

Piece obrotowe w dzisiejszym przemyśle cementowym

Rotary kilns in current cement industry

Wiesław Kurdowski^{1*}, Ernest Jelito²

¹ Fundacja Cement Wapno Beton

² Heidelberg Cement

*corresponding author: W. Kurdowski, e-mail: w.kurdowski@icimb.pl

Streszczenie

W dzisiejszym przemyśle cementowym stosuje się powszechnie krótkie piece obrotowe z cyklonowymi wymiennikami ciepła. Zasadą jest wprowadzanie dekarbonizatorów wstępnych i to nawet w przypadku pieców o małej wydajności, nie przekraczającej 3 tysięcy ton na dobę. Najlepsza metoda podawania gorącego powietrza jest stosowanie osobnego rurociągu z chłodnika rusztowego, co uzasadnia powszechne stosowanie tych chłodników. W dekarbonizatorach można spalać paliwa alternatywne, między innymi całe opony w specjalnych paleniskach.

Słowa kluczowe: piece o stosunku L/D 10, dekarbonizatory wstępne, spalanie opon, chłodniki rusztowe

Summary

Short rotary kilns with cyclone heat exchangers are commonly used in current cement industry. The principle is the installation of precalciner, even in the case of kilns with low capacity, not exceeding 3000 tons per day. The best method of tertiary air introducing is the usage of separate duct from grate cooler, which justifies widespread use of these coolers. Alternative fuels, as whole tires, can be burned in precalciners, on special furnaces.

Keywords: kilns with L/D ratio of 10, precalciners, old tires burning, grate coolers

1. Wprowadzenie

Klasycznym piecem do prażenia klinkieru jest dzisiaj krótki piec obrotowy, pracujący metodą suchą, wyposażony w cyklonowy wymiennik ciepła i wstępny dekarbonizator. Nawet piece stosowane w przypadku surowców, których nie można zmielić na sucho, do nich na przykład należy kreda, są wyposażone w cyklonowe wymienniki ciepła.

W światowym przemyśle cementowym znajduje się w eksploatacji jeszcze wiele pieców, które nie mają dekarbonizatorów wstępnych, lub stosujących częściową dekarbonizację. Spotyka się także piece długie pracujące metodą suchą, a nawet piece wykorzystujące metodę „półsuchą”, a jako wymiennik ciepła ruszt Lepola. Te ostatnie są stosowane z reguły do prażenia surowców o dużej zawartości wilgoci złożowej, a więc na przykład surowce kredowe. Są to na ogół surowce o znacznej retencji wody, w granicach od 14% do 16%.

1. Introduction

Nowadays, a typical kiln in clinker production is short rotary kiln, using dry process, equipped in cyclone preheater and precalciner. Even kilns used in the case of raw materials slurry, which cannot be ground as dry raw meal, for example chalk, are equipped in cyclone heat exchangers.

Global cement industry still operates kilns without precalciners or using partial decarbonization. Long dry kilns, and even semi-dry process kilns with Lepol grate as heat exchanger, are also encountered. The latter are usually used for burning of raw materials with high moisture content, thus for example chalk. These are usually raw materials with significant water retention, ranging from 14% to 16%.

In a certain period in cement industry, after grinding of raw materials using wet process, the slurry was subjected to filtration and fed into kiln just with such moisture. Two technologies can be used in this case:

Był okres w przemyśle cementowym, w którym po zmieleniu surowców metodą mokrą, szlam poddawano filtracji i wprowadzano do pieca, właśnie o takiej wilgotności. Mogą być w tym przypadku stosowane dwie technologie:

- przygotowanie surowców metodą suchą, a przed wprowadzeniem na ruszt w piecach Lepol, surowiec jest granulowany na talerzu granulacyjnym, z dodatkiem nawet około 20 % wody. Retencja wody przez wsad piecowy jest bowiem bardzo różna; od 16% do podanych 20% i taka musi być zawartość wody w granulach,
- rozdrabnianie mokre surowca, natomiast szlam odwadnia się w prasach filtracyjnych lub wprowadza bezpośrednio do kruszarko-suszarki i dalej, w obu przypadkach, do pieca pracującego metodą suchą.

Od roku 2000 nastąpił ogromny wzrost produkcji cementu, który w tym roku wynosił 1,67 miliarda ton, a do roku 2010 wzrósł dwukrotnie do 3,3 miliarda ton, aby w roku 2017 wynieść 4,1 miliarda ton (1). Temu rozwojowi produkcji cementu towarzyszyło unowocześnienie konstrukcji pieców, oparte przede wszystkim na wprowadzeniu dekarbonizacji wstępnej. Ta zmiana technologii nastąpiła przypadkowo i wiązała się z zastosowaniem w cementowni w Doternhausen podawania łupków roponośnych do komory wzniosu, łączącej piec z wymiennikami cyklonowymi. Opracowano patent obejmujący spalanie surowców o małej wartości opałowej i pokazywano całemu światu. Japończycy uznali bardzo szybko, że lepsze wyniki będzie dawało spalanie dobrych paliw w komorze wzniosu i tak powstał dekarbonizator wstępny. Surowiec wprowadzany do pieca miał duży stopień dekarbonizacji, co zmniejszało bardzo znacznie zapotrzebowanie ciepła w tym agregacie. A więc przy tym samym obciążeniu cieplnym strefy spalania paliwa w palniku piecowym, można było znacznie zwiększyć wydajność pieca.

Idea zasilania pieca wsadem, który zawierał zdekarbonizowany węglan wapnia, nie była nową. Niemiecki chemik Nacken już w roku 1936 wysuwał taką hipotezę, jednak w owym czasie jej zrealizowanie nie było możliwe. Stało się łatwe do realizacji po wprowadzeniu dekarbonizatora w linii piecowej.

