

طراحی و بررسی اثر پیش کلسیناتور بر مصرف انرژی در خط تولید سیمان

سید علی اشرفی زاده

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - مرکز تحقیقات سیمان

چکیده:

در این مقاله ابتدا به روند و سیر تاریخی کوره های سیمان و چگونگی مصرف انرژی در آنها پرداخته میشود و بعد از آن اثر وجود پیش کلسیناتور و فلسفه وجودی آن و اثر آن بر کاهش مصرف انرژی در خط تولید سیمان بررسی میگردد در ادامه پارامترهای موثر بر طراحی پیش کلسیناتور و الگوریتم پیشنهادی معرفی میگردند و مدل ارائه شده با یک نمونه موجود مقایسه میشود در نهایت نتایج و پیشنهادات ارائه میگردند

واژه های کلیدی: کلسیناسیون - پیش کلسیناتور - مصرف انرژی - کوره

۱- مقدمه:

کوره سیمان در طول تاریخ دستخوش تغییر و تحولات عمده ای شده است. این سیر تاریخی بطور خلاصه بصورت زیر بوده است:

۱- کوره های غیر مداوم :

الف) کوره های گنبدی شکل (۱۸۳۴ و قبل از آن)

ب) کوره های قائم غیر مقاوم (۱۸۵۵)

۲- کوره های مداوم:

الف) کوره های استوانه ای (۱۸۶۴)

ب) کوره های قائم مداوم (۱۸۸۰)

ج) کوره های دوار (۱۸۸۵)

د) کوره های با بستر سیالی شده

کوره هایی که امروز در صنعت سیمان مورد استفاده قرار میگیرند، عمدتاً کوره دوار است و عبارتست از یک استوانه ی دوار که بطور افقی با یک شیب مناسب قرار گرفته و مواد از یک طرف وارد آن و از طرف دیگر خارج میشوند و به قسمت کولر میروند. اخیراً مطالعاتی برای طراحی کوره ها با بستر سیالی انجام شده که هنوز وارد صنعت سیمان نشده اند و بکار گیری آنها هنوز در مرحله نیمه صنعتی است.

کوره های دوار با توجه به رطوبت مواد اولیه به انواع زیر تقسیم میشوند :

الف) کوره با فرایند تر که رطوبت خوراک بین ۲۵ تا ۴۵ درصد است.

ب) کوره با فرایند نیمه تر که رطوبت خوراک بین ۱۷ تا ۲۱ درصد است.

ج) کوره با فرایند نیمه خشک که رطوبت خوراک بین ۱۰ تا ۱۲ درصد است.

د) کوره با فرایند خشک که رطوبت خوراک کمتر از یک درصد است.

در تقسیم بندی فوق به ترتیب به سمت پائین ، فرایندهایی که در کوره اتفاق می افتند کمتر میشوند. به فرض در سیستم تر فرایندهای پیش گرمایش ، آب زدایی ، کلسیناسیون ، تشکیل فازهای کلینکر و سرمایش اولیه همگی در کوره انجام میشوند در حالیکه در سیستم خشک ، کلسیناسیون جزیی ، تشکیل فازهای کلینکر و سرمایش اولیه در کوره انجام میشوند.

مصرف انرژی در سیستم های ذکر شده بصورت زیر است :

سیستم تر : ۵۰۰۰ تا ۶۳۰۰۰ $\frac{kJ}{kgClin}$

سیستم نیمه تر: ۳۷۷۰ $\frac{kJ}{kgClin}$

سیستم نیمه خشک : ۳۴۵۰ $\frac{kJ}{kgClin}$

سیستم خشک : ۳۱۵۰ تا ۳۵۰۰ $\frac{kJ}{kgClin}$

مزیت اصلی تولید سیمان در روش خشک نسبت به روش تر اینستکه برای پخت کلینکر، انرژی حرارتی ویژه کمتری نیاز است.

در طول دهه های اخیر بیشترین تلاش محققان در امر تولید، این بوده است که تا حد امکان فرایند پخت را به قبل از کوره منتقل کنند تا هر چه بیشتر بتوانند طول کوره را کوتاهتر کنند. دلایل زیر را میتوان برای توجیه این امر ارائه داد :

الف) هزینه راهبری کوره با طول بلندتر، بیشتر است.

