KILN CONTROL AND OPERATION

راهبری و کنترل کوره

تهیه کننده : شیرزاد احمدیان ، مدیر تولید کارخانه سیمان غرب

مهر ۱۴۰۴

KILN CONTROL AND OPERATION
کنترل کوره و راهبری

Stefan Gross

1. INTRODUCTION مقدمه **4**

2. CONTROL PARAMETERS پارامترهای کنترل **5**

2.1 Location of the control parameters and variables محل پارامترها و متغیرهای کنترل 5

2.1.1 Wet kiln کوره مرطوب 5

2.1.2 Lepol kiln کوره لپول 6

2.1.3 Preheater kiln کوره پری هیتری 6

2.1.4 Precalciner kiln کوره پری کلساینری 7

2.2 Burning Zone Temperature (BZT) دمای منطقه پخت 7

2.2.1 Pyrometer reading خواندن پیرومتر 8

2.2.2 NOx of the exhaust gases ناکس گازهای خروجی 8

2.2.3 Kiln torque گشتاور کوره 9

2.2.4 Secondary Air Temperature (SAT) or Tertiary Air Temperature (TAT) 10

2.2.5 Position of the dark feed (valid only for pure natural gas flames) 10

موقعیت خوراک تاریک (فقط برای شعله‌های گاز طبیعی خالص معتبر است)

2.3 Back End Temperature (BET) دمای ته کوره 11

2.4 Oxygen control کنترل اکسیژن 12

3. CONTROL VARIABLES متغیرهای کنترل **13**

3.1 Fuel rate to the kiln نرخ سوخت در کوره 13

3.2 Feed rate to the kiln نرخ خوراک در کوره 13

3.3 Kiln draft مکش کوره 14

3.4 Kiln speed سرعت کوره 14

4. CONTROL STRATEGY استراتژی کنترل **14**

4.1 General remarks نکات کلی 14

4.2 Possible kiln parameter conditions شرایط احتمالی پارامترهای کوره 14

4.3 Decision tree درخت تصمیم 16

4.4 Counteractions واکنشهای متقابل 16

5. PRECALCINER CONTROL کنترل پری کلساینر **21**

5.1 Calcination temperature دمای کلسیناسیون 21
5.2 Oxygen control کنترل اکسیژن 22
5.3 Other control parameters دیگر پارامترهای کنترل 23
6. GRATE COOLER CONTROL کنترل گریت کولر 23
6.1 Bed height and grate speed ارتفاع بستر و سرعت گریت 23
6.2 Subordinate control loops حلقه های کنترل فرعی 23
6.2.1 Cooler air flow جریان هوای کولر 24
6.2.2 Kiln hood pressure فشار هود کوره 25
7. LEPOL GRATE CONTROL کنترل گریت لپول 26
7.1 Subordinary control loops حلقه های کنترل فرعی 26
7.1.1 Pressure control کنترل فشار 26
7.1.2 Traveling grate speed control کنترل سرعت گریت متحرک 27
7.1.3 Pelletizer control کنترل پلت ساز 27
8. PROCESS PROBLEMS AND KILN UPSET CONDITIONS 28
مشکلات فرایندی و شرایط نامطلوب کوره
8.1 Cycling سیکلی شدن 28
8.2 Coating Collapse فروپاشی کوتینگ 29
8.3 Ring break out شکستن رینگ 29
8.3.1 Clinker ring break out شکستن رینگ کلینکری 29
8.3.2 Sinter, middle, meal and mud rings زینتر ، میانی ،رینگهای خام و خاکی 30
8.4 Hot meal rush (avalanche) هجوم مواد داغ (بهمن مذاب) 30
8.5 Red spot on the kiln shell لکه قرمز روی بدنه کوره 30
8.6 Loss of kiln feed قطع خوراک کوره 31
9. STARTUP AND SHUTDOWN PROCEDURES مراحل راه اندازی و متوقف کردن 32
9.1 Start up راه اندازی 32
9.2 Shut down خاموش کردن 33
10. GENERAL CONSIDERATIONS محاسبات کلی 34
11. CALCULATION OF THE RETENTION TIME محاسبه زمان ماند 35

SUMMARY خلاصه

پارامترهای کنترل:

مهمترین پارامترهای کنترل در هر نوع سیستم کوره عبارتند از :

- دمای منطقه پخت (به عنوان شاخصی برای کیفیت کلینکر تولید شده)
- دمای ته کوره (به عنوان شاخصی برای آماده سازی خوراک خام که عمدتاً شامل خشک کردن، گرم کردن و کلسیناسیون است)
- غلظت اکسیژن گاز خروجی کوره (به عنوان شاخصی برای راندمان احتراق)
- در مورد سیستم‌های پری کلساینر: دما و غلظت اکسیژن در خروجی پریکلساینر
- در مورد کولر گریتها: ارتفاع بستر لایه کلینکر روی گریت

متغیرهای کنترل:

مهمترین متغیرهای کنترلی که برای حفظ پارامترهای کنترل قبلی در یک محدوده مجاز خاص تنظیم می‌شوند عبارتند از:

- میزان سوخت به کوره
- میزان تغذیه مواد به کوره
- مکش در کوره
- سرعت کوره
- در مورد سیستم‌های پریکلساینر: میزان سوخت و مکش در پری کلساینر
- در مورد گریت کولرها: سرعت گریت

اهداف عملکرد کوره

عملکرد یک سیستم کوره باید الزامات اساسی زیر را برآورده کند:

- حفاظت از تجهیزات و پرسنل در تمام اوقات
- کیفیت کلینکر همواره خوب
- عملکرد روان و پایدار
- حداکثر راندمان حرارتی
- حداکثر نرخ تولید

1. INTRODUCTION مقدمه

سیستم‌های مختلف کوره را می‌توان با توجه به میزان رطوبت مواد اولیه‌ای که به سیستم کوره تغذیه می‌شوند، از هم تشخیص داد.

انواع مختلف فرآیند عبارتند از:

- ◀فرآیند مرطوب ۳۰-۴۰٪ رطوبت
- ◀فرآیند نیمه مرطوب ۱۷-۲۱٪ رطوبت
- ◀فرآیند نیمه خشک ۱۰-۱۵٪ رطوبت
- ◀فرآیند خشک 1 >٪ رطوبت

اگرچه هر نوع فرآیند پارامترهای عملیاتی خاص خود را دارد، اما خوراک خام باید تا زمانی که کلینکر در نهایت از سیستم کوره خارج شود، واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی مشابهی را پشت سر بگذارد.

واکنش‌های اساسی عبارتند از:

- ◀خشک کردن خوراک خام
- ◀گرم کردن مواد
- ◀کلسیناسیون
- ◀تشکیل مواد معدنی کلینکر
- ◀خنک کردن کلینکر

تفاوت اصلی بین انواع مختلف فرآیند در زمان و انرژی مورد نیاز است، هر واکنش باید تکمیل شود.

بنابراین، محدوده عملیاتی پارامترهای کنترل مختلف از یک سیستم کوره به سیستم دیگر متفاوت است.

همین امر در مورد زمان پاسخ و همچنین فرکانس و بزرگی هرگونه تنظیم متغیر کنترل نیز صدق می‌کند.

با این وجود، برخی قوانین اساسی برای همه انواع سیستم‌های کوره قابل اجرا هستند.

این قوانین در ادامه ارائه شده‌اند و مفهوم اولیه‌ای از عملکرد کوره را ارائه می‌دهند.

2. CONTROL PARAMETERS

سیستم‌های کوره معمولاً به تعداد زیادی ابزار، حسگر و دستگاه اندازه‌گیری مجهز هستند.

برخی از آنها فقط برای اهداف اطلاعاتی هستند (مثلاً اگر یک دریچه باز یا بسته شود)، برخی دیگر برای تشخیص موقعیت‌های خطرناک (مثلاً انسداد سیکلون)، اما تنها تعداد کمی از آنها به طور مداوم برای عملکرد کوره استفاده می‌شوند.

مقادیر اندازه‌گیری شده‌ای که برای عملکرد کوره مهمترین هستند، در اینجا پارامترهای کنترل نامیده می‌شوند.

برای نزدیک نگه داشتن پارامترهای کنترل به یک هدف خاص، متغیرهای کنترل (اکچوایتورها یا محرک‌ها) دستکاری می‌شوند.

مهمترین پارامترهای کنترلی که در طول عملیات کوره بررسی می‌شوند عبارتند از:

- دمای منطقه پخت (به عنوان شاخصی برای کیفیت کلینکر تولید شده)
- دمای ته کوره (به عنوان شاخصی برای آماده‌سازی خوراک خام، که عمدتاً شامل خشک کردن، گرم کردن و کلسیناسیون است)
- غلظت اکسیژن گاز احتراق در اینلت کوره یا پیش گرمکن (به عنوان شاخصی برای راندمان احتراق و اتمسفر گاز داخل کوره)
- در مورد سیستم‌های پریکلساینر: دما و غلظت اکسیژن گاز خروجی در خروجی پری کلساینر
- در مورد خنک‌کننده گریت : ارتفاع بستر کلینکر

2.1 Location of the control parameters and variables محل قرارگیری پارامترها و متغیرهای کنترل

محل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف کنترل و برخی از مقادیر هدف معمول در زیر آمده است.
متغیرهای کنترل که برای نزدیک نگه داشتن پارامتر به هدف تنظیم می‌شوند، برای انواع مختلف سیستم‌های کوره نیز نشان داده شده‌اند.

