژی و سامانه‌های بازیافت انرژی را برای رسیدن به سطوح بالاتر بازدهی انرژی تعریف کند. می‌توان از طریق به کار بردن سامانه‌های بازیافت انرژی به این هدف دست یافت [۹-۱۲]. توسعه‌ی سامانه‌های بازیابی انرژی در صنعت مهم است و نیازمند جایگزینی فرآیندهای صنعتی متداول با ساختار پیوسته می‌باشد. این توسعه در برخی از کشورهای توسعه یافته به منظور ذخیره‌ی انرژی علاوه بر کنترل آلودگی انجام شده است. اگرچه، این رویکرد در کشورهای در حال توسعه علی‌رغم نیازشان به ذخیره‌ی انرژی و کنترل آلودگی صنعتی آنها کاملاً تعریف نشده یا هنوز اجرا نشده است.

این مقاله یک مدل ساده را برای ارزیابی عملکرد گرمایی یک کارخانه سیمان ارائه می‌دهد. مدل، براساس موازنه‌ی جرم، انرژی و انرژی با گذر از اصول قوانین اول و دوم ترمودینامیک توسعه می‌یابد. فرصت‌های ذخیره‌ی انرژی گرمایی نیز بررسی می‌شوند. برخی از اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در سطوح دولت، صنعت و کارخانه انجام شود تا بازدهی انرژی کارخانه‌ی موردنظر را افزایش دهد. این مطالعه مقدار صرفه‌جویی مالی را که از طریق جایگزینی نفت- دیزل صنعتی (IDO¹) با گرمای اتلافی بازیابی شده از خروجی کوره و خنک‌کن در کارخانه سیمان انجام می‌شود، معین می‌کند.

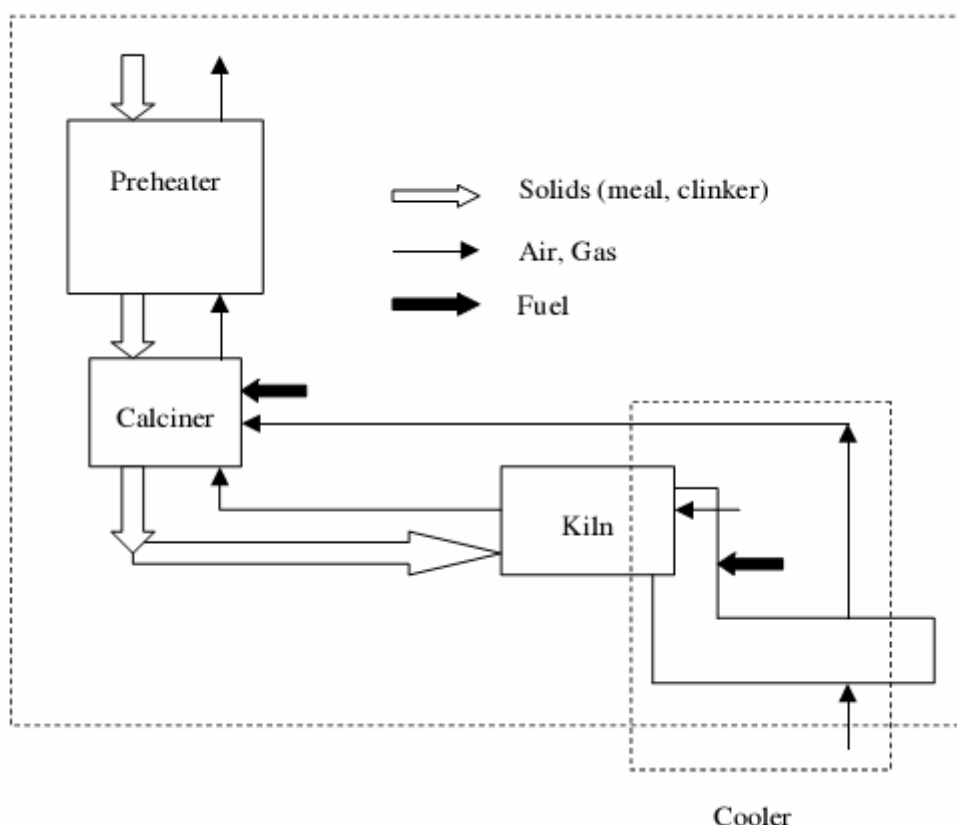
۲- فرآیند تولید سیمان و دستگاه‌ها

فرآیند کلیدی در تولید سیمان، عمل پخت مواد آسیاب شده در یک کوره‌ی دوار است. تولید کلینکر در چهار مرحله یعنی پیش‌گرم کردن سیکلونی، پیش‌کلسیناسیون، پخت و خنک کردن اتفاق می‌افتد.

سامانه‌ی کوره که برای مدل‌سازی لحاظ می‌شود، در شکل (۲) نشان داده شده است. خشک کردن مواد خام، پیش‌گرم کردن و بخشی از کلسیناسیون مواد خام در پیش‌گرم‌کن سیکلونی انجام می‌شود. با این حال، گرمای موردنیاز برای فرآیند پخت، توسط مشعل سوخت تولید می‌شود.

1-Industrial Diesel Oil

پیش‌گرمکن سیکلونی بین گازهای اتلافی کوره و مواد خام فقط به عنوان مبدل حرارتی عمل می‌کند. کربن‌زدایی ذرات مواد خام در کلساینر انجام می‌شود. کربنی شدن^۱ به دمای گاز، زمان نگهداری و یکنواختی اندازه‌ی ذره بستگی دارد. خوراک کوره و سوخت به طور یکنواخت در جریان گاز پخش می‌شوند و به شدت به گردش درمی‌آیند، طوریکه اختلاط خوبی بین سه جزء مواد خام، اکسیژن و سوخت وجود دارد. واکنش شیمیایی و پخت مخلوط خام سیمان برای تولید کلینکر در کوره‌ی دوار اتفاق می‌افتد.



شکل (۲) نمودار سامانه‌ی کوره‌ی لحاظ شده برای مدل‌سازی.

بیشتر انرژی، بالغ بر ۸۵٪، در فرآیند تولید کلینکر در کوره مصرف می‌شود [۱]. چهار نوع خنک‌کن کلینکر در صنعت سیمان وجود دارد که عبارتند از: خنک‌کن دوار، خنک‌کن سیاره‌ای^۲، خنک‌کن مشبک^۳ و خنک‌کن شفت. در این مدل، خنک‌کن مشبک برای خنک کردن کلینکر استفاده می‌شود. سپس کلینکر خنک شده همراه با گچ و اجزای دیگر، آسیاب شده و سیمان تولید می‌شود. در حدود ۱/۷ - ۱/۵ تن مواد خام برای تولید ۱ تن سیمان موردنیاز است که به نوع آسیاب بستگی دارد [۲، ۱۳].

