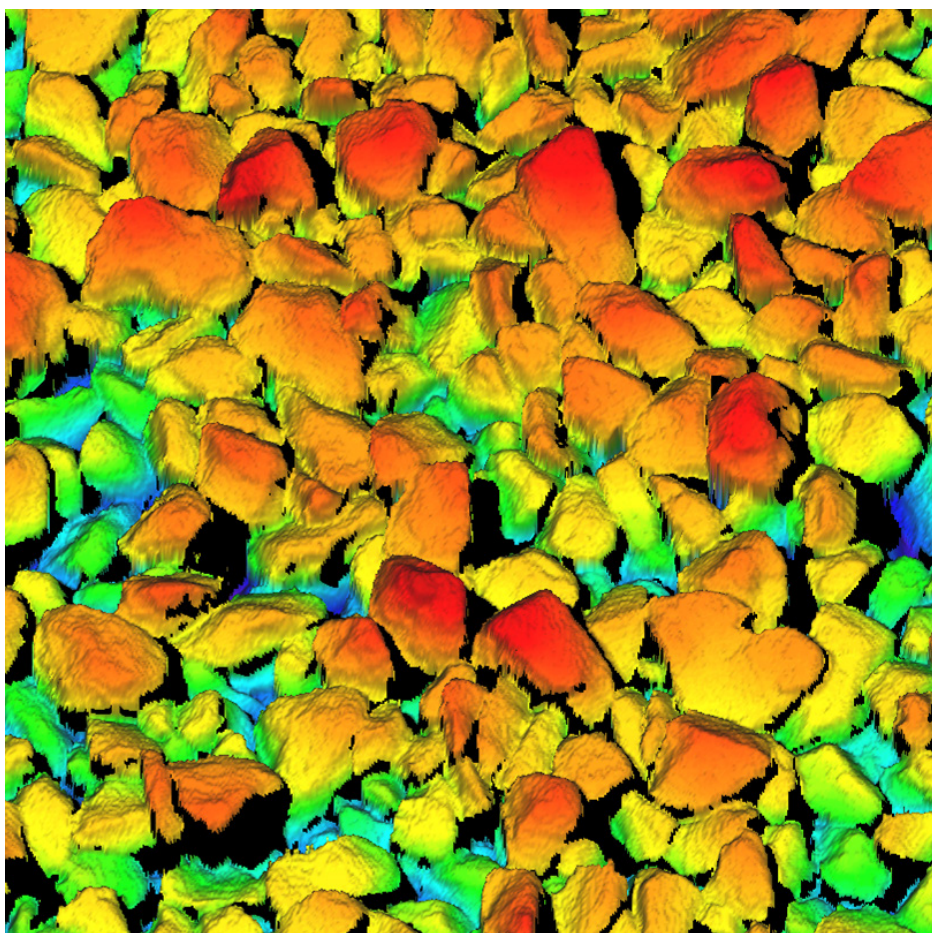


ENERGIEFFEKTIV MESAUGNSSTYRNING GENOM PARTIKELSTORLEKSMÄTNING

RAPPORT 2022:869



Energieffektiv mesaugnsstyrning genom partikelstorleksmätning

ERIK BERG
JONAS WETTERLING
PETER LINGMAN
RICHARD NORDENSKJÖLD

ISBN 978-91-7673-869-6 | © Energiforsk maj 2022

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt KVU45112 *Energieffektiv mesaugnsstyrning genom partikelstorleksmätning* inom Energiforsks skogsindustriella program.

Programmet handlar i första hand om energieffektivisering, att kunna nyttiggöra sidoströmmar och restvärme samt effektiv användning och återvinning av kemikalier. Projekt som genomförs inom programmet ska ge lösningar på upplevda problem på bruken och vara så generaliserbara så att flera har möjlighet att implementera forskningsresultaten inom en överskådlig tid.

Detta projekt har haft som mål är att undersöka hur sambandet mellan driftbetingelser och partikelstorlek ser ut, för att genom att mäta partikelstorleksfördelningen kunna styra mesaugnen mot en mer energieffektiv drift.

Arbetet har genomförts av Optimization AB med Peter Lingman som huvudprojektledare. Projektets referensgrupp har bestått av

Daniella Johansson, Södra
Pär Johnsson, BillerudKorsnäs
Fredrik Lind, SCA
Mats Lundberg, BillerudKorsnäs
Mikael Forssen, BillerudKorsnäs

Forskningen har möjliggjorts ekonomiskt genom medel från ÅForsk, Valmet samt dessa bruk:

Ahlstrom-Munksjö Aspa
Billerud Korsnäs, Frövi
Billerud Korsnäs Gävle
Billerud Korsnäs Gruvön
Billerud Korsnäs Karlsborg
Billerud Korsnäs Skärblacka
Holmen Iggesund
Metsä Board, Husum
SCA Munksund
SCA Obbola
SCA Östrand
Södra Cell Mönsterås
Södra Cell Mörrum
Södra Cell Värö

Samtliga har representanter i programstyrelsen.

Helena Sellerholm
Programansvarig
Termisk energiomvandling, Energiforsk AB

Sammanfattning

För att minimera energiförbrukningen i mesaugnar är det av högsta vikt att producera en ombränd kalk med hög och jämn reaktivitet. Kalkreaktiviteten är beroende av storleken på bildade kalknoder, och målet med detta projekt är att använda online-mätning av partikelstorleksfördelningen som en parameter i styrningen av mesaugnen. Genom online-mätning kan även effekten av driftförhållande på erhållen nodulstorlek utvärderas. I denna studie undersöktes effekten av kalktemperatur, rökgasttemperatur och ugnens varvtal genom kontrollerade försökskörningar.

Av de tre undersökta styrvariablerna har kalktemperaturen tydligast påverkan på nodulstorlek och damning. De två andra styrvariablerna, ugnens rotationsvarvtal och rökgasttemperatur inmatningsände har liten inverkan på kalkens storleksfördelning medan deras påverkan på energiförbrukningen är stor.

Försöken har resulterat i att rotationsvarvtalet har minskats med 0,2 rpm för alla produktionshastigheter och att rökgasttemperaturen hålls så låg som möjligt. Kalktemperaturen skall hållas stabil och så hög att damningen i ugnen minimeras.

Partikelstorleksmätning i realtid med 3DPM har visat sig vara mycket robust över tid och tillräckligt tillförlitlig för att användas till styrning. Försöken har visat att nodulstorleken kan påverkas med kalktemperaturen. Det borde därigenom vara möjligt att använda 3DPM mätningen för automatisk styrning av kalktemperatur.

Resultat och metod bedöms vara överförbara till andra mesaugnar.

Nyckelord

Partikelstorlek, mesaugn, reglering, siktkurva, energieffektiv, reglering, optimering, realtidsmätning, kalknoder

Summary

In order to minimize the energy usage of lime kilns it is of great importance to produce a reburned lime with a high and consistent reactivity. The lime reactivity is known to be affected by the nodule size and the aim of this work is to use online measurement of the nodule size distribution as an input parameter to the control of the lime kiln. Online measurement also allows for evaluation of the influence of operation conditions on the obtained particle size distribution; in this study the effects of lime temperature, flue gas temperature and rotational speed of the kiln are investigated.

The lime temperature was found to have the most significant effect on the nodule size and dusting behaviour of the studied control parameters. The rotational speed of the lime kiln and the flue gas temperature had a limited effect on the particle size distribution. However, their impact on the specific energy demand of the lime kiln is high.

The experiments have resulted changes to the recommended operating conditions of the lime kiln. The rotational speed of the lime kiln has been decreased with 0,2 rpm for all production rates compared to before the project. The flue gas temperature is kept as low as possible while the lime temperature is maintained at a high enough level to minimize dusting.

Measurement of the nodule size distribution with 3DPM was stable over time and the results were sufficiently reliable to allow use in the control of the lime kiln. The effect of lime temperature on the nodule size distribution has been shown and the 3DPM instrument may thus be used for automated control of the lime temperature.

The results and method used in this project is considered to be transferable to other lime kilns and are not specific to the kiln used in this study.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Mål	8
2	Genomförande	10
2.1	Mesaugn 2	10
2.2	temperaturmätningar	11
2.2.1	Kalktemperatur	11
2.2.2	Rökgastemperatur inmatningsände	12
2.2.3	Rotationsvarvtal ugn	12
2.3	Försök 1, pyrometertemperatur kalk	12
2.3.1	Försöksberättelse hög kalktemperatur	13
2.3.2	Försöksberättelse låg kalktemperatur	13
2.3.3	Försöksberättelse mellan hög kalktemperatur	14
2.4	Försök 2, rotationsvarvtal mesaugn	16
2.4.1	Försöksberättelse lågt rotationsvarvtal	16
2.4.2	Försöksberättelse högt rotationsvarvtal	17
2.5	Försök 3, Rökgastemperatur Inmatningsände	20
2.5.1	Försöksberättelse låg rökgastemperatur	20
2.5.2	Försöksberättelse hög rökgastemperatur	20
2.6	Försök 4, pyrometertemperatur kalk	22
2.6.1	Försöksberättelse hög kalktemperatur	22
2.6.2	Försöksberättelse låg kalktemperatur	23
2.6.3	Försöksberättelse återgång till hög kalktemperatur	23
2.7	Partikelstorleksmätning	25
2.7.1	Online mätning: 3DPM	25
2.7.2	Siktprover	27
3	Resultat	28
3.1	Resultat försök 1, pyrometertemperatur kalk	28
3.1.1	3DPM	28
3.1.2	Siktanalys och restkarbonat	29
3.1.3	Analys siktanalys och 3DPM	29
3.1.4	Restmetanol till brännare	30
3.2	Resultat försök 2, ugnrotation	31
3.2.1	Teori, rotationsvarvtal och fyllnadsgrad mesaugn	31
3.2.2	3DPM	32
3.2.3	Siktanalys och restkarbonat	32
3.2.4	Rökgastemperatur och energiförbrukning	33
3.3	Resultat försök 3, rökgastemperatur inmatning	34
3.3.1	3DPM	34

3.3.2	Siktanalys och restkarbonat	34
3.4	Analys siktanalys och 3DPM	35
3.5	Resultat försök 4, pyrometertemperatur kalk	35
3.5.1	3DPM	36
3.5.2	Restkarbonat	36
4	Diskussion	37
4.1	Betydelsen av partikelstorleksmätning	37
4.2	Varvtalsoptimum	37
4.3	Maximal kalktemperatur	38
5	Slutsatser	39
5.1	Utfall av försökskörningar	39
5.1.1	Kalktemperatur	39
5.1.2	Rotationsvarvtal ugn	39
5.1.3	Rökgastemperatur inmatningsände	39
6	Fortsatt arbete och rekommendationer	40
6.1	3DPM för styrning	40
6.2	Resultatöverföring	40
7	Referenser	41

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Mesaugnen har en central roll i återvinningen av processkemikalier i ett kemiskt massabruk. I mesaugnen sker ombränning av mesa där kalciumkarbonat (CaCO_3) ombildas till kalciumoxid (CaO). Processen är mycket energikrävande och en stor förbrukare av bränsle. Detta bränslebehov täcks antingen av externa bränslen som olja (fossil eller biobaserad) eller interna biprodukter som träpulver eller bark. I svenska mesaugnar uppgår den årliga förbrukningen av bränsle till i storleksordningen 4 TWh och förbättrad energieffektiviserande åtgärder som förbättrad processtyrning kan därmed potentiellt resultera i betydande energibesparingar (Dernegård, Dusting in a lime kiln, 2019).