2.1.1 Wet kiln

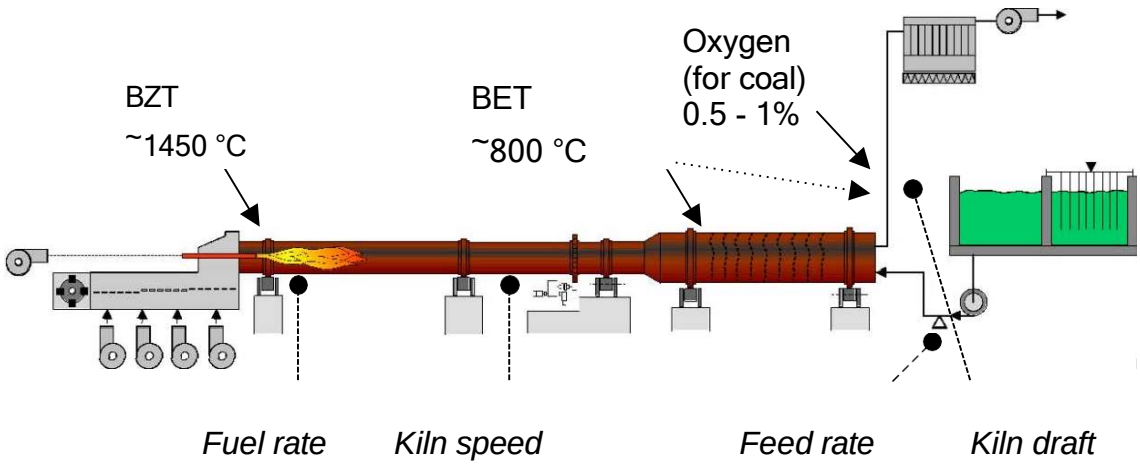


Figure 1: Control parameters and variables of a wet kiln

2.1.2 Lepol kiln

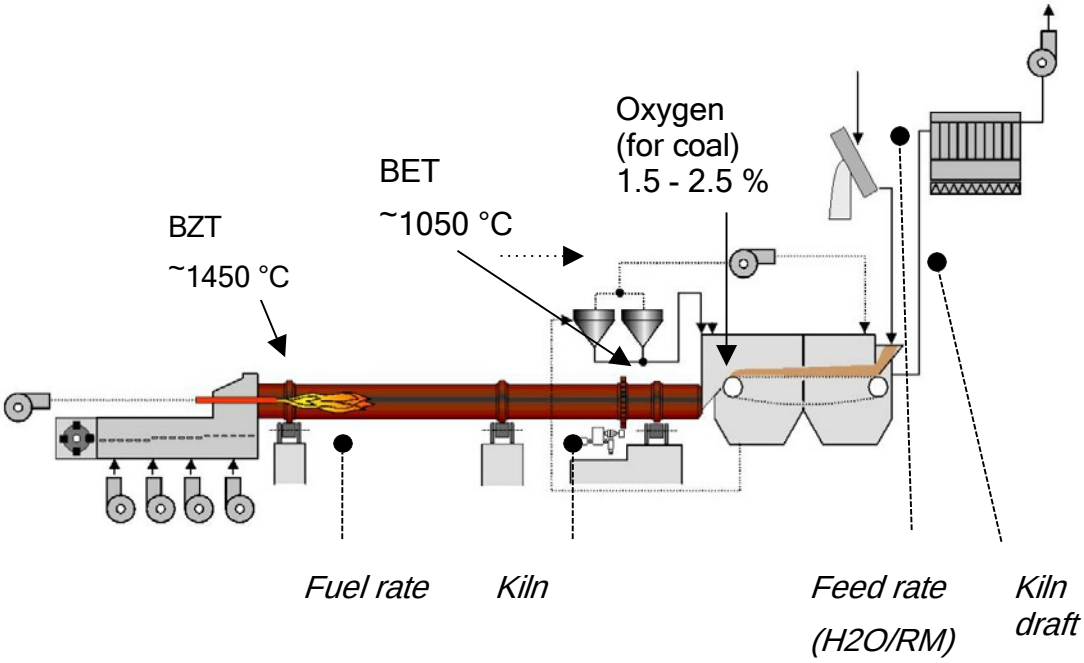


Figure 2: Control parameters and variables of a Lepol kiln

2.1.3 Preheater kiln

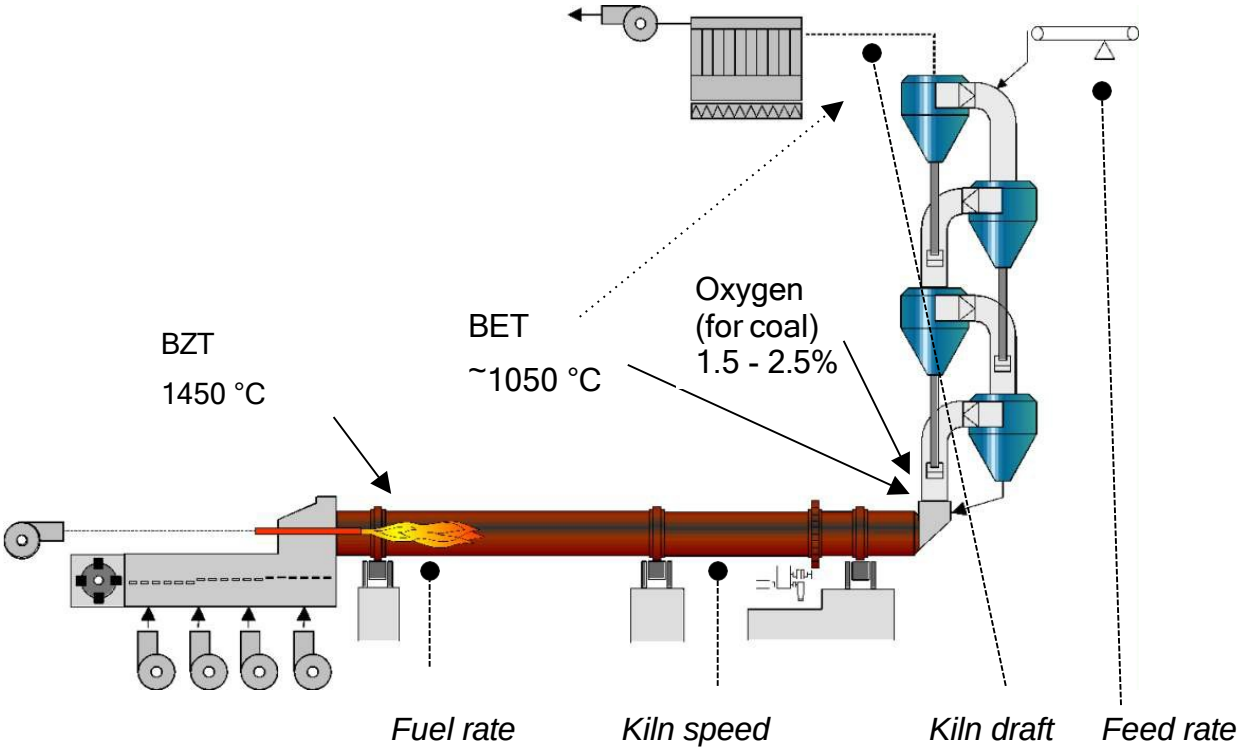


Figure 3: Control parameters and variables of a PH kiln

2.1.4 Precalciner kiln

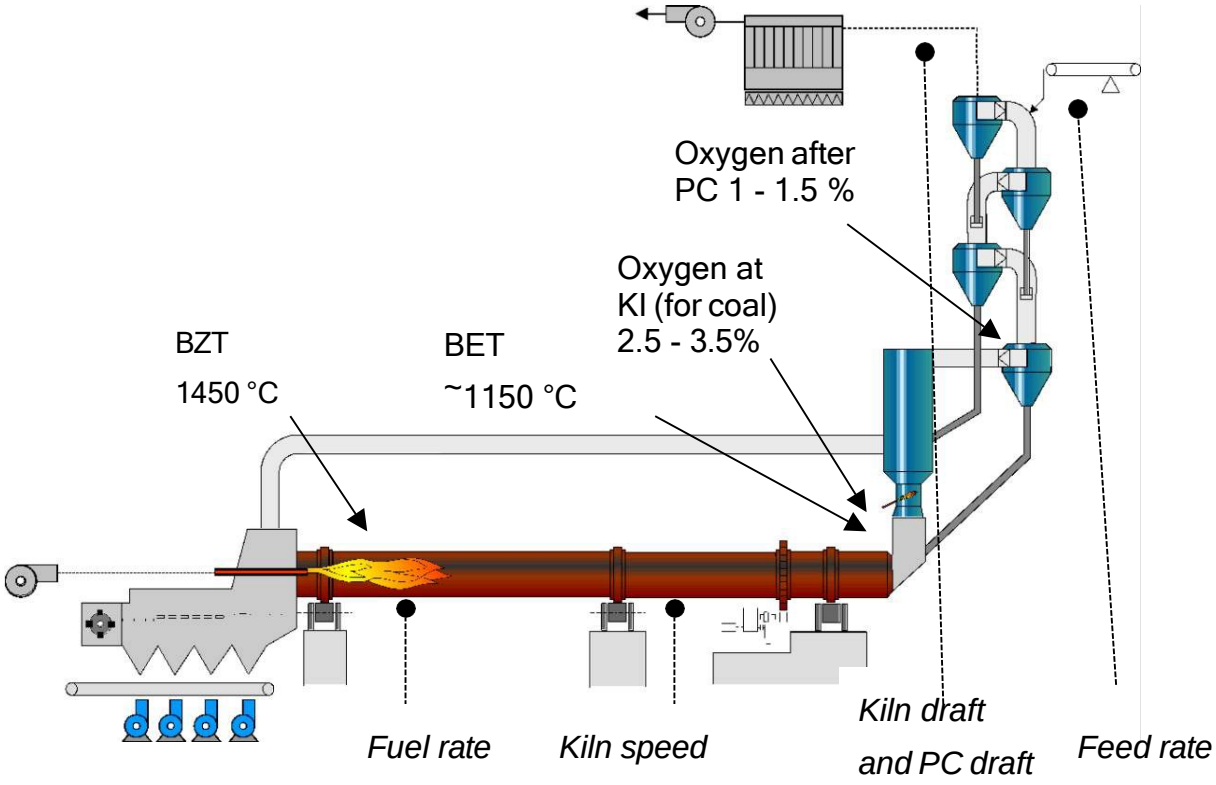


Figure 4: Control parameters and variables of a precalciner kiln

2.2 Burning Zone Temperature (BZT) دمای منطقه پخت

۲,۲,۱ BZTتعیین می‌کند که کلینکر چقدر خوب سوخته است و تبدیل C2S به C3S چقدر کامل است.

هنگامی که کلینکر از منطقه احتراق خارج می‌شود، نباید بیش از ۱,۵٪ و نه کمتر از ۰,۵٪ CaOغیرترکیبی یا آهک آزاد داشته باشد (که تقریباً معادل وزن یک لیتر حدود ۱۲۵۰-۱۳۵۰ گرم در لیتر است) CaO آزاد (یا وزن لیتری) که به صورت دوره‌ای اندازه‌گیری می‌شود، شاخص اصلی برای بیان این است که آیا هدف واقعی BZT کافی است یا باید افزایش یا کاهش یابد.

به دلیل تغییرات ترکیب مواد خام، تغییر هدف BZT می‌تواند هر از گاهی مورد نیاز باشد، زیرا قابلیت پخت مواد اولیه با نوسانات LSF ، SR، منیزیم و مغلظت قلیایی در میان سایر عوامل تغییر می‌کند .تغییر در ویژگی‌های شعله، که می‌تواند ناشی از استفاده از سوخت‌های متعدد یا شرایط پخت متفاوت باشد، تأثیر مشابهی دارد و بنابراین ممکن است نیاز به تغییر هدف BZT نیز داشته باشد .تغییرات هدف BZT فقط در یک دوره طولانی مدت انجام می‌شود، همانطور که CaO آزاد (یا وزن لیتری) معمولاً فقط به صورت یک یا دو ساعته اندازه‌گیری می‌شود BZTواقعی باید اندازه‌گیری شود تا مشخص شود که آیا انحرافی بین هدف موقت و BZT واقعی وجود دارد یا خیر .از آنجایی که عملکرد کوره یک فرآیند پویا است، انحرافات کاملاً مکرر و کوتاه مدت هستند.

چندین شاخص برای تعیین BZT استفاده می‌شود که در زیر فهرست شده‌اند .اکثر آنها به صراحت دمای مطلق را بیان نمی‌کنند، اما اطلاعات کافی برای تعیین افزایش یا کاهش BZT در مقایسه با یک هدف تعریف شده قبلی ارائه می‌دهند .این بدان معناست که آنها روند کوتاه مدت پارامتر کنترل BZT را ارائه می‌دهند .این به تخمین CaO آزاد احتمالی (یا وزن لیتری) کمک می‌کند و باید زمان را تا زمان در دسترس بودن تجزیه و تحلیل واقعی کلینکر، پل بزند.

2.2.2 خواندن پیرومتر Pyrometer reading

تشعشعات (تابش) کلینکر و کوتینگ در منطقه پخت با دمای آن ارتباط دارد .بنابراین، می‌توان BZT را با اندازه‌گیری شدت یا رنگ این تشعشعات تعیین کرد.

یک همبستگی تقریبی دما-رنگ در زیر (محدوده قابل مشاهده) ارائه شده است:

کمترین قرمز قابل مشاهده تا قرمز تیره ۴۷۵-۶۵۰ درجه سانتیگراد

قرمز تیره تا قرمز گیلاسی ۶۵۰-۷۵۰ درجه سانتیگراد

قرمز گیلاسی تا قرمز روشن ۷۵۰-۸۵۰ درجه سانتیگراد

قرمز روشن تا نارنجی ۸۵۰-۹۰۰ درجه سانتیگراد

نارنجی تا زرد ۹۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتیگراد

زرد تا زرد روشن ۱۱۰۰-۱۳۵۰ درجه سانتیگراد

زرد روشن تا سفید ۱۳۵۰-۱۵۵۰ درجه سانتیگراد

با اندازه‌گیری رنگ منطقه پخت و نه تنها شدت تابش، مقدار خوانده شده کمتر تحت تأثیر اختلالاتی مانند بار داست هوای ثانویه و موارد دیگر قرار می‌گیرد .بنابراین، پیرومترها و دوربین‌های کوره مدرن عمدتاً رنگ را اندازه‌گیری می‌کنند و نه شدت تابش را.

2.2.3 ناکس گازهای خروجی NOx of the exhaust gases

NOxتولید شده در حین احتراق بسته به دمای شعله و گازهای منطقه پخت متفاوت است .هرچه شعله داغ‌تر باشد، NOxبیشتری در حین احتراق تولید می‌شود و برعکس .هنگامی که BZT از غلظت و درصد NOx گازهای خروجی محاسبه می‌شود، غلظت اکسیژن و CO در گازهای خروجی نیز باید در نظر گرفته شود، زیرا CO باعث کاهش و اکسیژن باعث افزایش تشکیل NOx می‌شود .عامل دیگری که بر تشکیل NOx تأثیر می‌گذارد، نوع سوخت سوخته شده است .اگر ترکیب سوخت تغییر کند، مقدار NOx تولید شده نیز ممکن است تغییر کند (به خصوص هنگام سوختن سوخت‌های جایگزین)

2.2.4 Kiln torque تورک کوره

اگر BZT افزایش یابد، منطقه پخت به سمت بالا حرکت می‌کند و طولانی‌تر می‌شود BZT بالاتر، فاز مایع بیشتری در کلینکر تولید می‌کند .قطر گلوله‌های کلینکر افزایش می‌یابد و دانه‌بندی خوراک خام در کوره زودتر شروع می‌شود .بنابراین، وقتی BZT افزایش می‌یابد، گلوله‌های کلینکر بیشتر و بزرگتری باید درون کوره جابجا شوند .در عین حال، بستر مواد در کوره بیشتر بالا می‌رود که مرکز ثقل را از محور کوره دور می‌کند . دانه‌بندی متفاوت کلینکر و تغییر زاویه سکون، گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن کوره را در صورت افزایش BZT افزایش می‌دهد.

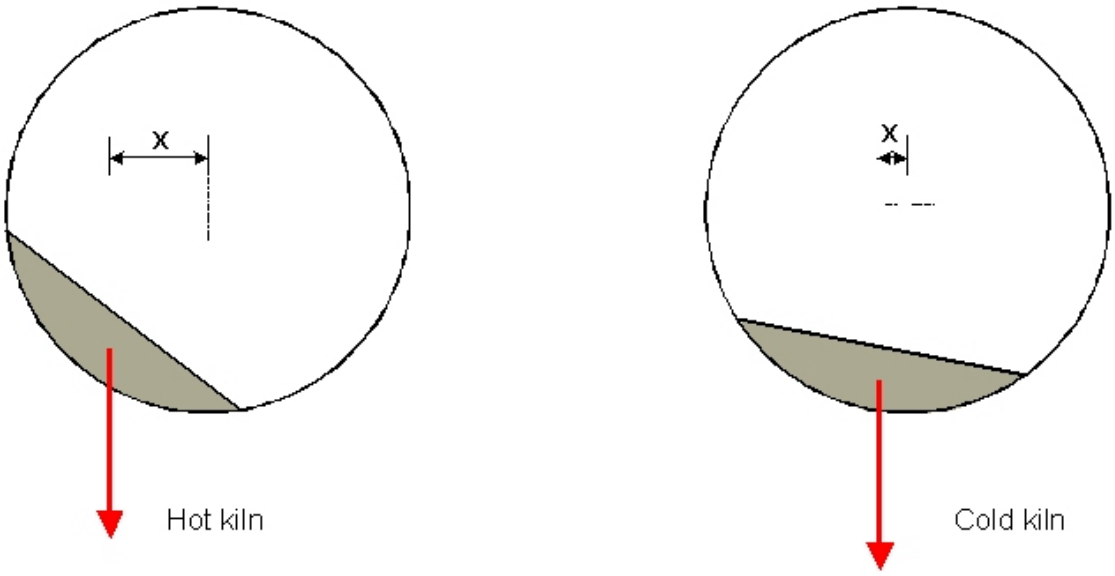


Figure 5: Torque of a hot and a cold kiln

این گشتاور کوره متناسب با جریان یک درایو DC و در صورت استفاده از درایو AC یا درایو هیدرولیکی متناسب با نسبت توان کوره به سرعت کوره است .تغییر وضعیت کوتینگ در منطقه پخت، گشتاور کوره را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (هرچه نسبت L/D کوره کمتر باشد) در نتیجه، گشتاور کوره می‌تواند در درازمدت بدون هیچ تغییری در BZT به طور قابل توجهی تغییر کند .بنابراین، سیگنال گشتاور کوره در بیشتر موارد فقط به عنوان یک نشانگر کوتاه مدت از BZT عمل می‌کند .کوتاه مدت تا ۱۲ ساعت تعریف می‌شود .گشتاور یک شاخص بسیار مفید برای شرایط کوره نسبت به روند آن است.

2.2.5 Secondary Air Temperature (SAT) or Tertiary Air Temperature (TAT)

کوره‌های دارای گریت کولر که به دستگاه اندازه‌گیری SAT یا TAT قابل اعتمادی مجهز هستند، اغلب از SAT یا TAT به عنوان شاخصی برای BZT استفاده می‌کنند .هرچه BZT بالاتر باشد، کلینکر آزاد شده داغ‌تر و SAT یا TAT بالاتری دارد (و برعکس) .با این وجود، SATو TATتحت تأثیر تعدادی از عوامل دیگر (دانه‌بندی کلینکر، عملکرد کولر و غیره) قرار می‌گیرند، بنابراین در همه کوره‌ها نمی‌توان همبستگی روشنی بین BZT و SAT یا TAT ارائه داد.

2.2.6 Position of the dark feed (valid only for pure natural gas flames)

موقعیت خوراک تیره (فقط برای شعله‌های گاز طبیعی خالص معتبر است)

اگر دید داخل کوره اجازه دهد (کمی داستی، شکل شعله و غیره)، خوراک داغ کلسینه شده را می‌توان هنگام ورود به منطقه پخت به صورت یک جریان تیره مشاهده کرد .می‌توان منطقه‌ای را تعیین کرد که این خوراک، مانند آب شناور، شروع به تشکیل فازهای مایع می‌کند و در آنجا به گلوله‌های کلینکر جامد تبدیل می‌شود .موقعیت منطقه‌ای که این تبدیل در آن رخ می‌دهد، یک شاخص اضافی برای BZT است .اگر این منطقه به سمت پایین حرکت کند، BZTدر حال سقوط است و برعکس.

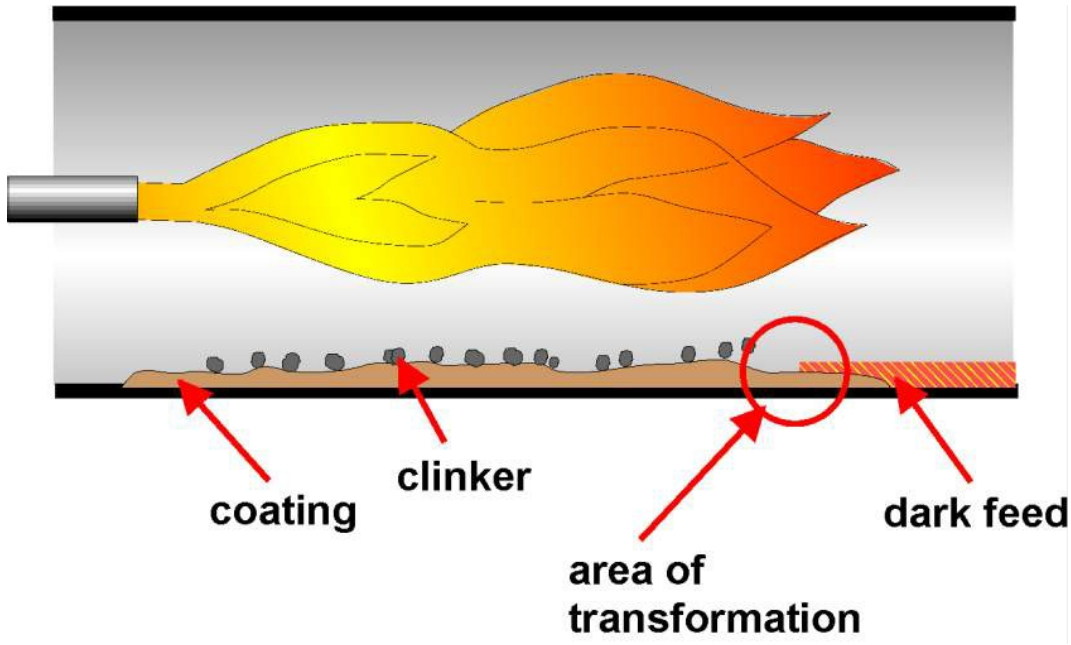


Figure 6: Position of the dark feed

2.3 Back End Temperature (BET) دمای ته کوره

اصطلاح BET به دمای گاز خروجی در ورودی کوره در مورد کوره‌های دارای پیش‌گرمکن و به دمای گاز میانی (قبل از بخش زنجیر) در صورت مجهز بودن کوره به زنجیر اشاره دارد. BET به نوع سیستم و نسبت L/D کوره بستگی دارد .این دما از حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد در کوره‌های مرطوب (قبل از بخش زنجیر) تا حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد در کوره‌های پری‌کلساینر AS متغیر است .اگر اندازه‌گیری دمای قابل اعتمادی در ورودی کوره (کوره‌های دارای پیش‌گرمکن) یا قبل از بخش زنجیر (کوره‌های دارای زنجیر) در دسترس نباشد، اغلب از دمای خروجی پیش‌گرمکن (کوره‌های دارای پیش‌گرمکن) یا دمای ورودی کوره (کوره‌های دارای زنجیر) استفاده می‌شود. BET شاخصی از میزان آماده‌سازی خوراک گرم هنگام ورود به کوره (یا هنگام عبور از نقطه اندازه‌گیری میانی، در صورت سیستم‌های کوره دارای زنجیر) است. BET نشان دهنده میزان

آماده‌سازی خوراک گرم هنگام ورود به کوره (یا هنگام عبور از نقطه اندازه‌گیری میانی، در صورت سیستم‌های کوره دارای زنجیر) است .قبل از اینکه خوراک در نهایت در منطقه پخت کلینکر شود، باید خشک شدن، کلسیناسیون (آزاد شدنCO_2) و به میزان کمی واکنش‌هایی مانند اصلاحات ساختاری و تشکیل محصولات میانی مانند C12A7 یا CA را پشت سر بگذارد .هرچه نیاز به انرژی برای واکنش‌های میانی در کوره بیشتر باشد (که عمدتاً به نوع فرآیند بستگی دارد)، کنترل مناسب BET اهمیت بیشتری دارد .از این رو، BETدر یک کوره مرطوب (۹۰ تا ۱۰۰ درصد کلسیناسیون انجام نمی‌شود) نسبت به یک کوره پری کلساینرجدا از هوا (حدود ۱۰ درصد کلسیناسیون انجام نمی‌شود) بحرانی‌تر است. BETبه هر تنظیم متغیر کنترلی، با طولانی‌تر شدن کوره (نسبت L/D بالاتر) و با مصرف انرژی بیشتر در کوره برای واکنش‌های میانی قبل از کلینکریزاسیون، کندتر واکنش می‌دهد .در حالت ایده‌آل، مواد باید همیشه درجه آماده‌سازی یکسانی داشته باشند، اما به دلیل عملکرد کوره و نوسانات طبیعی خواص مواد اولیه، سوخت‌ها، شرایط محیطی و موارد دیگر، این مورد صدق نمی‌کند .تغییرات در مواد اولیه ابتدا از طریق BET مشاهده می‌شود و بدین ترتیب تأثیر آتی بر BZT به زودی مشخص می‌شود .اگر همه پارامترهای دیگر ثابت بمانند و BET کاهش یابد، این نشان می‌دهد که همه مناطق واکنش به سمت پایین و برعکس تغییر مکان می‌دهند .اگر مناطق درون کوره به سمت پایین یا بالا تغییر مکان دهند، BZTکاهش می‌یابد .یا متعاقباً پس از آن نیز افزایش یابد، اگر هیچ اقدام متقابلی از قبل انجام نشود.