ب) در پیشگرمکن های سوسپانسیون و پیش کلسیناتورها که قبل از کوره قرار میگیرند تا بخشی از عملیات پخت به آنها محول شود ، بهترین نوع انتقال حرارت بین فاز گازی و جامد وجود دارد که همان بستر سیالی شده است.

ج) پیشگرمکن های سوسپانسیونی و پیش کلسیناتور بدلیل نداشتن قطعات متحرک، احتیاج کمتری به تعمیرات دارند و هزینه کمتری تحمیل میکنند.

د) با منتقل کردن قسمت بیشتر فرایند پخت به قبل از کوره میتوان ظرفیت تولید را بالا برد.

در حقیقت فلسفه استفاده از پیش گرمکن ها استفاده از گرمای گازهای حاصل از احتراق و حاصل از پخت ، در کوره هستند که دمایی در حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد دارند تا به نوعی بتوان گرمای این گازها را به خوراک کوره منتقل کرد و فلسفه استفاده از پیش کلسیناتور نیز انتقال درصد بالایی از کلسیناسیون به قبل از کوره و افزایش ظرفیت و کوتاه تر شدن طول کوره و مهمتر از همه :

۱- کاهش اتلاف حرارتی در کوره که مکانیسم غالب انتقال حرارت در آن تشعشع است.

۲- کاهش میزان سوخت مصرفی به ازای واحد ظرفیت تولید .

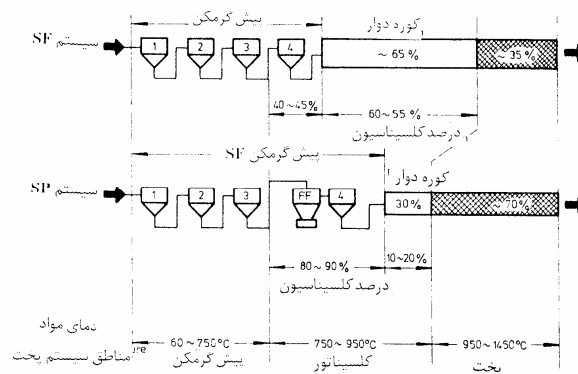
۲- معرفی پیش کلسیناتور و اثر آن در کاهش مصرف انرژی:

چیزی در حدود دو سوم از طول کوره به عمل کلسیتاسیون اختصاص دارد . چنانچه بتوان درصد بالایی از عمل کلسیناسیون را در خارج از کوره انجام داد ، تا حدود زیادی ابعاد کوره کاهش می یابد . ضمناً ساخت این کوره ها ساده تر است و هزینه های عملیاتی و راه بردی کمتری نیاز دارد و در ضمن ثابت شده که بهترین نوع انتقال حرارت عبارتست از ایجاد بستر های سیالی شده بین جامد و گاز و در این حالت اتلاف حرارتی از طریق تشعشع به حداقل میرسد . ضمناً با کاهش بار حرارتی کوره میتوان ظرفیت را افزایش داد. جدول زیر نشان میدهد که با افزایش ظرفیت ، مقدار سوخت مصرفی در منطقه پخت به ازای واحد تولید ، کاهش می یابد.

جدول ۱: اثر ظرفیت تولید بر مصرف سوخت در منطقه پخت:

ظرفیت تولید Ton/day	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۸۰۰۰	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰
میزان سوخت مصرفی KWh/Ton	۱۱۴۰	۱۱۰۶	۱۰۸۹	۱۰۷۸	۱۰۷۰	۱۰۶۵	۱۰۶۰	۱۰۵۶	۱۰۵۳	۱۰۵۰