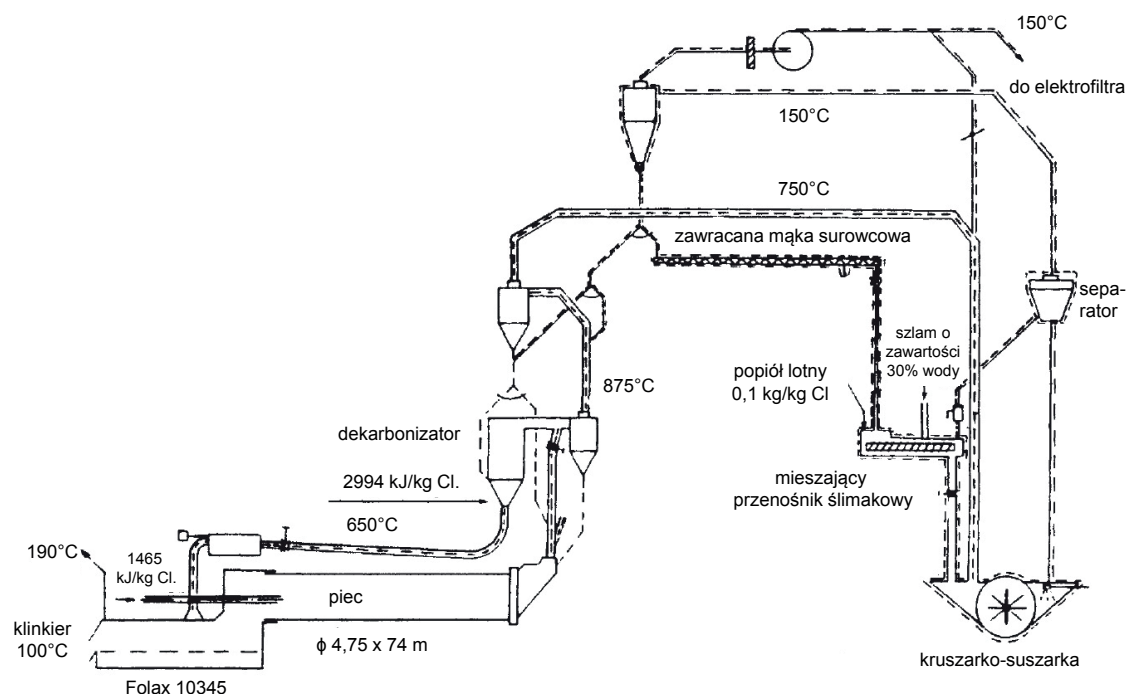
Takiemu rozwiązaniu sprzyjało spalanie w dekarbonizatorach paliw alternatywnych, bowiem temperatura w tych urządzeniach nie powinna przekraczać 1000°C. Ta granica jest związana z powstawaniem stopu w procesie klinkierizacji, co groziło osadzaniem się ziaren prażonego wsadu na ścianach dekarbonizatora i jego zaklejeniem. To także odpowiadało stosowaniu tej technologii w małych piecach, w światowym przemyśle cementowym. Trzeba przypomnieć, że dekarbonizator może zużywać 65% paliwa, przypadającego na całą instalację piecową, w której zużycie ciepła wynosi w metodzie suchej około 3000 kJ/kg klinkieru. Umożliwia to duże zwiększenie wydajności pieca, przy utrzymaniu niezmiennego obciążenia cieplnego pieca. Na przykład w cementowni Ożarów, w której piec o wymiarach 5,75 x 92 m, zużyciu ciepła około 3200 kJ/kg klinkieru miał wydajność około 3500 t/24 h. Po zastosowaniu dekarbonizacji wstępnej, w której spalano 65% paliwa, osiągnął wydajność 8000 t/24 h. Jego obciążenie ciepl-

- Preparation of raw materials in dry process, and before feeding on grate in Lepol kilns, raw materials are granulated on granulation plate with water addition, even about 20%. Water retention of the feed is very different; from 16% to even given 20% and such water content has to be in granules,
- Wet grinding of raw materials, however, slurry is dewatered in filter press or it is fed directly to dryer-crusher and then, in both cases, into dry process kiln.

Huge increase in cement production has been observed since 2000. In that year it was 1.67 billion tons, doubled to 3.3 billion tons to 2010, and it achieved 4.1 billion tons in 2017 (1). This development in cement production was accompanied by modernization of kiln structures, based primarily on the introduction of precalcination. This change in technology occurred accidentally at the Doternhausen cement plant and it was associated with feeding of petroliferous shale to the riser duct, connecting kiln with cyclone heat exchangers. A patent covering the burning of the low combustion heat raw materials was developed and shown to the whole world. The Japanese recognized very quickly that the better results will be obtained by burning of good fuels in the riser duct and thus the precalciner was created. Raw material introduced into the kiln was highly decarbonated, which significantly reduced the heat demand in this aggregate. Thus, with the same heat load of fuel combustion zone in the kiln burner, the kiln capacity could be significantly increased.

The idea of introduction the feed into kiln, which contained decarbonated calcium carbonate, was not new. As early as 1936, the German chemist Nacken advanced such a hypothesis, but it was not possible to implement it at that time. It became easy to implementation after introducing the precalciner in the kiln line.

Combustion of alternative fuels in the precalciners favoured this solution, because the temperature in these furnaces should not exceed 1000°C. This limit is associated with the melt formation in the clinkering process, which threatens the feed grains sticking on precalciner walls and its plugging. This also corresponded to the usage of this technology in small kilns, in the global cement industry. It should be remembered that precalciner can consume 65% of the fuel for the entire kiln installation, in which the heat consumption in dry process kiln is about 3000 kJ/kg of clinker. This makes it possible to significantly increase the kiln capacity while maintaining the kiln heat load unchanged. For example, in the Ożarów cement plant, where kiln with dimensions of 5.75 x 92 m and heat consumption of about 3200 kJ/kg of clinker, had capacity of about 3500 t/24 h. After the usage of precalciner, in which 65% of the fuel was burned, it achieved capacity of 8000 t/24 h. Its heat load, which was about 1440 kJ/s·m² of internal cross-section of the kiln, did not increase, but even decreased and it is about 1150 kJ/s·m². Since a grate cooler has also been introduced, which has better thermal efficiency than satellite coolers, the specific heat consumption has been reduced. This also caused the reduction in heat load of the kiln.



Rys. 1. Piec z dekarbonizatorem i wymiennikami cyklonowymi, zasilany szlamem, według FLSmidtha

Fig. 1. Rotary kiln with precalciner and cyclone heat exchangers, with slurry introduction, according to FLSmidth

ne, które wynosiło około $1440 \text{ kJ/s}\cdot\text{m}^2$ wewnętrznego przekroju poprzecznego pieca, nie tylko nie zwiększyło się, a nawet uległo zmniejszeniu i wynosi około $1150 \text{ kJ/s}\cdot\text{m}^2$. Ponieważ wprowadzono również chłodnik rusztowy, który ma lepszą sprawność cieplną od chłodników planetarnych, więc jednostkowe zużycie ciepła uległo zmniejszeniu. To także spowodowało zmniejszenie obciążenia cieplnego pieca.

2. Rodzaje pieców obrotowych

Jak już wspomniano w światowym przemyśle cementowym dużą przewagę mają krótkie piece, z wymiennikami cyklonowymi i z dekarbonizatorami. Są jednak surowce, w przypadku, których zestaw surowcowy można łatwiej produkować metodą moką. Wówczas firma FLSmidth proponuje piec z dekarbonizatorem i z wymiennikiem cyklonowym – rysunek 1. Piec ten, przy zawartości wody w szlamie wynoszącej 30%, zużywa 4460 kJ/kg klinkieru.

Podawany do pieca szlam wpada na kruszarkę, odgrywającą równocześnie rolę suszarki. Zasilana ona jest gazami odlotowymi z pieca o temperaturze około 750°C , w związku z tym wymiennik cyklonowy ma tylko dwa stopnie. Dekarbonizator podaje materiał do drugiego cyklonu, z którego wpada on do pieca. Powietrze trzecie pobierane jest z chłodnika rusztowego typu Folax i ma temperaturę około 650°C . Taki piec pracował w cementowni Aalborg, należącej do 2004 roku do firmy FLSmidth.