- 1-Carbonation
- 2-Planetary
- 3-Grate

۳- توسعه‌ی مدل

موازنه‌ی گرما برای هر سامانه‌ای می‌تواند اطلاعات مفیدی را از عملکرد حرارتی بیان کند و نشان می‌دهد که حرارت تولید شده در کجا و چگونه مصرف می‌شود. برای سهولت انجام محاسبات جرم، انرژی و انرژی برای به کار بردن اینها برای کنترل زمان واقعی سامانه، یک میکروکامپیوتر مجهز به نرم‌افزار صفحه گسترده‌ی استاندارد به کار گرفته شد. با ملاحظه‌ی رابطه‌ی زیر:

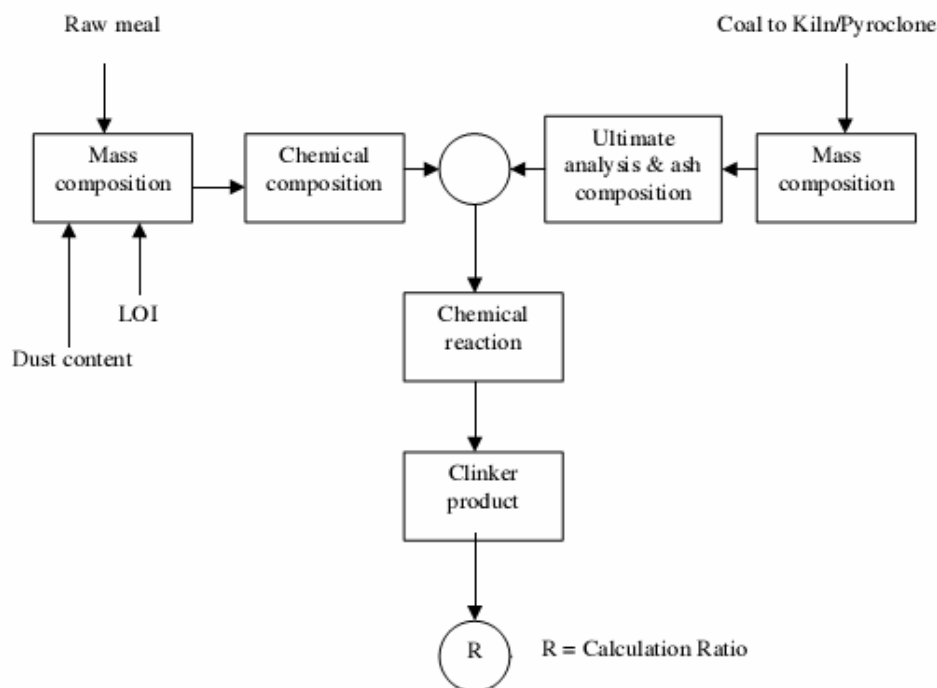
$$\text{Heat Input} = \text{heat output} + \text{accumulated loss}$$

قسمتهای ورودی و خروجی بوسیله‌ی جهت جریانها مشخص می‌شود؛ طوریکه جهت جریان به سمت داخل مرز معادل با ورودی و به سمت خارج مرز معادل با خروجی است. گرمای تبدیل، در مرز روی می‌دهد و اثر خالص به عنوان معیار استفاده می‌شود؛ طوریکه واکنش گرمازا معادل با ورودی و واکنش گرماگیر معادل با خروجی است. موازنه بر اساس عاری از LOI^1 انجام می‌شود زیرا هیچ موازنه‌ای برای کل مقدار شامل LOI در زمانیکه ورودی جرم به گاز تبدیل می‌شود نمی‌تواند انجام شود. موازنه‌های جرم، انرژی و انرژی به صورت زیر هستند:

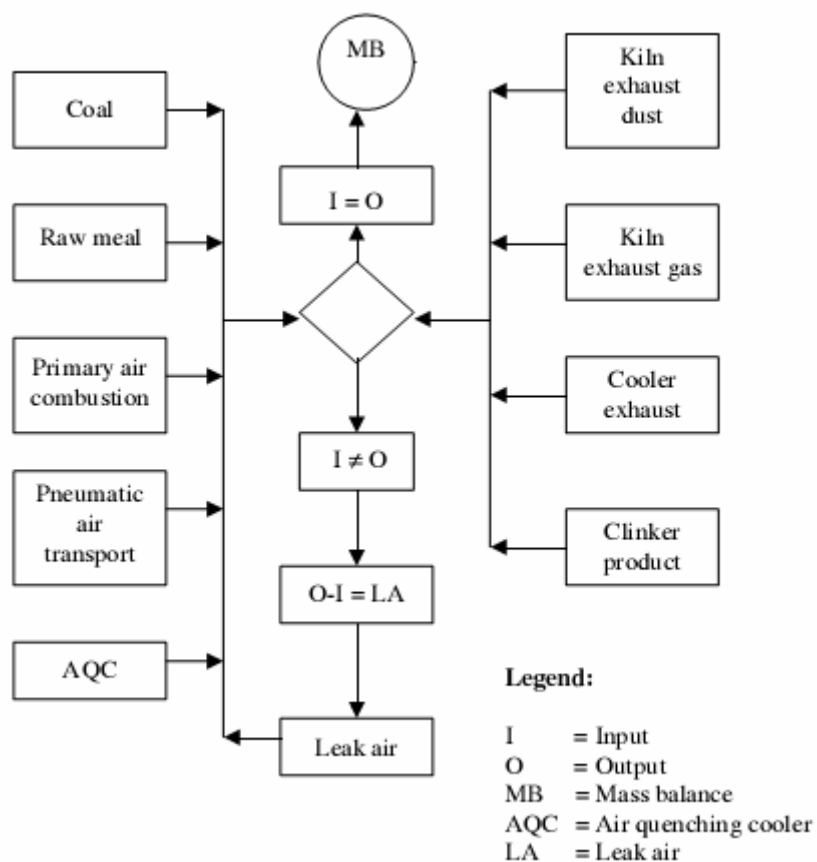
۳-۱- موازنه‌ی جرم

موازنه‌ی جرم برای محصول کلینکر و در طول مرز سامانه‌ی کوره انجام می‌شود که شامل پیش‌گرمکن، کوره و خنک‌کن می‌باشد و در شکل (۲) مشخص است. میزان نشتی هوا از اختلاف جرم ورودی و خروجی تخمین زده می‌شود. داده‌های ورودی یعنی ترکیب مواد خام، تجزیه‌ی نهایی سوخت، میزان غبار موجود در گاز خروجی، LOI ، ترکیب گاز خروجی در پیش‌گرمکن سیکلونی برای انجام موازنه‌ی جرم استفاده شدند. شکل‌های (۳) و (۴)، نمودارهای جریانی هستند که اساس تولید کلینکر و محاسبات موازنه‌ی جرم را نشان می‌دهند.

1-Loss Of Ignition



شکل (۳) نمودار محاسبه‌ی تولید کلینکر.



شکل (۴) نمودار نشان دهنده‌ی اساس موازنه‌ی جرم.