För att minska energiförbrukningen i mesaugnen är det viktigt att minimera kalkförbrukningen. För att undvika överkalkning till kausticeringen är det viktigt ha en jämn kalkkvalité med hög reaktivitet. Kalkreaktiviteten är beroende av storleken på bildade kalkpartiklar (noder) i mesaugnen. Storleken på nodulerna påverkar den optimala uppehållstiden i mesaugnens kalcineringszon för att uppnå en sintringsgrad som ger en god kalkreaktivitet. Större noder kräver längre uppehållstid än finmaterial för att kalcineras hela vägen in till kärnan (Tran & et.al, 2007). Samtidigt leder alltför lång uppehållstid vid en hög temperatur till överbränning och en minskad kalkreaktivitet. Noder i storleksordningen 10-15 mm har visats ha högre reaktivitet än finmaterial (Dernegård, Brelid, & Theliander, 2017).

Utöver att resultera i låg kalkreaktivitet så har damning en negativ effekt på mesaugnens drift. Skärmning av värmestrålning kan ge instabil drift och recirkulation av damm ger även upphov till betydande energiförluster. De faktorer som huvudsakligen påverkar uppkomsten av damning är kalktemperatur, rökgasflöde samt storleken på kalkpartiklarna (Fardadi, 2010). Det har även visats i experimentell skala att höga kalktemperaturer samt en lägre upphettningshastighet kan leda till minskad damning (Richards & Joseph, 2019).

Befintliga mesaugnsstyrningar på marknaden utgår från mätningar av drifttillstånd som mesaflöde, varvtal på mesaugnen, kalktemperatur, rökgastemperatur samt rökgassammansättning (Järvensivu, Saari, & Jämsä-Jounela, 2001), (Villarroel & Tran, 2015). Genom att inkludera mätdata på partikelstorleksfördelningen kan ett direkt mått på erhållna kalkpartiklar kombineras med övriga mätsignaler. Genom att studera en mesaugnsstyrning som kombineras med partikelstorleksmätning kan uppehållstiden i mesaugnen styras i realtid för att erhålla en god produktkvalitet. Effekten av driftsförhållanden på den erhållna partikelstorleksfördelningen kan också studeras för att minimera damningen i mesaugnen och därmed uppnå lägsta möjliga energiförbrukning.

1.2 MÅL

Målet med projektet är att undersöka möjligheterna att använda en onlinemätning av partikelstorleksfördelningen av den brända kalken som en indata parameter till

en automatiserad mesaugnsstyrning. Ett mål är att kvantifiera betydelsen av rögastemperatur, kalktemperatur och uppehållstid på partikelstorleksfördelningen och i förlängningen effekten på kalkeffektivitet och damning.

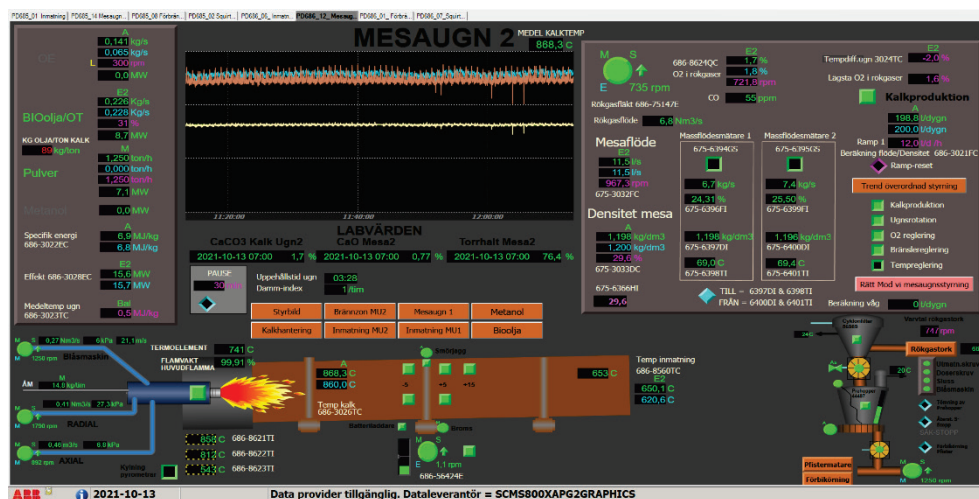
Målet med studien är också att öka den bakomliggande förståelsen för sambandet mellan mesaugnens driftsbetingelser och den erhållna partikelstorleksfördelningen. Genom att följa partikelstorleksfördelningen online är målet att styrningen av mesaugnen ska kunna anpassas för att undvika damning och därmed minska de erhållna energiförlusterna. Målet är därmed att kunna identifiera en rutin för driftoptimering som ger minskad damning och kan tillämpas även vid andra mesaugnar som saknar mätning av partikelstorleksfördelningen.

2 Genomförande

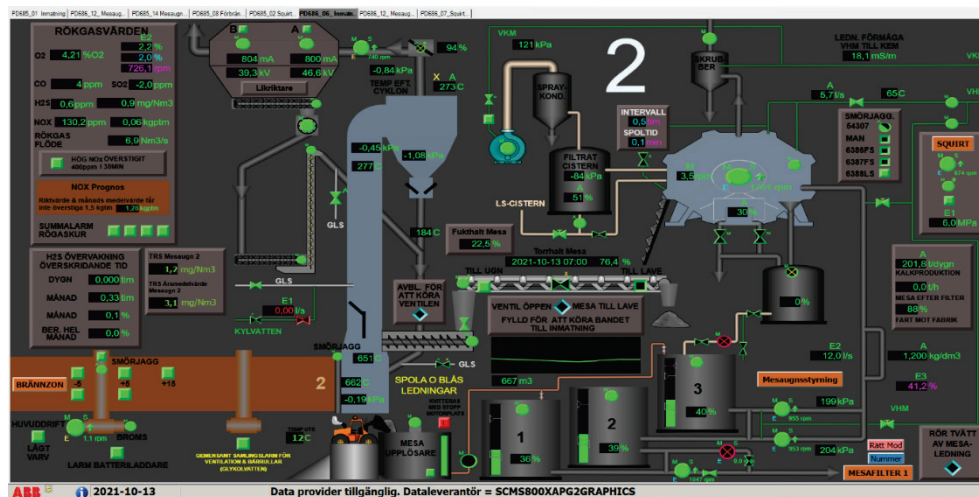
2.1 MESAUGN 2

Mesaugn 2 i Mönsterås är en traditionell ugn med cyklontork.

- Längd 80 m
- Diameter yttre 3,3 m inre ca 2,9 m
- Lutning 2,5 %
- Bränsle Träpulver, bioolja, eldningsolja och metanol
- Kalkproduktion Design 275 t/d, med träpulver ca 225 t/d



Figur 1. Mesaugn 2, operatörsbild "Mesaugnstyrning"



Figur 2. Mesaugn 2, operatörsbild "Inmatning MU2"

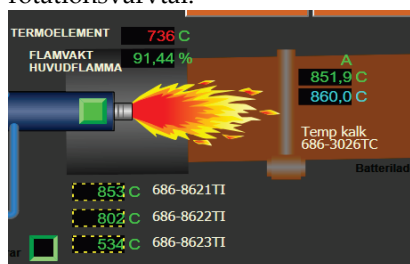
2.2 TEMPERATURMÄTNINGAR

2.2.1 Kalktemperatur

De flesta mesaugnar saknar en bra och tillförlitlig temperaturmätning av kalk i ugnens utmatningsände. Många gånger finns ett termoelement som mäter temperatur i sekundärluften till brännare. Termoelementet kan påverkas mer eller mindre av flammans och kalkens strålningsvärme. I det fall det finns pyrometrar som mäter kalktemperatur är dessa i ofta felaktigt inriktade eller har fel våglängdsområde.

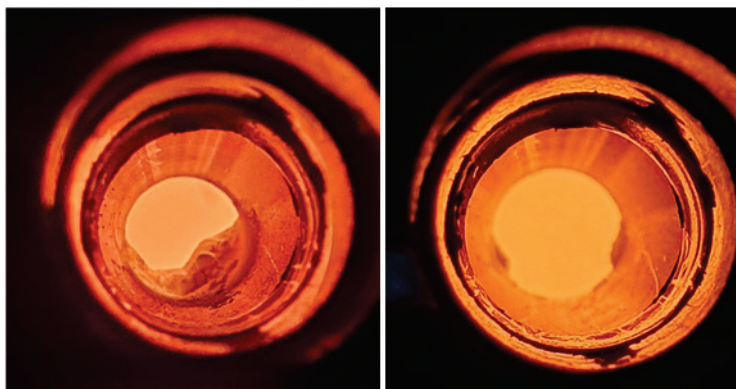
I Mönsterås har stor möda lagts ner på att säkerställa korrekt och stabil mätning av kalktemperaturen. För att få redundans och lättare fånga upp felaktiga mätsignaler används tre pyrometrar. Placeringen är noggrant vald för att i största mån undvika damm och mäta mot kalkbädden.

Mätvärdet utgörs av maxurval av de tre pyrometrarna, valt mätvärde lågpasfilteras med tre minuters filtertid för att ta bort variationer som beror av ugnens rotationsvarvtal.



Figur 3. Pyrometer temperatur, 8621TI, 8622TI och 8623TI, vald och filterad temperatur utgör mätvärde för 3026TC. Termoelement brännzon 8521TI i övre vänstra hörnet.

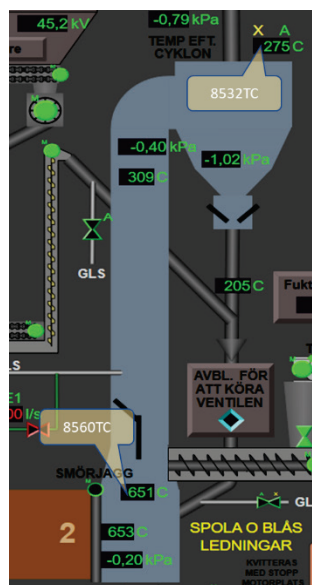
Under försöken har det konstaterats att pyrometrarna kan påverkas av påbyggnad av damm och små noder i genomföringsrörets mynning. Innan försöken renblåstes pyrometrarna till att börja med. Senare har de försetts med en automatisk renblåsningsekvens.



Figur 4. Påbyggnad av damm och noder i pyrometers genomföringsrör, vänster bild före renblåsning, höger bild efter renblåsning.

2.2.2 Rökgastemperatur inmätningssände

Tidigare mätning av rökgastemperaturen var känslig för uppbyggnad av mesa i ugnsinmatningen. Periodvis var givaren begravd i mesa och gav ett lågt mätvärde. Ett gediget och envist arbete har lett fram till en ny mätposition som inte påverkas av påbyggnad av mesa. Mätningen är stabil över tid och bedöms ge tillförlitliga mätdata.



Figur 5. Rökgastemperatur inmatning, 8560TC och rökgastemperatur efter cyklon, 8532TC.

2.2.3 Rotationsvarvtal ugn

Varvtalets visning har kontrollerats i fält, och stämmer med visningen i operatörsbild.



Figur 6. Rotationsvarvtal ugn, 686-56424E i mitten av bildens nedkant.