2.4 Oxygen control کنترل اکسیژن

برای احتراق خوب سوخت‌ها، مقدار مشخصی هوای اضافی مورد نیاز است .مقدار هوای اضافی با اندازه‌گیری میزان اکسیژن گازهای خروجی تعیین می‌شود .کنترل مناسب سطح اکسیژن برای احتراق خوب و راندمان حرارتی بالا بسیار مهم است .محدوده‌های معمول اکسیژن (در ورودی کوره) برای رایج‌ترین سیستم‌های کوره در جدول زیر آمده است .سطح اکسیژن مورد نیاز به نوع سیستم کوره و همچنین به شدت به نوع سوخت مورد استفاده بستگی دارد (به عنوان مثال، گاز به هوای اضافی کمتری نسبت به زغال سنگ یا سوخت جامد AFR نیاز دارد).

یکی دیگر از عوامل مهم مؤثر بر سطح اکسیژن، میزان گوگرد، کلر و قلیا در سیستم کوره است .بنابراین، اگر مشکل تبخیر گوگرد وجود داشته باشد، سطح اکسیژن بالاتر در محدوده‌های داده شده انتخاب می‌شود.

	Gas	Fuel oil	Coal	Petcoke Solid AFR
Wet kiln	0.5 - 1.0 %	1.0 - 2.0 %	1.5 - 2.0 %	2.0 - 2.5 %
Lepol kiln	1.0 - 1.5 %	1.5 - 2.0 %	1.5 - 2.5 %	2.0 - 3.0 %
Preheater kiln	1.0 - 1.5 %	1.5 - 2.0 %	1.5 - 2.5 %	2.0 - 3.0 %
Inline PC kiln	2.5 - 3.0 %	2.5 - 3.0 %	2.5 - 3.5 %	2.5 - 4.0 %
Separate PC kiln	1.0 - 1.5 %	1.5 - 2.0 %	1.5 - 2.5 %	2.0 - 3.0 %

Table 1: Typical oxygen levels at the kiln inlet (dry gas)

در اکثر سیستم‌های کوره، مقدار هوای اضافی مورد نیاز کمی بالاتر از نقطه‌ای است که دمای شعله به دلیل گوگرد، کلر یا وضعیت قلیایی در بالاترین حد خود قرار دارد .بنابراین، کاهش جزئی مقدار هوای اضافی، دمای شعله را کمی افزایش می‌دهد .هوای اضافی (یا اکسیژن) بسیار کم، دمای شعله را کاهش می‌دهد که باعث طولانی شدن شعله (پس از احتراق) و کاهش راندمان سوخت می‌شود .علاوه بر این، تبخیر گوگرد و قلیا افزایش می‌یابد که ممکن است منجر به مشکلات تجمع و پوسته پوسته شدن build up and incrustation در سیستم کوره شود .هوای اضافی (یا اکسیژن) بیش از حد نیز شعله را خنک می‌کند و به دلیل انتقال حرارت بدتر، منجر به راندمان حرارتی پایین سوخت نیز می‌شود .از آنجایی که جریان کل گاز افزایش می‌یابد، چرخه‌های داست داخلی و خارجی کوره نیز افزایش می‌یابد .از این رو، اگر تبخیر گوگرد مشکل‌ساز نباشد، سطح اکسیژن پایین‌تری انتخاب می‌شود .به عنوان یک قاعده کلی، در حداقل سطح اکسیژن مجاز، هیچ CO قابل توجهی تشکیل نمی‌شود (یعنی کمتر از ۰٫۰۵٪ در ورودی کوره).

3. CONTROL VARIABLES متغیرهای کنترل

در پاراگراف بعدی، پارامترهای اصلی کنترل مورد استفاده برای کنترل کوره ارائه شدند .این پارامترها باید در محدوده‌ای باریک و نزدیک به هدف نگه داشته شوند تا کوره به شیوه‌ای روان و کارآمد کار کند .به طور کلی، هرچه انحراف پارامتر از هدف کمتر باشد، کنترل کوره بهتر است .برای نزدیک نگه داشتن پارامترهای کنترل به هدف، معمولاً لازم است تنظیماتی در متغیرهای کنترل انجام شود .متغیرهای اصلی کنترل (به استثنای سیستم‌های پری‌کلساینر) عبارتند از:

- نرخ سوخت به کوره
- نرخ تغذیه مواد به کوره
- کشش کوره
- سرعت کوره

در ادامه، تأثیر هرگونه تنظیمی که بر روی یکی از چهار متغیر کنترل کوره انجام می‌شود، نشان داده شده است .برای ساده نگه داشتن روابط معمولاً نسبتاً پیچیده، فرض می‌شود که تنظیم فقط بر روی یک متغیر در هر زمان انجام می‌شود (سایر متغیرها دست نخورده باقی می‌مانند) و این تنظیم آنقدر کوچک است که هیچ یک از پارامترهای کنترل از هدف فاصله زیادی نمی‌گیرند.

3.1 Fuel rate to the kiln نرخ سوخت کوره

هنگام افزایش نرخ سوخت ورودی به کوره:

- افزایش BZT
- افزایش BET
- کاهش غلظت اکسیژن (کاهش نرخ سوخت اثر معکوس دارد).

انرژی بیشتری وارد سیستم می‌شود، بنابراین BZT و BET افزایش می‌یابند .سطح اکسیژن کاهش می‌یابد، زیرا بخشی از هوای اضافی برای احتراق سوخت اضافی مصرف می‌شود .البته موارد فوق فقط در صورتی اعمال می‌شود که احتراق در شرایط کاهشی رخ ندهد.

3.2 Feed rate to the kiln نرخ خوراک کوره

هنگام افزایش نرخ تغذیه مواد به کوره:

- کاهش دمای احتراق(BZT)
- کاهش دمای انجماد(BET)
- کاهش غلظت اکسیژن (کاهش نرخ تغذیه اثر معکوس دارد).

هنگامی که خوراک بیشتری وارد سیستم کوره می‌شود، ابتدا دما در انتهای کوره شروع به کاهش می‌کند .پس از رسیدن مقدار بیشتر خوراک به منطقه پخت، دمای منطقه پخت (BZT) نیز شروع به کاهش می‌کند .خوراک اضافی، H2Oو CO2 بیشتری آزاد می‌کند .مقدار اضافی گاز حاصل از خوراک، مقدار هوای احتراق (و در نتیجه هوای اضافی) را کاهش می‌دهد، زیرا مقدار گاز خروجی (تقریباً) ثابت می‌ماند .این امر منجر به کاهش اکسیژن در گاز خروجی می‌شود.

.

3.3 مکش کوره Kiln draft

هنگام افزایش مکش در کوره:

◄کاهش BZT

◄افزایش BET

◄افزایش غلظت اکسیژن

(کاهش جزئی مکش اثر معکوس دارد. اگر احتراق در شرایط کاهشی (هوای اضافی خیلی کم) رخ دهد، BZTدوباره کاهش و BET افزایش می‌یابد (به فصل ۲,۴ مراجعه کنید) .هنگامی که مکش کوره افزایش می‌یابد، هوای ثانویه بیشتر (و کمی سردتر) به داخل کوره و از طریق منطقه پخت کشیده می‌شود. این امر دمای شعله را کاهش می‌دهد و در نتیجه BZT کاهش می‌یابد .اگرچه مقدار گرمای داده شده به سیستم کوره تا حدودی بیشتر است (هوای ثانویه بیشتر)، گرمای کمتری در منطقه پخت آزاد می‌شود (دمای شعله پایین‌تر منجر به کاهش انتقال حرارت می‌شود) بنابراین BET افزایش می‌یابد .افزایش مکش کوره، هم غلظت اکسیژن و هم حجم گازهای خروجی را افزایش می‌دهد.

3.4 سرعت کوره Kiln speed

هنگام افزایش سرعت کوره:

◄کاهش BZT (موقتا)

◄ً کاهش BET (موقتا)

◄ً کاهش اکسیژن (موقتاً) (کاهش سرعت کوره اثر معکوس دارد).

هنگامی که سرعت کوره افزایش می‌یابد، پیشروی خوراک - مواد سریع‌تر می‌شود .تمام مناطق واکنش به طور موقت به سمت پایین حرکت می‌کنند که باعث کاهش BET و BZT می‌شود .از آنجایی که مواد بیشتری به طور موقت وارد منطقه خشک کردن و کلسینه شدن می‌شود (همان اثر افزایش سرعت تغذیه)، مقدار بیشتری H2O و CO2 آزاد می‌شود که منجر به کاهش غلظت اکسیژن می‌شود .این اثرات فقط موقتی هستند، زیرا سرعت بالاتر کوره با سرعت تغذیه ثابت، درجه پر شدن کوره را کاهش می‌دهد .هنگامی که درجه پر شدن کوره در کل کوره کاهش یابد (تمام موادی که هنگام تغییر سرعت در کوره بودند، از کوره خارج می‌شوند)، BZT، BETو اکسیژن بازیابی می‌شوند.

نکته: تقریباً در تمام استراتژی‌های بهره‌برداری از کوره، سرعت کوره به نرخ تغذیه کوره بستگی دارد .هدف، ثابت نگه داشتن درجه پر شدن کوره است .بنابراین، سرعت کوره در شرایط عادی بهره‌برداری، یک متغیر مستقل نیست، بلکه همگام با نرخ تغذیه کوره تنظیم می‌شود .در برخی شرایط نامساعد (به‌ویژه هجوم وحشتناک خوراک گرم)، سرعت کوره باید تا حدی کاهش یابد که کاهش موازی تغذیه کوره باعث گرم شدن بیش از حد انتهای کوره شود .در این شرایط، باید بین افزایش درجه پر شدن و BET مصالحه‌ای صورت گیرد (در این شرایط، اصطلاحاً چرخه‌ای شدن می‌تواند رخ دهد).

4. استراتژی کنترل CONTROL STRATEGY

4.1 نکات کلی General remarks

همانطور که قبلاً مشاهده شد، تنظیم تنها یکی از متغیرهای کنترل، بر هر سه پارامتر کنترل تأثیر می‌گذارد .برای نگه داشتن همه پارامترهای کنترل در یک محدوده مشخص نزدیک به هدف، معمولاً لازم است که بیش از یک متغیر کنترل تنظیم شود .اما با انجام این کار، اصلاح یک پارامتر کنترل خاص می‌تواند انحراف پارامتر دیگر را افزایش دهد .در نتیجه، باید به مصالحه‌ای دست یافت که میانگین وزنی همه انحرافات پارامترها را به حداقل برساند .وزن (درجه اهمیت) هر پارامتر کنترل خاص به نوع سیستم و کوره خاص بستگی دارد .به عنوان مثال، در یک کوره

پری‌کلساینر، BETنسبت به کوره تر، اهمیت کمتری دارد .بنابراین، تأثیر BET در یک کوره پریکلساینر نسبت به کوره تر، وزن کمتری دارد . انتخاب متغیرهای کنترل مورد استفاده برای بازگرداندن یک یا چند پارامتر کنترل که خارج از محدوده هستند به حالت عادی، به دیدگاه کلی همه پارامترهای کنترل بستگی دارد .در ادامه، مثالی از استراتژی بهره‌برداری از کوره ارائه شده است که معمول‌ترین اقداماتی را که ممکن است برای انواع سیستم‌های کوره انجام شود، شرح می‌دهد .اصلاحات خاصی در این استراتژی ممکن است در موارد خاص ضروری باشد، زیرا هر کوره رفتار متفاوتی دارد و پیش‌شرط‌های متفاوتی دارد .یک عامل بسیار مهم در اینجا، توانایی ایجاد تغییرات مثبت در متغیرهای کنترل است .در بسیاری از کوره‌ها، یک گلوگاه وجود دارد که پس از رسیدن به ظرفیت اسمی، اجازه هیچ تغییر مثبتی در یکی از متغیرهای کنترل را نمی‌دهد (به عنوان مثال، یک فن ID که از قبل با حداکثر سرعت یا با دمپر کاملاً باز کار می‌کند) .در نتیجه، این امر ممکن است نیاز به تغییر استراتژی ارائه شده داشته باشد .هدف از این استراتژی، درک اصول بهره‌برداری از کوره است و ممکن است به طور مستقیم در همه سیستم‌های کوره قابل اجرا نباشد.

4.2 Possible kiln parameter conditions شرایط ممکن پارامترهای کوره

فرض بر این است که سه پارامتر کورهBZT ، BETو اکسیژن در ورودی کوره را می‌توان به یکی از حالت‌های زیر نسبت داد (اگرچه انتقال‌ها سیال هستند)، که عبارتند از:

- داخل محدوده مورد نظر، که به معنی خوب است .
- بالاتر از محدوده مورد نظر، که به معنی بالا است .
- پایین‌تر از محدوده مورد نظر، که به معنی پایین است

محدوده مورد نظر برای سه پارامتر کنترل معمولاً به شرح زیر است:

	BZT	BET	Oxygen
Wet kiln	Target +/- 20 °C	Target +/- 10 °C	Target +/- 0.3 %
Lepol kiln	Target +/- 20 °C	Target +/- 15 °C	Target +/- 0.5 %
Preheater kiln	Target +/- 20 °C	Target +/- 15 °C	Target +/- 0.5 %
Inline PC kiln	Target +/- 20 °C	Target +/- 20 °C	Target +/- 0.7 %
Separate PC kiln	Target +/- 20 °C	Target +/- 20 °C	Target +/- 0.5 %

Table 2: Desired range of the different control parameters

ترکیب سه پارامتر کنترل و حالت مربوط به آنها در هر ترکیبی، منجر به ۳^۳=۲۷ حالت ممکن می‌شود .این ۲۷ حالت اساسی به صورت گرافیکی در زیر در نموداری که به آن «درخت تصمیم» می‌گویند، نشان داده شده‌اند.

4.3 Decision tree درخت تصمیم

بر اساس ۳ شرط ممکن از ۳ پارامتر کنترلی، درخت تصمیم زیر ساخته شده است که هر ۲۷ حالت ممکن را پوشش می‌دهد.