۲-۳- موازنه‌ی انرژی

موازنه‌ی انرژی برای سامانه‌ی کوره و سامانه‌ی خنک‌کن به طور جداگانه انجام می‌شود.

۳-۲-۱- سامانه‌ی کوره

به علت اینکه تخمین دقیق درصد واکنش شیمیایی کامل شده قبل از ورود مواد خام به کوره، مشکل می‌باشد؛ پیش‌گرمکن و خنک‌کن برای موازنه‌ی انرژی با هم در نظر گرفته شدند: معادله‌ی موازنه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Q_{ik} = Q_{ok} + L_k$$

که Q_{ik} گرمای ورودی به سامانه‌ی کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر، Q_{ok} گرمای خروجی از سامانه کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر و L_k اتلاف از سامانه‌ی کوره به ازای هر کیلوگرم کلینکر می‌باشد. گرماهای ورودی به سامانه کوره را می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد:

جدول (۱) گرماهای ورودی به سامانه‌ی کوره.

نمادها	توضیح	فرمول استفاده شده	واحدها
Q_1	گرمای احتراق زغال سنگ	$w_f.LCV$	kJ/kg
Q_2	گرمای محسوس زغال سنگ	$w_f.C_f.(T_f - T_a)$	kJ/kg
Q_3	گرمای محسوس مواد خام خشک شده	$w_m.C_f.(T_m - T_a)$	kJ/kg
Q_4	گرمای محسوس رطوبت در مواد خام	$w_r.(T_m - T_a)$	kJ/kg
Q_5	گرمای محسوس هوای اولیه	$A_1.C_a.(T_{a1} - T_a)$	kJ/kg
Q_6	گرمای محسوس هوای خنک‌کننده	$A_c.C_a.(T_{ac} - T_a)$	kJ/kg

گرمای ورودی به صورت زیر است:

$$Q_{ik} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

توضیح همه‌ی Q ها در جدول (۱) آمده است.

گرمای خروجی به شکل زیر می‌باشد:

$$Q_{ok} = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} + Q_{13}$$

توضیح همه‌ی Q ها در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) گرماهای خروجی از سامانه‌ی کوره.

نمادها	توضیح	فرمول استفاده شده	واحدها
Q_7	گرمای محسوس مواد خام برای گرمادهی، واکنش تخریب، تشکیل کلینکر، غیره (جدول (۳))	موجود در جدول (۳)	kJ/kg
Q_8	گرمای محسوس کلینکر در خروجی خنک‌کن	$C_{cl} \cdot (T_{cl2} - T_a)$	kJ/kg
Q_9	گرمای محسوس گاز خروجی خنک‌کن	$A_s \cdot C_a \cdot (T_s - T_a)$	kJ/kg
Q_{10}	گرمای نهان رطوبت در مواد خام	$w_r \cdot r$	kJ/kg
Q_{11}	گرمای محسوس گاز خروجی از پیش‌گرمکن سیکلونی	$1/24(w_r + w_{steam})C_{steam}(T_g - T_a) + w_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(T_g - T_a)$	kJ/kg
Q_{12}	گرمای محسوس غبار خروجی از کوره	$C_d \cdot (T_g - T_a) \cdot w_d$	kJ/kg
Q_{13}	اتلافهای همرفتی و تشعشع	$q / \{m_{cl}(T_{ks} - T_a)\}$	kJ/kg

$$Q_7 = Q_a + Q_b + Q_c - Q_d - Q_e - Q_f$$

جزئیات Q_7 در جدول (۳) آمده است.

بازدهی پخت در سامانه‌ی کوره می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\eta_{burning} = \frac{(Q_7 - Q_4)}{(Q_1 + Q_2)}$$

جدول (۳) جزئیات Q_7 .

نمادها	توضیح	فرمول استفاده شده	واحدها
Q_a	گرمای محسوس مواد خام برای گرمادهی تا $900^\circ C$	$w_m \times C_m \times 900$	kJ/kg
Q_b	گرمای برای واکنش تخریب $MgCO_3, CaCO_3$ و کائولن	$714(CaO) + 588(MgO) + 564(Al_2O_3)$	kJ/kg
Q_c	گرمای محسوس مواد خام برای گرمادهی از $900^\circ C$ تا $1450^\circ C$	$(1/11 \times 1450) - (0/98 \times 900)$	kJ/kg
Q_d	گرمای تشکیل کلینکر	$418/68$	kJ/kg
Q_e	گرمای محسوس CO_2 و بخار در $900^\circ C$	$187(CaO) + 262(MgO) + 159(Al_2O_3)$	kJ/kg
Q_f	گرمای محسوس هوای کلینکر در $1450^\circ C$	$1/11 \times 1450$	kJ/kg

توجه: گرمای ویژه‌ی کلینکر در $900^\circ C$ برابر $0/98 \text{ kJ/kg}^\circ C$ و در $1450^\circ C$ برابر $1/11 \text{ kJ/kg}^\circ C$ است.

۳-۲-۲- سامانه‌ی خنک‌کن

برای سامانه‌ی خنک‌کن به طور جداگانه موازنه‌ی انرژی درنظر گرفته می‌شود تا بازدهی خنک‌کن و مقدار انرژی که می‌تواند از خنک‌کن بازیابی شود برآورد شود. گرمای ورودی به خنک‌کن به صورت زیر است:

$$Q_{ic} = Q_h + L_6$$

که $Q_h = C_{cl} \cdot (T_{cll} - T_a)$ گرمای محسوس کلینکر از کوره به خنک‌کن بر حسب kJ/kg می‌باشد. گرمای خروجی از خنک‌کن طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{oc} = Q_{pk} + Q_{pc} + Q_8 + Q_9$$

که Q_{pk} گرمای بازیافتی از هوای ثانویه کوره و Q_{pc} گرمای بازیافتی از هوای ثالثیه پیروکلون^۱ از خنک‌کن بر حسب kJ/kg می‌باشد:

$$Q_{pk} = A_2 \cdot C_a \cdot (T_{a2} - T_a)$$

$$Q_{pc} = A_3 \cdot C_a \cdot (T_{a3} - T_a)$$

راندمان خنک‌کن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{cooler} = \frac{A-B}{A} = \frac{Q_h + Q_p - Q_6}{Q_h}$$

که A محتوای گرمای کلینکر از کوره به خنک‌کن و B جمع اتلافهای گرما در خنک‌کن می‌باشد. بازدهی بازیافت هوای ثانویه و ثالثیه می‌تواند به صورت زیر ارائه شود:

$$\eta_{cooler} = \frac{Q_p}{Q_h + Q_6}$$

۳-۳- موازنه‌ی انرژی

حداکثر کار مفیدی که می‌تواند از یک سامانه در حالت مشخص (یعنی فشار P_1 و دمای T_1) به دست آید، زمانی است که سامانه در یک محیط معین (یعنی فشار مرجع P_0 و دمای مرجع T_0) عمل کند که انرژی نامیده می‌شود. منابع ورودی انرژی به سامانه‌ی کوره عبارت است از: زغال‌سنگ، مواد خام، هوای اولیه و هوای خنک‌کننده. منابع خروجی انرژی نیز شامل انرژی کلینکر، خروجی خنک‌کن، خروج کوره، انتقال حرارت در سامانه‌ی کوره و واکنشهای شیمیایی می‌باشد.

