

Energiebesparingsmogelijkheden door toevoeging van biomassa-uitbrandstoffen in de keramische industrie

In het kader van de zogenoemde 'Fabriek van de Toekomst', onderdeel van de 'Routekaart Bouwkeramiek', is door de Nederlandse keramische procesindustrie in 2010 een toekomstvisie op het gebied van energiebesparing gepresenteerd. Daarbij is een aantal relevante onderwerpen geformuleerd, waaronder de mogelijke energiebesparingsmogelijkheden in de bouw(grof)keramische industrie bij het toevoegen van hernieuwbare natuurlijke uitbrandstoffen (biomassa) aan de oorspronkelijke kleimassa. Achterliggende gedachte hierbij was dat de bij de verbranding hiervan in het stookproces vrijkomende energie, ten goede zal komen aan de opwarming van de producten tijdens het bakproces. Dit zou dan moeten leiden tot het beperken van de hierbij benodigde hoeveelheid primaire energie, met het doel de CO₂-footprint te beperken. Gefinancierd door AgentschapNL is in 2011/2012 een oriënterend onderzoek uitgevoerd naar de beschikbaarheid van biomassa en de mogelijke bouwkeramische toepasbaarheid. Het onderzoek is in twee delen gesplitst: een literatuur- en deskstudie, waarbij een overzicht is gemaakt van verkrijgbare en keramisch toe te passen (hernieuwbare) uitbrandstoffen, en als vervolg hierop een laboratoriumonderzoek, waarbij uiteindelijk een potentieel toepasbare uitbrandstof oriënterend op zijn feitelijke grofkeramische toepasbaarheid is onderzocht.

Edo Walda, senior adviseur in diverse deelgebieden in de keramische industrie bij TCKI en redactieraadlid van KGK

In dit artikel worden de resultaten van het tweeledige onderzoek gepresenteerd. Opgemerkt wordt dat hierin de begrippen biomassa en hernieuwbare (uitbrand)stoffen door elkaar gebruikt worden, terwijl steeds hetzelfde wordt bedoeld.

Literatuurstudie

Eind 2011 is het rapport van de literatuur- en deskstudie afgerond. Hierin zijn de resultaten van reeds eerder uitgevoerde studies met uitbrandstoffen in (grof)keramische producties beschouwd. Tevens is onderzocht welke hernieuwbare uitbrandstoffen in Nederland voorkomen en wat de beschikbaarheid is op lange(re) termijn. Opvallende conclusie was dat in de geraadpleegde literatuur in binnen- en buitenland geen bruikbare informatie voorhanden bleek met betrekking tot de toepassing van hernieuwbare grondstoffen (of afval- en/of reststoffen in het algemeen) in keramische producten, specifiek gericht op energiebesparing. Op basis van bekende keramische productieproces- en producteisen zijn twee biomassa's geïdentificeerd, die interessant zouden kunnen zijn voor (grof)keramische toepassing, te weten stro en zaagmeel (zaagsel).

Laboratoriumonderzoek

Op basis van de resultaten van het literatuuronderzoek is aansluitend het hierna beschreven laboratoriumonderzoek uitgevoerd. Naast een onderzoek naar de keramische toepasbaarheid is in dit onderzoeksgedeelte tevens het energiebesparingspotentieel van de biomassatoevoeging beschouwd. Dit aspect komt aan het einde van dit artikel aan de orde.

Onderzoekopzet

Randvoorwaarden

Op basis van de bevindingen in de literatuur- en deskstudie is bij de opzet van het laboratoriumonderzoek als uitgangspunt genomen, dat het onderzoek zou moeten leiden tot een hygrisch, fysisch-mechanisch en esthetisch acceptabel product, dat tenminste toegepast zou kunnen worden als reguliere buitenmuur metselbaksteen. De productie van keramische binnenmuurstenen is buiten beschouwing gelaten, omdat dit in Nederland een naar verhouding maar zeer beperkte baksteenproductie betreft, terwijl de keramische toepasbaarheid van uitbrandstoffen, waaronder biomassastoffen, hierin al ruimschoots bekend is. Verder is de productie van gebakken straatstenen ook niet in het onderzoek betrokken, vanwege het feit dat de producteigenschappen hiervan, met name waar dit de scherfdichtheid c.q. porositeit betreft, toeslag van koolstofhoudende uitbrandstoffen redelijkerwijs niet toelaat. Vanwege het kleinschalige karakter van het onderzoek zijn geen energetische metingen verricht, maar is het eventuele effect van energiebesparing theoretisch is beschouwd.