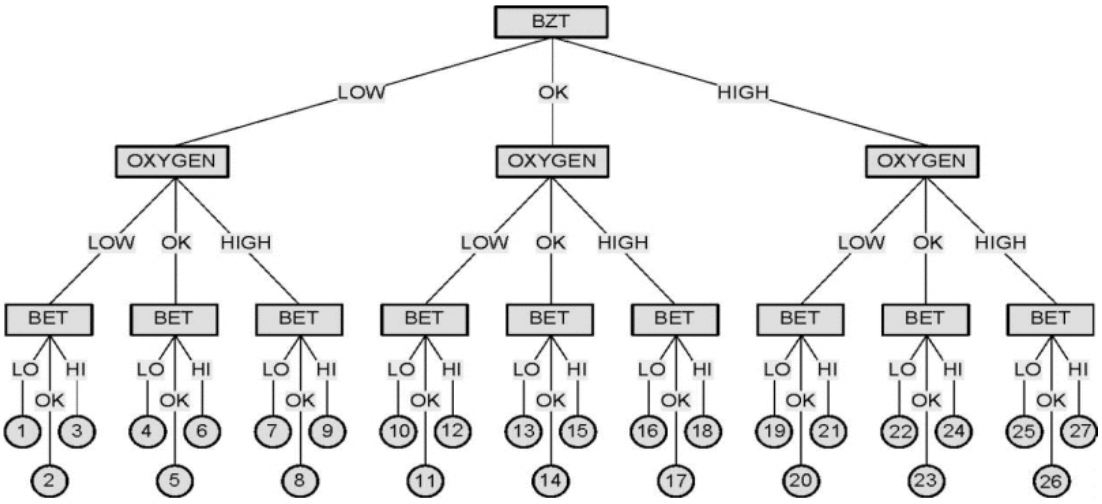


Figure 7: Decision tree

4.4 Counteractions واکنش متقابل

برای هر یک از ۲۷ حالت ممکن، یک اقدام خاص (تنظیم متغیر کنترل) شرح داده شده است تا پارامترهای کنترل را به هدف، که حالت مطلوب ۱۴ است، بازگرداند .واکنش‌های متقابل با این فرض اعمال می‌شوند که هیچ گلوگاهی وجود ندارد .اگرچه همیشه به صراحت ذکر نمی‌شود، اما بزرگی انحراف احتمالی نقش مهمی ایفا می‌کند، زیرا بر شدت واکنش متقابل تأثیر می‌گذارد .هرگونه تنظیم در متغیرهای کنترل باید کم و بیش، بسته به میزان انحراف پارامتر از هدف، مشخص باشد .در غیر این صورت، اصلاح پارامترهای کوره یا ناکافی یا بیش از حد قوی است که منجر به پاسخ ضعیف یا جهش بیش از حد واکنش پارامتر (ایجاد اثر سیکلی) می‌شود .در سیستم‌های کوره، که BET از اهمیت کمی برخوردار است، عمدتاً BZT و اکسیژن اقدامات را ایجاد می‌کنند .این بدان معناست که انحراف خاصی از هدف BET به طور موقت پذیرفته می‌شود، اگر این امر به حفظ بهره‌وری بالا کمک کند و تا زمانی که وضعیت کلی کوره آسیب نبیند .اگر اجازه داده شود که BET برای مدت طولانی ادامه یابد، افزایش BET ممکن است منجر به افزایش تراکم عناصر در گردش در مناطق صعب العبور شود .این امر می‌تواند باعث گرفتگی و توقف احتمالی کوره شود و باید از آن اجتناب شود .اقداماتی که معمولاً باید انجام شود عبارتند از (اقداماتی که باید انجام شود بیشتر بر عملکرد پایدار کوره تأکید دارند تا حداکثر بهره‌وری):

Case Condition		Action	Reason
1 BZT	low	When BZT is slightly low:	
OXYGEN	low	1 increase kiln draft	increase oxygen and prepare for step 2, increase BET
BET	low	2 increase fuel rate	increase BZT and BET, bring oxygen back to normal
		When BZT is very low:	
		1 increase kiln draft	increase oxygen and prepare for step 2, increase BET
		2 increase fuel rate	increase BZT and BET, bring oxygen back to normal
		3 decrease kiln speed	increase BZT and BET even more
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
2 BZT	low	1 increase kiln draft slightly	increase oxygen, increase BET to prepare for step 2
OXYGEN	low	2 decrease fuel rate	increase oxygen even more, bring BET back to normal
BET	o.k.	3 decrease kiln speed	increase BZT
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
3 BZT	low	1 decrease fuel rate	increase oxygen and prepare for step 2, decrease BET
OXYGEN	Low	2 decrease kiln draft	decrease BET
BET	High	3 decrease kiln speed	increase BZT
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
4 BZT	Low	When BZT is slightly low:	
OXYGEN	o.k.	1 increase kiln draft	increase BET, increase oxygen to prepare for step 2
BET	Low	2 increase fuel rate	increase BZT and BET
		When BZT is very low:	
		1 increase kiln draft	increase BET, increase oxygen to prepare for step 2
		2 increase fuel rate	increase BZT and BET
		3 decrease kiln speed	increase BZT and BET even more
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant and increase BET
5 BZT	Low	When BZT slightly low and oxygen slightly high, but still o.k.:	
OXYGEN	o.k.	1 increase fuel rate	increase BZT
BET	o.k.	When BZT very low:	
		1 increase kiln draft slightly increase oxygen and prepare for step 2	
		2 increase fuel rate slightly	increase BZT
		3 decrease kiln speed	increase BZT more
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
6 BZT	Low	When BZT is slightly low and oxygen is slightly high, but still o.k.:	
OXYGEN	o.k.	1 decrease kiln draft	increase BZT and decrease BET
BET	High	When BZT is very low:	
		1 decrease fuel rate	decrease BET, increase oxygen to prepare for step 2
		2 decrease kiln draft	decrease BET, bring oxygen back to normal
		3 decrease kiln speed	increase BZT
		4 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
7 BZT	Low	When BZT is slightly low:	
OXYGEN	high	1 increase fuel rate	increase BZT and BET, decrease oxygen
BET	Low	When BZT is very low:	
		1 increase fuel rate	increase BZT and BET, decrease oxygen
		2 decrease kiln speed	increase BZT and BET
		3 decrease feed rate	maintain kiln filling degree constant
8 BZT	low	When BZT is slightly low:	
OXYGEN	high	1 increase fuel rate	increase BZT, decrease oxygen
BET	o.k.	When BZT is very low:	
		1 increase fuel rate	increase BZT, decrease oxygen
		2 decrease kiln speed	increase BZT
		3 decrease feed rate	to maintain kiln filling degree constant
9 BZT	low	When BZT is slightly low:	
OXYGEN	high	1 increase fuel rate	increase BZT, decrease oxygen
BET	high	2 decrease kiln draft	decrease BET and oxygen, compensate BET increase of step 1
		When BZT very low:	
		1 increase fuel rate	increase BZT, decrease oxygen
		2 decrease kiln draft	decrease BET and oxygen, compensate BET increase of step 1
		3 decrease kiln speed	increase BZT
		4 decrease feed rate	to maintain kiln filling degree constant

10 BZT	o.k.	1 increase kiln draft	increase oxygen, increase BET
OXYGEN	low	2 increase fuel rate slightly	compensate BZT decrease of step 1
BET	low		
11 BZT	o.k.	1 increase kiln draft	increase oxygen
OXYGEN	low		
BET	o.k.		
12 BZT	o.k.	1 decrease fuel rate	decrease BET, increase oxygen and prepare for step 2
OXYGEN	low	2 decrease kiln draft slightly	decrease BET
BET	high		
13 BZT	o.k.	1 increase kiln draft	increase BET
OXYGEN	o.k.	2 increase fuel rate slightly compensate oxygen increase and BZT decrease of step 1 BET	
BET	low		
14 BZT	o.k.	When this condition persists:	
OXYGEN	o.k.	1 increase kiln draft	increase oxygen to prepare for step 2
BET	o.k.	2 increase fuel rate	increase BZT to prepare for step 3
		3 increase feed rate	increase production
		4 increase kiln speed	to maintain kiln filling degree constant
		When this condition is only temporary:	
		1 No action	
15 BZT	o.k.	When oxygen is slightly high, but still o.k.:	
OXYGEN	o.k.	1 decrease kiln draft decrease BET	decrease BET
BET	high	When oxygen is slightly low, but still o.k.:	
		1 decrease fuel rate	decrease BET and prepare for step 2
		2 decrease kiln draft	decrease BET
16 BZT	o.k.	1 increase kiln draft slightly	increase BET, increase oxygen to prepare for step 2
OXYGEN	high	2 increase fuel rate	increase BET, compensate BZT decrease of step 1
BET	low		
17 BZT	o.k.	1 decrease kiln draft	decrease oxygen
OXYGEN	high		
BET	o.k.		
18 BZT	o.k.	1 decrease kiln draft	decrease oxygen and BET
OXYGEN	high	2 decrease fuel rate slightly	decrease BET, compensate BZT increase of step 1
BET	high		
19 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	low	1 increase kiln draft	increase oxygen, increase BET
BET	low	When BZT is high:	
		1 increase kiln draft	increase oxygen, increase BET
		2 increase kiln speed	decrease BZT
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
20 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	low	1 increase kiln draft	increase oxygen, decrease BZT
BET	o.k.	When BZT is high:	
		1 decrease fuel rate	increase oxygen, decrease BZT
		2 increase kiln speed	decrease BZT
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
21 BZT	high	When BZT is slightly high:	decrease BZT and BET, increase oxygen
OXYGEN	low	1 decrease fuel rate	
BET	high	When BZT is high:	
		1 decrease fuel rate	decrease BZT and BET, increase oxygen
		2 increase kiln speed	decrease BZT and BET
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
22 BZT	high	When BZT is slightly high:	.
OXYGEN	o.k.	1 increase kiln draft	decrease BZT, increase BET
BET	low	When BZT is high:	
		1 increase kiln draft	decrease BZT, increase BET
		2 increase kiln speed	decrease BZT and BET
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant

23 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	o.k.	1 decrease fuel rate	decrease BZT
BET	o.k.	When BZT is high:	
		1 decrease fuel rate	decrease BZT
		2 increase kiln speed	decrease BZT
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
24 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	o.k.	1 decrease fuel rate	decrease BZT and BET
BET	high	When BZT is high:	
		1 decrease fuel rate	decrease BZT and BET
		2 increase kiln speed	decrease BZT and BET
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
25 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	high	1 increase kiln draft	decrease BZT, increase BET
BET	low	When BZT is high:	
		1 increase kiln draft	decrease BZT, increase BET
		2 increase kiln speed	decrease BZT and BET
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
26 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	high	1 decrease fuel rate	decrease BZT
BET	o.k.	When BZT is high:	
		1 increase kiln draft	decrease BZT, increase BET to prepare for step 2
		2 increase kiln speed	decrease BZT
		3 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant
27 BZT	high	When BZT is slightly high:	
OXYGEN	high	1 decrease fuel rate	decrease BZT and BET
BET	high	2 decrease kiln draft	decrease oxygen
		When BZT is high:	
		1 decrease fuel rate	decrease BZT and BET
		2 decrease kiln draft	decrease oxygen
		3 increase kiln speed	decrease BZT
		4 increase feed rate	to maintain kiln filling degree constant

۲۷ اقدام متقابل اساسی فقط مربوط به عملیات کوره است و عملیات پری‌کلسیناسیون، پیش‌گرمکن لپول یا گریت کولر را در نظر نمی‌گیرد .اگر سیستم پری‌کلسیناسیون نصب شده باشد، پارامترهای کنترلی اضافی باید در محدوده هدف نگه داشته شوند .همین امر در مورد گریت کولر (که رایج‌ترین نوع خنک‌کننده است و بالاترین قابلیت تنظیم عملیاتی را دارد) و پیش‌گرمکن لپول نیز صدق می‌کند.

5. PRECALCINER CONTROL کنترل پری کلساینر

هدف از پیش‌کلسیناسیون، انتقال واکنش کلسیناسیون از بالادست کوره به یک پیش‌کلسیناتور خارجی کوره است .اگرچه پیش‌گرمکن‌های با پخت ثانویه و پیش‌کلسیناتور هوا از طریق هوا نیز به این گروه تعلق دارند، اما بیشتر مورد توجه قرار نمی‌گیرند، زیرا میزان سوخت به پخت ثانویه یا به هوای عبوری از کلسیناتور معمولاً ثابت نگه داشته می‌شود و کنترل خاصی بر درجه کلسیناسیون در ورودی کوره ارائه نمی‌دهند .همچنین میزان انرژی صرف شده برای پیش‌کلسیناسیون در این نوع‌ها محدود است (معمولاً کمتر از ۲۰٪ از کل انرژی حرارتی). سیستم ارائه شده، کلسیناتور جدا از هوا است که در آن هوای احتراق از طریق کوره تحویل داده نمی‌شود، بلکه از طریق یک داکت هوای ثالثیه انجام می‌شود .در این پیش‌کلسیناتورها، خوراک تقریباً به طور کامل (تا ۹۰٪) کلسینه می‌شود و بیش از نیمی از کل انرژی حرارتی (تا ۶۰٪) برای این واکنش صرف می‌شود .هدف، کلسیناسیون هرچه بیشتر و یکنواخت‌تر خوراک است .این مزیت عملیاتی اصلی پیش‌کلسینه‌کننده جدا از هوا است، زیرا این امکان را فراهم می‌کند که تهیه خوراک کاملاً مستقل از کوره کنترل شود .بنابراین، BETاز نقطه نظر عملیاتی اهمیت کمی دارد.

5.1 Calcination temperature دمای کلسیناسیون

در عملیات کوره، CaOآزاد (یا وزن لیتری) هدفBZT (پارامتر کنترل) را تعیین می‌کند که عمدتاً به وسیله نرخ سوخت به مشعل اصلی (متغیر کنترل) نزدیک به هدف نگه داشته می‌شود .به طور مشابه در سیستم‌های پیش‌کلسیناسیون، درجه کلسیناسیون، دمای کلسیناسیون (پارامتر کنترل) را تعیین می‌کند که سپس توسط نرخ سوخت به کلسیناتور (متغیر کنترل) نزدیک به هدف نگه داشته می‌شود .این دمای کلسیناسیون در سیستم‌های کلسیناتور اساساً عملکرد BET سایر سیستم‌های کوره را بر عهده می‌گیرد .یک درجه کلسیناسیون مطلوب معمولی در یک سیستم پری‌کلسیناتور حدود ۹۰٪ است که مربوط به دمای مواد (یا دمای گاز خروجی کلسیناتور) ۸۷۰-۸۹۰ درجه سانتیگراد است .درجه کلسیناسیون بالاتر با دمای کلسیناسیون بالاتر به دست می‌آید، اما در دماهای بالاتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد، فاز مایع از قبل شروع به تشکیل می‌کند که منجر به تجمع در کلسیناتور و جریان گاز محدود می‌شود .بنابراین دمای اضافی مطلوب نیست .از نقطه نظر عملیاتی، قوانین کلی زیر برای تعیین دمای کلسیناسیون و درجه کلسیناسیون وجود دارد:

- هرچه دمای کلسیناسیون (و درجه کلسیناسیون) بالاتر باشد، درجه کلسیناسیون یکنواخت‌تر است (زیرا شیب منحنی کلسیناسیون با افزایش دمای کلسیناسیون کاهش می‌یابد) و در نتیجه عملکرد کوره پایدارتر است، اما راندمان حرارتی سیستم کوره پیش‌کلسیناتور به دلیل دمای بالاتر خروجی کلسیناتور و پیش‌گرمکن پایین‌تر است.
- هرچه دمای کلسیناسیون (و درجه کلسیناسیون) پایین‌تر باشد، درجه کلسیناسیون یکنواخت‌تر است (زیرا شیب منحنی کلسیناسیون با کاهش دمای کلسیناسیون افزایش می‌یابد) و درجه کلسیناسیون به نوسانات (اختلالات) سرعت و خواص سوخت پیش‌کلسیناتور و خوراک کوره حساس‌تر است.