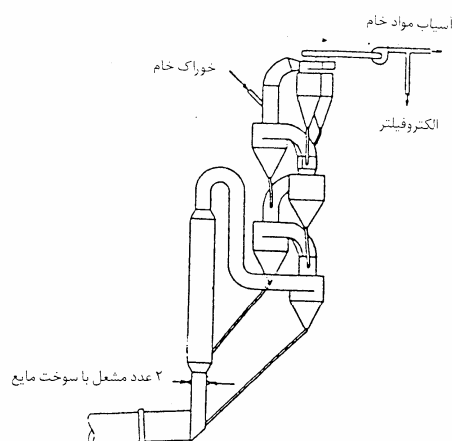
این مطالب رهنمون محققان شد تا اینکه حدود سال ۱۹۷۰ میلادی، شرکت ^(۱) IHI از ژاپن، یک روش جدید در پیش گرمکن های سیکلونی ابداع کرد. فاکتور مهم این پیشگرمکن های جدید این بوده است که اکثر عملیات کلسیناسیون مخلوط خام در حین جداسازی انجام میشد. دستگاهی که برای این کار مورد استفاده قرار میگرفت، اصطلاحاً کوره جهنده ^(۲) نام گرفت. در این نوع کوره، کمترین اختلاف دمایی بین گاز و ذرات مواد خام وجود داشت و برای انتقال حرارت از یکسری مشعلهایی استفاده میشد.



شکل ۱: تاثیر استفاده از پیش کلسیناتور بر ابعاد کوره دوار

- 1- Ishikawa,jima-Harima heavy Industries.
- 2- Flash furnace(F.f)

کوره های دارای پیش کلسیناتور (PC) حاصل تغییر و تحولاتی بود که در سیستم پیش گرمکن های معمولی (SP) بوجود آمد. هر دو سیستم از هر نظر شبیه به یکدیگر هستند، با این تفاوت که بخشی از کل سوخت مورد نیاز به یک محفظه خاصی که بین پیش گرمکن و کوره دوار قرار دارد، تزریق میشود و در این محفظه تعدادی مشعل قرار دارد که بوسیله سوخت، مشتعل شده و عمل پیش کلسیناسیون را انجام میدهند. این تغییر ساده ولی موثر باعث ایجاد تحولات شگرفی در فرایند پخت کلینکر شد. شکل ۲ اولین سیستم مجهز به پیش کلسیناتور را نشان میدهد.



شکل ۲: اولین کوره صنعتی مجهز به سیستم پیش کلسیناتور

ناگفته پیداست که برای عمل احتراق در پیش کلسیناتور و مشتعل شدن مشعل به هوا نیاز است. هوای لازم جهت احتراق در پیش کلسیناتور را میتوان هم از طریق مکش از داخل کوره و هم از طریق یک لوله هوا که از خنک کن انشعاب می یابد، بطور جداگانه تامین نمود. در اینصورت دو نوع سیستم پیش کلسیناتور وجود خواهد داشت.

۳- پارامترهای طراحی پیش کلسیناتور

چنانچه پیش کلسیناتور را یک استوانه فرض کنیم ، پارامترهای مهم و اساسی در طراحی فرایندی این دستگاه ، عبارت خواهند بود از :

الف (قطر

ب) طول

پ) درصد سوخت تزریقی به پیش کلسیناتور

ت) زمان اقامت مواد در پیش کلسیناتور

الف و ب) طول و قطر : این دو عامل در طراحی پیش کلسیناتور به مقدار گازهای حاصل از احتراق و نیز زمان اقامت مورد نیاز مواد خام در پیش کلسیناتور ، بستگی دارد . در قسمت بعد به توضیحات کاملتری در این باره خواهیم پرداخت.

پ) درصد سوخت تزریقی به پیش کلسیناتور: اینکه چه مقدار از سوخت باید به پیش

کلسیناتور تزریق شود ، به عوامل زیر بستگی دارد:

- درصد کلسیناسیون مورد نظر در پیش کلسیناتور

- نوع و کیفیت سوخت

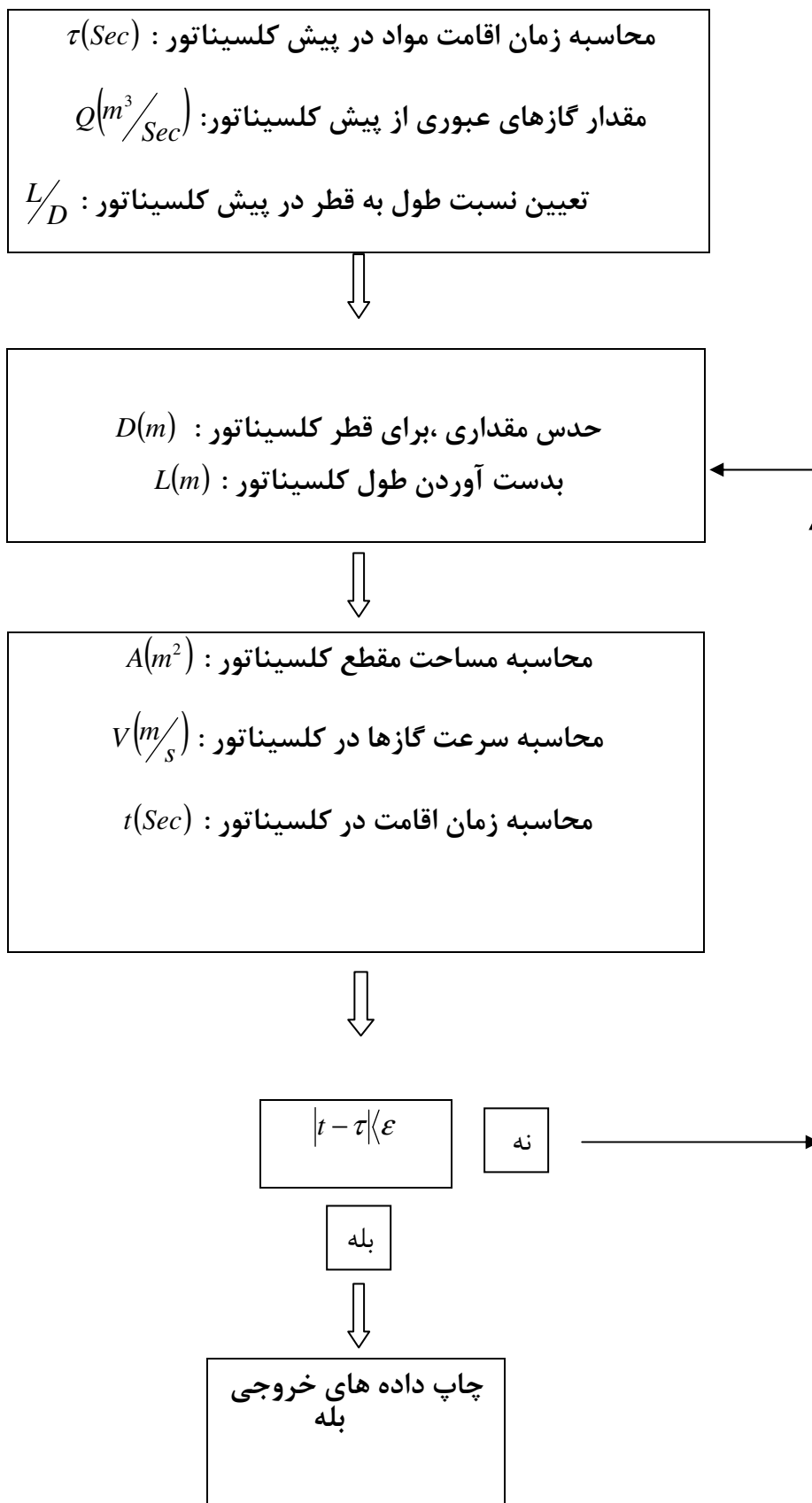
- ترکیب مواد اولیه

- محدودیت های عملیاتی

قاعداً هر چه درصد کلسیناسیون مورد نظر بیشتر باشد، به مقدار سوخت بیشتری در کلسیناتور نیاز است.

ت) زمان اقامت : زمان اقامت مواد در پیش کلسیناتور به دمای پیش کلسیناتور و درصد کلسیناسیون مورد نظر ، بستگی دارد. بنابراین محاسبه زمان اقامت ، به دانستن سینتیک کلسیناسیون نیاز است که در قسمت بعد ، توضیح داده خواهد شد.