Wzorowany na tej technologii piec został zbudowany w cementowni Chelm, jednak w celu zmniejszenia zużycia ciepła zasilany on jest nie mieloną kredą, po kruszarce, o uziarnieniu od 80 mm do 150 mm i wilgotności około 24%. Jest wyposażony w dekarbonizator wstępny oraz trzy stopnie cyklonów – rys. 2.

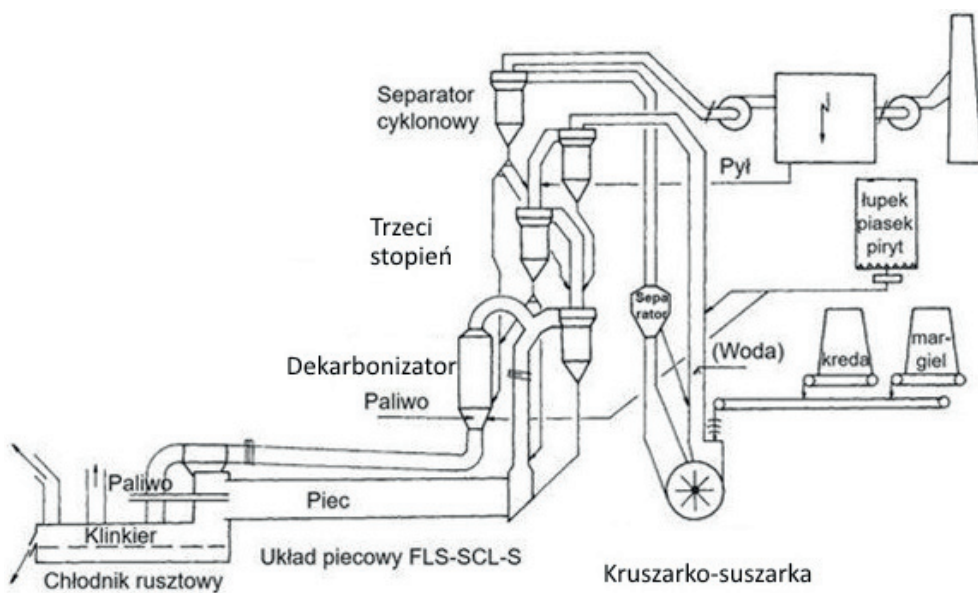
2. Types of rotary kilns

As aforementioned, in the global cement industry, short kilns with cyclone heat exchangers and precalciners have a great advantage. However, there are raw materials which can be more easily produced using wet process. Then FLSmidth proposes kiln with precalciner and cyclone exchangers – Fig. 1. This kiln consumes 4460 kJ/kg of clinker, with a water content in the slurry of 30%.

The slurry is introduced into the kiln by the dryer-crusher, which pulverized it in the kiln exit gases with temperature of about 750°C . This temperature is assured by the cyclone heat exchanger with only two cyclones. The first feed the raw meal to the precalciner and after decarbonisation the second cyclone is introducing it into the kiln. Tertiary air is taken from Folax type grate cooler and it has temperature of about 650°C . This kiln worked at the Aalborg cement plant, owned by FLSmidth until 2004.

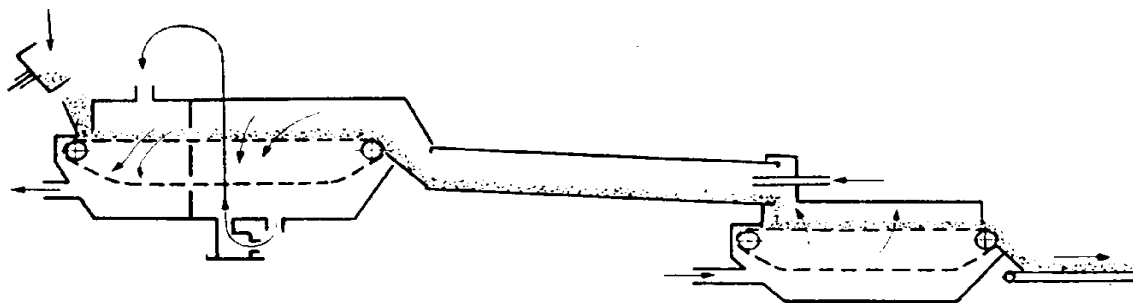
The kiln modelled on this technology was built in the Chelm cement plant, however, in order to reduce heat consumption, it is fed with non-ground chalk, only after a crusher, with grain size from 80 mm to 150 mm and moisture of about 24%. It is equipped with a precalciner and three cyclone stages – Fig. 2.

Next to the short kilns with L/D from 10 to 17, Lepol kilns are also operated in cement industry, and these kilns can be classified as semi-dry process. As aforementioned these kilns are equipped in second type external heat exchangers, which is Lepol grate. The raw meal is granulated on plate granulators, with water addition of 14%-20%, and its amount depends on the water retention of used raw material. Kiln exit gases are passed through the granules layer on the grate from top to bottom [Fig. 3]. This direction of gases



Rys. 2. Linia piecowa w cementowni Chełm

Fig. 2. The rotary kiln line in Chełm cement plant



Rys. 3. Piec z rusztem Lepol [schemat]

Fig. 3. Kiln with Lepol grate [scheme]

Obok pieców krótkich, o L/D od 10 do 17, są eksploatowane w przemyśle cementowym piece Lepol, które można zaliczyć do technologii „półsuchej”. Są one wyposażone w drugi rodzaj zewnętrznych wymienników ciepła, którymi jest ruszt Lepol. Mączkę surowcową granuluje się na granulacjach talerzowych, z dodatkiem 14-20% wody, której ilość zależy od retencji wody przez stosowany zestaw surowcowy. Przez warstwę granул na ruszcie przepuszcza się w kierunku z góry w dół gazy odlotowe z pieca [rys. 3]. Ten kierunek gazów umożliwia osiadanie znacznej ilości pyłu zawartego w gazach, na granulach. Piece te mają stosunkowo małe zużycie ciepła i dużą wydajność, wynikającą z dużego stopnia dekarbonizacji granул, nawet do około 40%, na wlocie do pieca. W tablicy 1 zebrano dane dla tych pieców.

Pewnym utrudnieniem eksploatacyjnym w przypadku tych pieców jest osadzanie się pyłów, unoszonych z gazami, na przegrodzie oddzielającej pierwszą komorę rusztu od drugiej. Umożliwia to jednak powtórne skierowanie gazów na ruszt od góry, a więc na lepsze osadzanie pyłów z gazów piecowych, na warstwie granул. W jednej z cementowni we Francji usuwano te narosty z przegrody

allows settling of significant amount of dust contained in the gases, on the granules. These kilns have relatively low heat consumption and high capacity, resulting from a high degree of granules decarbonization, even up to about 40%, at the kiln inlet. Parameters of these kilns are given in Table 1.