2.3 FÖRSÖK 1, PYROMETERTEMPERATUR KALK

Försök med ändrad kalktemperatur, hög, låg och mellanhög temperatur.

Försöket pågår från 21-10-13 till 21-10-15

21-10-13 försök med hög kalktemperatur, 850°C.

21-10-14 försök med låg kalktemperatur, 760°C

21-10-15 försök med mellanhög kalktemperatur, 810°C

21-10-16 tillbaka till hög kalktemperatur, 850°C

2.3.1 Försöksberättelse hög kalktemperatur

Förutsättningar

- Varvtal 1,1 rpm under hela försöket
- Prod.bv 200 t/h under hela försöket.
- Specifik energi under hela försöket 6,77 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 1,8 %
- H₂S stabil före och under försöket medel 1,4 ppm
- CO stabil under försöket, i stort sett noll förutom en spik vid 13:10
- Rökgas till cyklon stabil, medel 274°C

Rengör pyrometrar 21-10-13 10:40

Lägger ur styrning för att inte regleringen skall ändras under rengöring. Specifik energi till auto 6,77 MJ/kg, vilket är samma som medel för de senaste 4 timmarna.

Mätvärdet hoppar upp ca 50°C vid rengöring. Ugnens störs inte i övrigt utan temperaturerna är fortsatt stabila.

Kalktemperatur relativt stabil under försöket ca 830 till 860°C, medelvärde 850°C 12 timmar före och under provet.

Rökgastemperatur stabil, 8560TC medel 652°C

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 21-10-13 14:00 = 2,2 %

12:00 provtagning påbörjas.

15:20 provtagning avslutas

Brännare

Under försöket har förbränningen inte varit helt stabil, trots oförändrade bränsleflöden och primärluftsflöden har temperaturen i förbränningszonen varierat en del. Termoelementet har haft snabba förändringar om ca 740–690°C, NO_x har ändrats snabbt några gånger mellan 160–120 ppm. Tyder på snabbt ändrade förhållanden i brännzonen. Orsak hittills okänd. Tiderna för de svängande temperaturerna bedöms inte påverka nodulstorlek.

Avslut provtagning 21-10-13 15:25

Försöket har avslutats, temperaturbörvärdet ställs om. Börvärdet ändras från 860°C till 810°C.

2.3.2 Försöksberättelse låg kalktemperatur

Provtid 211015 08:30-11:30

Förutsättningar

- Varvtal 1,1 rpm under hela försöket
- Prod.bv 200 t/h under hela försöket.
- Specifik energi under hela försöket 6,4–6,7 MJ/kg, medel 6,53 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 1,8–2,3 %, medel 1,9 %

- H₂S stabil före och under försöket medel 1,4 ppm
- CO något hög under försöket i området 0–1000 ppm, två enstaka spikar, medel 687 ppm.
- Rökgas till cyklon stabil, medel 287°C
- Restkarbonat enligt ordinarie mätning 07:00 = 2,0 %

Kalktemperatur relativt stabil under försöket ca 747°C till 779°C, medelvärde 760°C 12 timmar före och under provet.

Rökgastemperatur relativt stabil, 8560TC medel 673°C

21-10-14 12:00 provtagning påbörjas, avslutas 15:00

Brännare

Under försöket har förbränningen inte varit stabil, hög pulverandel och metanol till brännaren gör att förbränningen är lite upp och ned. Försöket var egentligen menat att ske vid 810°C men förbränningen försämrades plötsligt först runt 03:00 och sedan 05:00. Förmodligen beroende på att oren metanol tillfördes till brännaren. Metanol började tillföras 21-10-13 20:30. Styrningen kunde inte återhämta utan temperaturen förblev låg. Provtagningen sköts framåt från 09:00 till 12:00 för att få stabil temperatur några extra timmar innan provtagningen påbörjades.

Avslut provtagning 21-10-14 15:00

Försöket har avslutats, temperaturbörvärdet ställs om till 810°C och andelen pulver sänks i två omgångar från 1,25 t/h till 0,75 t/h, kalktemperaturen stiger.

2.3.3 Försöksberättelse mellanhög kalktemperatur

Provtid 211015 08:30-11:30

Förutsättningar

- Varvtal 1,1 rpm under hela försöket
- Prod.bv 200 t/h under hela försöket.
- Specifik energi under hela försöket 6,2–6,45 MJ/kg, medel 6,33 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 1,8–2,6 %, medel 2,1 %
- H₂S stabil före och under försöket medel 1,3 ppm
- CO något hög under försöket i området 0–1000 ppm, två enstaka spikar, medel 800 ppm.
- Rökgas till cyklon stabil, medel 263°C
- Restkarbonat enligt mätning 07:00 1,7 %

Kalktemperatur relativt stabil under försöket ca 783°C till 825°C, medelvärde 808°C timmarna före och under provet.

Rökgastemperatur relativt stabil, 8560TC medel 642°C.

21-10-15 08:30 provtagning påbörjas.

11:30 provtagning avslutas

Brännare

Under försöket har förbränningen varit stabil, låg andel pulver ger bra styrbarhet och jämna förhållanden för förbränningen. Något hög CO, förmodligen pga. att oren metanol tillförs brännaren.

Avslut provtagning 21-10-15 12:00

Försöket har avslutats, temperaturlöslaget ställs om till normaltemperatur, 860°C, och andelen pulver ökas i omgångar från 0,75 t/h till 1,25 t/h

2.4 FÖRSÖK 2, ROTATIONSVARVTAL MESAUGN

Försök med ändrad rotationshastighet, lågt och högt varvtal.

Försöket pågår från 21-12-07 till 21-12-09

21-12-07 Omställning till låg rotationshastighet, minskat varvtal 1,16 till 0,96 rpm

21-12-08 Provuttag lågt varvtal, omställning till högt varvtal 0,96 till 1,25 rpm

21-12-09 Provuttag högt varvtal

21-12-09 Tillbaka till normal rotationshastighet 1,16 rpm

2.4.1 Försöksberättelse lågt rotationsvarvtal

Till lågt varvtal

- Kalktemperatur stabilt på 850°C mer än 12 timmar före ändring av varvtalet.
- Røkgastemperatur stabil på 670°C mer än 12 timmar före ändring av varvtalet.

21-12-07 11:11

Varvtal 0,96 rpm ställdes in, tidigare 1,16 rpm.

Specifik energi lades i auto med bibehållet börvärde på 6,9 MJ/kg

Kraftig transient på kalktemperatur där temperaturen började stiga sakta ca 10°C i 40 min för att sedan stiga allt snabbare.

12:20

Temperaturen ökat ytterligare 50°C till 910°C. Specifik energi minskas till 6,7 MJ/kg.

Temperaturen fortsätter stiga och specifik energi minskas i omgångar med ca 30 min intervaller till som lägst 5,9 MJ/kg.

O2 till auto, börvärde 3 %

Røkgastemperaturen faller kraftigt till under 600°C.

15:03

Kalktemperaturen har fallit tillbaka till 860°C, specifik energi ökas till 6,3 MJ/kg

16:30

Lägger styrning aktiv igen, nytt börvärde røkgastemp = 585°C.

18:45

Energi, kalktemperatur och røkgastemperatur stabila på sina börvärden.

Förutsättningar

- Prod.bv 210 t/h under hela försöket.
- Specifik energi stabil under hela försöket 6,5 MJ/kg.
- O2 12 timmar före och under hela försöket 1,7–2,1 %, medel 1,9 %.

- H₂S stabil före och under försöket medel -0,3 ppm.
- CO stabil under försöket, i stort sett noll förutom enstaka spik.
- Kalktemp stabil 12 timmar före och under hela försöket 830–850°C, medel 841°C.
- Röktemp stabil under hela försöket 580–600°C, medel 591°C.
- Rökgas till cyklon sjunkande från 290°C tolv timmar före provuttag till 270°C under provuttag, medel 284°C.
- Restkarbonat enligt ordinarie mätning 21-12-07 23:00 = 2,1 %.

21-12-08 07:00 provtagning påbörjas.

10:00 provtagning avslutas

Brännare

Från 21-12-06 11:00 till 21-12-08 10:20 har enbart bioolja använts som bränsle. Det har medfört att förbränningen varit mycket stabil med stabil NO_x och stabil temperatur termoelement.

Avslut provtagning 21-12-08 10:00

10:18 läggs pulver till brännare 0,5 t/h, motsvarande 2,8 MW till brännare.

11:06 stegas varvtalet upp från 0,96 till 1,11 rpm.

2.4.2 Försöksberättelse högt rotationsvarvtal

Till högt varvtal

21-12-08 11:06

Varvtal 1,1 rpm ställdes in, tidigare 0,96 rpm.

12:00

Kalktemperatur har droppat från 850 till 760 gr, specifik energi har ökat till 7,0 MJ/kg via styrningen. O₂ börvärde på min = 1,7 %.

Specifik energi och O₂ till auto. Börvärde specifik energi till 7,0 MJ/kg O₂ till 1,7 %.

12:30

Kalktemperatur slutar falla på fastnar på ca 740°C. Röktemp ökar stadigt, nu 607°C, start 585°C.

13:30

Kalktemperatur kvar på 740°C, röktemp fortsätter öka, nu 622°C, temp efter cyklon upp ca 10°C sedan varvtalsändringen.

15:55

Kalktemperatur uppe på 800°C, röktemp 626°C

Ökar varvtalet från 1,1 till 1,3 rpm, snabbt fallande kalktemperatur efter varvtalsökningen.

16:55

Ökar specifik energi till 7,2 MJ/kg rökgastemperatur börjar öka.

18:23

Kalktemperaturen når sitt lägsta värde på 724°C, rökgastemperatur uppe i 660°C.

20:45

Kalktemperatur upp i 815°C, verkar svårt att komma högre. Minskar varvtalet något från 1,3 till 1,25 rpm.

Lägger in styrningen med börvärde rökgaser 660°C och kalktemperatur 850°C.

Styrningen börjar jobba från O₂ 1,7 % och specifik energi 7,2 MJ/kg

22:00

Kalktemperatur stabil på börvärde 850°C, rökgastemperatur stabil på börvärde 660°C.

22:00-07:15

Fortsatt stabilt. Specifik energi stabil på 7,0–7,1 MJ/kg, medel 7,04 MJ/kg, kalktemp medel 848°C.

Temperatur efter cyklon 286–306°C, medel 295°C.

08:50

Stopp i mesa till ugnen, varvtal till 0,3 rpm, ugnen i "hot standby"

09:30

Start mesa till ugnen, varvtalet till 1,3 rpm

09:30-11:00

Hög kalktemperatur, max 939°C vid 10:17

Förutsättningar

- Prod.bv 210 t/h under hela försöket, stopp i produktion under 40 min 21-12-08 08:50-09:30.
- Specifik energi stabil under hela försöket 7,0–7,1 MJ/kg
- O₂ stabil 12 timmar före och under hela försöket 1,5–1,8 %, medel 1,6%.
- H₂S stabil före och under försöket medel -0,2 ppm
- CO stabil under försöket, i stort sett noll förutom enstaka spik
- Kalktemp 12 timmar före och under hela försöket 840–860°C, medel 846°C
- Rökgastemperatur stabil under hela försöket 655–670°C, medel 662°C
- Rökgas till cyklon stabil 12 timmar före och under hela försöket, medel 298°C
- Restkarbonat enligt ordinarie mätning 21-12-09 08:00 = 1,9 %

21-12-09 09:30 provtagning påbörjas.