۴- الگوریتم طراحی :

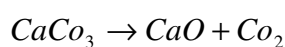


شرح الگوریتم :

همانگونه که مشاهده میشود ، این الگوریتم با فرض معلوم بودن زمان کلسیناسیون ، دبی گازهای عبوری از کلسیناسیون و نسبت طول به قطر کلسیناتور بکار گرفته شده است. بنابراین لازم است ابتدا در مورد این سه فاکتور صحبت شود:

زمان کلسیناسیون:

طی فرایند کلسیناسیون ، واکنش زیر صورت میگیرد:



نتیجه تحقیق محققان نشان داده است که این واکنش از درجه اول بوده است و انرژی اکتیواسیون آن بسته به سرعت گرمایش ، ۴۴/۴ تا ۵۴/۲ کیلو کالری بر مول، میباشد.

معادله سرعتی که برای این واکنش ارائه شده است ، عبارتست از : [1]

$$\frac{dx}{dt} = K(1-x)^{1/2}$$

با جابجایی در رابطه فوق داریم :

$$\frac{dx}{(1-x)^{1/2}} = Kdt$$

اگر از رابطه فوق انتگرال گیری کنیم خواهیم داشت :

$$-2 \left[(1-x_2)^{1/2} - (1-x_1)^{1/2} \right] = Kt$$

در رابطه فوق داریم :

x_1 : درصد تبدیل اولیه (قبل از کلسیناتور)

x_2 : درصد تبدیل ثانویه (بعد از کلسیناتور)

K : ثابت سرعت $(1/Sec)$

t : زمان (Sec)

مقادیر ثابت سرعت را می توان از جدول زیر استخراج کرد:

جدول ۲: ثابت سرعت K بر حسب $\frac{1}{Sec}$ برای انواع مختلف آهک

مواد خام سیمان	سنگ آهک	مرمر	دما (°C)
$1.6 \cdot 10^{-3}$	---	---	700
$13.9 \cdot 10^{-3}$	$2.65 \cdot 10^{-3}$	$1.12 \cdot 10^{-3}$	800
$65.8 \cdot 10^{-3}$	$22.3 \cdot 10^{-3}$	$12.4 \cdot 10^{-3}$	900
$272 \cdot 10^{-3}$	$138.0 \cdot 10^{-3}$	$96.0 \cdot 10^{-3}$	1000
---	$652 \cdot 10^{-3}$	$505 \cdot 10^{-3}$	1100
---	2500	$2330 \cdot 10^{-3}$	1200

دبی گاز عبوری

مقدار گاز عبوری از کلسیناتور، بعد از اعمال موازنه جرم، بسته به موارد زیر قابل دستیابی است :

- درصد مواد اولیه
- نوع سوخت
- درصد هوای اضافی
- شرایط دما و فشار
- نسبت طول به قطر:

این نسبت، مانند کوره دوار، بستگی به نوع سیستم انتخاب شده دارد. نسبت طول به قطر در کلسیناتور، در محدوده $1/3$ تا $3/5$ می باشد. جدول زیر مقدار L/D را برای چند سیستم معروف نشان می دهد:

جدول ۳: نسبت طول به قطر کلسیناتور برای چند سیستم معروف

نوع سیستم	SF	MFC	RSP	KSV	DD	GG	FLS
L/D	1.46	1.70	2.08	2.77	3.38	2.36	2.27

بعد از معلوم شدن سه مورد مذکور، مقداری برای D حدس زده میشود و چون مقدار L/D

معلوم فرض میشود، مقدار L را نیز میتوان بدست آورد.

در این حالت چون سطح مقطع کلسیناتور معلوم میشود، سرعت گازها در آن نیز بدست می آید:

$$V_g = \frac{Q}{A}$$

در رابطه فوق داریم:

$$V_g: \text{سرعت گاز در کلسیناتور } (m/s)$$

$$Q: \text{دبی حجمی گازها در پیش کلسیناتور } (m^3/sec)$$

$$A: \text{سطح مقطع کلسیناتور } (m^2)$$

فرضی که در این حالت به طراحی کمک میکند و علاوه بر آن، ضریب اطمینان آنرا بالا میبرد، اینستکه سرعت ذرات مساوی سرعت گازهاست. در واقعیت میدانیم که سرعت ذرات از سرعت گازها کمتر است و زمان اقامت حقیقی چیزی بزرگتر از زمان اقامتی است که برای کلسیناسیون مد نظر است و این به طراح کمک می کند تا از رسیدن به درصد کلسیناسیون مورد نظر اطمینان حاصل کند.