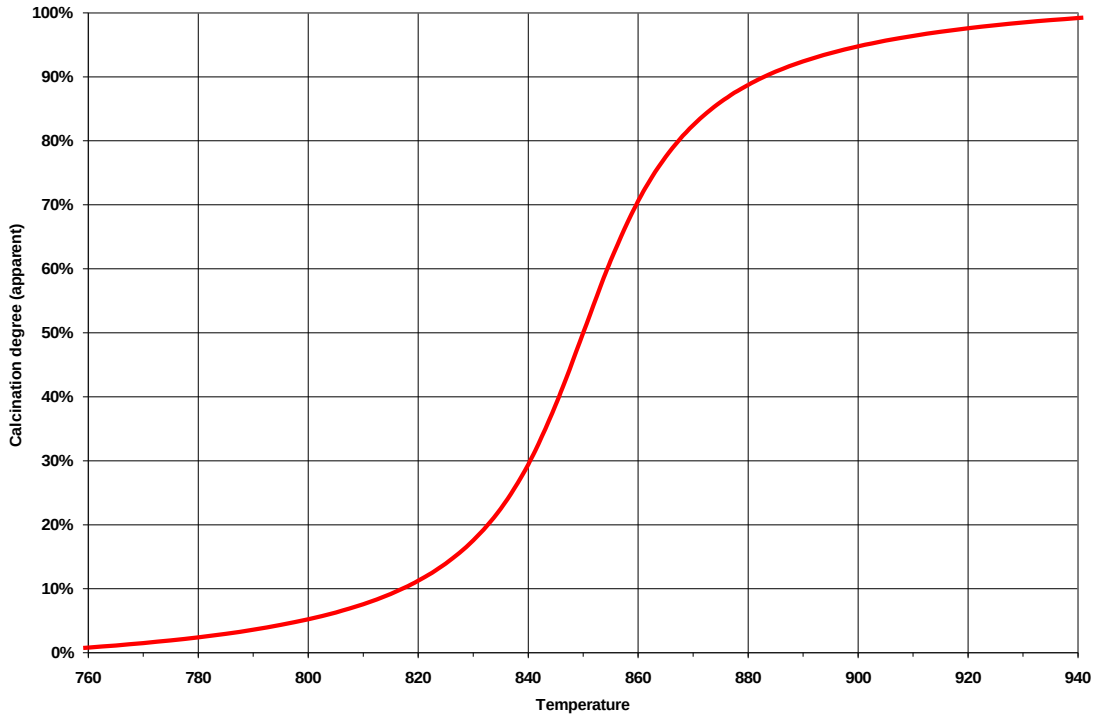


Figure 8: Typical calcining curve

5.2 Oxygen control کنترل اکسیژن

اکسیژن در خروجی کلساینر از طریق جریان کلساینر کنترل می‌شود، همانطور که اکسیژن در ورودی کوره توسط جریان کوره کنترل می‌شود . مقدار هدف معمول برای اکسیژن پس از کلساینر (خروجی سیکلون پایین) ۱ تا ۱,۵ درصد است .در سیستم‌های کلساینر جدا از هوا، جریان کلساینر توسط فن گاز خروجی تنظیم می‌شود .تنظیمات فن گاز خروجی نیز بر جریان کوره تأثیر می‌گذارد .بنابراین هرگونه تنظیم در فن گاز

خروجی معمولاً شامل تنظیم دمپر هوای ثالثیه (یا بسته به طراحی دهانه کوره) نیز می‌شود تا جریان کوره ثابت بماند .فقط در مورد کلساینرهای خط جداگانه، جریان کلساینر را می‌توان به طور مستقل از کوره از طریق فن گاز خروجی اضافی کنترل کرد.

5.3 Other control parameters دیگر پارامترهای کنترل

در کنار دو پارامتر کنترل اصلی دما و اکسیژن و دو متغیر کنترل نرخ سوخت به داخل کلساینر و مکش کلساینر، در برخی از طرح‌هایAS ، قابلیت تنظیم بیشتری از طریق ورود مرحله‌ای سوخت و/یا خوراک و/یا هوای ثالثیه ارائه می‌شود .این ویژگی‌های طراحی به دلایل مختلفی پیاده‌سازی می‌شوند (مثلاً کاهشNOx ، احتراق و سوختن بهتر سوخت‌های با واکنش‌پذیری پایین، محافظت در برابر نسوز در یک نقطه داغ و غیره) .تنظیم خاص آنها در این مقاله مورد بحث قرار نخواهد گرفت.

6. GRATE COOLER CONTROL کنترل گریت کولر

خنک‌کننده‌ی گریت نه تنها رایج‌ترین نوع خنک‌کننده است، بلکه بیشترین سازگاری را با الزامات مختلف فرآیند دارد.

6.1 Bed height and grate speed ضخامت بستر بار و سرعت گریت

هدف اصلی عملکرد خنک‌کننده گریت، بازیابی بیشترین مقدار انرژی ممکن از کلینکر داغ است تا به دمای بالای هوای احتراق دست یافته و کلینکر به طور کافی خنک شود .بسته به دانه‌بندی کلینکر، ارتفاع مشخصی از بستر کلینکر یافت می‌شود که در آن راندمان بازیابی به بهترین شکل ممکن است .عملکرد گریت کولر باید سعی کند ضخامت لایه کلینکر روی گریت را در این ارتفاع بهینه ثابت نگه دارد .از آنجایی که این ضخامت بهینه اساساً به دانه‌بندی کلینکر بستگی دارد، ارتفاع بستر با بهترین عملکرد می‌تواند با گذشت زمان تغییر کند و ممکن است هدف ارتفاع بستر (پارامتر کنترل) را تغییر دهد .برای تعیین ضخامت بستر کلینکر، از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

◀فشار برگشتی زیر اولین گریت، در صورتی که جریان فن خنک‌کننده مربوطه ثابت نگه داشته شود (رایج‌ترین روش)

◀سیستم‌های تشخیص سطح، که با اندازه‌گیری فاصله راداری کار می‌کنند

◀سیستم‌های توزین که بار کلینکر یک منطقه خاص را وزن می‌کنند، به عنوان مثال بار کلینکر روی ورودی ثابت (به ندرت استفاده می‌شود)

متغیر کنترل برای تنظیم ضخامت بستر کلینکر، سرعت گریت کولر (یا سرعت انتقال کلینکر) است .با افزایش سرعت گریت، بستر کلینکر سریع‌تر به بیرون حرکت می‌کند و ارتفاع بستر کاهش می‌یابد .کاهش سرعت گریت اثر معکوس دارد .معمولاً این سرعت گریت به طور خودکار کنترل می‌شود (عمدتاً در عملکرد فشار برگشتی یک یا چند محفظه زیر گریت اول).

حلقه‌ای (لوپ) که مسئول این کنترل است، اساساً باید دو وظیفه متضاد را انجام دهد:

◀افزایش سرعت گریت در هنگام ریزش کوتینگ، شکستن رینگ ها و سایر مواردی که کوره مقدار زیادی کلینکر را به سرعت آزاد می‌کند (که نیاز به تنظیمات PID تهاجمی دارد: تناسبی↑ ، انتگرالی↓)

◀حفظ ارتفاع بستر کلینکر (یعنی فشار برگشتی زیر گریت) در شرایط عملیاتی عادی تا حد امکان نزدیک به نقطه تنظیم مطلوب، بدون نوسان یا چرخه (که نیاز به تنظیمات PID ملایم دارد: تناسبی↓ ، انتگرالی↑) کنترل‌کننده‌ای که این الزامات را برآورده می‌کند، ممکن است ویژگی‌های معمول زیر را داشته باشد:

◀تنظیم نرم سرعت گریت، اگر فشار در یک محدوده از پیش تعریف شده خاص باشد (مثلاً ۳۵ میلی‌بار +/- ۲ میلی‌بار)

◀تنظیم شدید سرعت گریت، اگر فشار خارج از محدوده از پیش تعریف شده باشد

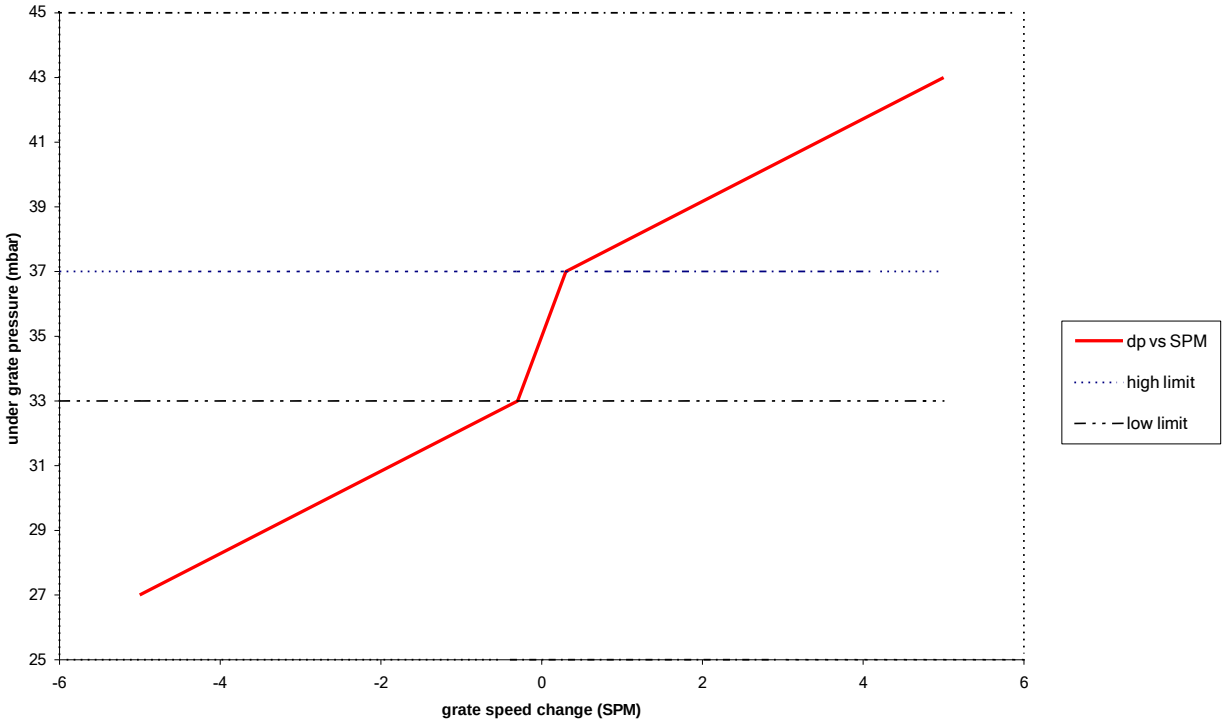


Figure 9: Typical grate speed controller characteristic (example)

اگر خنک‌کننده (کولر) از بیش از یک گریت تشکیل شده باشد، سرعت گریت های بعدی به طور معمول با نسبت متناسب با سرعت گریت اول نگه داشته می‌شود .در نتیجه، نسبت سرعت گریتهای بعدی به تدریج افزایش می‌یابد، بنابراین ارتفاع بستر کلینکر از گریت اول به گریت‌های بعدی به صورت پله‌ای کاهش می‌یابد.

6.2 Subordinate control loops حلقه های کنترل فرعی

6.2.1 Cooler air flow جریان هوای کولر

جریان فن‌های کولر معمولاً به‌طور خودکار ثابت و مستقل از فشار برگشتی گریت و بستر کلینکر نگه داشته می‌شود .هدف این است که همیشه مقدار یکسانی از هوای کولر را به گریت، مستقل از نوسانات جزئی توان عملیاتی کولر، ارائه دهیم .جریان هوای ثابت، پیش‌نیاز اساسی برای کنترل ارتفاع بستر کلینکر است، زمانی که کنترل سرعت گریت با فشار برگشتی زیر گریت اول کار می‌کند .جریان هوای ویژه (مقدار هوای کولر در هر متر مربع و ثانیه) و فشار برگشتی در ردیف‌های اول کولر بیشترین مقدار را دارند و الگوی نزولی به سمت خروجی کولر دارند .این به این دلیل است که خنک‌سازی کلینکر و بازیابی گرما به همان اندازه که اختلاف دمای بین کلینکر و هوای کولر بیشتر باشد، کارآمدتر است .بنابراین، هوای خنک‌کننده بیشتری در ورودی، جایی که کلینکر هنوز داغ است، استفاده می‌شود .یک توزیع هوای معمولی (با فشار برگشتی مربوطه) یک خنک‌کننده در زیر نشان داده شده است (در مثال، خنک‌کننده دارای ۱ گریت و ۶ بخش اتاقچه هوادهی است) .

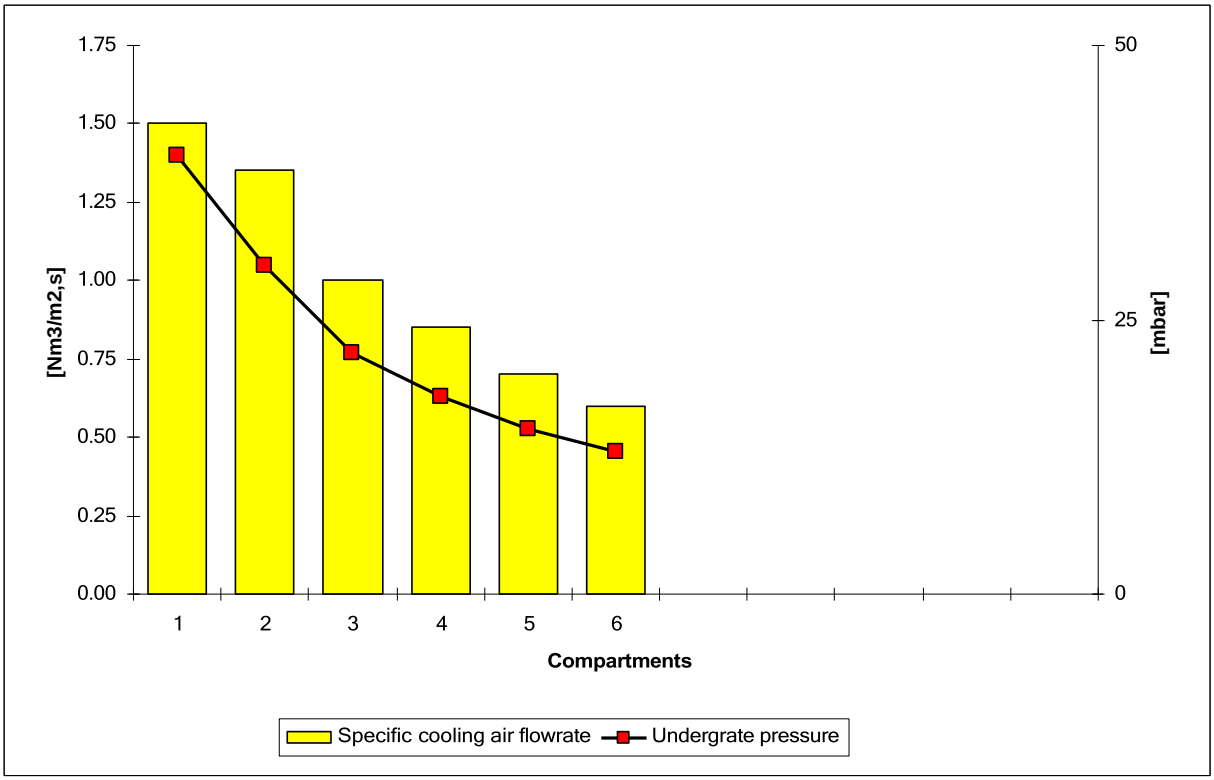


Figure 10: Cooling air flow distruibution (example)

6.2.2 Kiln hood pressure فشار هود کوره

در یک گریت کولر ، مقدار هوای مورد استفاده برای خنک کردن کلینکر بیشتر از مقدار هوای مورد نیاز برای احتراق در کوره (و کلسینه‌کننده) است .هوای اضافی باید توسط یک سیستم تهویه جداگانه، به اصطلاح فن هوای خروجی، از کولر خارج شود .دمای فن هوای خروجی باید طوری تنظیم شود که فشار در کولر و هود کوره نه مثبت باشد و نه خیلی منفی .معمولاً این فشار در هود کوره اندازه‌گیری می‌شود و در مقداری حدود - ۰,۲ - ۰,۵- میلی‌بار ثابت نگه داشته می‌شود .برای کاهش فشار هود کوره (منفی‌تر کردن)، دمای فن هوای خروجی افزایش می‌یابد و برعکس . اغلب یک کنترل خودکار این کار را انجام می‌دهد .فشار ثابت و کمی منفی هود کوره به دلایل ایمنی و برای محافظت از تجهیزات مهم است .از آنجایی که فن هوای خروجی، فن ID را متعادل می‌کند (به سمت آن می‌کشد)، فشار هود کوره نباید در شرایط عادی کار، منفی‌تر از حد لازم باشد .با این وجود، فشار هود کوره اغلب در هنگام راه‌اندازی (کوره سرد) روی مقادیر بسیار پایین‌تر (۲,۰- تا ۳,۰- میلی‌بار) تنظیم می‌شود تا شعله را عقب نگه دارد (شعله را کوتاه کند) و از گرم شدن بیش از حد انتهای کوره جلوگیری کند (از BET بالا به دلیل شعله بلند و مکش بیش از حد جلوگیری کند) .