11:30 provtagning avslutas

Brännare

Från 21-12-08 10:20 till 21-12-09 11:30 har 0,5 t/h pulver, motsvarande 2,8 MW tillförts brännaren resterande bränsle utgörs av bioolja. Förbränningen har varit mycket stabil med stabil NOx och stabil temperatur termoelement.

Avslut provtagning 21-12-09 11:30

Försöket med högt varvtal avslutats, varvtalet ställs om till normala 1,16 rpm.

2.5 FÖRSÖK 3, RÖKGASTEMPERATUR INMATNINGSÄNDE

Försök med ändrad rökgastemperatur i ugnens inmatningsände, låg och hög temperatur. Försöket pågår från 21-12-13 till 21-12-15
 21-12-14 försök med låg rökgastemperatur, 613°C.
 21-12-15 försök med hög rökgastemperatur, 640°C.

2.5.1 Försöksberättelse låg rökgastemperatur

Förutsättningar

- Varvtal 0,96 rpm under hela försöket
- Prod.bv 210 t/h under hela försöket.
- Specifik energi i styrning under hela försöket, 6,6 till 7,0 MJ/kg, medel 6,82 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 2,0 %, ett kort drop i O₂ 00:33
- H₂S stabil före och under försöket medel -0,6 ppm
- CO stabil under försöket, i stort sett noll förutom enstaka små spikar och en större vid 00:33

Rökgas till cyclon stabil, medel 290°C

Kalktemperatur relativt stabil under försöket ca 790 till 830°C, medelvärde 808°C
 10 timmar före och under provet.

Rökgastemperatur relativt stabil, 8528TC 600–620°C, medel 613°C

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 21-12-14 07:00 = 3,1 %

07:30 provtagning påbörjas.

10:00 provtagning avslutas

Brännare

Från 21-12-13 11:00 till 21-12-15 16:00 har 1,9 t/h pulver, motsvarande 10,7 MW tillförts brännaren resterande bränsle utgörs av bioolja. Förbränningen har varit mycket stabil med stabil NO_x och stabil temperatur termoelement.

Avslut provtagning 21-12-14 10:00

Försöket har avslutats, temperaturbörvärde rökgaser ställs om

2.5.2 Försöksberättelse hög rökgastemperatur

Provtid 21-12-15 08:30-10:30

Förutsättningar

- Varvtal 0,96 rpm under hela försöket
- Prod.bv 210 t/h under hela försöket.
- Specifik energi under hela försöket 6,7–7,4 MJ/kg, medel 6,92 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 2,0–3,7 %, medel 3,7 %
- H₂S stabil före och under försöket medel -0,8 ppm

- CO låg före och under försöket en enstaka spik, medel 27 ppm.
- Rökgas till cyklon stabil, medel 319°C, kylningen har periodvis gått till
- Restkarbonat enligt ordinarie mätning 07:00 = 2,1 %

Kalktemperatur stabil under försöket ca 790°C till 840°C, medelvärde 818°C 12 timmar före och under provet.

Rökgastemperatur relativt stabil, 8560TC medel 640°C

21-12-15 08:30 provtagning påbörjas, avslutas 10:30

Brännare

Från 21-12-13 11:00 till 21-12-15 16:00 har 1,9 t/h pulver, motsvarande 10,7 MW tillförts brännaren resterande bränsle utgörs av bioolja. Förbränningen har varit mycket stabil med stabil NOx och stabil temperatur termoelement.

Avslut provtagning 21-12-15 10:00

Försöket har avslutats, temperaturbörvärdet rökgas sänks till 590°C.

Försök med ändrad kalktemperatur, hög och låg temperatur.

Försöket pågår från 22-01-13 till 22-01-19

21-10-14 utvärdering hög kalktemperatur, 850°C.

21-10-17 utvärdering låg kalktemperatur, 760°C

21-10-19 utvärdering hög kalktemperatur, 850°C

2.6 FÖRSÖK 4, PYROMETERTEMPERATUR KALK

Försök med ändrad kalktemperatur, hög och låg temperatur.

Försöket pågår från 22-01-13 till 22-01-19

21-10-14 utvärdering hög kalktemperatur, 850°C.

21-10-17 utvärdering låg kalktemperatur, 760°C

21-10-19 utvärdering hög kalktemperatur, 850°C

Försöket har pågått under längre tid än tidigare försök. Innan mätdata från 3DPM utvärderas har aktuell temperatur varit stabil i minst ett dygn. Inga kompletterande restkarbonatprov eller siktprov har tagits ut under försöket. Restkarbonat har kontrollerats via ordinarie restkarbonatprov som tas två till tre gånger per dygn och storleksfördelningen utvärderas enbart med 3DPM-mätning.

2.6.1 Försöksberättelse hög kalktemperatur

Förutsättningar

- Varvtal 0,87 rpm under hela försöket
- Prod.bv 190 t/h under hela försöket.
- Specifik energi stabil under hela försöket 6,7–7,0 MJ/kg, medel 6,9 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 2,5–3,5 %, medel 3,0 %
- H₂S stabil före och under försöket medel -0,6 ppm
- CO stabil under försöket, i stort sett noll förutom enstaka spik
- Rökgas till cyklon stabil, medel 304°C

Pyrometrar har sedan december 2021 en automatisk renbåsning. Fram till januari 2022 har renblåsningen fungerat bra och ingen uppbyggnad i någon av pyrometrarna har noterats.

Kalktemperatur stabil under försöket ca 840 till 860°C, medelvärde 849°C 18 timmar före och under utvärderingen.

Rökgastemperatur relativt stabil, 8560TC medel 588°C

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-13 23:00 = 2,5 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-14 07:00 = 3,7 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-14 15:00 = 1,7 %

22-01-14 10:00 utvärdering påbörjas.

22-01-14 13:00 provtagning avslutas

Brännare

Stabil förbränning under försöket. NO_x låg och stabil, medel 103 ppm. Pulvermatningen fast och oförändrad på 1,1 t/h motsvarande 6,2 MW. Termoelement brännzon stabil, medel 672°C.

Avslut utvärdering 22-01-14 13:00

Försöket har avslutats, temperaturbörvärdet ställs om. Första steg från 850 till 810°C för att inte orsaka någon större störning.

2.6.2 Försöksberättelse låg kalktemperatur

Utvärderingstid 22-01-16 16:00-20:00

Förutsättningar

- Varvtal 0,87 rpm under hela försöket
- Prod.bv 190 t/h under hela försöket.
- Specifik energi ökande under dygnet 6,6–7,2 MJ/kg, medel 6,9 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 2,0–4,3 %, medel 3,5%
- H₂S stabil före och under försöket medel -0,7 ppm
- CO i stort sett noll under hela försöket förutom enstaka spik.
- Rökgas till cyklon stabil, medel 301°C

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-16 23:00 = 4,1 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-17 07:00 = 3,3 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-17 15:00 = 5,5 %

Kalktemperatur lite orolig under försöket 720°C till 785°C, medelvärde 758°C 24 timmar före och under utvärderingstiden.

Rökgastemperatur stabil, 8560TC medel 588°C

22-01-17 16:00 provtagning påbörjas, avslutas 20:00

Brännare

Stabil förbränning under försöket. NO_x stabil, medel 149 ppm. Pulvermatningen fast och oförändrad på 1,5 t/h motsvarande 8,5 MW. Termoelement brännzon orolig 585–660°C, medel 614°C. Temperaturen i brännzonen speglar den oroliga pyrometertemperaturen väl.

Avslut utvärdering 22-01-17 20:00

Försöket har avslutats, temperaturbörvärdet ställs om i ett första steg till 810°C. Mellan 21:00 och 23:00 ökas kalkproduktionen från 190 till 212,5 t/h pga. stopp på MU1.

2.6.3 Försöksberättelse återgång till hög kalktemperatur

Utvärderingstid 22-01-18 -2201-20

Förutsättningar

- Varvtal 0,97 rpm under hela försöket
- Prod.bv 212,5 t/h under hela försöket.
- Specifik energi varierande under dygnet 6,6–7,2 MJ/kg, medel 6,9 MJ/kg
- Börvärde O₂ under hela försöket 2,0–2,4 %, medel 2,0%

- H₂S stabil före och under försöket medel -0,8 ppm
- CO i stort sett noll under hela försöket förutom enstaka spikar per dygn.
- Rökgas till cyklon hög och stabil, medel 305°C

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-18 07:00 = 2,1 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-18 15:00 = 5,2 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-18 23:00 = 1,5 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-19 07:00 = 1,9 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-19 15:00 = 3,3 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-19 23:00 = 2,0 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-20 07:00 = 2,6 %

Restkarbonat enligt ordinarie mätning 22-01-20 16:00 = 3,0 %

Kalktemperatur kommer inte upp till börvärdet under försöket, variation mellan 790°C till 840°C, medelvärde 819°C under utvärderingstiden.

Rökgastemperatur kommer inte ner till börvärdet under försöket, 8560TC medel 629°C, börvärde 610°C.

Brännare

Stabil förbränning under försöket. NO_x stabil, medel 126 ppm. Pulvermatningen fast och oförändrad på 1,5 t/h motsvarande 8,5 MW. Termoelement brännzon orolig 647–686°C, medel 668°C. Temperaturen i brännzonen följer i princip kalktemperaturen.

Avslut utvärdering 22-01-20 16:00

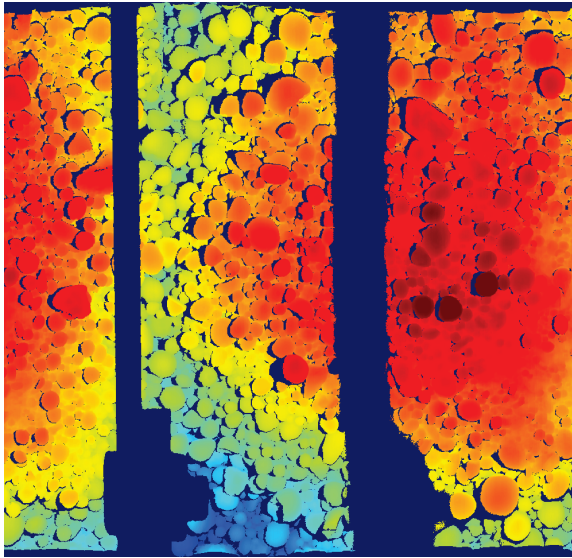
2.7 PARTIKELSTORLEKSMÄTNING

2.7.1 Online mätning: 3DPM



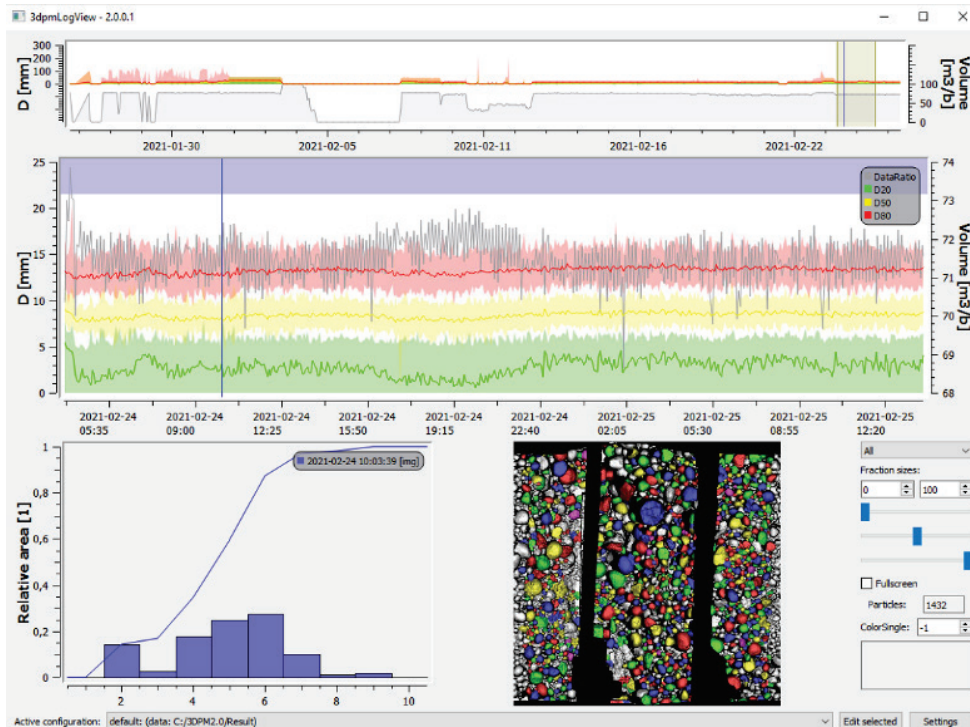
Figur 7. Mät huvud från 3DPM bestående av kamera och laser