این منابع به ترتیب در جداول (۴) و (۵) تعریف شده‌اند.

جدول (۴) انرژی ورودی به سامانه‌ی کوره.

واحدها	فرمول استفاده شده	توضیح	نمادها
kJ/kg	NHV+Z.W	انرژی شیمیایی زغال‌سنگ	a_1
kJ/kg	$X_i \{ (H_{T_2} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_2} - S_{T_0}) \}$	انرژی خوراک خام ورودی	a_2
kJ/kg	$X_i \{ (H_{T_3} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_3} - S_{T_0}) \}$	انرژی هوای اولیه‌ی ورودی	a_3
kJ/kg	$X_i \{ (H_{T_4} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_4} - S_{T_0}) \}$	انرژی هوای خنک‌کننده برای خنک‌کن	a_4

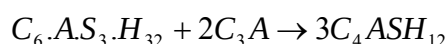
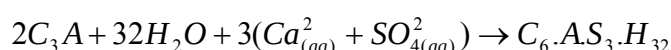
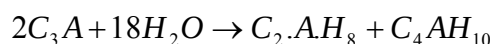
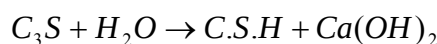
جدول (۵) اگزرژی خروجی از سامانه‌ی کوره.

نمادها	توضیح	فرمول استفاده شده	واحدها
a_5	اگزرژی کلینکر	$X_i \{ (H_{T_5} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_5} - S_{T_0}) \}$	kJ/kg
a_6	اگزرژی خروجی از خنک‌کن	$X_i \{ (H_{T_6} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_6} - S_{T_0}) \}$	kJ/kg
a_7	اگزرژی خروجی از کوره	$X_i \{ (H_{T_7} - H_{T_0}) - T_0 (S_{T_7} - S_{T_0}) \}$	kJ/kg
a_8	اگزرژی انتقال حرارت در سطح کوره	$(1 - T_0 / T_8) \cdot Q_{13}$	kJ/kg
a_9	اگزرژی به علت واکنش شیمیایی	* توضیح در زیر	kJ/kg

* خوراک خام در سامانه‌های پیش‌گرمکن گرم می‌شود و واکنش تجزیه‌ی کربنات کلسیم به اکسید شروع می‌شود،



خوراک خام در طول کوره پیش‌می‌رود و گرم می‌شود و واکنش بین CaO و عناصر دیگر انجام می‌شود تا اجزای تشکیل دهنده‌ی کلینکر در دمای $1450^\circ C$ تشکیل شود. اجزای اصلی تشکیل دهنده‌ی کلینکر، آلایت (C_3S) یا بلیت ($3CaO \cdot SiO_2$)، بلیت (C_2S یا $2CaO \cdot SiO_2$)، آلومینات (C_3A یا $3CaO \cdot Al_2O_3$) و فریت (C_4AF) یا $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ می‌باشند. واکنش‌های اصلی فازهای کلینکر، که گرمازا هستند مطابق زیر هستند [۱۵،۱۴]:



در اینجا، $C.S.H$ یک هیدروژل آمورف است که ترکیب متغیری بر حسب نسبت Ca/Si و H_2O/SiO_2 دارد. همچنین باید توجه کرد که C_4AF واکنشهای مشابهی با C_3A دارد. یعنی $C_6(A,F)S_3H_{32}$ تولید می‌کند. مقدار کار مفید (کار خالص) که از این واکنشهای شیمیایی به دست می‌آید به عنوان "اگزرژی به علت واکنشهای شیمیایی" نامیده می‌شود.

عموماً موازنه‌ی اگزرژی سامانه‌ی کوره می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$a_i = a_0 + I$$

که a_i کل اگزرژی ورودی، a_0 کل اگزرژی خروجی و I بازگشت‌ناپذیری کل می‌باشد. همه‌ی اینها بر حسب kJ/kg fuel می‌باشند.

اگزرژی ورودی (جدول (۴)) به صورت زیر است:

$$a_i = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$$

توضیح aها در جدول (۴) آمده است. اگزرژی خروجی (جدول (۵)) به صورت زیر است:

$$a_0 = a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9$$

بازدهی قانون دوم برای تولید کلینکر مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{2nd-law} = \frac{a_5 + a_9}{a_i}$$

۴- کاربرد مدل

مدل برای ارزیابی عملکرد یک کارخانه سیمان پرتلند در اندونزی استفاده شد. سیمان پرتلند محتوی حداقل ۹۵٪ کلینکر می‌باشد، در حالیکه انواع دیگر (سیمانهای مخلوط، پوزولانی و اسلگ^۱) محتوی کلینکر کمتر معمولاً ۶۵٪ می‌باشند [۱]. فرضیات زیر در طول جمع‌آوری داده‌ها در نظر گرفته شد:

- عملیات کارخانه در حالت پایدار است.
- شرط مرزی حول کوره، پیش‌گرمکن سیکلونی و خنک‌کن ثابت است.
- دبی محصول کلینکر با دبی شارژ شده در هر زمانی برابر است.
- موازنه‌های گرما مطابق JIS R030 [۱۶] با یک سری اصلاحات منطقی تحلیل شدند.

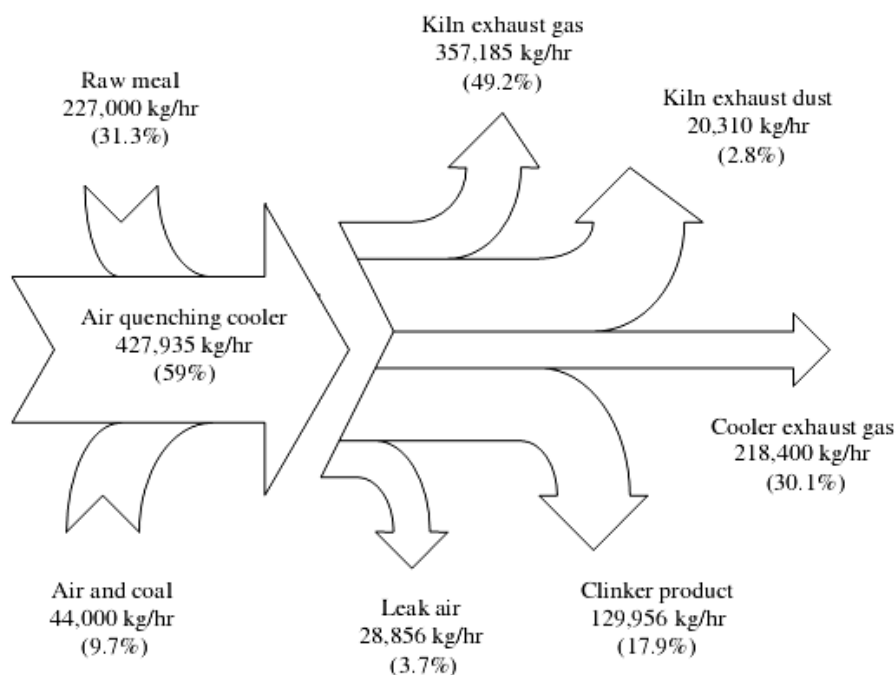
دمای مرجع همان دمای محیط $25^{\circ}C$ است یعنی گرمای محسوس دبی‌های جرمی در $25^{\circ}C$ برابر صفر است. گرمای تبدیل (احتراق، تبخیر، تشکیل) نیز بر اساس دمای مرجع هستند. تمام فرمول‌بندیهای ریاضی فرآیندهای احتراق سوخت بر اساس عملیات حالت پایدار و استوکیومتری کارخانه محاسبه شدند. داده‌های موردنیاز برای تحلیل از منابع زیر به دست آمدند:

- آزمایشگاه کنترل کیفیت (ترکیب خوراک خام، تجزیه‌ی زغال‌سنگ، کیفیت کلینکر، تحلیل احتراق و LOI).
- اتاق کنترل (ترکیب خروجی، تمام دماها و فشارها، و اندازه‌گیری جریان).
- کتابهای مرجع (گرمای نهان و محسوس مواد، خواص ترمودینامیکی و واکنشهای شیمیایی).

محاسبات موازنه‌ی جرم، انرژی و انرژی با استفاده از داده‌های به دست آمده صنعت اندونزی، در زیر بحث می‌شوند.

۴-۱- موازنه‌ی جرم

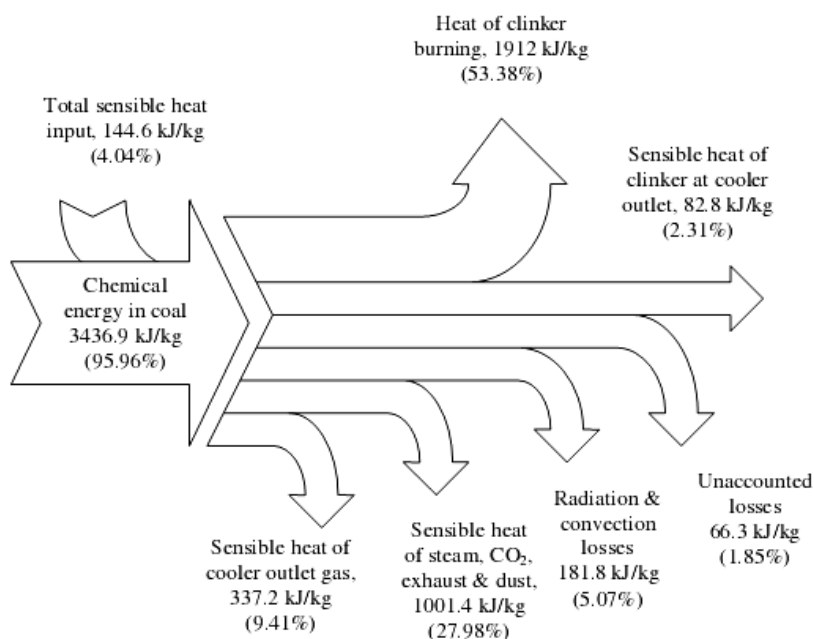
شکل (۵) نمودار دبی جرمی (بر حسب kg/h) سامانه‌ی کوره را نشان می‌دهد. کل جرم ورودی به کوره 698935 kg/h بود که شامل خوراک خام، هوا و زغال‌سنگ است. هوای نشتی به مقدار 26856 kg/h محاسبه شد که تقریباً ۳/۷٪ کل دبی جرمی می‌باشد.



شکل (۵) نمودار دبی جرمی سامانه‌ی کوره.

۲-۴- موازنه‌ی انرژی

شکل (۶) نمودار جریان‌ی انرژی (بر حسب kJ/kg) و همچنین تفکیک مصرف انرژی سامانه‌ی کوره (به $\%$) را نشان می‌دهد. نیاز کارخانه‌ی سیمان به انرژی گرمایی ویژه در حدود kJ/kg-clinker ۳۵۸۱/۴۹ بود که kJ/kg ۳۴۳۶/۹ ($\%۹۶$) گرمای احتراق زغال سنگ و kJ/kg ۱۴۴/۶ ($\%۴$) کل گرمای محسوس بود.

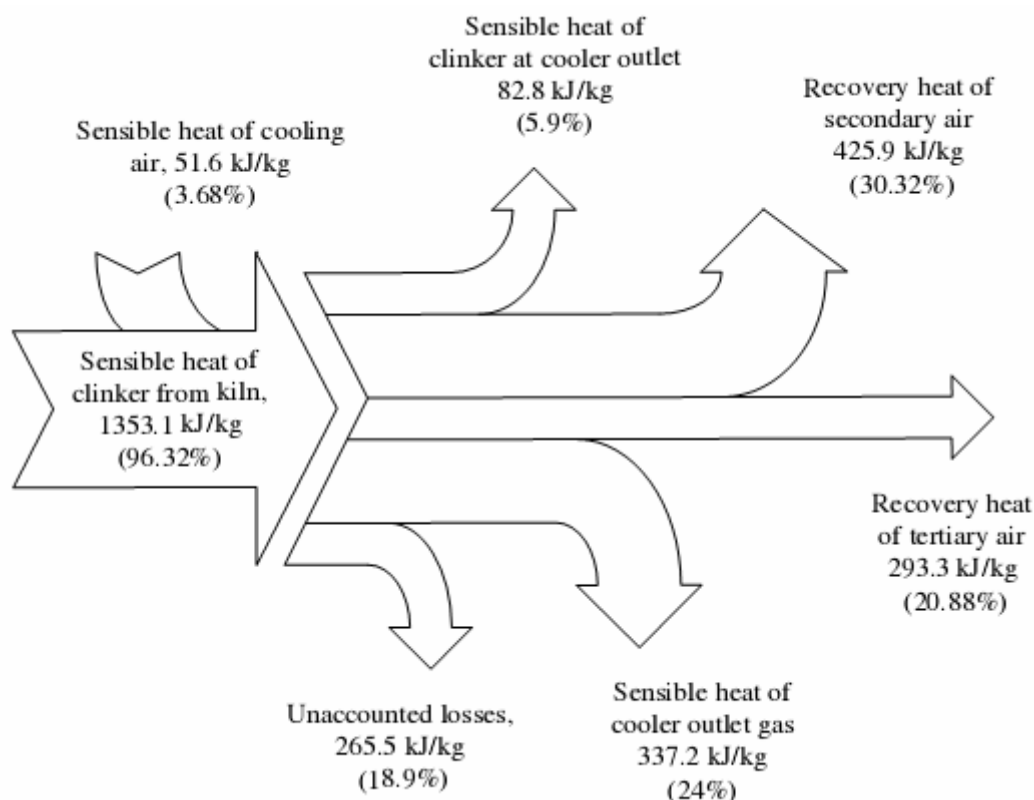


شکل (۶) نمودار جریان انرژی سامانه‌ی کوره.