A certain difficulty in operating of these kilns is the deposition of kiln dusts, carried with gases, on the partition separating the first chamber of the grate from the second. However, this makes it possible to re-direct the gases to the grate from top, and thus to better deposit of kiln dusts from kiln gases, on the granules layer. In one of the cement plants in France, these

build-ups were removed once a week from the partition, using long „mining hammers” adapted for this purpose.

As aforementioned, the greatest amount of rotary kilns in the worldwide cement industry, concerns the short rotary kilns with cyclone preheaters.

At the beginning of the eighties, Humboldt introduced the very short rotary kilns, with L/D ratio of 10 – Fig. 4. These kilns were distinguished by higher capacity, associated with faster alite formation. It was influenced by CaO phase, which could not recrystallize in these kilns, due to the short time interval after decarbonization of limestone and the formation of the clinker melt and faster dissolution of CaO in this melt. Alite formation begins in these kilns after about 10 minutes [Fig. 4], and in longer kilns after about 30 minutes. In the latter, this process takes much longer time, because CaO dissolution, after recrystallization also takes longer, about 15 minutes. However, in short kilns it is about 11 minutes.

Further broad development of cyclone preheaters was undoubtedly associated with introduction of fluidized bed precalciners. The principle of this structure consists in introduction of fluidized bed

Tablica 1 / Table 1

DANE PIECÓW LEPOL

PARAMETERS OF LEPOL KILNS

Wielkość / Parameter	Jednostka Unit	Metoda „półmokra” Semi-wet process	Metoda „półmokra” Semi-wet process	Metoda „półsucha” Semi-dry process
Wymiary pieca / Kiln dimensions	M	6,0/5,6 × 90	4,6/4,2 × 70	4,2/4,4 × 68
Nachylenie pieca / Kiln inclination	%	3,5	–	3,5
Wymiary rusztu <i>Lepola</i> / Lepol grate dimensions	M	5,6 × 61,7	4,8 × 31,7	4 × 36
Powierzchnia rusztu <i>Lepola</i> / Surface area of Lepol grate	m ²	305	138	
Grubość warstwy na ruszcie / Layer thickness on grate	Mm	280	–	180
Stopień kalcynacji surowca / Calcination degree of raw material	%	40	–	–
Wymiary chłodnika Recupol / Dimensions of Recupol cooler	M	3,3 × 31,3	2,4 × 21,1	–
Powierzchnia rusztu chłodnika / Surface area of cooler grate	m ²	92	46,7	–
Zawartość wody w granulach / Water content in granules	%	21,7	21,7	12-14
Temperatura gazów odlotowych / Temperature of kiln exit gases	K (°C)	393* (120)	–	393* (120)
Zapylenie gazów odlotowych / Dusting of kiln exit gases	g/nm ³	4-6	–	–
Wydajność dobową pieca / Kiln capacity per 24h	T	3 300	1 350	1 500
Wydajności dobowe właściwe / Specific capacity per 24h of:				
pieca / kiln	kg/P _s	157 000	122 000	
	kg/V _p	1 800	1 740	
rusztu /grate	kg/F _r	10 800	9 800	
chłodnika / cooler	kg/F _c h	35 800	28 800	
Ilość bocznikowanych gazów / The amount of kiln by-pass gases	%	8	0	–
Zużycie ciepła / Heat consumption	kJ/kg	3 729	3 771	–
	(kcal/kg)	890	900	
Zużycie energii elektrycznej / Power consumption				
piec / kiln	kJ/kg (kWh/t)	65 (80)	68 (19)	–
chłodnik / cooler	kJ/kg (kWh/t)	20 (5,5)	21,6 (6)	–

* temperatura gazów przed rusztem / temperature of gases before grate

raz w tygodniu, za pomocą dostosowanych w tym celu długich młotków „górnicych”.

Jak już wspomniano największa liczba pieców w światowym przemyśle cementowym przypada na piece krótkie z wymiennikami cyklonowymi.

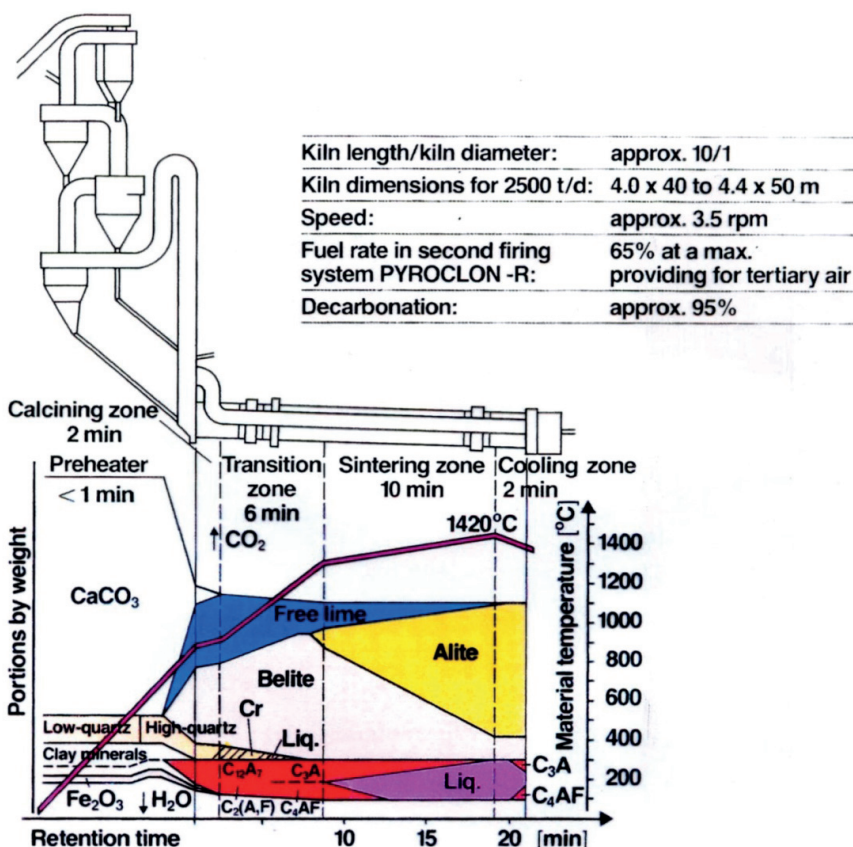
Z początkiem lat osiemdziesiątych Humboldt wprowadził bardzo krótkie piece obrotowe, o stosunku L/D = 10 – rysunek 4. Piece te wyróżniały się większą wydajnością, związaną z szybszym powstawaniem alitu. Miała na to wpływ faza CaO, która nie ulegała w tych piecach rekrytalizacji, w związku z krótkim przedziałem czasowym po dekarbonizacji wapienia i powstawaniem stopu w klinkierze oraz szybszym rozpuszczaniem się CaO w utworzonym stopie klinkierowym. Powstawanie alitu rozpoczyna się w tych piecach po około 10 minutach [rys. 4], a w piecach dłuższych po około 30 min. W tych ostatnich proces ten trwa znacznie dłużej, bowiem rozpuszczanie CaO, po rekrytalizacji trwa także dłużej, około 15 minut. Natomiast w piecach krótkich około 11 min.