3DPM är ett system som mäter storleksfördelning av partiklar i realtid på transportörer. Systemet bygger på lasertriangulering och genererar 3-dimensionella bilder i verkliga millimeter på det material som passerar, vilket gör att bulkhöjdsvariation och övriga perspektivfel inte återspeglas i mätning såsom hos till exempel 2-dimensionella system. Partiklarna separeras och mäts via algoritmer. Storleksfördelningsresultat ges i "andel per klass" [%] där klassgränser är ställbara, D värden där till exempel värdet på D10 [mm] innebär att 10 % av alla partiklar är mindre än värdet. Bilder för individuella mätningar kan även sparas för vid behov visuell utvärdering. Även värden för bland annat bulkvolym [m³/m] och största partikel, samt underhållsinformation som sensortemperaturer och datakvalité presenteras.



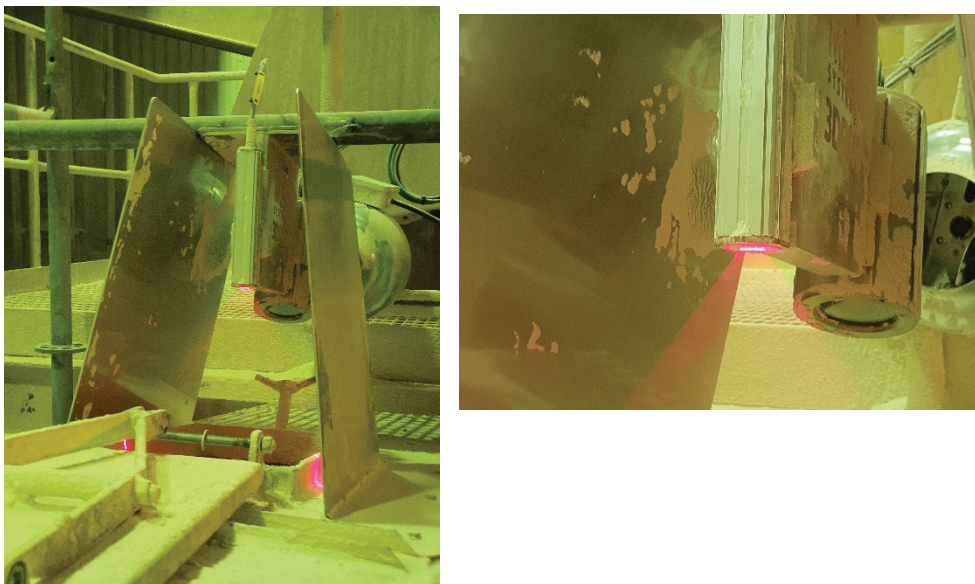
Figur 8. Färgsatt 3D bild (höjdkarta) där rött är högre upp från transportören och blått är närmst botten. Ett exempel på data som genereras av 3DPMs sensor som sedan används för att bestämma partikelstorleksfördelning.

Algoritmerna i 3DPM klarar att skilja fullt synliga partiklar från delvis övertäckta, vilket är av vikt för att inte inkludera de bitvis synliga partierna som mycket små partiklar, vilket skulle ge en underskattning av storleksfördelningen. Områden med "fines", alltså damm eller mycket små partiklar, hittas också. Dessa får dock ingen individuell storlek utan inkluderas i storleksfördelningen motsvarande det område som täcks. Gränsen för individuell partikelmätning går i aktuell installation vid 2 mm, och allt mindre klassas som fines.



Figur 9. Exempel resultat tagen från ett visningsprogram i 3DPM där exempelvis D20, D50 och D80 trendas och uppmätta 3D-bilder sparas och visualiseras.

I aktuell installation produceras mätdata i realtid, det vill säga samtligt material som passerar synligt under sensorn får beräknad storleksfördelning. Detta gäller, som med alla bildbaserade system, endast ytan då man inte kan se vad som är dolt där under. Viss differens mellan konventionell manuell siktning och 3DPMs mätresultat kan därför förväntas i absoluta värden, men då ytan korrelerar med vad som finns under kan differensen vägas upp av det mycket större antal mätningar som åstadkoms av 3DPM kontra manuella prover.



Figur 10. Aktuell installation över transportör

2.7.2 Siktprover

Manuella siktprover tog ut under försökskörningar för att verifiera uppmätta storleksfördelningarna från 3DPM. Kalkprover togs ut efter kalkkylare strax före placeringen av 3DPM instrumentet.

Manuell siktning av kalkprover genomfördes med ett skaksåll. Erhållna fraktioner från sällningen är:

- <1mm, den andel av kalkprovet som understiger partikelstorlek 1 mm, denna fraktion anses i huvudsak utgöras av kalkdamm.
- 1–10 mm
- 10–15 mm
- >15 mm

3 Resultat

3.1 RESULTAT FÖRSÖK 1, PYROMETERTEMPERATUR KALK

Försöket ger en tydlig koppling mellan kalktemperatur och kalkens nodulstorlek. Ändringarna i kalktemperatur och nodulstorlek stämmer väl överens i tid där en låg kalktemperatur efter ungefär två omsättningar i ugnen slår igenom och ger mindre noder och högre dammhalt.

Kalktemperaturen minskar snabbt 21-10-13 17:00. Åtta timmar senare 21-10-14 01:00 minskar nodulstorleken i ett tydligt steg under ett par timmar. När kalktemperaturen höjs till mellanhög så kan man se en tendens till ökad nodulstorlek även om ökningen inte är helt stabil.

Efter försöken natten mot den 17 oktober stiger kalktemperaturen till en hög och stabil nivå igen. Även här syns en tydlig ökning av nodulstorleken i 3DPM-mätningen.

3.1.1 3DPM

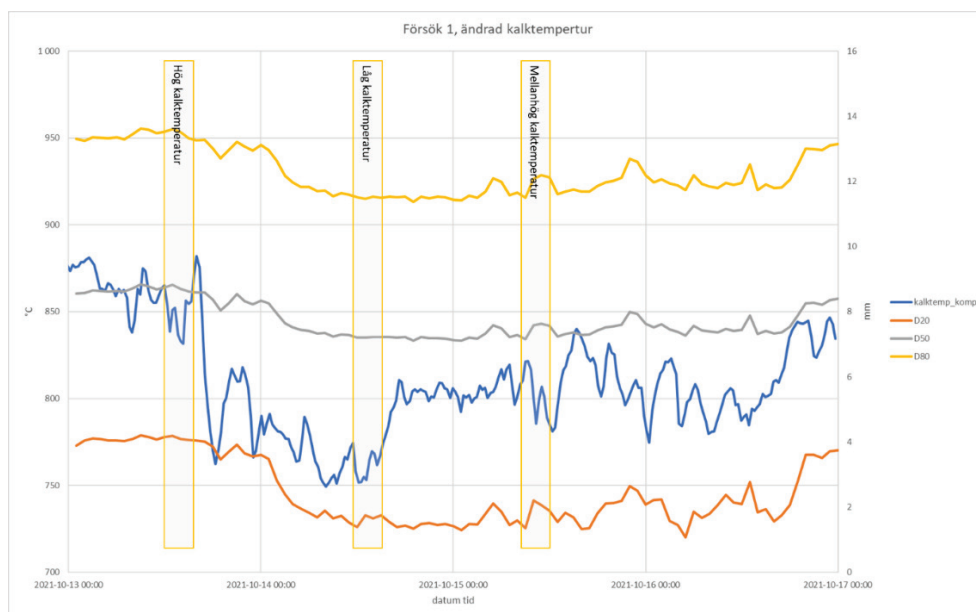
I analysen från partikelstorleksmätaren har vi valt att koncentrera oss på 3 mätvärden.

- D20, 20 % av kalken har en storlek understigande värdet på D20.
- D50, 50 % av kalken har en storlek understigande värdet på D50.
- D80, 80 % av kalken har en storlek understigande värdet på D80.

3DPM har stabila mätvärden under försöket.

Tabell 1 Storleksfördelning 3DPM under försök 1, ändrad kalktemperatur.

<i>Fraktionsfördelning 3DPM</i>			
<i>Kalktemp</i>	D20	D50	D80
Hög temperatur	4,5	9	13,5
Låg temperatur	1,5	7,5	11,5
Medelhög temperatur	2	7,5	12,5



Figur 11. Försök 1, kalktemperatur. Perioder för provtagning markerad i graf

3.1.2 Siktanalys och restkarbonat

Tabell 2 Resultat siktprover och analys av restkarbonat

Beräkningsfil Prover	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]	Kommentar
2021-10-13 12:20-12:40	27,4	31,7	39,0	1,9	2,2	Labbprovet Onsdag 2 har fått små mängder vatten på sig. Kan ha gjort prov opålitligt.
2021-10-13 13:00-13:40	25,0	28,7	44,0	2,3	2,7	-
2021-10-13 14:00-14:40	19,5	29,1	49,3	2,1	2,8	-
2021-10-14 12:00-12:50	22,6	28,5	44,4	4,5	2,6	-
2021-10-14 13:00-13:40	20,2	29,4	45,9	4,5	2,3	-
2021-10-14 14:20-14:40	18,6	32,7	43,7	5,1	2,5	-
2021-10-15 08:45-09:30	25,5	28,1	42,6	3,9	2,1	-
2021-10-15 10:00-10:40	24,5	27,8	42,7	5,0	2,6	-
2021-10-15 11:10-11:40	21,8	28,8	45,6	3,8	2,2	-

Tabell 3, Medelvärden siktanalys och restkarbonat

Medelvärden	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]
Högtemp	24,0	29,8	44,1	2,1	2,5
Lågtemp	20,4	30,2	44,7	4,7	2,5
Medelhög temp	23,9	28,2	43,7	4,2	2,3

Restkarbonathalten har kontrollerats under provperioden för att garantera att provförutsättningarna ger låg restkarbonat. Provresultat som ger hög restkarbonat, >4 %, är inte praktiskt användbara.

I samtliga försök var restkarbonathalten låg och jämn. Ingen signifikant skillnad fanns mellan proven.