7. LEPOL GRATE CONTROL

پیش‌گرمکن گریت لپول اساساً از یک گریت متحرک تشکیل شده است که از دو اتاقچه عبور می‌کند .گلوله‌های روی گریت که در دستگاه گلوله‌ساز (فقط فرآیند نیمه‌خشک) تشکیل شده‌اند، ابتدا در اتاقچه‌ی خشک‌کن خشک می‌شوند و سپس بیشتر گرم می‌شوند و تا حدی در اتاقچه ی داغ کلسینه می‌شوند .گازهای داغ کوره از بستر روی گریت در اتاقچه ی داغ به سمت پایین نفوذ می‌کنند، از آنجا توسط فن میانی که جریان کوره را کنترل می‌کند، خارج می‌شوند .از آنجا توسط فن گاز خروجی از اتاقچه ی خشک‌کن عبور می‌کنند که فشار در اتاقچه ی خشک‌کن را کنترل می‌کند.

.

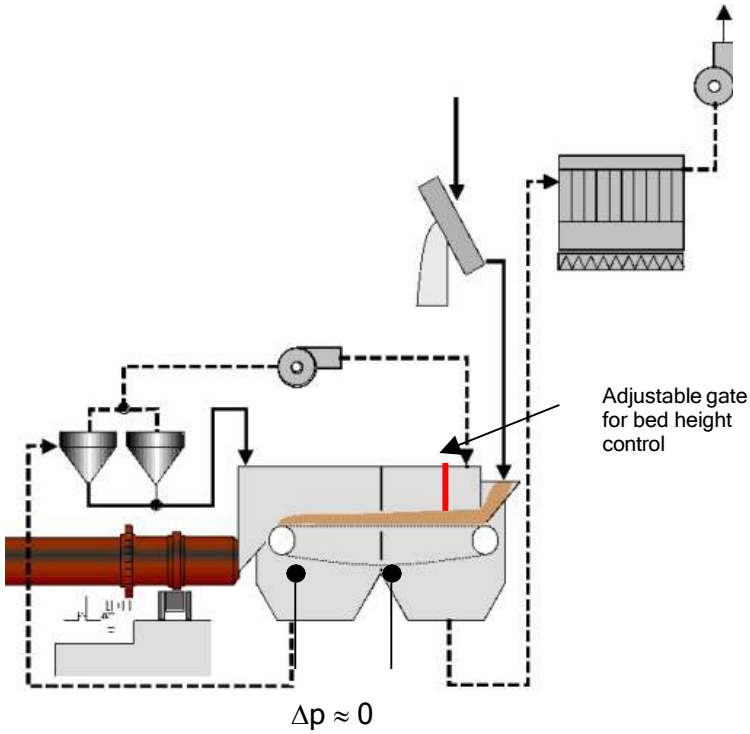


Figure 11: Gas - and material flows of a Lepol preheater

7.1 Subordinary control loops

7.1.1 Pressure control کنترل فشار

افت فشار روی گریت در خشک‌کن و در اتاقچه گرم معمولاً بین ۶ تا ۱۰ میلی‌بار است که به ارتفاع بستر روی گریت و حجم خالی بستر بستگی دارد .اندازه اتاقچه های پیش‌گرمکن لپول به گونه‌ای طراحی شده است که افت فشار روی گریت در هر دو اتاقچه معمولاً برابر باشد .(با این وجود، در کوره‌های خاصی که بار داست در ورودی کوره زیاد است، افت فشار روی بستر در محفظه گرم به دلیل کاهش حجم خالی از طریق داست، بیشتر از افت فشار در اتاقچه خشک‌کن است). از آنجایی که آب‌بندی بین دو اتاقچه محدود است، ایجاد تعادل مناسب بین فشار بین دو اتاقچه زیر و بالای گریت از اهمیت بالایی برخوردار است .این وظیفه فن گاز خروجی است که معمولاً به گونه‌ای تنظیم می‌شود که فشار زیر گریت اتاقچه خشک‌کن تقریباً برابر با فشار زیر گریت اتاقچه گرم باشد (اگر افت فشار روی گریت در هر دو اتاقچه برابر باشد، در نتیجه فشار بالای گریت اتاقچه خشک‌کن نیز باید برابر با فشار بالای گریت اتاقچه گرم باشد) .اگر فن اگزوز بیش از حد بکشد، فشار در اتاقچه خشک‌کن در زیر و بالای گریت منفی‌تر از اتاقچه گرم است که منجر به اتصال کوتاه گازهای داغ از اتاقچه گرم به اتاقچه خشک‌کن و سیستم گاز خروجی می‌شود .این اتصال کوتاه گازهای داغ از اتاقچه گرم به اتاقچه خشک‌کن اغلب باعث ترکیدن گلوله‌ها می‌شود (به دلیل فشار بخار آب بیش از حد در گلوله‌ها) .اگر فن خروجی به اندازه کافی هوا را مکش نکند، فشار در اتاقچه خشک‌کن زیر و بالای گریت، منفی‌تر از اتاقچه گرم است که منجر به اتصال کوتاه گازهای "سرد" از اتاقچه خشک‌کن به اتاقچه گرم و چرخش مجدد (ریسیرکولاسیون) گازها از اتاقچه خشک‌کن از طریق فن میانی می‌شود که در نتیجه،

جریان هوای کوره را کاهش می‌دهد.

7.1.2 Traveling grate speed control کنترل سرعت رفت و برگشتی گریت

برای تضمین تبادل حرارتی خوب بین گازها و گلوله‌ها (پلت) ، حفظ ارتفاع مشخصی از بستر روی گریت توری مهم است .ارتفاع بهینه بستر گلوله‌ها، که اساساً تابعی از مقاومت بستر است، باید به صورت تجربی پیدا شود و به حجم خالی بستر (توزیع اندازه گلوله) بستگی دارد .ارتفاع بستر با تنظیم دیواره عبور بین شوت تغذیه مواد و اتاقچه خشک‌کن تعیین می‌شود (شکل ۱۱ را ببینید) .سطح مواد در بونکر تغذیه با تنظیم انتقال مواد به و از دستگاه پلت‌ساز به گریت توری ثابت نگه داشته می‌شود .با افزایش سرعت حرکت گریت توری، نرخ تغذیه مواد افزایش می‌یابد و برعکس.

7.1.3 Pelletizer control کنترل پلت ساز

در سیستم‌های کوره نیمه خشک، پلت‌ها از مواد خام تحت افزودن ۱۰ تا ۱۵ درصد آب در پلت‌ساز، که فقط یک ظرف چرخان است، تشکیل می‌شوند.

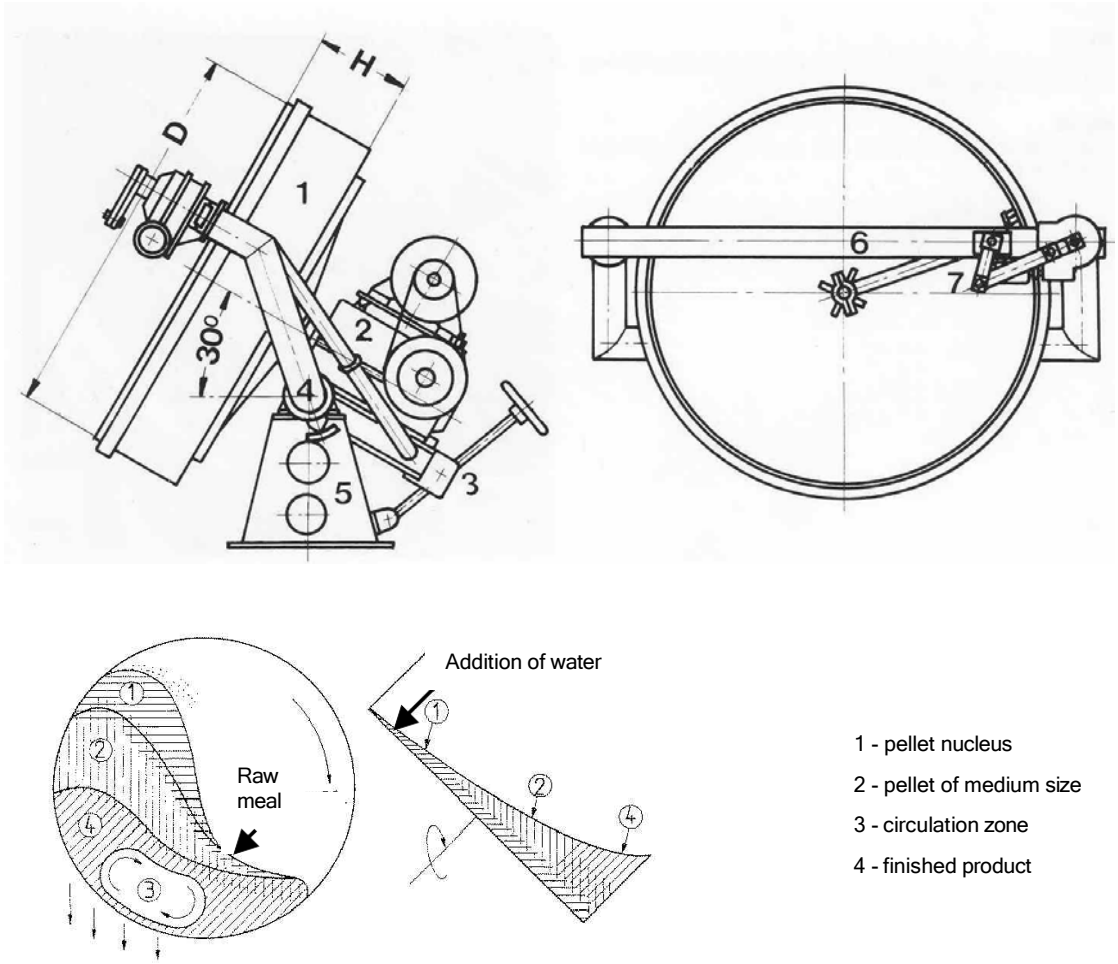


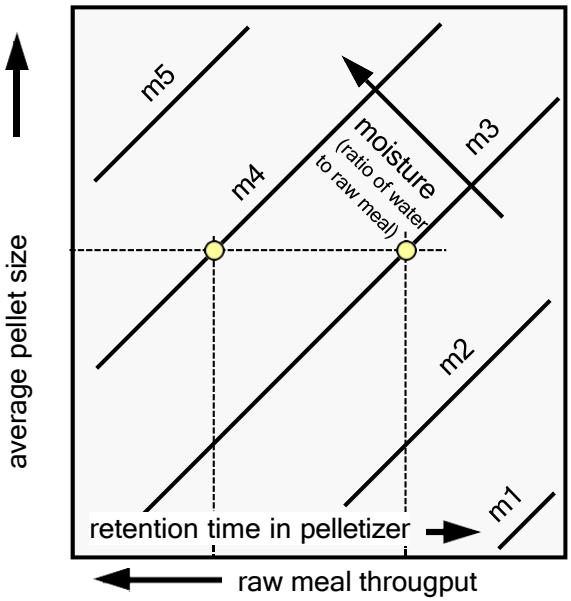
Figure 12: Pelletizer (semi dry process)

مهم‌ترین خواص پلت‌ها اندازه، یکنواختی، تخلخل، میزان رطوبت و استحکام آن‌ها است .این خواص تحت تأثیر نرخ تغذیه پودر خام (میزان نفوذ)، نسبت آب به پودر خام (میزان رطوبت پلت)، زاویه شیب ظرف، سرعت چرخش، ارتفاع لبه ظرف و سایر پارامترها قرار می‌گیرند .از نقطه نظر عملیاتی، نرخ تغذیه پودر خام (میزان نفوذ) و نسبت آب به پودر خام مهم‌ترین عواملی هستند که بر خواص پلت‌ها تأثیر می‌گذارند.

تأثیر نرخ تغذیه آرد خام (توان عملیاتی) و نسبت آب به آرد خام به شرح زیر است:

• نرخ تغذیه مواد خام (در نسبت ثابت آب به خوراک خام)هرچه نرخ تغذیه خوراک خام بیشتر باشد، اندازه گلوله کوچکتر (حجم خالی کمتر)، گلوله متخلخل‌تر و توزیع اندازه گلوله‌ها (حجم خالی کاهش یافته) غیریکنواخت‌تر است .هرچه نرخ تغذیه آرد خام کمتر باشد، اندازه گلوله بزرگتر (ترکیدن گلوله‌ها)، گلوله کمتر متخلخل (ترکیدن گلوله‌ها) و توزیع اندازه گلوله‌ها یکنواخت‌تر است.

• نسبت آب به خوراک خام (در نرخ ثابت تغذیه آرد خام) هرچه نسبت آب به خوراک خام بیشتر باشد، اندازه گلوله بزرگتر (ترکیدن گلوله‌ها) و استحکام گلوله بیشتر است .هرچه نسبت آب به خوراک خام کمتر باشد، اندازه گلوله کوچکتر (حجم خالی کاهش یافته) و استحکام گلوله کمتر (شکستگی در حین ترانسپورت) است .رابطه بین اندازه گلوله، نرخ تغذیه خوراک خام و نسبت آب به خوراک خام (میزان رطوبت) گلوله‌ها) به صورت کیفی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



(m5>m4>m3>m2>m1)

Figure 13: Pellet size in function of raw meal feed rate and ratio of water to raw meal

برای حفظ اندازه مشخصی از پلت (مثال در شکل ۱۳)، نسبت آب به پودر خام (رطوبت پلت) باید با افزایش نرخ خوراک پودر خام کمی افزایش یابد (و برعکس) .با این وجود، تغییر مورد نیاز در نسبت آب به پودر خام اندک است (چند دهم درصد رطوبت) و یک دانه‌بندی مناسب صرفاً به نرخ خوراک مواد خام و نسبت آب به مواد خام بستگی ندارد، بلکه به شدت تحت تأثیر خواص شیمیایی و کانی‌شناسی پودر خام، طراحی و تنظیم پلت‌ساز و تعدادی از عوامل دیگر نیز قرار می‌گیرد.

8. PROCESS PROBLEMS AND KILN UPSET CONDITIONS
مشکلات فرآیند و شرایط نامساعدکوره

تعدادی موقعیت نامطلوب وجود دارد که نیاز به توجه ویژه و اقدامات متقابل دارند .از میان تعداد زیاد مشکلات و شرایط آشفته احتمالی، اکنون مهمترین آنها و اقدامات متقابل مربوط به آنها ارائه شده است.

8.1 Cycling چرخه ای شدن

سیکلی شدن شرایطی است که در آن یک یا چند پارامتر کوره (اما بیشترBZT) با دامنه زیادی در اطراف هدف نوسان می‌کنند .این به اصطلاح جهش بیش از حد است .یک عملیات نامناسب کوره خود باعث سیکلی شدن مکرر می‌شود، به خصوص اگر اقدامات متقابلی که برای بازگرداندن یک یا چند متغیر کنترل به هدف انجام می‌شود، بسیار قوی باشد .این یک پدیده شناخته شده در مهندسی کنترل است، یک مشکل کلی که در سایر زمینه‌های کنترل نیز وجود دارد .برای جلوگیری از سیکلی شدن کوره، عملیات باید روان باشد، یعنی هرگونه تنظیم در متغیرهای کنترل باید

تا حد لازم بزرگ و در عین حال تا حد امکان کوچک باشد .یک اقدام متقابل نه تنها باید شرایط واقعی را در نظر بگیرد، بلکه باید به تغییرات گذشته و آینده نیز نگاهی داشته باشد، یعنی علاوه بر مقدار واقعی، روند یک متغیر کنترل خاص نیز باید در نظر گرفته شود .برای شکستن یک سیکل ، عملیات کوره باید قبل از رسیدن به آن، شروع به مقابله با یک نقطه انتهایی سیکل کند .وقتی دوره تناوب سیکل مشخص باشد، باید قبل از رسیدن به نصف هر دو حد، واکنش متقابل برای حد نهایی بعدی انجام شود .این کار دامنه هر سیکل بعدی را کاهش می‌دهد و کوره را به حالت پایدار عملیاتی بازمی‌گرداند .در سیکل هایی که توسط خود عملیات کوره ایجاد می‌شوند، تناوب معمولاً تقریباً دو برابر زمان ماند مواد در کوره است .در فصل ۱۱ دو فرمول برای محاسبه زمان ماند ارائه شده است .با آگاهی از این تناوب، می‌توان سیکل را زودتر قطع کرد .علاوه بر این سیکل ها، که می‌توان آنها را به عملیات کوره نسبت داد، عوامل دیگری نیز مسئول هستند .رایج‌ترین آنها نوسانات مواد اولیه و خواص سوخت‌ها هستند .اگر این نوسانات دارای ویژگی تناوبی باشند، می‌توان آنها را به همان روشی که در بالا توضیح داده شد، خنثی کرد .اگر تصادفی باشند، عملیات هرگز یک (کنش متقابل) در زمان نخواهد بود، بلکه همیشه یک واکنش برای اصلاح آنچه قبلاً اتفاق افتاده است، خواهد بود .از آنجایی که شرایط سیکل تأثیر منفی زیادی بر بهره‌وری کوره دارد، باید تمام تلاش‌ها برای دستیابی به یک عملیات پایدار کوره انجام شود .بنابراین یکی از اساسی‌ترین پیش‌نیازها، خواص همگن خوراک و سوخت است.