Dalszy masowy rozwój cyklonowych wymienników ciepła związany był niewątpliwie z wprowadzeniem fluidalnych dekarbonizatorów wstępnych. Zasada tej konstrukcji polega na włączeniu do ukła-

reactor into the system of cyclone heat exchangers [Fig. 6], to which all or part of the raw material from the third stage cyclone is fed. In general, it can be said: from the penultimate cyclone. In the Humboldt solution, this precalciner “took the place” of the riser duct connecting kiln with the cyclones preheater.

In individual phases of clinkering process, there are large differences in heat consumption, which can be followed on the Q-T plot [Fig. 7]. The highest heat consumption is associated with decarbonization process of calcium carbonate, which takes place at about 900°C and it is about 2000 kJ/kg of clinker.

Therefore, transfer of this process to the precalciner significantly reduced the heat load of rotary kiln and allowed for a significant increase in its capacity. For example, kiln at the Ożarów cement plant with dimensions of 5.75 x 90 m had capacity of 3500 tons per 24 h, thus about 146 t/h, which with heat consumption of 3350 kJ/kg of clinker gives $146 \cdot 10^3 \times 3350 = 489100 \cdot 10^3$ kJ/h. Cross-section of the kiln inner dimension is $5.35^2 \times 0.785 = 22.5$ m², thus heat load of sintering zone calculated per one m² of cross section of the kiln inner dimension is $22 \cdot 10^6$ kJ/h·m². Based on this heat load, the limit capacity of this kiln can be expressed by the formula:



Rys. 4. Bardzo krótki piec obrotowy z dekarbonizatorem firmy Humboldt

Fig. 4. Very short rotary kiln with precalciner produced by Humboldt

du wymienników cyklonowych reaktora fluidalnego [rysunek 6], do którego doprowadza się całość, lub część surowca, z cyklonu trzeciego stopnia. Ogólnie można powiedzieć: z przedostatniego cyklonu. W rozwiązaniu firmy Humboldt ten dekarbonizator „zajął miejsce” komory wzniosu, łączącej piec z wymiennikiem cyklonowym.

W poszczególnych fazach procesu klinkieryzacji występują duże różnice w zużyciu ciepła, które najlepiej prześledzić na wykresie Q-T [rysunek 7]. Największe zużycie ciepła związane jest z procesem dekarbonizacji węgla wapniowego, który przebiega w około 900°C i wynosi około 2000 kJ/kg klinkieru.

W związku z tym przeniesienie tego procesu do dekarbonizatora wstępnego zmniejszyło znacznie obciążenie cieplne pieca obrotowego i pozwoliło na znaczne zwiększenie jego wydajności. Dla przykładu można podać, że piec w cementowni Ożarów o wymiarach 5,75 x 90 miał wydajność 3500 ton/24 h więc około 146 t/h, co przy zużyciu ciepła wynoszącym 3350 kJ/kg klinkieru daje $146 \cdot 10^3 \times 3350 = 489100 \cdot 10^3$ kJ/h. Przekrój pieca w świetle $5,35^2 \times 0,785 = 22,5$ m², a więc obciążenie cieplne strefy spalania liczone na jeden m² przekroju pieca w świetle wynosi $22 \cdot 10^6$ kJ/h·m². W oparciu o to obciążenie cieplne można graniczną wydajność omawianego pieca wyrazić wzorem:

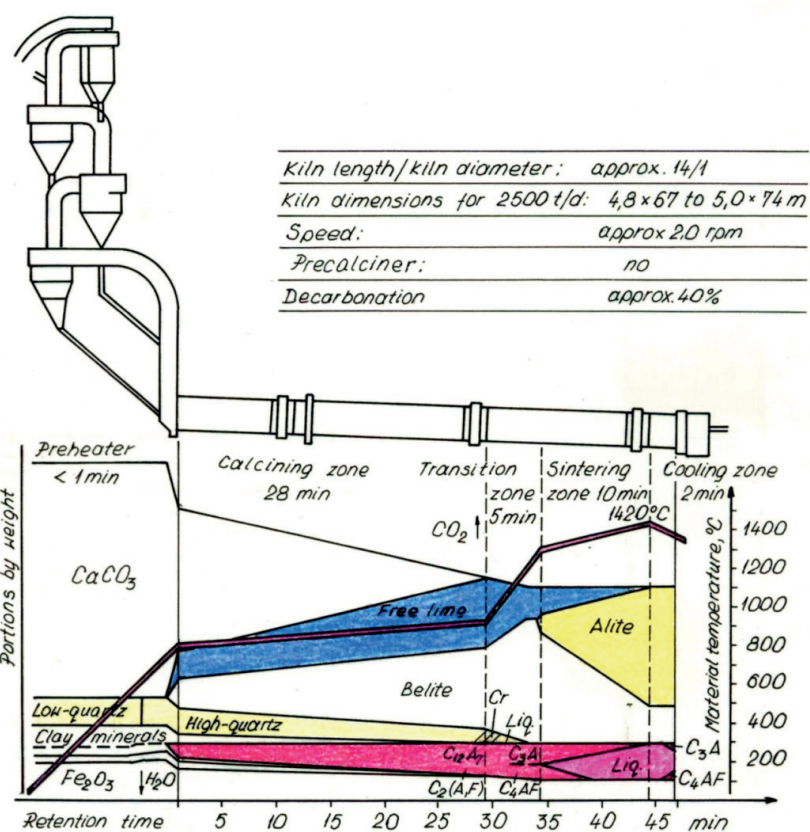
$$\frac{22 \cdot 10^6 \times 22,5}{3350 \times 10^3} = 148 \text{ t/h}$$

Due to the fact that about 56% of fuel is burned in precalciner, the heat load of kiln decreases to $22 \cdot 10^6 \times 0,44$, the kiln capacity has to increase more than double, to about 8000 tons/24 h, to remain it at the same level. Just such capacity was achieved, after installing the precalciner and Smith grate cooler Folax.

Precalciners have another important advantage: they have a relatively low temperature, as aforementioned. Therefore, alternative fuels with low calorific value can be used as fuel. As it is known, flame temperature is closely related to calorific value of the fuel, which can be expressed by the formula:

$$t_{pl} = \frac{(1 - \vartheta)W_d + Q}{\sum G \cdot c} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [1]$$

where: W_d – calorific value of fuel, in kJ/kg, Q – physical heats of air and fuel in kJ/kg of fuel, G – gases mass = $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$, in kg/kg of fuel, c – specific heat of these exhaust components in kJ/kg·K.



Rys. 5. Proces klinkieryzacji w piecu o stosunku L/D = 14

Fig. 5. Clinkering process in kiln with L/D ratio of 14

$$\frac{22 \cdot 10^6 \times 22,5}{3350 \times 10^3} = 148 \text{ t/h}$$

W związku z tym, że w dekarbonizatorze wstępnym spalamy około 56% paliwa, to obciążenie cieplne pieca spada do $22 \cdot 10^6 \times 0,44$ i aby utrzymywało się na tym samym poziomie to wydajność pieca musi wzrosnąć ponad dwukrotnie, do około 8000 ton/24 h. Po zainstalowaniu dekarbonizatora i chłodnika rusztowego firmy Smidth, osiągnięto właśnie taką wydajność.