3.1.3 Analys siktanalys och 3DPM

Siktproverna och mätresultaten från 3DPM stämmer bra överens. När dammhalten ökar från 2,1 % till 4,7 % så sjunker värdet för D20 från 4,5 mm till 1,5 mm. Även den något minskade dammhalten då man går från låg till medeltemperatur fångas i 3DPM. Minskad dammhalt i siktprovet från 4,7 % till 4,2 % ses i mätdata från 3DPM som ett ökat D20 värde från 1,5 mm till 2,0 mm.

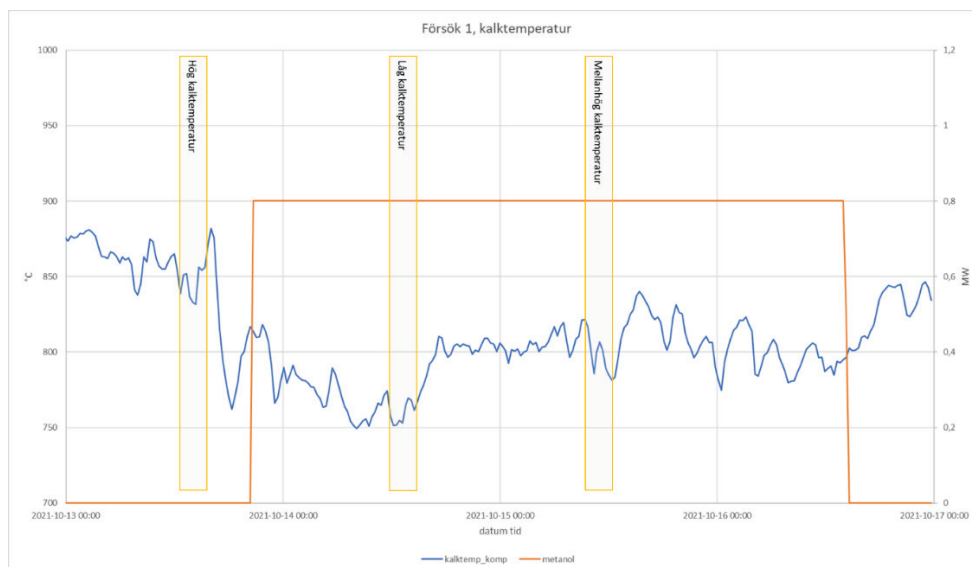
3.1.4 Restmetanol till brännare

Under tiden för försök 1 så destruerades periodvis en restmetanol från metanolfabriken i mesaugn 2. Enligt analys av Moore Research så innehåller restmetanolen i huvudsak metanol och terpentiner med ett relativt högt svavelinnehåll. Brännvärdet är osäkert och densiteten på restmetanolen kan variera kraftigt över tid vilket kan tyda på varierande värmevärde, svavel eller vattenhalt.

Destruktionen av restmetanol har i efterhand konstaterats ha negativ inverkan på förbränningen i mesaugnen med förhöjd CO, sänkt kalktemperatur och ökad energiförbrukning.

Om man tar med tillförseln av restmetanol till brännaren i analysen så har destruktions tyvärr påbörjats mellan testperiod 1 och testperiod 2 och avslutats någon dag efter testperiod 3. Man kan därför misstänka att förändringen vi ser på i nodulstorlek inte beror på förändringen i kalktemperatur utan på destruktions av restmetanol. Det kan också vara så att restmetanolen påverkar kalktemperaturen som i sin tur påverkar nodulstorleken. I Figur 12 kan man se att ändringarna i kalktemperatur sammanfaller med destruktions av restmetanol i MU2.

För att säkerställa att resultaten från försöket med ändrad kalktemperatur inte beror på destruktions av restmetanol bör ett nytt försök genomföras för att verifiera eller förkasta resultatet från försök 1, se försök 4.



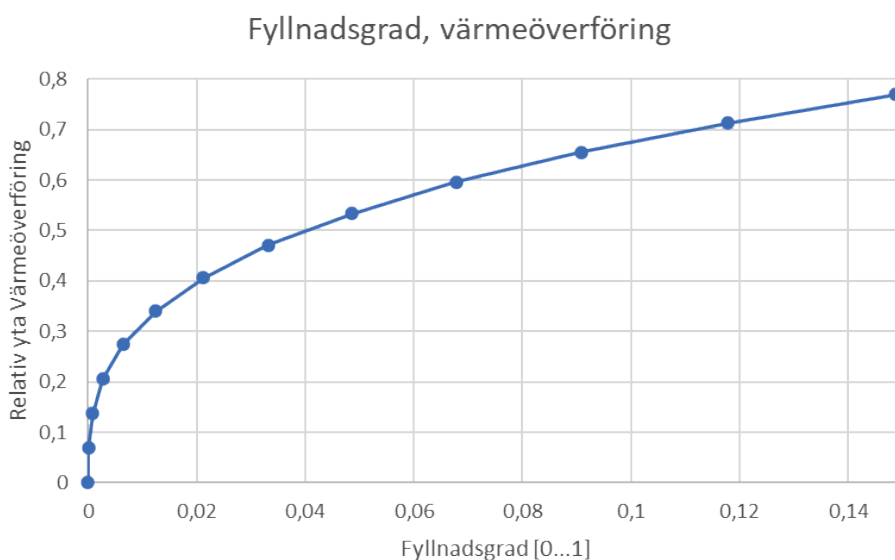
Figur 12. Kalktemperatur och metanol till brännare under försök 1.

3.2 RESULTAT FÖRSÖK 2, UGNSROTATION

3.2.1 Teori, rotationsvarvtal och fyllnadsgrad mesaugn

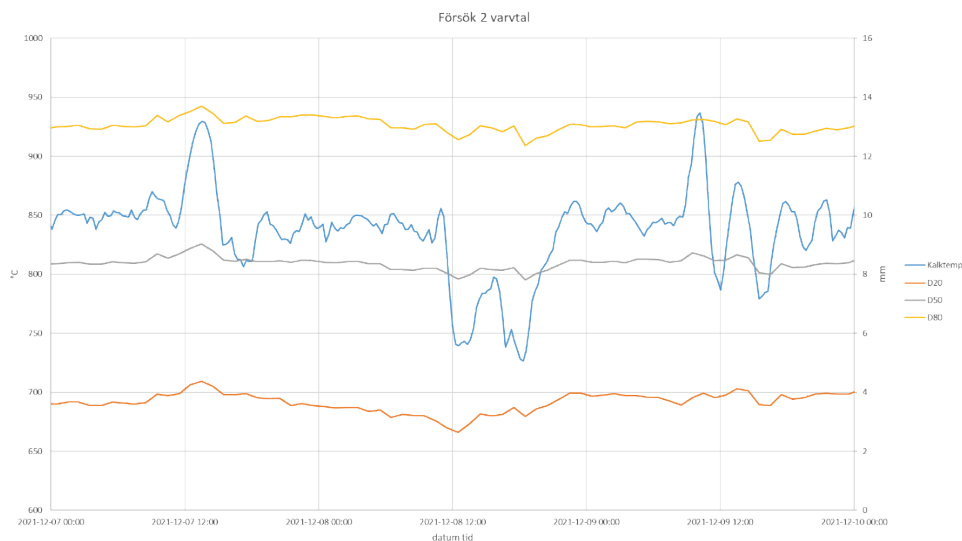
Fyllnadsgraden i ugnen påverkar den värmeöverförande ytan mellan kalk-rökgas och kalk-ugnsvägg. Högre fyllnadsgrad ger ökad värmeöverförande yta.

- Kalkproduktion 210 t/d och varvtal 1,16 rpm ger en teoretisk fyllnadsgrad på 0,071 vid en bulkdensitet om 0,8 kg/dm³.
- Kalkproduktion 210 t/d och varvtal 0,96 rpm ger en teoretisk fyllnadsgrad på 0,086
- Kalkproduktion 210 t/d och varvtal 1,25 rpm ger en teoretisk fyllnadsgrad på 0,066
- Minskat varvtal från 1,16 till 0,96 rpm ger en ökning i värmeöverförande yta motsvarande ca 7 %.
- Ökat varvtal från 0,96 till 1,25 rpm ger en minskning i värmeöverförande yta motsvarande ca 9 %.



Figur 13. Förhållande fyllnadsgrad och värmeöverförande yta

Försöket ger ingen tydlig koppling mellan rotationsvarvtal och kalkens nodulstorlek. I 3DPM mätningen är ändringarna små, några tiondelar skiljer mellan hög och låg rotationshastighet. Transienterna i kalktemperatur som uppstår vid varvtalsändringarna kan ses i mätdata från 3DPM. Det lägre varvtalet resulterar också i 70°C lägre rök Gastemperatur och en minskning av specifik energi med 0,5 MJ/kg kalk.

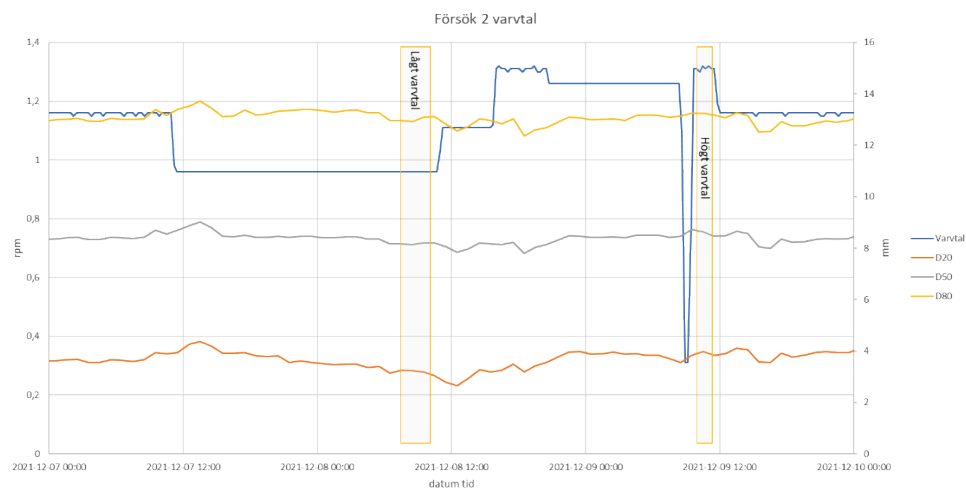


Figur 14. Transienter i kalktemperatur vid varvtalsändring kan ses i 3DPM-mätningen.

3.2.2 3DPM

Tabell 4 Värden 3DPM under försök med ugnrotation

Fraktionsfördelning 3DPM			
Ugnrotation	D20	D50	D80
Lågt varvtal 0,96 rpm	3,1-3,5	8,2	13,1
Högt varvtal 1,25 rpm	3,8	8,6	13,2



Figur 15. Försök 2, ugnrotation. Perioder för provtagning markerad i graf

3.2.3 Siktanalys och restkarbonat

Tabell 5 Resultat siktprover och analys av restkarbonat

Beräkningsfil	Prover	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]	Kommentar
2021-12-08 07:20-07:50	Låg rota 1 och 2	19,8	31,5	46,3	2,5	2,1	
2021-12-08 08:30-09:00	Låg rota 3 och 4	22,4	28,4	47,4	1,8	2,5	
2021-12-08 09:00-09:40	Låg rota 5 och 6	19,1	33,2	46,1	1,6	4,5	
2021-12-09 09:00-09:40	Hög rota 1 och 2	21,4	31,6	44,1	3,0	2,1	
2021-12-09 09:00-09:40	Hög rota 3 och 4	23,8	29,6	44,4	2,9	0,7	

Tabell 6, Medelvärden siktanalys och restkarbonat

Medelvärden	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]
Medel låg rota	20,4	31,0	46,6	1,9	3,0
Medel hög rota	22,6	30,6	44,2	2,6	1,4

Restkarbonathalten har kontrollerats under provperioden för att garantera att provförutsättningarna ger låg restkarbonat. Provresultat som ger hög restkarbonat, >4 %, är inte praktiskt användbara.