8.2 Coating Collapse

کوتینگ، لایه محافظی از فازهای مایع مذاب و جامد شده روی نسوز در منطقه پخت است .بسته به خواص مواد اولیه، نسوز، سوخت‌ها و شعله، این کوتینگ می‌تواند کم و بیش مشخص باشد .فروپاشی کوتینگ وضعیتی است که در آن بخش‌های بزرگی از این کوتینگ به دلیل وزن زیاد، تغییرات زیاد دما در منطقه پخت (به ویژه افت شدید دما)، نوسانات خواص مواد اولیه، عملکرد نامناسب و موارد دیگر، به صورت توده‌های بزرگ از نسوز جدا می‌شوند .فروپاشی کوتینگ در درجه اول از طریق آمپرهای کوره تشخیص داده می‌شود .افزایش شدید در آمپرهای متوسط کوره نشان می‌دهد که ناگهان مقدار بیشتری از مواد باید در کوره جابجا شود .افزایش مداوم آمپرهای کوره همچنین ممکن است نشان دهنده از بین رفتن ناهموار کوتینگ در یک ناحیه از کوره باشد .در صورت نصب دوربین کوره، کوتینگ افتاده را می‌توان در آخرین مترهای قبل از خروجی کوره نیز به صورت بصری مشاهده کرد .این نشانه‌ها به تخمین شدت از بین رفتن کوتینگ و میزان اقدام متقابلی که باید انجام شود، کمک می‌کنند .وقتی کوتینگ از بین می‌رود و مقدار آن خیلی زیاد نیست، هیچ تنظیمی روی متغیرهای کنترل انجام نمی‌شود BZT .ممکن است برای مدت کوتاهی کمی کاهش یابد اما معمولاً به سرعت بهبود می‌یابد، زیرا کوتینگ قبلاً به دمای پخت رسیده است .فروپاشی کوتینگ معمولاً منجر به افزایش مقادیر CaO آزاد کلینکر می‌شود، زیرا کلینکر کردن قطعات بزرگ دشوار است .به همین دلیل نباید تلاشی برای کلینکر کردن کوتینگ فرو ریخته شده انجام شود، زیرا این امر فقط منجر به گرم شدن بیش از حد کل سیستم می‌شود .اگر فروپاشی کوتینگ برجسته‌تر باشد، باید به کولر توجه ویژه‌ای شود، زیرا مقدار بیش از حد مواد ممکن است کولر و سیستم‌های انتقال کلینکر را بیش از حد پر کند یا منجر به دمای انتهایی بیش از حد کلینکر شود . اگر سنگ‌شکن چکشی نصب شده باشد، باید بررسی دقیقی انجام شود تا توده‌های کوتینگ سنگ‌شکن را بیش از حد بار نکنند یا مسدود نکنند، در غیر این صورت سرعت گریت کولر باید کاهش یابد .وقتی احتمال اضافه بار کولر یا کراشر کلینکر وجود دارد و سرعت گریت کولر باید به طور قابل توجهی کاهش یابد، کوره نیز باید به طور موقت کند شود تا خروجی کلینکر کوره کاهش یابد و از پر شدن بیش از حد کولر در ورودی جلوگیری شود .اگر وضعیت آنقدر وخیم باشد که کوره برای مدت طولانی‌تری (حداکثر بیش از پنج دقیقه، شرایط تجهیزات محلی باید حاکم باشد) کند شود، میزان سوخت، میزان تغذیه و مکش کوره باید کاهش یابد.

8.3 Ring break out شکستن رینگ

در ادامه، واکنش‌های متقابل پس از شکستن رینگ شرح داده شده است.

8.3.1 Clinker ring break out شکستن رینگ کلینکری

رینگ کلینکری که در خروجی کوره تشکیل می‌شود، مانعی برای کلینکر است و باعث می‌شود کلینکر پشت این رینگ گیر کند .اگر این رینگ شکسته شود، مقدار زیادی کلینکر کاملاً پخته شده از کوره آزاد می‌شود .افزایش شدید ارتفاع بستر کولر (برای گریت کولرها)، کاهش تدریجی آمپر کوره و افزایش تدریجی دمای هوای ثانویه، نشان‌دهنده شکستن رینگ کلینکری است .در بیشتر مواردی که دوربین کوره نصب شده است، شکستن رینگ کلینکری را می‌توان به صورت بصری نیز مشاهده کرد .برای گریت کولر: به دلیل خروجی بالاتر موقت کوره، اغلب لازم است سرعت کوره را کاهش دهید تا از اضافه بارکولر که ممکن است منجر به دمای بیش از حد کلینکر و هوای هدر رفته یا از کار افتادن فن‌های کولرشود، جلوگیری شود.

8.3.2 Sinter, middle, meal and mud rings

رینگهای زینتر ، خام و خاکی

هر یک از انواع مختلف رینگ‌ها، محل و منشأ خاص خود را دارند .با این حال، وجه مشترک همه آنها این است که جریان مواد را مسدود می‌کنند . به محض اینکه رینگ‌ها می‌شکنند، مقدار زیادی از مواد نیمه‌آماده آزاد می‌شود .این باعث خنک شدن کوره و جابجایی تمام مناطق واکنش به سمت پایین می‌شود .کوره "فشار" می‌آورد .تشخیص فوری شکستگی رینگ‌ها دشوار است .از آنجایی که مواد پخته نشده تأثیر قابل توجهی بر گشتاور کوره ندارند، آمپرهای کوره اغلب هیچ تغییری نشان نمی‌دهند .تنها اگر حلقه به اندازه‌ای بزرگ باشد که مانع قابل توجهی برای جریان گاز ایجاد کند، ممکن است کاهش کمی در افت فشار در کوره مشاهده شود .از آنجایی که تشخیص فوری شکستگی رینگ‌ها اغلب دشوار است، تنها افت شدید BZT و افزایش ناگهانی خروجی کوره می‌تواند این سوءظن را ایجاد کند که رینگی قبلاً شکسته شده است .اسکنرهای پوسته کوره به تشخیص تشکیل رینگ کمک می‌کنند .به همین ترتیب، آنها می‌توانند به راحتی از بین رفتن تدریجی رینگ را نشان دهند .متأسفانه آنها اغلب به اندازه کافی سریع واکنش نشان نمی‌دهند تا فروپاشی رینگ را نشان دهند .اقدامات متقابلی که *باید انجام شود به اندازه شکستن رینگ و وضعیت کلی کوره بستگی دارد و به احتمال زیاد مطابق موارد ۱ تا ۹ از اقدامات متقابلی است که قبلاً توضیح داده شد.*

8.4 Hot meal rush (avalanche) هجوم هات میل (بهمن مذاب)

هجوم خوراک داغ یا به اصطلاح "بهمن" وضعیتی است که در آن BZT به اندازه‌ای افت می‌کند که مواد کلسینه شده اما پخته نشده به خروجی کوره می‌رسند .این وضعیت ممکن است ناشی از عملکرد خود کوره، پیشروی نامنظم خوراک (مثلاً شکستن رینگ، انسداد موقت سیکلون) یا خرابی سیستم‌های تغذیه خوراک یا سوخت و موارد دیگر باشد .هنگامی که خوراک گرم به خروجی کوره رسید، باید تمام تلاش‌ها برای جلوگیری از ورود این خوراک به کولر انجام شود .خوراک پخته نشده اما داغ می‌تواند آسیب جدی به گریت کولر وارد کند .اگر خوراک گرم وارد کولرشود، درصد زیادی از آن دوباره به داخل کوره دمیده می‌شود .فضای بسیار داستی در کوره مانع از انتقال حرارت مناسب شعله به سمت منطقه پخت می‌شود .علاوه بر این، داست شعله را خنک می‌کند .از آنجایی که تقریباً هیچ گرمایی از خوراک قابل بازیابی نیست، دمای هوای ثانویه کاهش می‌یابد .همه این عوامل بر انتقال حرارت تأثیر منفی می‌گذارند و منجر به افت بیشتر BZT (اما افزایش BET) می‌شوند .بنابراین، تنها اقدام متقابل، اما کاملاً اجباری و ناگزیر، کاهش فوری سرعت کوره است تا از ورود داست به کولر جلوگیری شود و متغیرهای کنترل مطابق موارد ۱ تا ۹ از اقدامات متقابل که قبلاً توضیح داده شد، تنظیم شوند .به احتمال زیاد، سرعت کوره باید تا حدی کاهش یابد که کاهش موازی خوراک کوره برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد انتهای کوره امکان‌پذیر نباشد .در این شرایط، سیکل می‌تواند رخ دهد.

8.5 Red spot on the kiln shell لکه سرخ روی بدنه کوره

لکه قرمز، ناحیه‌ای محدود و موضعی از شل کوره است که بیش از حد گرم شده است .وقتی دمای سطح از ۴۵۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود، بدنه بیش از حد گرم شده در نظر گرفته می‌شود .تابش مرئی روی سطح پوسته از دمای تقریباً بالای ۴۷۵ درجه سانتیگراد شروع می‌شود، به همین دلیل به آن لکه قرمز می‌گویند .این امر معمولاً از فرسودگی نسوز و عدم وجود هرگونه کوتینگ در این ناحیه ناشی می‌شود که منجر به انتقال حرارت بیش از حد از داخل به خارج کوره، به دلیل عایق ناکافی، می‌شود .دمای بالای بدنه باعث تاب برداشتن شل کوره می‌شود که در نتیجه مانع از نصب صحیح نسوز شده و به دلیل نیروهای مکانیکی بیش از حد، منجر به خرابی زودرس آجرها می‌شود .بنابراین باید همیشه از آنها اجتناب شود .دلایل مختلفی برای ایجاد نقطه داغ وجود دارد.

◄وقتی آجرها از قبل نازک هستند و لایه کوتینگ محافظ جدا می‌شود، نسوز باقی مانده عایق کافی را فراهم نمی‌کند .نقاط داغ ایجاد شده توسط این مکانیسم می‌توانند از یک لحظه به لحظه دیگر ظاهر شوند .

◄هنگامی که کوتینگ از بین می‌رود، کوتینگ لایه‌ای از ماده نسوز را جدا می‌کند و آجر را ضعیف می‌کند .این امر همچنین ممکن است به عنوان یک اثر ثانویه رخ دهد، زمانی که ماده نسوز به دلیل شوک حرارتی که آجر متحمل می‌شود، شروع به ترک خوردن می‌کند، زمانی که ناگهان در معرض گرمای کامل منطقه پخت قرار می‌گیرد (پوسته پوسته شدن حرارتی) .

◄انواع خرابی‌های مکانیکی آجر، که در آن بخش‌هایی از ماده نسوز جدا می‌شوند و بدنه را تا حدی یا کاملاً بدون محافظ باقی می‌گذارند .

از بین رفتن کوتینگ و گرم شدن بیش از حد موضعی پوسته ممکن است ناشی از:

عمل پختن بیش از حد شدید، که کوتینگرا ذوب کرده و آستر را می‌شکند .کوره معمولاً داغ، گرمای بیشتری نسبت به حالت معمول به پوسته منتقل می‌کند و ممکن است در آن نواحی که آجرها قبلاً ضعیف بودند، نقطه داغ ایجاد شود.

◄تنظیم نادرست لوله مشعل نسبت به محور کوره.

◄تنظیم نادرست دمپرهای محوری یا شعاعی، به ویژه هنگامی که هوای شعاعی بیش از حد زیاد باشد، شعله‌ای بسیار پهن و پرپشت ایجاد می‌کند.

◄تشکیل توده آدم برفی روی لوله مشعل که جریان هوا (یا سوخت) را در نوک مشعل به سمت آجرها و پوسته کوره منحرف می‌کند .

◄کنترل ضعیف شیمی خوراک کوره که منجر به دوره‌های پختن بیش از حد و به دنبال آن دوره‌های پختن کم می‌شود.

اگر نقطه داغ خیلی بزرگ نباشد (کمتر از حدود ۱ متر مربع) و اگر در منطقه پخت، جایی که کوتینگ قرار دارد، باشد، اپراتور کوره قبل از هر چیز باید سعی کند یک لایه کوتینگ محافظ را بازسازی کند .یک روش معمول این است که کوره را گرم نگه دارند اما اجازه دهند که خوراک کلسینه شده به صورت دوره‌ای وارد ناحیه آسیب‌دیده شود (مثلاً با تغییر سرعت کوره) .این کار نقطه داغ مربوطه را کمی خنک می‌کند و مواد شروع به سفت شدن و چسبیدن به ناحیه آسیب‌دیده می‌کند .با این وجود، باید توجه ویژه‌ای به جلوگیری از خنک شدن واقعی منطقه پخت داشت، زیرا یک کوره سرد کوتینگ تشکیل نمی‌دهد و گرمای بعدی در طول بازیابی، کوتینگ و پوسته کوره آسیب‌دیده را بیشتر خراب می‌کند .در موارد خاص، همان اثر حرکت مناطق واکنش به بالا و پایین، که به تشکیل کوتینگ کمک می‌کند، می‌تواند با تغییر دوره‌ای پروفیل دمای شعله حاصل شود .پروفیل دما با حرکت منظم مشعل به داخل کوره (که شعله را بلندتر می‌کند) و خارج از آن (که شعله را کوتاه‌تر می‌کند) تغییر می‌کند . همچنین می‌توان تنظیمات اولیه هوا (نسبت هوای محوری/شعاعی) را تغییر داد، اگرچه این کار توصیه نمی‌شود .با شیمی صحیح، یک کوره که کمی بیش از حد گرم شده باشد، کوتینگ را ایجاد و حفظ می‌کند، در حالی که یک کوره سرد نمی‌تواند به راحتی کوتینگ را ایجاد یا حفظ کند . خنک کردن خارجی پوسته کوره در ناحیه آسیب دیده از طریق فن، تشکیل کوتینگ را نیز تقویت می‌کند .در نتیجه، دمای پوسته به صورت موضعی کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش دمای داخل کوره نیز می‌شود .احتمال انجماد خوراک یا کلینکر از قبل تشکیل شده در ناحیه خنک شده بیشتر از ناحیه گرم‌تر است .اگر اقدامات ذکر شده مؤثر نباشند و وضعیت پس از گذشت مدت زمان مشخصی (حداکثر ۴ ساعت) بهبود نیابد، کوره باید خاموش شود .اگر نقطه داغ بزرگتر از حدود ۱ متر مربع باشد، بازیابی دمای طبیعی پوسته از طریق تشکیل کوتینگ تقریباً غیرممکن است .در بیشتر موارد، نسوز از قبل به قدری تحت تأثیر قرار گرفته است که احتمال تخریب بیشتر کوتینگ به دلیل ضعف مکانیکی وجود دارد .همچنین اگر نقطه قرمز در ناحیه‌ای رخ دهد که هیچ کوتینگی تشکیل نشده باشد، نمی‌توان کاری انجام داد .روش معمول این است که بلافاصله کوره را خاموش کرده و بخش‌های نسوز آسیب‌دیده را به طور کامل تعویض کنید .یک لکه قرمز که در زیر یا مجاور تایر قرار دارد، دلیلی برای اقدام فوری است .اغلب مدیریت کارخانه دستور خاموشی فوری کوره را می‌دهد.

8.6 Loss of kiln feed قطع خوراک کوره

قطع خوراک به وضعیتی گفته می‌شود که در آن دستگاه‌های تغذیه کوره مانند تغذیه‌کننده‌ها، تجهیزات کمکی ترانسپورت یا تجهیزات استخراج منجر به کاهش یا قطع کامل تغذیه کوره می‌شوند .از آنجایی که هیچ گرمایی توسط تغذیه قطع شده جذب نمی‌شود، سیستم شروع به گرم شدن بیش از حد می‌کند که ممکن است به دلیل دمای بیش از حد منجر به خرابی تجهیزات شود .بنابراین، نرخ سوخت و سرعت کوره باید به طور قابل توجهی کاهش یابد (یعنی تا ۸۰٪) .به عنوان یک راهنما، اگر تغذیه عادی کوره در کمتر از ۱۰ دقیقه قابل بازیابی نباشد، کوره باید خاموش شود . دمای خروجی برج باید زیر نقاط تنظیم ایمنی برای امرشن تیوب سیکلون، داون کامر، فن ID و هرگونه تجهیزات پایین‌دستی اضافی حفظ شود . مشخصات دمای واقعی باید راهنمای سرعت و شدت هرگونه تنظیمات مورد نیاز باشد.