کل گرمای محسوس شامل $4/96 \text{ kJ/kg}$ گرمای محسوس زغال‌سنگ، $77/57 \text{ kJ/kg}$ گرمای محسوس خوراک خام، $4/27 \text{ kJ/kg}$ گرمای محسوس رطوبت در خوراک خام، $6/2 \text{ kJ/kg}$ گرمای محسوس هوای اولیه و $51/63 \text{ kJ/kg}$ گرمای محسوس هوای خنک‌کننده می‌باشد. اتلاف محاسبه نشده‌ی سامانه‌ی کوره $1/85\%$ بود. حدود 28% ($1001/4 \text{ kJ/kg}$) گرما از طریق هوای خروجی به بیرون دفع می‌شود که گرمای محسوس گاز خروجی از احتراق خود آن $660/3 \text{ kJ/kg}$ می‌باشد؛ که حدود دو سوم گرمای دفع شده است.

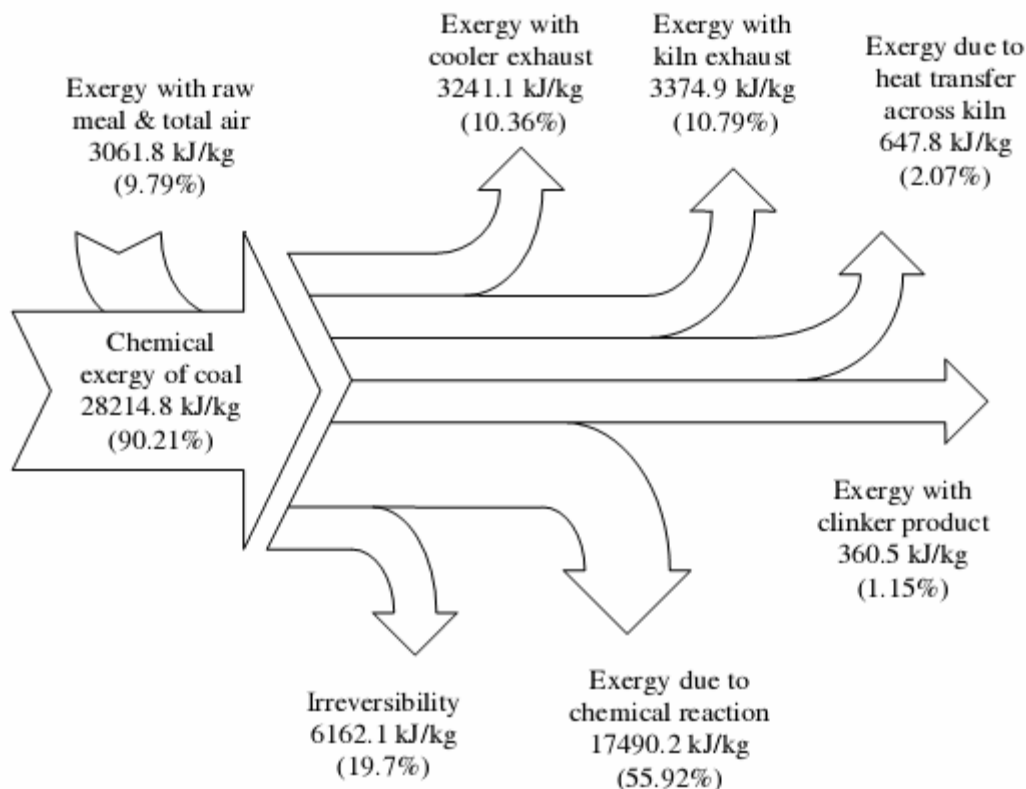
اگرچه، این گرما به طور کامل تلف نمی‌شود؛ از اینرو گاز خروجی با دمای بیش از 300°C می‌تواند برای پیش‌گرم کردن و خشک کردن مواد خام به کار رود و بعد از خنک کردن کلینکر به محیط دفع می‌شود. اتلافها از کوره‌ی عایق شده در حدود 5% است.

شکل (۷) نمودار جریان انرژی سامانه‌ی کوره را نشان می‌دهد. اگرچه، گرمای محسوس کلینکر $1353/1 \text{ kJ/kg}$ است که فقط $425/93 \text{ kJ/kg}$ می‌تواند از هوای ثانویه تزریق شده به کوره و $293/3 \text{ kJ/kg}$ از طریق هوای ثالثیه‌ی تزریق شده به پیروکلون بازیابی شود. اتلاف محاسبه نشده‌ی خنک‌کن نسبتاً بالا و حدود 19% است که به طور عمده به علت اتلافهای همرفتی و تشعشع از خنک‌کن عایق نشده می‌باشد. به عبارت دیگر، اتلاف به علت گرمای محسوس خروجی خنک‌کن 24% است. بازدهی پخت سامانه‌ی کوره $52/07\%$ و بازدهی سامانه‌ی خنک‌کن $47/75\%$ می‌باشد. بازدهی بازیافت گرمای سامانه‌ی خنک‌کن $51/2\%$ می‌باشد.



شکل (۷) نمودار جریان انرژی سامانه‌ی خنک‌کن.

شکل (۸) نمودار جریان انرژی (بر حسب kJ/kg) به همراه تفکیک جریان انرژی (بر حسب $\%$) سامانه‌ی کوره را نشان می‌دهد. منابع ورودی انرژی عبارتند از: زغال سنگ، خوراک خام و هوا. بازدهی قانون دوم و بازگشت‌ناپذیری سامانه به ترتیب 57.07% و 19.70% می‌باشد. اتلاف انرژی در احتراق به علت تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی می‌باشد.



شکل (۸) نمودار جریان انرژی سامانه‌ی کوره.

۵- فرصتهای ذخیره‌ی انرژی

یکی از اهداف ذخیره‌ی انرژی این است که استفاده از انرژی ثانویه را تا حد ممکن گسترش و نیاز به خرید اولیه‌ی انرژی را کاهش دهد. فرصتهای ذخیره در هر صنعت فرآیندی می‌تواند به سه دسته، یعنی، معیارهای کوتاه مدت، معیارهای میان مدت و معیارهای بلند مدت [۱۷] تقسیم شود. این دسته‌ها مختصراً در زیر توضیح داده می‌شوند.