Försöket med lågt varvtal har ett av tre restkarbonatprover som avviker, värdet är något högt, 4,5 %. De andra två analysresultaten visar låg restkarbonat. Det finns ingen uppenbar anledning till den höga restkarbonaten. Det ordinarie restkarbonatprovet, 2,1 %, från kvällen innan provtagningen visar också på låg restkarbonat. Försöket får därför ses som lyckat och det enstaka provet med hög restkarbonat bortses ifrån.

Restkarbonatvärdena från försöket med hög rotationshastighet är mest troligt påverkade av att ugnen stod i "hot standby" under 40 minuter före proven togs ut. Det förklarar det låga andra värdet för restkarbonat på 0,7 %.

Analys siktanalys och 3DPM

Siktproverna och mätresultaten från 3DPM stämmer bra överens. Båda pekar på låg dammhalt och liten skillnad mellan låg och hög rotationshastighet.

3.2.4 Rökgastemperatur och energiförbrukning

Ändrat rotationsvarvtal påverkar inte nodulstorlek eller dammhalt i någon större utsträckning. Siktproverna vid lågt varvtal visar på en dammhalt i storleksordningen 2 % vilket får anses som bra. Varvtalet visade sig i stället ha en signifikant påverkan på rökgastemperatur och energiförbrukning. Rökgastemperaturen skiljde ca 70°C mellan 1,25 rpm (662°C) och 0,96 rpm (591°C). Den lägre rökgastemperaturen ger lägre rökgasförluster och minskad energiförbrukning med ca 0,5 MJ/kg vilket motsvarar en minskning av energiförbrukningen med ca 7 %.

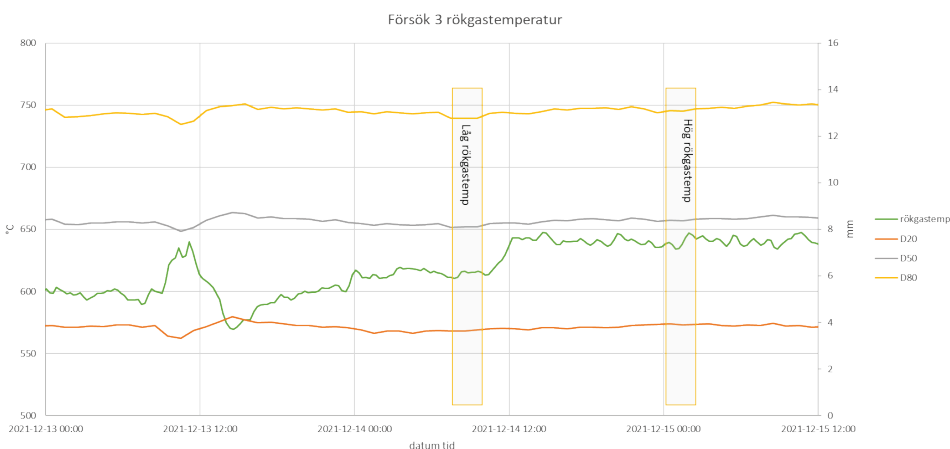
Förklaringen till den lägre rökgastemperaturen och lägre energiförbrukningen vid lågt varvtal är att fyllnadsgraden i ugnen ökar med minskat varvtal. Ökad fyllnadsgrad ger i sin tur ökad värmeöverförande yta mellan mesa och ugnsvägg och mellan mesa och rökgaser.

En varvtalsändring från 1,25 till 0,96 rpm vid kalkproduktion 210 t/d ger uppskattningsvis en ökning av fyllnadsgraden från 6,6 % till 8,6 % vilket teoretiskt medför en ökning av den värmeöverförande ytan med 9 %, vilket i sin tur motsvarar en ökning av ugnens längd med 7 m från 80 m till 87 m.

3.3 RESULTAT FÖRSÖK 3, RÖKGASTEMPERATUR INMATNING

Skillnaden i rökgastemperatur mellan försöken är inte så hög som man kan önska. Den höga andelen pulverbränsle ger små marginaler. Den önskade extra låga temperaturen kan inte nås utan att kalktemperaturen minskar och den höga rökgastemperaturen begränsas av att temperaturen efter cyklon blir hög och kylningen ligger på gränsen att aktiveras.

Försöket ger ingen tydlig koppling mellan rökgastemperatur och kalkens nodulstorlek. I 3DPM mätningen är ändringarna små, några tiondelar skiljer mellan hög och låg temperatur.



Figur 16. Försök 3, kalktemperatur. Perioder för provtagning markerad i graf

3.3.1 3DPM

Tabell 7 Värden 3DPM under försök med ugnrotation

Fraktionsfördelning 3DPM			
Rökgastemperatur	D20	D50	D80
Lågt temperatur	3,7	8,1	12,8
Hög temperatur	4	8,6	13,4

3.3.2 Siktanalys och restkarbonat

Tabell 8 Resultat siktprover och analys av restkarbonat

Beräkningsfil	Prover	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]	Kommentar
2021-12-14 07:30-08:00	Låg intemp 1 och 2	17,8	30,7	49,5	2,0	2,3	
2021-12-14 08:00-08:30	Låg intemp 3 och 4	22,6	27,6	47,5	2,3	2,2	
2021-12-14 09:30-10:00	Låg intemp 5 och 6	20,5	28,8	48,8	2,0	2,5	
2021-12-15 08:30-09:00	Hög intemp 1 och 2	22,0	29,0	47,0	2,1	2,8	
2021-12-15 09:00-09:30	Hög intemp 3 och 4	20,5	27,4	50,1	2,0	3,7	
2021-12-15 10:00-10:30	Hög intemp 5 och 6	19,7	31,3	47,1	1,9	1,9	

Tabell 9, Medelvärden siktanalys och restkarbonat

Medelvärden	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]
Medel låg intemp	20,3	29,0	48,6	2,1	2,4
Medel hög intemp	20,7	29,2	48,1	2,0	2,8

Restkarbonathalten har kontrollerats under provperioden för att garantera att provförutsättningarna ger låg restkarbonat. Provresultat som ger hög restkarbonat, > 4 %, är inte praktiskt användbara.

Försöket med hög rökastemperatur har ett av tre restkarbonatprover som avviker, värdet är något högt, 3,7 %. De andra två analysresultaten visar låg restkarbonat. Det finns ingen uppenbar anledning till den höga restkarbonaten. Det ordinarie restkarbonatprovet, 2,1 %, från samma morgon som provtagningen visar också på låg restkarbonat. Försöket får därför ses om lyckat och det enstaka provet med hög restkarbonat bortses ifrån.

I samtliga försök var restkarbonathalten låg och jämn. Ingen signifikant skillnad fanns mellan proven.

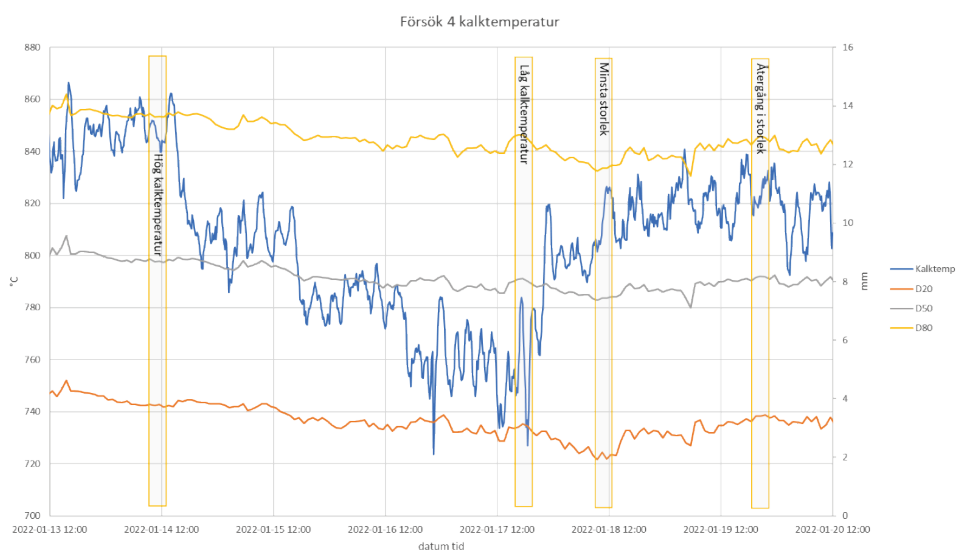
3.4 ANALYS SIKTANALYS OCH 3DPM

Siktproverna och mätresultaten från 3DPM stämmer bra överens. Båda pekar på låg dammhalt och liten påverkan på dammhalt och nodulstorlek mellan låg och hög rökastemperatur.

3.5 RESULTAT FÖRSÖK 4, PYROMETERTEMPERATUR KALK

Kalktemperaturen har i princip gått från den maximala som ugnen kan styras mot med aktuell bränslemix till den lägsta möjliga innan halten restkarbonat i kalken blir för hög. Temperaturen har ändrats från 850°C stegvis ner till 760°C under två dygn. Därefter låg temperatur i 30 timmar innan temperaturen åter höjdes i två steg under 12 timmar.

Försöket ger en tydlig koppling mellan kalktemperatur och kalkens nodulstorlek. I 3DPM mätningen är ändringarna tydliga. Intressant är att nodulstorleken fortsätter att minska under 12 timmar då kalktemperaturen ökas från 760°C till 810°C. När kalktemperaturens börvärde höjs till 850°C ökar nodulstorleken sakta men tydligt under ett till två dygn. Den långsamma återhämtningen i nodulstorlek kan bero på att styrningen inte nådde upp till börvärdet på 850°C. I praktiken blev kalktemperaturen 810–830°C under 18–19 januari.