Keuze basiskleien

Vanuit energetisch oogpunt is het gewenst dat de energie (warmte) vanuit een uitbrandstof pas in het hogere temperatuursbereik (>800 °C) beschikbaar komt. Bij gangbare Nederlandse kleisoorten, mengsel van rivierafzettingen, zeeklei en/of lössklei, bestaat dan echter een grotere kans op productdeformatie. Dit hangt samen met de klei-



Foto 1: Klei/zaagselmenger en handvormproductie proefstenen

mineralogische samenstelling, die bij deze kleisoorten als keramisch minder thermisch stabiel (vuurvast) kan worden aangemerkt. Dit heeft geresulteerd in de keuze van een vuurvaste(re) kleisoort, zonder organische stof, die op relatief hoge temperatuur zijn initiële steenvorm nog behoudt. Deze kleisoort wordt ook in de Nederlandse keramische industrie veelvuldig toegepast. Voor het onderzoek is een productiegerede, witbakkende Westerwaldklei (D) geselecteerd, afkomstig uit de reguliere steenproductie van een steenfabriek. Als tweede (referentie) basisklei is een regulier, kalkarm Nederlands rivierkleimengsel gekozen, zoals toegepast bij een steenfabriek in het Rivierengebied. Deze kleimassa is in hoge mate representatief te noemen voor de Nederlandse steenfabricage met vergelijkbare (inlandse) kleisoorten.

Keuze biomassa

Bij de aanvoer van stro als één van beide uit het literatuuronderzoek geselecteerde biomassa's werd duidelijk dat het materiaal dermate lang- en stugvezelig was, dat dit in de oorspronkelijke vorm niet verwerkbaar was voor de productie van bakstenen. Ook na intensieve mechanische verhakseling bleven de vezels nog veel te lang voor verwerkbaarheid. Omdat inmiddels ook was gebleken dat er in Nederland een tekort is ontstaan aan stro, zodat dit materiaal momenteel zelfs vanuit de Baltische staten wordt aangevoerd, is besloten dit materiaal verder geheel buiten het onderzoek te houden.

Hiermee bleef zaagsel als enige biomassa over in de proefnemingen. Gekozen is voor regulier zachthoutzaagsel, met een korrelgrootte tussen 0-2,5 mm, zoals voor speciale steenproducten reeds in de baksteenindustrie wordt toegepast.

Klei/biomassa-mengsels

Om de grens te verkennen tot bij welke toeslagpercentages biomassa steenproductie in ieder geval praktisch mogelijk is, is op basis van gekozen kleisoorten en gekozen biomassa voor toeslagpercentages aan beide basiskleisoorten van 0 (blanco), 7,5 en 15 gew.%. Gezien het verhoudingsgewijs lichte karakter van zaagsel, betekent dit in volumeaandeel overigens een aanmerkelijk forsere toeslaghoeveelheid.

Stookproeven

Uitgangspunt bij de proefstokingen is geweest om zoveel mogelijk met de praktijk vergelijkbare condities aan te houden. Een steenpakket ('schijf') van vier lagen van acht stenen (circa 42x21 cm, hoogte circa 40 cm) per stoking komt hieraan het meest tegemoet. Vanwege de te verwachten lagere productstabieleit bij hogere temperatuur, is bij de roodbakkende rivierklei/zaagsel-mengsels verondersteld dat de stookproeven bij een lagere toptemperatuur (circa -40 °C) uit zouden moeten worden gevoerd ten opzichte van de reguliere steenproductie met dergelijke klei.

Uitvoering

Proefsteenproductie

Uitgaande van de twee geselecteerde baksteenbasiskleien zijn bij een voor dit onderzoek benaderde steenfabriek handmatig proefstenen gemaakt met toevoeging van respectievelijk 0 (blanco), 7,5 en 15 gew.% zaagsel. Bij deze steenfabriek is een kleine enkelassige menger voorhanden, die zeer geschikt is voor de menging van de klei-zaagselmengsels voor de in het onderzoek benodigde kleinschalige steenproducties. Totaal zijn proefstenen van zes kleimassa's (twee kleisoorten blanco + 2x2 mengsels) geproduceerd (foto 1).

De natte proefstenen zijn op metalen droogplaten geplaatst, waarna deze onder reguliere condities in de normale steenproductiedrogerij zijn gedroogd. De gedroogde stenen zijn naar het laboratorium van TCKI gehaald voor verder onderzoek.