معیارهای کوتاه مدت، تقاضاهای فناوریهایی موجود می‌باشند که عموماً نیاز به سرمایه‌گذاریهای بزرگ ندارند. این بررسیها شامل تمرینهای مدیریتی هستند:

- خاموش کردن موتورها و گرمکن‌هایی که استفاده نمی‌شوند.
- تشویق به فعالیت در مورد حفاظت از منبع انرژی.

- برنامه‌های آموزشی برای تجهیزاتی که انرژی زیادی مصرف می‌کنند.
 - معیارهای میان مدت، شامل گرایش به سمت فناوریهای جدید و پربازده می‌باشد. هدف این مرحله این است که مصرف انرژی و بازیابی را بدون سرمایه‌گذاری قابل ملاحظه‌ای کاهش دهیم. ذخیره‌ی انرژی می‌تواند از طریق بهسازی عملیات و تکنیکهای نگهداری و تعمیر، اطمینان از پیوستگی فرآیند، بهسازی شرایط درون فرآیند انجام شود. در نهایت، بهسازیها در محصول می‌تواند کمک دیگری در ذخیره‌ی انرژی باشد.
 - معیارهای بلند مدت، نیازمند سرمایه‌گذاریهای زیاد و نوآوریهای جدید می‌باشد. این امر شامل سرمایه‌گذاری در اتصالات فرآیند می‌باشد. این مرحله می‌تواند مجموعه‌ای از معیارهای مختلف باشد که در زیر شرح داده می‌شود.
 - مدیریت و پیوستگی دو منبع انرژی، که بهترین مثال آن تولید همزمان گرما و انرژی الکتریکی می‌باشد [۲۲-۱۸].
 - بهینه‌سازی ارتباط بین تجهیزات که به بهره‌وری بهتر از محصولات واسطه و انرژی کمک می‌کند.
 - اتوماسیون متمرکز با اتصالات کامل در کل کارخانه که براساس تشخیص‌های اولیه عملیات واقعی تجهیزات مختلف و الگوریتم بهینه‌سازی توسعه یافته قرار دارد.
 - اصلاحات یا طراحی دوباره‌ی فرآیندها، فناوریهای قدیمی‌تر با فناوریهای جدید جایگزین می‌شوند، که عامل مهمی برای مصرف انرژی ویژه‌ی پایین‌تر می‌باشد.
- در این مطالعه، فقط معیارهای ذخیره‌ی انرژی گرمایی ارائه می‌شود. اساساً تمام جریانهای خروجی از سامانه‌ی کوره می‌تواند پتانسیل بازیابی گرمای اتلافی را داشته باشد. منابع عمده‌ی ذخیره‌ی انرژی می‌تواند شامل گرمای محسوس گاز خروجی از کوره، خنک‌کن، گرمای نهان گازهای خروجی، و گرمای تشعشع کوره و خنک‌کن باشد. گرمای اتلافی بازیافت شده می‌تواند برای خشک کردن مواد خام و زغال‌سنگ و پیش‌گرم کردن هوای احتراق به عنوان هوای ثانویه برای کوره و هوای ثالثیه برای پیروکلون به کار رود.

۵-۱- بازیافت گرما از خروجی کوره

محاسبه‌ی صرفه‌جویی در انرژی و هزینه از طریق بازیافت گرمای اتلافی خروجی از کوره برای خشک کردن مواد خام استفاده شده در خشک‌کن خاکرس و خشک‌کن بشکه‌ای^۱ در جدول (۶) آمده است. کارخانه حدود ۱۴۸۵۸۶ تن خاکرس (خشک شده) و ۱۲۲۱۸۵۷ تن مخلوط مواد خام (خشک شده) در هر سال استفاده می‌کند. بنابراین، مقدار کل گرمای استفاده شده در سال، برای تبخیر آب در خشک‌کن بشکه‌ای و خشک‌کن خاکرس برابر با $10^{11} \times 934$ kJ می‌باشد. قبل از اینکه کارخانه از گرمای اتلافی از کوره استفاده کند، از نفت دیزل صنعتی (IDO) برای خشک کردن استفاده می‌کرد. ویژگیهای IDO به صورت زیر است:

جدول (۶) صرفه‌جویی در انرژی و هزینه از طریق بهره‌برداری از گرمای اتلافی از کوره و خروجی از خنک‌کن.

توضیح	خشک‌کن خاکرس	خشک‌کن بشکه‌ای
محتوای رطوبت ورودی	(حداکثر مقدار) ۱۲/۵٪	۱۲/۵٪
محتوای رطوبت خروجی	۷٪	۷٪
دمای ورودی	۲۰ °C	۲۰ °C
دمای خروجی	۸۰ °C	۸۰ °C
آب تبخیر شده	تن ۸۱۷۵ (۱۲/۷-۷) = ۱۴۸۵۸۶	۶۷۲۰۰ تن
گرمای محسوس آب	$۲/۰۵۴ \times ۱۰^۹$ kJ	$۱/۶۸۸ \times ۱۰^{۱۰}$ kJ
گرمای تبخیر	۲۳۱۵/۳ kJ/kg water	۲۳۱۵/۳ kJ/kg water
گرمای نهان آب	$۱/۸۹۳ \times ۱۰^{۱۰}$ kJ	$۱/۵۵۳ \times ۱۰^{۱۱}$ kJ

با $NHV = ۳/۹۷۷ \times ۱۰^۴$ kJ/kg، $NHV = ۰/۹۸$ kg/l، وزن مخصوص، بنابراین NHV نفت دیزل صنعتی برابر با $۳/۸۹۸ \times ۱۰^۴$ kJ/l می‌شود. در نتیجه، مقدار IDO استفاده شده در خشک‌کن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$۱/۹۳۴ \times ۱۰^{۱۱} \text{ kJ} / ۳/۸۹۸ \times ۱۰^۴ \text{ kJ/l} = ۴۹۶۱۵۱۹ \text{ l}$$

هزینه‌ی IDO در اندونزی ۲۰۰ روپیه در هر لیتر است. بنابراین، صرفه‌جویی مالی می‌تواند در حدود $۹/۹۲۳ \times ۱۰^۸$ روپیه باشد که معادل ۱۱۸۳۴۲ دلار آمریکا در هر سال است که با نرخ تبدیل کنونی USD = ۸۳۸۵ = ۱ روپیه به دست آمده است.

۵-۲- بازیابی گرما از خروجی خنک‌کن

مقدار قابل ملاحظه‌ای گرما در خروجی خنک‌کن اتلاف می‌شود که می‌تواند برای پیش‌گرم کردن هوای اولیه ورودی به سامانه‌ی کوره استفاده شود. داده‌های ورودی به صورت زیر هستند:

- هوای اولیه ورودی به کوره = $۱۶۵ \text{ m}^3 / \text{min}$ در ۴۰°C .
- هوای اولیه ورودی به پیروکلون = $۸۴ \text{ m}^3 / \text{min}$ در ۴۰°C .