Dekarbonizatory wstępne mają jeszcze jedną ważną zaletę: panuje w nich stosunkowo niska temperatura, o czym już wspomniano. W związku z tym, jako paliwo mogą służyć paliwa alternatywne, o małej wartości opałowej. Jak wiadomo bowiem temperatura płomienia jest ściśle związana z wartością opałową paliwa, co można wyrazić wzorem:

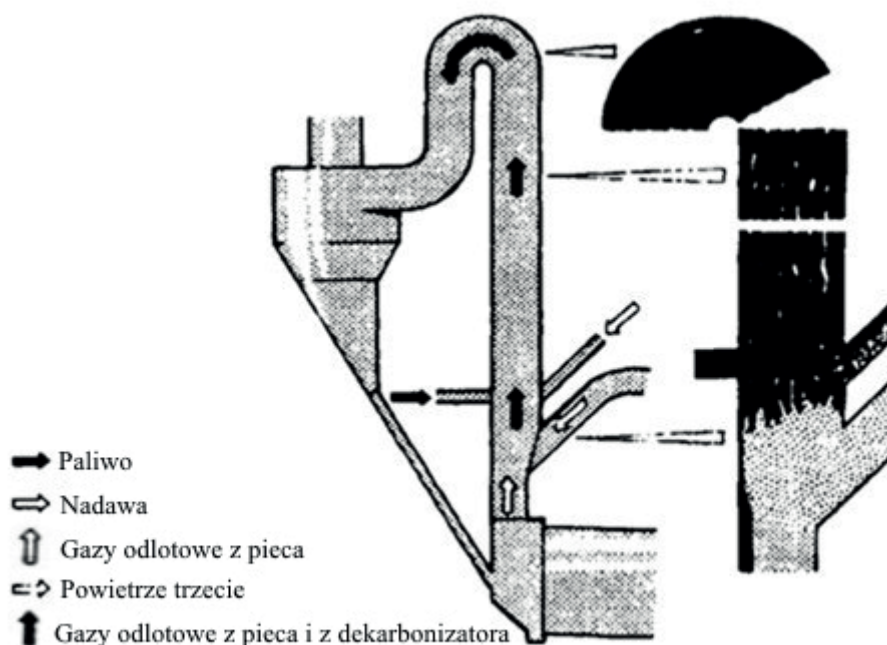
$$t_{pl} = \frac{(1 - \vartheta)W_d + Q}{\sum G \cdot c} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [1]$$

gdzie: W_d – wartość opałowa paliwa, w kJ/kg, Q – ciepło fizyczne powietrza i paliwa w kJ/kg paliwa, G – masa gazów = $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$, w kg/kg paliwa, c – ciepło właściwe tych składników spalin w kJ/kg·K.

Dobrym paliwem odpadowym do pieców są zużyte opony samochodowe, które mają dużą wartość opałową około 27 kJ/kg. Firma FLSmidth opracowała specjalne urządzenie „Hot Disc”, przeznaczone specjalnie do dekarbonizatorów wstępnych – rysunek 8. Całe lub pocięte opony można także podawać bezpośrednio do pieca obrotowego, co było dawniej często stosowane. Pokazano to strzałką na rysunku 9. Jednak w przypadku pieców z dekarbonizatorem nie jest to dobre rozwiązanie. Obecnie można w tym celu także stosować dekarbonizator wstępny Humboldta, z podajnikiem pokazanym na rysunku 9, jednak muszą to być pocięte opony.

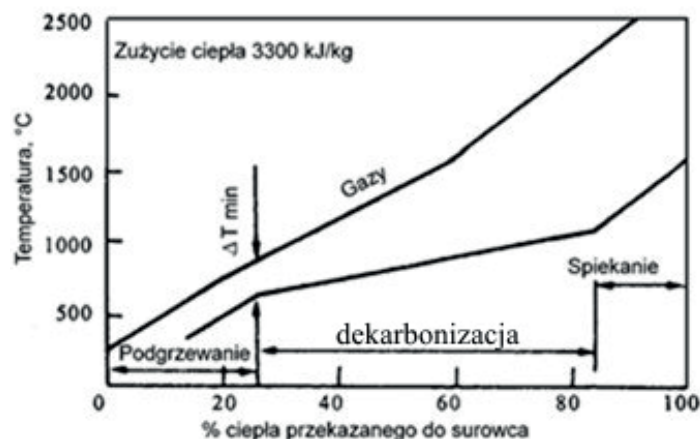
Wpływ stopnia dekarbonizacji surowca na wydajność pieca dobrze ilustrują krzywe na rysunku 10. Można równocześnie stwierdzić duże znaczenie doprowadzenia powietrza trzeciego osobnym przewodem, a nie przez piec. To ostatnie rozwiązanie musi zwiększać współczynnik nadmiaru powietrza i obniżyć temperaturę płomienia. Wynika to jasno z wzoru [1].

Bardzo pouczający jest diagram opracowany przez Herschenbacha i pokazany na rysunku 11. Wynika z niego znacznie większa opłacalność, a więc i celowość, wprowadzania dekarbonizatorów wstępnych do dużych pieców, o wydajności 5000 do 6000 ton/24 h. Natomiast nie powinno się stosować dekarbonizatorów w przypadku pieców małych, szczególnie o wydajności mniejszej od 3000 t/24h. Ta opinia Herschenbacha nie jest przestrzegana i powszechnie buduje się piece z dekarbonizatorami o wydajności niższej od 3000 t/24h.