9. STARTUP AND SHUTDOWN PROCEDURES راه اندازی و خاموش کردن

راه‌اندازی و خاموش کردن سیستم کوره، بحرانی‌ترین مراحل در طول عملیات کوره هستند .اکثر خرابی‌های جدی تجهیزات و حوادث ناشی از خود عملیات، معمولاً در این دو دوره اتفاق می‌افتند .بنابراین، باید قبل و در حین راه‌اندازی و خاموش کردن، به سیستم کوره توجه و احتیاط ویژه‌ای مبذول داشت.

9.1 Start up راه اندازی

هنگام راه‌اندازی کوره سرد، قوانین کلی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از (لیست جامع نیست):

◄اطمینان حاصل کنید که تمام تجهیزات آزاد شده و از افراد تعمیر و نگهداری پاک شده‌اند.

◄تمام مخازن و بالابرها بازرسی شده‌اند.

◄تمام ابزارهای اندازه‌گیری فرآیند در دسترس هستند.

◄اطمینان حاصل کنید که تمام درها و منافذ بازرسی بسته هستند.

◄پس از روشن کردن مشعل، شعله تحت نظارت قرار می‌گیرد (توسط آشکارساز شعله یا با چشم).

◄جریان هوای داخل کوره کافی است، اما بیش از حد نیست (گرم شدن بیش از حد پشت کوره).

◄گرم شدن کوره بر اساس نرخ مشخصی است که عمدتاً توسط ابعاد کوره و نوع نسوز تعیین می‌شود (معمولاً در ابتدا حدود ۵۰-۷۰ درجه سانتیگراد در ساعت، وقتی بدنه گرم است ۶۰-۹۰ درجه سانتیگراد در ساعت). یک منحنی پیش گرمایش توصیه می‌شود .بسته به عوامل مختلفی از جمله نوع و میزان جایگزینی نسوز در سیستم کوره، می‌توان از منحنی‌های مختلفی استفاده کرد.

◄کوره به صورت دوره‌ای ۱۰۰ درجه چرخانده می‌شود (به آرامی چرخانده می‌شود) تا از گرمایش نامتعادل بدنه کوره جلوگیری شود .برنامه‌ی چرخش باید با منحنی پیش‌گرمایش هماهنگ باشد .کوره باید به طور مداوم پس از رسیدن دمای پایه کوره به ۷۵۰ درجه سانتیگراد (در صورت بارندگی شدید حتی زودتر) چرخانده شود.

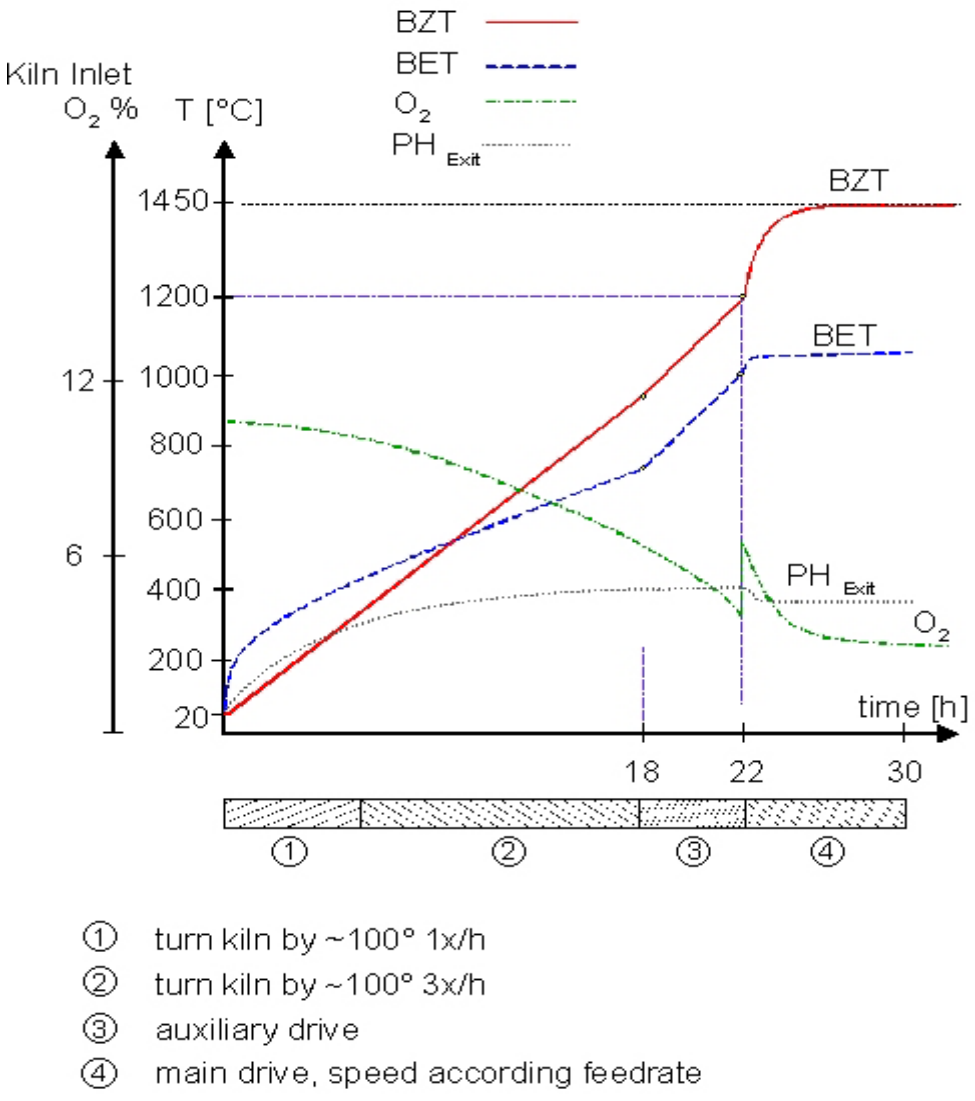


Figure 13: Example of a heat up curve (4 stage PH kiln)

◄گاهی اوقات وارد کردن مقادیر کمی از خوراک کوره در طول پیش گرمایش به سفت شدن آجرها در طول گرم شدن کمک می‌کند (به خصوص اگر آجرها تازه نصب شده‌اند). این کار همچنین به جلوگیری از جابجایی آجر در طول دوره‌های چرخش مداوم کوره کمک می‌کند.

◄در مورد گریت کولرها: مطمئن شوید که ردیف‌های اول گریت با کلینکر پوشانده شده‌اند، اولین فن‌های کولر را در طول گرم شدن روشن کنید.

◄در مورد گریت کولرها: فشار هود کوره (منفی‌تر) را کاهش دهید تا شعله کوتاه بماند و از مکش بیش از حد سیستم جلوگیری شود

◄در مورد گریت کولرها: قبل از تغذیه کوره، تمام فن‌های کولر را روشن کنید .جریان هوای کل خنک‌کننده را روی ~۲-۲,۵ Nm3/kg cli تنظیم کنید .جریان هوای خنک‌کننده را متناسب با خوراک کوره افزایش دهید .همچنین در طول راه‌اندازی، الگوی نزولی توزیع هوای خاص را حفظ کنید، که در ورودی بالاترین و در خروجی پایین‌ترین است .(نمودار ۷,۲,۱) .در بسیاری از موارد، اولین فن‌ها در ۷۰ تا ۸۰ درصد از نرخ تغذیه اسمی کوره به جریان هوای اسمی می‌رسند.

◄در مورد گریت کولرها:: کنترل خودکار فن‌های خنک‌کننده با استفاده از دستورالعمل‌های نقطه تنظیم فوق، از جمله فن هوای خروجی کولر، قبل از تغذیه کوره مطلوب است .این امر حجم هوای کافی برای احتراق را تضمین می‌کند.

◄در مورد سیکلون‌ها: مطمئن شوید که تمام فلپ‌های پاندولی آزاد شده و تمام دریچه‌های قطع و وصل باز هستند.

◄در مورد سیکلون‌ها: هنگام شروع تغذیه، مطمئن شوید که جریان هوا کافی است تا تضمین شود که آرد مستقیماً از طریق رایزرها نمی‌ریزد.

◄دستگاه‌های انفجار ضربه‌ای باید فعال باشند و در حالت اتوماتیک تنظیم شوند، در صورت نیاز اپراتور، پالس دستی همچنان می‌تواند آغاز شود.

◄در طول این مرحله بسیار بحرانی از عملکرد کوره، باید نظارت دقیق و دقیقی بر دمای برج و پروفیل فشار وجود داشته باشد.

9.2 خاموش کردن Shut down

یک روش معمول خاموش کردن کوره به شرح زیر است (لیست جامع نیست):

◄در صورت خاموشی کوتاه مدت: تمام سوخت سیستم را قطع کنید و جریان هوای کوره را به حداقل برسانید (از گرم شدن بیش از حد قسمت پشتی کوره جلوگیری کنید و منطقه پخت را گرم نگه دارید) .با این حال، در برخی از کارخانه‌ها، شعله نگهدارنده دوباره برقرار می‌شود تا به حفظ دمای کوره کمک کند.

◄در صورت خاموشی طولانی مدت: جریان هوای مشخصی را در کوره حفظ کنید اما از گرم شدن بیش از حد قسمت پشتی کوره جلوگیری کنید (سیستم را تا حد امکان سریع خنک کنید).

◄کوره را به مدت ۳۰ دقیقه با موتور کمکی بچرخانید (در صورت بارندگی شدید، این زمان بیشتر هم می‌شود) .بعداً، به تدریج چرخش کوره را ۱۰۰ درجه کمتر کنید تا از خنک شدن نامتعادل پوسته کوره جلوگیری شود .مگر اینکه برای آسترکاری مجدد کوره درخواست شده باشد: کوره را خالی روشن نکنید.

◄در صورت استفاده از گریت کولرها : موتور گریت را ببندید تا ردیف‌های اول گریت با کلینکر پوشانده شوند .فن‌های کولر اول را روشن بگذارید.

◄ در مورد سیکلون‌ها: مطمئن شوید که تمام زبانه‌های آونگی (فلپها) محکم شده و تمام دریچه‌های قطع جریان بسته شده‌اند.

10. GENERAL CONSIDERATIONS ملاحظات کلی

هنگام کار با کوره، اصول کلی زیر باید در نظر گرفته شوند که دستورالعمل‌های اساسی برای عملکرد صحیح هستند.

■ **حفاظت از پرسنل و تجهیزات**

در کار با کوره، اجتناب از موقعیت‌های خطرناک که ممکن است پرسنل آسیب ببینند یا تجهیزات از کار بیفتند، حتی اگر منجر به کاهش تولید یا کیفیت پایین شود، الزامی است .هرگونه وضعیت غیرعادی مانند نقاط داغ روی بدنه کوره، گریت سرخ در خنک‌کننده، هجوم کنترل نشده خوراک گرم یا ریزش سوخت باید در اسرع وقت پیشگیری یا اصلاح شود .آسیب فیزیکی به تجهیزات که ممکن است در نتیجه پذیرش این شرایط غیرعادی ایجاد شود، به هیچ وجه با کاهش احتمالی تولید کلینکر که ممکن است در اثر تعمیرات ناشی از آن رخ دهد، متناسب نیست .این امر در صورتی که سلامت یا جان پرسنل مورد توجه باشد، حتی بیشتر صدق می‌کند.

■ **کیفیت خوب و مداوم کلینکر**

هدف از تولید کلینکر، تولید کلینکری است که نه بیش از حد سوخته باشد و نه کمتر از حد پخته باشد، زیرا هر دو حالت افراطی برای استحکام سیمان مضر هستند .کیفیت، که اغلب به صورت درصد آهک آزاد یا وزن لیتری بیان می‌شود، باید فقط در محدوده کوچکی تغییر کند .کیفیت ثابت کلینکر نه تنها با توجه به خواص سیمان محصول نهایی، بلکه برای فرآیند آسیاب بعدی (آسیاب‌پذیری، دانه‌بندی، افزودن گچ و غیره) نیز مهم است.

■ **عملکرد روان و پایدار**

عملکرد روان و پایدار کوره شرایطی است که در آن فقط باید تنظیمات بسیار کوچکی در سیستم کوره انجام شود .عملکرد روان پیش‌نیاز کیفیت ثابت و یکنواخت کلینکر است .کارکرد روان و پایدار کوره، طول عمر نسوز را افزایش می‌دهد زیرا پایداری کوتینگ در منطقه پخت را افزایش می‌دهد .هر دو مستقیماً بهره‌وری کلی را بهبود می‌بخشند، زیرا توقف‌های کمتری در کوره برای کارهای بازسازی آجر لازم است .یک عملکرد پایدار کوره همیشه باید به حداکثر تولید موقت که قابل حفظ نیست، ترجیح داده شود .بنابراین، در صورت لزوم، همان تأکیدی که برای افزایش خوراک کوره اعمال می‌شود، باید برای کاهش آن نیز اعمال شود .با رعایت این قانون، بالاترین بهره‌وری بلندمدت حاصل خواهد شد.

■ **حداکثر راندمان حرارتی**

به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی، طبیعتاً هر کارخانه‌ای علاقه‌مند است که هر تن کلینکر را با حداقل مقدار سوخت تولید کند .سوختن بیش از حد کلینکر، احتراق ضعیف و عملکرد ناپایدار در کنار بسیاری موارد دیگر، مانع از راندمان بالای سوخت می‌شود.

■ **حداکثر نرخ تولید**

بالاترین نرخ تولید متوسط زمانی حاصل می‌شود که کوره پایدار کار کند .باید از هرگونه شرایط نامطلوب (به‌ویژه خنک شدن منطقه پخت) اجتناب شود .از این رو، تمرکز نباید فقط بر افزایش موقت تولید باشد، اگر این امر باعث ایجاد چرخه کوره یا خطر تضعیف (خنک شدن) منطقه پخت شود، زیرا این شرایط منجر به کاهش چشمگیر نرخ خوراک شده و منجر به از دست رفتن بهره‌وری کلی می‌شود .خوراک فقط در صورتی باید افزایش یابد که کوره بتواند در یک نرخ تولید بالا و مشخص در طول زمان، اساساً پایدار نگه داشته شود.

11. CALCULATION OF THE RETENTION TIME محاسبه زمان ماند (اقامت)

آگاهی از زمان ماند مواد در کوره برای عملکرد کوره از اهمیت بالایی برخوردار است .هنگام تنظیم متغیرهای کنترل، به ویژه در شرایط سیکلی، زمان ماند در اکثر سیستم‌های کوره، راهنمایی برای زمان واکنش کوره است، زیرا هر دو تقریباً یکسان هستند .زمان ماند مواد در یک کوره دوار خشک را می‌توان به صورت ریاضی به روش‌های زیر تعیین کرد:

According Duda:

$$t = \frac{1.77 \cdot l \cdot \sqrt{\Theta}}{\nu \cdot d \cdot n} \cdot F$$

According Labahn:

$$t = \frac{l}{d} \cdot \frac{1}{\pi \cdot n \cdot \tan\alpha}$$

With: t: Time in minutes

l: Length of kiln in meter

θ: Angle of repose in degrees: 35-40 ° for clinker 0-50 mm

ν: Slope of kiln in degrees (normally 1 – 2.5 °)

α: Angle of the moved material in the kiln

(tan α must be calculated from sin α = sin ν / sin θ)

d: Internal diameter of the kiln in meter (in-between bricks)

n: Number of revolutions per minute

F: Factor, which equals 1, if the kiln has a constant diameter

Example:

PH Kiln with the following data:

l: 60 m, θ: 35 °, ν: 3 % = 1.72 °, d: 3.6 m, n: 1.7 1/min, F: 1

According Duda:

$$t = \frac{1.77 \cdot 60 \cdot \sqrt{35}}{1.72 \cdot 3.6 \cdot 1.7} \cdot 1 = 59.7\,\text{min}$$

According Labahn:

$$t = \frac{60}{3.6} \cdot \frac{1}{\pi \cdot 1.7 \cdot \tan 3.00} = 59.6\,\text{min}$$

with α = 3.00 ° from sin α = sin 1.72 / sin 35

PC Kiln with the following data:

l: 70 m, θ: 35 °, ν: 3.5 % = 2.00 °, d: 5.6 m, n: 2.0 1/min, F: 1

According Duda:

$$t = \frac{1.77 \cdot 70 \cdot \sqrt{35}}{2.00 \cdot 5.6 \cdot 2.0} \cdot 1 = 32.6\,\text{min}$$

According Labahn:

$$t = \frac{70}{5.6} \cdot \frac{1}{\pi \cdot 2.0 \cdot \tan 3.49} = 32.6\,\text{min}$$

with α = 3.49 ° from sin α = sin 2.00 / sin 35