Figur 17. Försök 4, kalktemperatur. Perioder för utvärdering markerad i graf

3.5.1 3DPM

Tabell 10 Värden 3DPM under andra försöket med kalktemperatur

Fraktionsfördelning 3DPM			
Kalktemperatur #2	D20	D50	D80
Hög temperatur	3,8	8,7	13,6
Låg temperatur	3	8	12,9
Minsta storlek	2	7,4	11,9
Återgång hög temperatur	3,4	8,2	12,9

3.5.2 Restkarbonat

Tabell 11 Restkarbonat under försöksperioden

Beräkningsfil Prover	Labbidentitet	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]	Kommentar
2022-01-13 23:00	Kalktemp 850°C	-	-	-	-	2,5	
2022-01-14 07:00	Kalktemp 850°C	-	-	-	-	3,7	
2022-01-14 15:00	Kalktemp 850°C	-	-	-	-	1,7	
2022-01-14 22:00	Kalktemp 810°C	-	-	-	-	3,1	
2022-01-15 07:00	Kalktemp 810°C	-	-	-	-	2,2	
2022-01-15 20:00	Kalktemp 785°C	-	-	-	-	6,4	
2022-01-16 07:00	Kalktemp 785°C	-	-	-	-	2,2	
2022-01-16 23:00	Kalktemp 760°C	-	-	-	-	4,1	
2022-01-17 07:00	Kalktemp 760°C	-	-	-	-	3,3	
2022-01-17 15:00	Kalktemp 760°C	-	-	-	-	5,6	
2022-01-17 23:00	Kalktemp 810°C	-	-	-	-	1,7	
2022-01-18 07:00	Kalktemp 810°C	-	-	-	-	2,1	
2022-01-18 15:00	Kalktemp 810°C	-	-	-	-	5,2	
2022-01-18 23:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	1,5	
2022-01-19 07:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	1,9	
2022-01-19 15:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	3,3	
2022-01-19 23:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	2	
2022-01-20 08:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	2,6	
2022-01-20 15:00	Kalktemp 825°C	-	-	-	-	3	

Tabell 12 Medelvärden restkarbonat under försöksperioden

Medelvärden	Medelvärden	15 mm [%]	10 mm [%]	1 mm [%]	0 mm [%]	Restkarb [%]
	15 mm [%]					
Högtemp, 850°C	-	-	-	-	-	2,6
Lågtemp, 785-760°C	-	-	-	-	-	4,3
Högtemp 825°C	-	-	-	-	-	2,4

Restkarbonathalten har kontrollerats med ordinarie provtagning (2–3 ggr/dygn) under provperioden för att garantera att provförutsättningarna ger låg restkarbonat. Provresultat som ger hög restkarbonat, >4 %, är inte praktiskt användbara.

Hög rökgastemperatur ger godkänd restkarbonat med medelvärde runt 2,5 %, medan låg temperatur har ett medelvärde som är väl högt, 4,3 %.

4 Diskussion

4.1 BETYDELSEN AV PARTIKELSTORLEKSMÄTNING

Partikelstorleken är viktig för energieffektiviteten i mesaugnen och för efterföljande kaustisering (Dernegård, Dusting in a lime kiln, 2019).

Ett antal användbara manuella och indirekta mått på damning finns: Brännarkamera (subjektivt, operatörsberoende, svårt att följa upp), Manuella siktprover (arbetskrävande, ögonblicksbild, ofta liten andel som analyseras), Belastning på mesaugnsdriften (hög dammhalt ger i regel högre belastning, går att följa upp men kräver att ett antal andra produktionstillstånd ingår i analysen).

För att följa upp partikelstorleken finns alltså ett antal möjliga val. Vi bedömer att en realtidsmätning av partikelstorlek och bulkvolymflöde ger en bra analysmöjlighet med historisk uppföljning samtidigt som den möjliggör en återkopplad reglering. En mätning av partikelstorlek möjliggör också bättre uppföljning vid experimenterande kring dammreducerande åtgärder och försök, ex. bindemedelstillsatser eller andra ändringar.

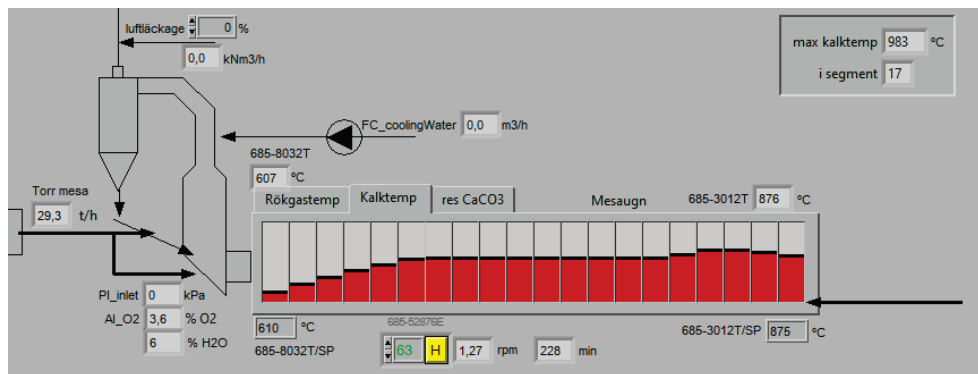
4.2 VARVTALSOPTIMUM

Försöken har visat att kalktemperaturen har tydligast påverkan på nodulstorlek medan rökgasttemperatur och rotationsvarvtalet har störst påverkan på energiförbrukningen. För att nå önskad kalktemperatur kan inte rökgasttemperaturen vara för låg. Lägre rotationsvarvtal medger att hög kalktemperaturen kan nås med lägre rökgasttemperatur. I försöken har sambanden mellan rökgasttemperatur och varvtal konstaterats och underbyggts med ett teoretiskt resonemang. Inga försök att nå "optimum" vad gäller varvtal/fyllnadsgrad har utförts. Här kan det finnas utrymme till ytterligare energibesparing. När optimum söks behöver man ta hänsyn till den ökade belastning som högre fyllnadsgrad i ugnen medför.

4.3 MAXIMAL KALKTEMPERATUR

3DPM mätningen ger en indikation på ökad nodulstorlek vid ökad rök Gastemperatur. I *Lime Kiln Dusting* (Richards & Joseph, 2019), är resultatet det omvända med ökad finfraktion när uppvärmningshastigheten är hög.

En förklaring till att resultaten pekar i olika riktningar är att den uppmätta (pyrometer)kalktemperaturen i 3DPM-försöken inte är den högsta temperaturen kalken utsätts för. När kalken passerar sista biten av ugnen kommer den att kylas av mötande sekundärluft innan temperaturen mäts med pyrometrarna. I simulering av Mönsterås mesaugn 1 är maximala kalktemperaturen mer än 100°C högre än pyrometertemperaturen och nås ungefär 10 m in i ugnen från brännarsidan. Om rök Gastemperaturen ökas 40°C, från 610°C till 650°C samtidigt som pyrometertemperatur är oförändrad i simuleringen så höjs maximala kalktemperaturen med 14°C.



Figur 18. Simulerade kalktemperaturer genom Mönsterås MU1

5 Slutsatser

5.1 UTFALL AV FÖRSÖKSKÖRNINGAR

5.1.1 Kalktemperatur

Kalktemperaturen har störst och tydligast påverkan på damning och nodulstorlek. Specifik energiförbrukning är i stort oförändrad när kalktemperaturen ändras. Den högre kalktemperaturen återvinns i hög grad i kalkkylaren och därmed liten påverkan på specifik energiförbrukning.

5.1.2 Rotationsvarvtal ugn

Varvtalet på ugnen påverkar i fyllnadsgraden i ugnen vilket i sin tur påverkar uppehållstid och värmeöverförande yta. Påverkan på damning och nodulstorlek är liten. Røkgasttemperatur vid inmatningsände (och därmed røkgasförluster) kommer naturligen att sjunka med minskat varvtal eftersom ugnen blir en effektivare värmeväxlare. Specifik energiförbrukning påverkas kraftigt. Efter provperioden behövs det lägre varvtalet utan att några negativa effekter har noterats.

5.1.3 Røkgasttemperatur inmatningsände

Røkgasttemperaturen har liten påverkan på damning och nodulstorlek. Möjligen kan man se en liten minskning i tex D20 i 3DPM-mätningen när røkgasttemperaturen sänks. Minskningen i nodulstorlek kan i så fall också bero på att den högsta kalktemperaturen i ugnen blir något lägre med lägre røkgasttemperatur även om kalktemperaturen i utmatningsändan är oförändrad.

Røkgasttemperaturen har stor påverkan på specifik energiförbrukning och bör i princip hållas så låg som det är möjligt.

6 Fortsatt arbete och rekommendationer

6.1 3DPM FÖR STYRNING

Mätningen via 3DPM har visat sig vara mycket stabil över tid, ett par gånger under de månader den har varit i drift har den behövt rengöras. Samtliga gånger har det berott på att den smala spalten som lasern lyser ner igenom har byggts igen med kalkdamm i samband med inblåsning av kalk till kalksilo.

Mätningen är tillräckligt stabil för att användas för styrning. Vi har konstaterat att vi kan påverka nodulstorleken via kalktemperatur. Det borde därigenom vara möjligt att använda 3DPM mätningen för automatisk styrning av kalktemperatur.

En möjlig styrning vore att med en enkel P-reglering justera kalktemperaturen inom ett avgränsat område, ex 820–870°C.

6.2 RESULTATÖVERFÖRING

Lärdomar från projektet bedöms vara överförbart till alla mesaugnar i drift.

Steg 1

Stabil instrumentering av ugnen för att mäta relevanta storheterna rökgasttemperatur och kalktemperatur.

Steg 2

Stabil reglering av rökgasttemperatur och kalktemperatur

Steg 3

Instrumentera ugnen med 3DPM för realtidsmätning av partikelstorlek och volymflöde.

Steg 4

Hitta optimum för rökgasttemperatur, kalktemperatur och varvtal i syfte att minimera specifik energi och damning. Använd 3DPM för långtidsanalys av partikelstorlekens påverkan.

7 Referenser

- Dernegård, H. (2019). *Dusting in a lime kiln*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Dernegård, H., Brelid, H., & Theliander, H. (2017). Characterization of a dusting lime kiln - A mill study. *Nordic Pulp and Paper Reserach Journal Vol 32 (1)*, 25-34.
- Fardadi, M. (2010). *Modeling Dust Formation in Lime Kilns*. Toronto: UNiversity of Toronto.
- Järvensivu, M., Saari, K., & Jämsä-Jounela, S.-L. (2001). Intelligent control system of an industrial lime kiln process. *Control Engineering Practice*.
- Richards, T., & Joseph, J. (2019). *Lime Kiln Dusting*. Energiforsk.
- Tran, H., & et.al. (2007). Correlation between nodule sizes and residual carbonate content in lime kilns. *Tappi Journal vol. 6(4)*, 9-15.
- Villarroel, R., & Tran, H. (2015). Operating experience of the world's largest lime kiln. *The 7th international Collegium of Eucalyptus Pulp*. Vitoria, Braxil.

ENERGIEFFEKTIV MESAUGNS-STYRNING GENOM PARTIKELSTORLEKSMÄTNING

För att minimera energiförbrukningen i mesaugnar är det av högsta vikt att producera en ombränd kalk med hög och jämn reaktivitet. Kalkreaktiviteten är beroende av storleken på bildade kalknoduler. I detta projekt har online-mätning av partikelstorleksfördelningen som en parameter i styrningen av mesaugnen undersökts.

Av de tre undersökta styrvariablerna har kalktemperaturen tydligast påverkan på nodulstorlek och damning. De två andra styrvariablerna, ugnens rotationsvarvtal och rökgastemperatur inmatningsände har liten inverkan på kalkens storleksfördelning medan deras påverkan på energiförbrukningen är stor.

Försöken har resulterat i att rotationsvarvtalet har minskats med 0,2 rpm för alla produktionshastigheter och att rökgastemperaturen hålls så låg som möjligt. Kalktemperaturen skall hållas stabil och så hög att damningen i ugnen minimeras.

Partikelstorleksmätning i realtid med 3DPM har visat sig vara mycket robust över tid och tillräckligt tillförlitlig för att användas till styrning. Försöken har visat att nodulstorleken kan påverkas med kalktemperaturen. Det borde därigenom vara möjligt att använda 3DPM mätningen för automatisk styrning av kalktemperatur. Resultat och metod bedöms vara överförbara till andra mesaugnar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se