Grondstofanalyses

Beide basiskleisoorten en de vier klei/zaagselmengsels zijn geanalyseerd op de korrelgrootteverdeling, het gehalte aan totaal organisch koolstof en (ook het gebruikte zaagsel) de calorische eigenschappen. De basiskleien zijn daarnaast geanalyseerd op hoofd- en spoorelementen (XRF), het zogeheten specifiek oppervlak en het vochtgehalte (uitgaande van de gereede productieklei). Van beide basiskleien en beide klei/zaagselmengsels met het hoogste percentage zaagsel zijn verder thermische analyses uitgevoerd, te weten de differentieel scanning calorimetrie (DSC), die

inzicht geeft in de endo- en exotherme reacties in het bakproces, en de thermo gravimetrische analyse (TG), waarmee de gewichtsafname gedurende het bakproces inzichtelijk wordt gemaakt. De grafische weergaves van deze onderzoeken zijn weergegeven in figuur 1 (DSC) en 2 (TG).

Stookproeven

In de laboratoriumgasoven van TCKI zijn tien bakproeven van de geproduceerde proefstenen-uitgevoerd, vijf op de witte en vijf op de rode klei/zaagselmengsels. Hierbij is in eerste instantie steeds uitgegaan van stookproeven op het mengsel met het hoogste (15 gew.%) zaagselpercentage. Waar noodzakelijk is overgegaan naar een lagere mengselverhouding.

Bij iedere lakproef een 'schijf' van 8x4 stenen in de oven geplaatst, die aan de hand van een ingestelde stookcurve is gebakken. Ter referentie zijn daarbij van dezelfde kleisoort steeds enkele blancostenen en enkele stenen van het andere mengsel meegebakken.

Bij alle stookproeven zijn op diverse plaatsen tussen en in de stenen meet 'koppels' geplaatst ter registratie van de verschillende temperaturen gedurende de bakcurvecycli.

In foto 2 is de opstelling zichtbaar van één van de stookproeven, met achterin de oven de paketschijf, daarvoor enkele referentiestenen en ertussen de meetkoppels.



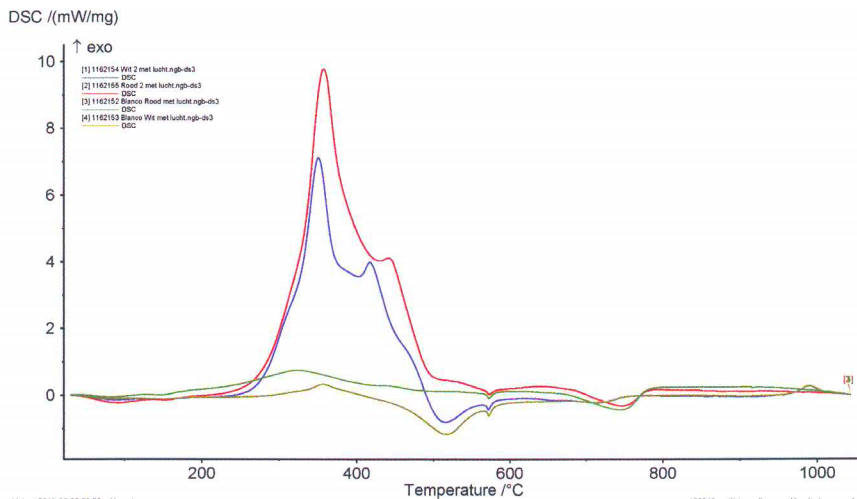
Foto 2: Pakketopstelling bakproeven met thermokoppels in laboratoriumgasoven

Bij de witbakkende stenen is de insteek van de stookproeven geweest om stenen te stoken op een toptemperatuur die gelijk is aan de toptemperatuur bij reguliere steenproducties met deze productsoort en daarbij te komen tot een homogene productkleur en - kwaliteit.