Rys. 6. Dekarbonizator wstępny w rozwiązaniu firmy Humboldt

Fig. 6. Precalciner in the Humboldt solution



Rys. 7. Wykres Q-T wypalania klinkieru

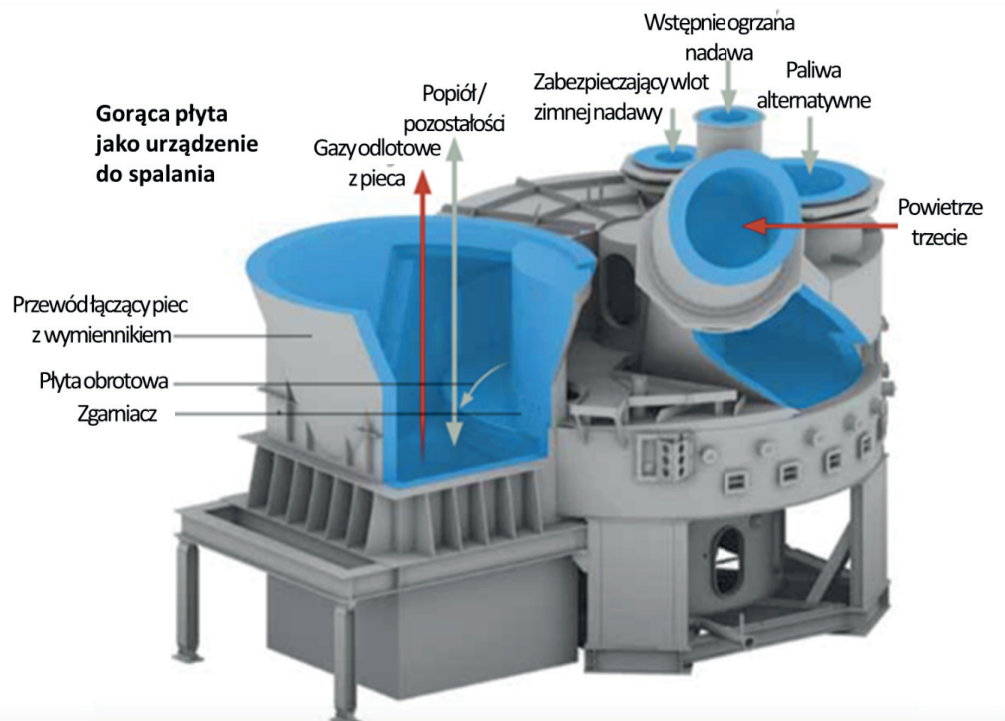
Fig. 7. Q-T plot of clinker burning

Good waste fuel for kilns are the car tires, which have a high calorific value of about 27 kJ/kg. FLSmidth has developed a special “Hot Disc” combustion device specifically designed for precalciners – Fig. 8. Whole or cut tires can also be fed directly to rotary kiln, which was often used in the past. It is shown on Fig. 9 by the arrow. However, for kilns with precalciner it is not a good solution. At present, the Humboldt precalciner, with the feeder shown on Fig. 9, can also be used for this purpose, but tires have to be cut into pieces.

The influence of the decarbonization degree of raw material on kiln capacity is well illustrated by the curves on Fig. 10. It can also be stated that introduction of tertiary air through the separate duct, and not through the kiln, is very important. The latter solution has

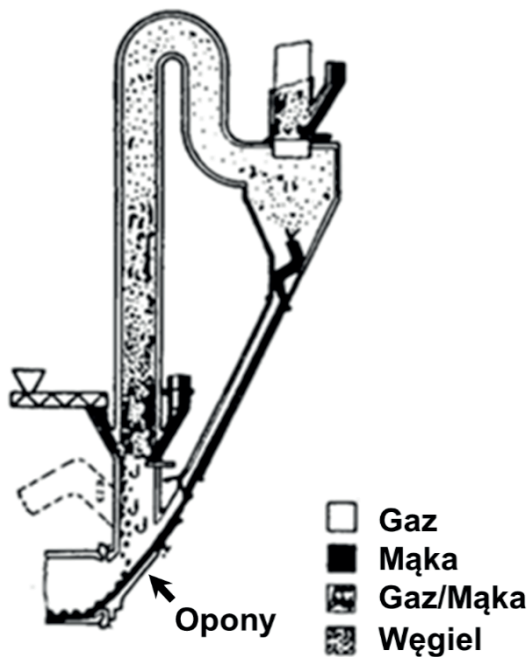
Duże wydajności i małe zużycie ciepła, którymi wyróżniają się nowoczesne piece o dużej wydajności, jest w poważnym stopniu zależne od dobrych chłodziaków rusztowych. Zapewniają one niską temperaturę klinkieru, zwykle nieprzekraczającą 60°C plus temperatura otoczenia i wysoką temperaturę powietrza drugiego na wlocie do pieca i trzeciego do dekarbonizatora. Niestety zużywają więcej powietrza niż potrzeba do spalania paliwa w piecu i w dekarbonizatorze, stąd powietrze nadmiarowe, które wynosi zwykle około 1,2 nm³/kg klinkieru. Powietrze to trzeba także odpylać, do czego udaje się czasem wykorzystać elektrofiltr gazów piecowych.

W ostatnim okresie nastąpił rozwój pieców z dekarbonizatorami fluidalnymi, co radykalnie zmniejszyło zapotrzebowanie powietrza do spa-



Rys. 8. Palenisko do spalania całych opon w dekarbonizatorze firmy Smidth zwane „Hot disc”

Fig. 8. Smidth Hot Disc furnace for whole tires burning in precalciner



Rys. 9. Częściowa dekarbonizacja ze spalaniem paliw odpadowych w instalacji Humboldt–Wedag

Fig. 9. Partial decarbonization with waste fuels burning in Humboldt–Wedag installation

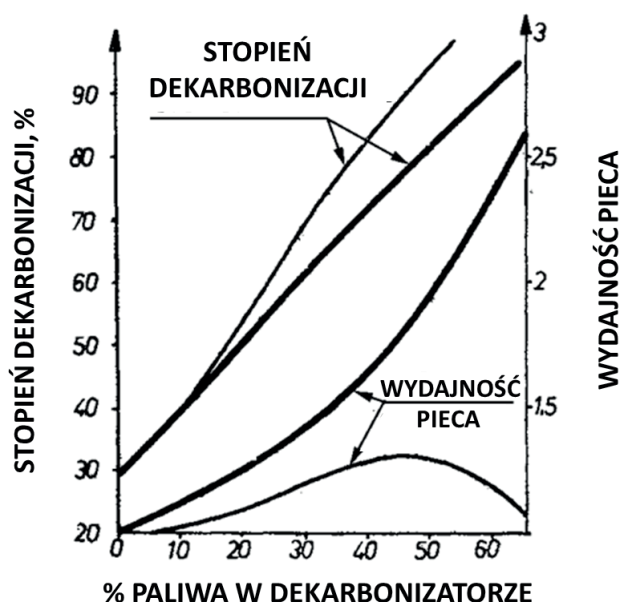
lania w samym piecu, nawet o około 60%. Dekarbonizator trzeba także zasilać gorącym powietrzem, co w połączeniu ze znacznym wzrostem wydajności pieca stworzyło warunki dające znaczną przewagę chłodziakom rusztowym. Odprowadzenie powietrza trzeciego z chłodziaka rusztowego można prosto rozwiązać, co

to increase the excess air coefficient and reduce the flame temperature. It results from the formula [1].