حال که سرعت ذرات و مسافت طی شده توسط آنها معلوم شد، (با فرض حرکت مستقیم الخط یکنواخت) میتوان زمان اقامت در کلسیناتور را محاسبه کرد:

$$t = \frac{L}{V_g}$$

در رابطه فوق داریم:

t : زمان اقامت مواد در کلسیناتور (Sec)

L : طول کلسیناتور (m)

V_g : سرعت گازها \approx سرعت ذرات (m/s)

چنانچه مقدار t با τ که از معادله سینتکی محاسبه شده ، اختلاف جزئی داشته باشد

، مقادیر L و D

به عنوان طول و قطر کلسیناسیون گزارش داده خواهند شد. در غیر این صورت

برای D حدس جدیدی زده میشود. نتایج حاصل از این روش با یک نمونه شاهد در جدول

۴ مقایسه شده است:

جدول ۴: کمیت‌های پیش کلسیناتور برای مدل و نمونه شاهد

درصد اختلاف	محاسبه شده	واقعی	
+۸	۱۲	۱۱/۱	طول (m)
+۷/۳۵	۷/۳	۶/۸	قطر (m)
-۱۶/۶۷	۵۰	۶۰	درصد سوخت تزریق %

۵- تجزیه و تحلیل نتایج:

نتایج محاسبه شده در جدول ۴ از دقت قابل قبولی برخوردار میباشند فقط اختلاف ده درصدی در میزان سوخت تزریقی را میتوان دلیل عدم آجرکاری مناسب و یا ملاحظات مهندسی و اپراتوری قلمداد کرد. بهر حال در صورت عدم دسترسی به درصد کلسیناسیون مناسب، اپراتور قدرت تغییر و مانور روی این پارامتر را دارد.

نتیجه کلی از بررسی انجام شده رهنمون این واقعیت است که برای احداث واحدهای جدید تولید سیمان میبایست به سراغ سیستمهای مجهز به پیش کلسیناتور رفت و حتی المقدور ظرفیت تولید بالاتر را انتخاب نمود تا بدین وسیله مصرف انرژی به ازای واحد تولید را کاهش داد و برای واحدهای قدیمی با تعبیه و نصب مشعل در محل مناسب قبل از کوره (که خود نیاز به مطالعات فراوان دارد) تا حدودی زیان عدم وجود پیش کلسیناتور را جبران نمود.

مراجع:

۱- عباس طائب و علی زاهدی: تبدیل مواد به کلینکر (سمینار کارشناسی ارشد).

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، خرداد ۱۳۷۴.

۲- عباس طائب و منوچهر بکائیان: بهینه سازی مصرف انرژی خط یک بخش کوره و

پیش گرمکن (پروژه تحقیقاتی). مجتمع صنعتی آبیک، مرکز تحقیق و

توسعه، مرداد ۱۳۷۳.

۳- عباس طائب، محمد حسین دهستانی اردکانی و عیسی حسن زاد: طراحی کلان کارخانه

سیمان با

ظرفیت هزار تن در روز (پروژه کارشناسی). دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده

مهندسی شیمی، مرداد ۱۳۷۵.

- 4- J.D.Bapat,H.C.Visvesvaraya,T.R.Rao and D.Subba Rao: Kinetics for Cement and Building Material Nodules.ZEMENT-KALK-GIPS,Vol.3,PP.156(1994)**
- 5- Tsuchida, Shizuo;Survey of SP and NSP Kilns, The Cement Association of Japan Committee on Kiln Control.**
- 6- K.Peray;The Rotary Cement Kiln (Second edition).Chemical Publishing Co.Inc,1986.**
- 7- Kohlhass and Labahm;Cement Engineers'Hand book.**