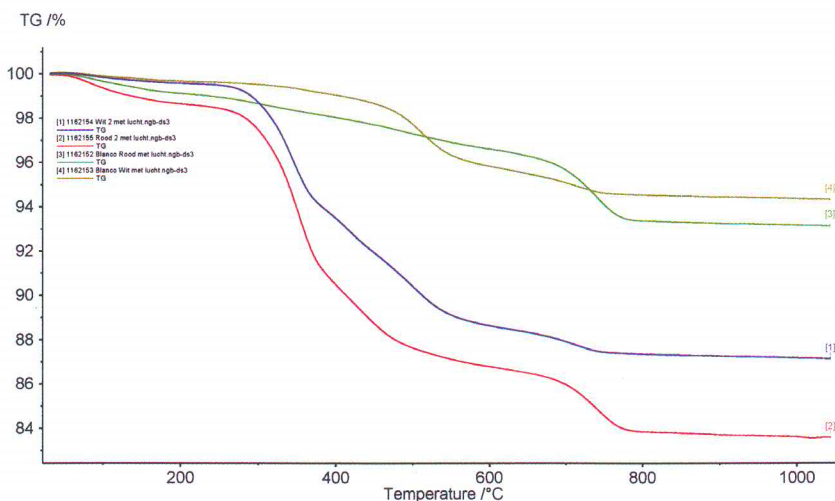
Bij de roodbakkende stenen van Nederlandse rivierklei is de benadering anders geweest, vanwege het feit dat handhaving van de toptemperatuur, zoals in de praktijk, op voorhand al onmogelijk is. Dit vanwege het grote risico op opblazen van deze thermisch niet voldoende stabiele kleisoort.

Omdat een noodzakelijke verlaging van de toptemperatuur zal leiden tot een meer gesinterde, gereduceerde steenkern en een onvoldoende gesinterde, rode buitenzijde, dient door middel van zogenoemde reductie (zuurstofarme ovenluchtcondities) aan het einde van de toptemperatuurfase de kwaliteit van de buitenschil te worden verbeterd.

De proefstokingen zijn steeds zolang doorgezet totdat er visueel en bij eerste beoordeling acceptabele stenen waren verkregen. Hierbij wordt het volgende opgemerkt. Als gevolg van het vrijko-



Figuur 1



Figuur 2



Foto 3: Zwarte kernen in stookpakket wit

men van energie op hoge temperatuur door de verbranding van zaagsel in de kern van het product, is het in deze pakketzetting onvermijdelijk dat er zogenoemde 'zwarte kernen' (foto 3) of verkleuringen in het product ontstaan, als gevolg van reductieverschijnselen (onttrekking van zuurstof uit omliggende ijzerverbindingen) en onverbrand koolstof. In dat geval is een nieuwe stookproef uitgevoerd, met een langere aanhoudtijd in het opwarmtraject, om dit effect te verminderen.

Van een aantal stookproeven zijn stenen onderzocht op de hygrische en volumieke eigenschappen.

Bespreking resultaten

Thermische analyses basiskleien en klei/zaagselmengsels

De grafieken van differentieel scanning calorimetrie (DSC) in figuur 1 en de thermo-gravimetrische analyse (TG) in figuur 2 geven een goed beeld van de exotherme en endotherme reacties in de blancokleien en de mengsels met de hoogste zaagseldosering (tussendoseringen niet geanalyseerd).

Roodbakkende klei

In de onder oxiderende condities geanalyseerde proefmengsel met 15 gew.% zaagsel is bij circa 380 °C in de DSC-grafiek in figuur 1 (rode curve) duidelijk de verbranding van het hoge aandeel organisch koolstof te zien. Bij de pure klei (groene curve) is bij een iets lagere temperatuur een heel licht 'piekje' waarneembaar van het hierin aanwezige organische materiaal (humus). Bij exact 573 °C is de energievragende kwarts'sprong' (α/β -kwarts omzetting) te zien in zowel de blanco als het klei/zaagselmengsel. Rond 700 °C verschijnt bij beide analyses van deze productsoort een endotherm knikje als gevolg van de ontleding van carbonaten in de klei-massa. In de TG-analyse in figuur 2 is bij het klei/zaagselmengsel (rode curve) goed de gewichtsvermindering te zien door de verbranding van organische koolstof. Vanaf 700 °C is de gewichtvermindering door de carbonaattuitstoot bij beide kleimassa's goed waarneembaar.

Witbakkende klei

Bij deze kleisoort is in de DSC-grafiek de piek bij circa 380 °C in het mengsels met 15 gew.% zaagsel (blauwe curve) opvallend lager dan bij het overeenkomstige roodbakkende mengsel (rode curve), terwijl het gehalte aan organische stof volgens analyse vergelijkbaar is. Bij circa 520 °C is bij beide onderzocht kleimassa's een endotherme dip te zien, samenhangend met de uitstoot van (mineraal)chemisch gebonden water (blancoklei = zee-groene curve).

Bij beide analyses is bij 573 °C weer de endotherme kwarts'sprong' goed te zien.