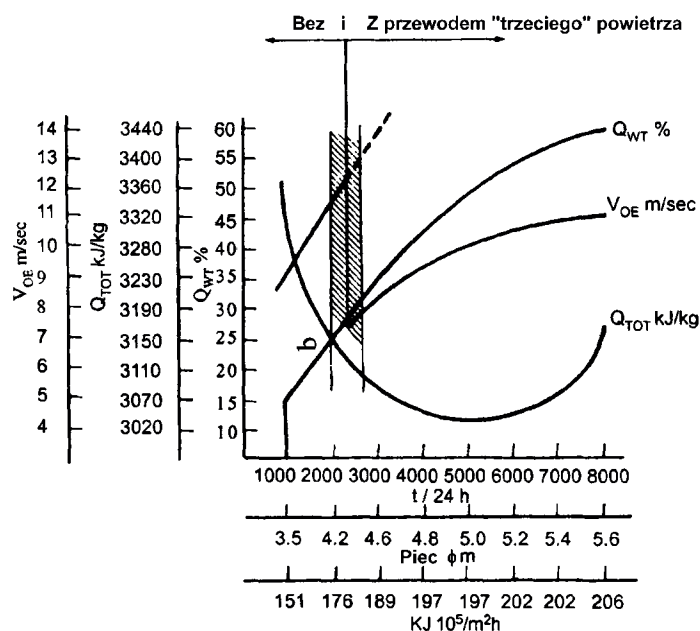
Diagram shown on Fig. 11 and developed by Herschenbach is very instructive. It results in a much greater cost-effectiveness, and therefore desirability of introducing precalciners into great rotary kilns, with capacity from 5000 to 6000 tons per 24 h. However, precalciners should not be used in the case of small kilns, especially with capacity less than 3000 t/24h. However, this Herschenbach's opinion is not observed and commonly the kilns with calciners of the capacity lower than 3000 t/day, are constructed.

High capacity and low heat consumption, which are typical for the modern high-capacity kilns, is heavily dependent on the good grate coolers. They provide a low clinker temperature, usually not exceeding 60°C plus ambient temperature and the high temperature of secondary air at the kiln inlet and tertiary air at the precalciner. Unfortunately, they consume more air than needed to fuel burning in kiln and in precalciner, hence there is the excess air, which is usually about 1.2 nm³/kg of clinker. This excess air must also be dedusted, and sometimes electrostatic precipitator for kiln gases can be also used for this purpose.

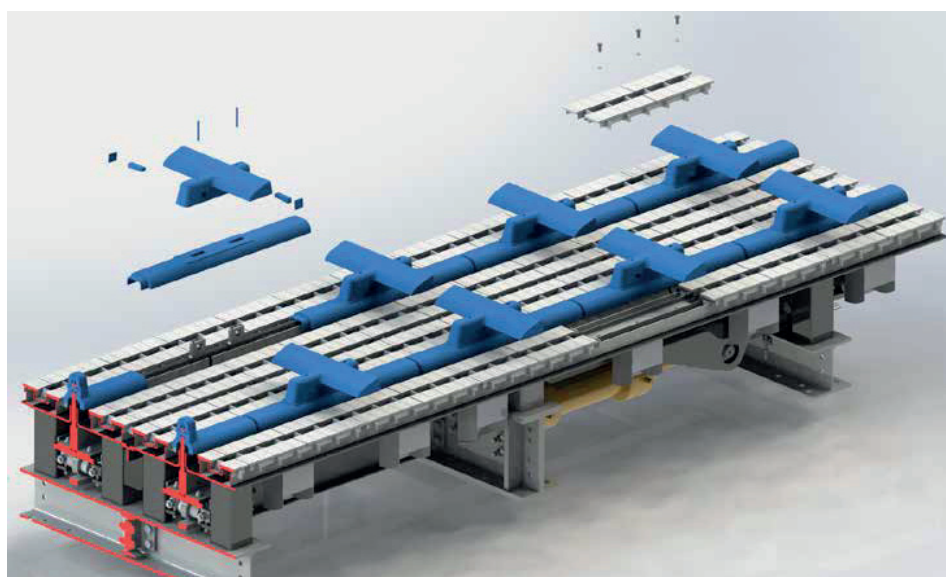
Recently, kilns with fluidized bed precalciners have been developed, which drastically reduced combustion air required in the kiln, even by about 60%. Precalciner must also be supplied with hot air, which, combined with a significant increase of the kiln capacity, has created conditions which give a significant advantage to grate coolers. The transfer of tertiary air from grate cooler can be easily solved, which is their additional advantage. This is relatively well shown on Fig. 2.



Rys. 10. Wydajność pieca i stopień dekarbonizacji w zależności od udziału paliwa spalane go w dekarbonizatorze. Linie cienkie doprowadzenie powietrza trzeciego przez piec, linie grube osobnym rurociągiem z chłodnika
 Fig. 10. Kiln capacity and decarbonization degree depending on the proportion of fuel burned in precalciner. Thin lines, introduction of tertiary air through the kiln, thick lines with a separate duct from the cooler



Rys. 11. Jednostkowe zużycie ciepła Q_{TOT} i prędkość gazów na wylocie z pieca V_{OE} dla różnej ilości ciepła Q_{WT} , dostarczanej do dekarbonizatora wg. Herschenbacha
 Fig. 11. Specific heat consumption Q_{TOT} and gas velocity at the kiln outlet V_{OE} for various heat amounts Q_{WT} , introducing to precalciner acc. Herschenbach



Rys. 12. Zasada pracy chłodnika rusztowego firmy FLSmidth
 Fig. 12. Operating principle of the FLSmidth grate cooler

stanowi dodatkową ich zaletę. Jest to stosunkowo dobrze pokazane na rysunku 2.

Do nowoczesnych chłodników rusztowych należy zaliczyć przede wszystkim chłodniki dwóch firm: FLSmidth i IKN. Chłodniki IKN należą do nietypowych, bowiem ruszt jest podwieszony. W chłodniku firmy FLSmidth zastosowane są specjalne listwy, z których ruchome „popychają” klinkier – rysunek 12.

The coolers from two companies: FLSmidth and IKN belong to modern grate coolers. IKN coolers are unusual, because the grate is suspended. The FLSmidth cooler has special strips, from which these movable “push” for the clinker are introducing – Fig. 12.

Summing up this short discussion about modern solutions used in rotary kilns, it can be stated that it created the conditions for installation of high-capacity kilns. The widespread introduction of precalciners contributed to this. For this reason, the kilns with

Podsumowując to krótkie omówienie nowoczesnych rozwiązań zastosowanych w piecach obrotowych, można stwierdzić, że stworzyło to warunki do budowy pieców o dużych wydajnościach. Przyczyniło się do tego powszechne wprowadzenie dekarbonizatorów wstępnych. Z tego względu w nowych fabrykach stosuje się często piece o wydajności od sześciu do ośmiu tysięcy ton na dobę.

capacity of six to eight thousand tonnes per day are often used in the new cement plants.

Literatura / References

1. CEMUREAU Annual Reports from 2002 and 2019.
2. FLSmith, Dry process kiln systems.
3. FLSmith, Cross-bar cooler.
4. H. Meedom, Kompaktes System zum Brennen von Filterkuchen., Zement-Kalk-Gips, **30**, (8), 369 – 371 (1970).
5. A. Wolter, Pyrorapid-Kurzdrehofen,-Vorteile für alle Rohmaterialien, Zement-Kalk-Gips, **50**, (9), 429-432 (1990).
6. H. Herchenbach, H. Weber, Solid fuels preparation for burning for precalcining systems. Rock Prod. **81**, (10), 104 – 108 (1978).
7. W. Kurdowski, Cement manufacture, in J. Bensted, P. Barnes (eds.) Structure and Performance of Cements, 1-25, Spon Press, London, 2002.