گرمای محسوس هوا بدون پیش‌گرم کردن:

$$\text{ظرفیت گرمایی هوا} = ۱/۰ \text{ kJ/kg}$$

$$\text{وزن مخصوص هوا در } ۴۰^\circ \text{C} = ۱/۱۱۲ \text{ kg/m}^3$$

$$\text{دمای ورودی} = ۲۵^\circ \text{C}$$

$$\text{دمای خروجی} = ۴۰^\circ \text{C}$$

گرمای محسوس هوا = $1/983 \times 10^4 \text{ kJ}$

اگر هوای پیش گرم شده استفاده شود، گرمای محسوس افزایش خواهد یافت:

ظرفیت گرمای هوا = $1/0 \text{ kJ/kg}$

وزن مخصوص هوا در $220^\circ \text{C} = 0/73 \text{ kg/m}^3$

دمای ورودی = 25°C

دمای خروجی = 40°C

تعداد روزهای کاری = 330 روز در سال

گرمای محسوس هوا = $7/034 \times 10^4 \text{ kJ}$

تفاوت در گرمای محسوس ورودی برابر با $6/836 \times 10^4 \text{ kJ}$ است. اگر این گرمای محسوس توسط زغال سنگ فراهم شود، با فرض اینکه NHV زغال سنگ برابر با $2/554 \times 10^5 \text{ kJ/kg}$ و قیمت آن برابر با $30 \text{ US\$/ton}$ باشد، صرفه جویی مالی بوسیله کاهش مصرف زغال سنگ در سال برابر با $8030 \text{ US\$}$ خواهد بود.

۶- نتیجه گیری

یک تحلیل از عملکرد گرمایی براساس موازنه‌ی جرم، انرژی و انرژی سامانه‌های کوره و خنک‌کن ارائه شد. بازده‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک سامانه‌ی کوره به ترتیب $52/07\%$ و $57/07\%$ می‌باشد. بازدهی خنک‌کن و بازیافت بازیابی گرما به ترتیب $47/75\%$ و $51/2\%$ است. بازگشت‌ناپذیری سامانه در حدود 20% بود. علت اصلی بازگشت‌ناپذیری فرآیند، تبدیل انرژی شیمیایی سوخت (زغال سنگ) به انرژی گرمایی می‌باشد. تحلیل عملکرد گرمایی مهم است و می‌تواند به عنوان مقدمه‌ای برای رسیدن به اهدافی مانند حداکثر کردن تولید کارخانه، حداقل کردن مواد خام و مصرف انرژی در هر کارخانه سیمان، حتی هر فرآیند یا صنعتی به کار رود.

معیارهای ذخیره‌ی انرژی در کارخانه‌ی مذکور، مشخص می‌باشد، به خصوص در کشورهای در حال توسعه برای: الف) استفاده‌ی بهینه از انرژی در صنعت، ب) کاهش هزینه‌ی انرژی به ازای واحد تولید محصول، و ج) کاهش آلودگی محیط که از طریق صنایع ایجاد شده است. همچنین باید از سامانه‌های بازیافت انرژی اتلافی در طراحی صنایع جدید به منظور حداقل کردن مصرف انرژی، و بهسازی کیفیت محصول کمک گرفته شود. این مطالعه نشان می‌دهد که فقط با جایگزین کردن نفت دیزل صنعتی (IDO) برای خشک کردن مواد خام و زغال سنگ، و پیش گرم کردن هوای احتراق با گرمای بازیافتی از کوره و خروجی خنک‌کن، یک کارخانه سیمان در اندونزی می‌تواند حدود $1/264 \times 10^5 \text{ US\$}$ در سال صرفه جویی مالی کند.

- [1] L. Szabo, I. Hidalgo, J.C. Ciscar, A. Soria, P. Russ, Energy consumption and CO₂ emissions from the world cement industry, European Commission Joint Research Centre, Report EUR 20769 EN, June 2003.
- [2] International Energy Agency, The reduction of greenhouse gas emission from the cement industry, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 1999.
- [3] E. Worell, N. Martin, L. Pryce, Potentials for energy efficiency improvements in the US cement industry, Energy 25 (2000) 1189–1214.
- [4] F. Liu, M. Ross, S. Wang, Energy efficiency of China's cement industry, Energy 20 (7) (1995) 669–689.
- [5] L. Ben-dor, Thermal methods, Advances in cement technology by SN Ghosh, Department of Inorganic and Analytical Chemistry, The Hebrew University of Jerusalem, Israel, 1981.
- [6] K. Yoshida, Thermodynamic analysis of energy flows and its applications to cement industry, Energy Conservation of Cement Industries, University of Tokyo, Japan, 1982.
- [7] O. Labahn, Cement Engineers Handbook, fourth ed., Bauverlag GMNH, 1983.
- [8] D.W. Haspel, High Level Kiln Control, Process Technology of Cement Manufacturing, VDZ, Greenhithe, 1985.
- [9] Japan Iron and Steel Federation, 2003. Available from: <<http://www.jisf.or.jp/energy>>.
- [10] EETD, Energy Efficiency Technical Department Newsletter, Summer 1999.
- [11] A. Shirazi, Potential for implementation of energy saving measures in selected cement factories in Iran, M.Sc. Thesis, University of Flensburg, Germany, March 2002.
- [12] Cement industry handy manual prepared by UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) 1994. Available from: <<http://www.unido.org/userfiles/puffk/cement>>.
- [13] C.A. Hendriks, E. Worell, D. Jager, K. Blok, P. Reimer, Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry, Greenhouse Gas Control Technologies Conference Paper 2000. Available from: <<http://www.ieagreen.org>>.
- [14] W. Widiyanto, Thermal performance modelling of cement industries: a case study in Indonesia, AIT Thesis No. ET-89-16, Bangkok, Thailand, 1989.
- [15] Chemistry of cement. Available from: <<http://www.abdn.ac.uk/chemistry/research/dem/cemhon.doc>>.
- [16] Japanese standard JIS R0303, Heat Balancing Method for Cement Industry, 1979.
- [17] B. Mohanty, J.C. Mora, An overview of rational use of energy in industry, in: Proceedings 6th Asian School on Energy, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1988.
- [18] A.B. Herrera, Techno-economic evaluation of co-generation potential in two manufacturing plants in Philippines, Masters Thesis, Energy Technology Division, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1989.
- [19] Powergen, A power generation company throughout the world, "Plant start-up and engineering support to the power industry, 2003. Available from: <<http://www.pwrgen.com/pwrgen.html>>.
- [20] SEDA, Sustainable energy development authority, New South Wales, Australia, "Renewable energy and co-generation, 2003. Available from: <http://www.seda.nsw.gov.au/ren_cogeneration_body.asp>.
- [21] T.D. Baker, Co-generation for resort hotel, ASHRAE Transaction (Part B1) 92 (1986) 318–329.
- [22] D.C. Pedreya, A micro-computer version of a large mainframe program for use in co-generation analysis, ASHRAE Transaction 94 (1988) 1617–1625.