Omdat in deze mengsels kalk (calciumcarbonaat) geheel ontbreekt, is, zoals bij de roodbakkende kleimengsels, bij 700 °C geen dip zichtbaar. Bij het klei/zaagselmengsel Wit (blauwe curve) is in de TG-grafiek ook goed de gewichtsvermindering te zien door de verbranding van organische koolstof. Evenals bij de DSC-curve het geval is bij de exotherme reactie is deze gewichtsvermindering echter wel minder dan bij de rode klei.

Opgemerkt wordt dat de hierboven in de thermische analyse genoemde temperatuurkarakteristieken, met name waar dit de ontleding van organische stof betreft, in de praktijksituatie bij steenproductie bij beide kleisoorten doorgaans hoger zullen liggen. Dit hangt samen met het feit dat de stenen niet 'open' gestookt worden, zoals bij de monsters op laboratoriumschaal, maar in betrekkelijk dichte steenpakketten worden gebakken. Het reactieverloop in de steenmassa zal daardoor sterk vertragend optreden.

Keramische verwerkbaarheid

Deze bleek bij de handmatige productie van de proefstenen goed te zijn. De verkregen proefstenen waren goed van vorm en vertoonden geen onvolkomenheden aan het steenoppervlak door het zaagsel.

Stookproeven

Wit

De eerste stookproef van deze productsoort was uitgevoerd aan proefstenen met toevoeging van 15 gew.% zaagsel. In de opwarmzone naar top-temperatuur (1.200 °C) was ruimschoots tijd gereserveerd voor het uitbranden van organische stof. Desondanks kon uit het stookresultaat worden afgeleid voor het volledig uitbranden van organische stof meer uitbrandtijd benodigd was. In de tweede stookproef is de aanhoudtijd daarom



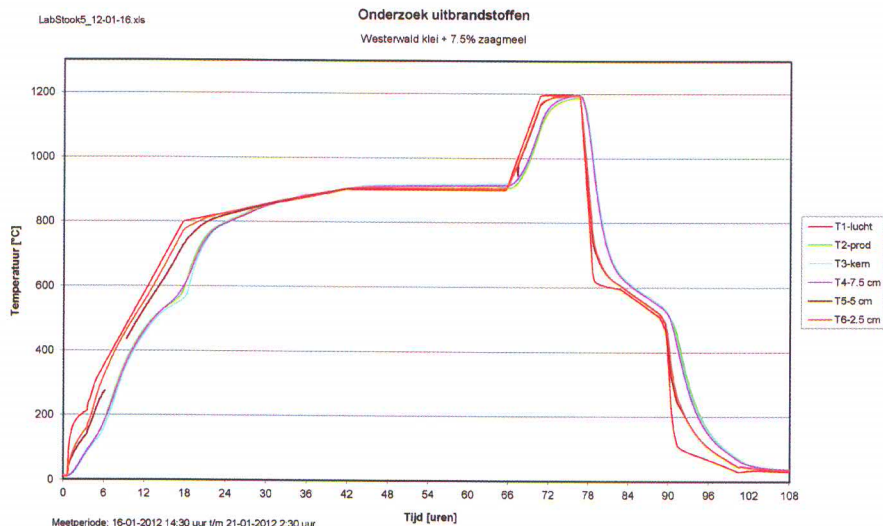
Foto 4: Resultaat bakproef 2 Wit met 15 gew.% zaagsel

de uitbrandtijd voor organische stof op hogere temperatuur (800-1.200 °C) met tien uur verlengd. Het resultaat van deze stookproef was op zich goed te noemen (foto 4) met een goede klank van de producten. Er was echter nog steeds sprake van reductiekernen in de stenen, hoewel wel minder dan bij de eerste stookproef. Gezien de gehanteerde stookcurve werd geconcludeerd dat het volledig uitbranden van organische stof op dit klei/zaagselmengsel redelijkerwijs niet realistisch was.

De navolgende stookproeven op deze kleisoort zijn daarom uitgevoerd aan de mengsels met een lager zaagselaandeel.

Ondanks een extreme verlenging van de aanhoudtijden in de diverse bakcurves tussen 300 en 1.200 °C, ten behoeve van de uitbranding van organische stof tot wel 66 uur in de laatste stoking (zie bakcurve in figuur 3), bleven de verkregen producten nog steeds zwartgrijze reductiekernen vertonen. Alleen een zeer lange, voor de praktijksituatie onrealistische bakcurve zou dit nog kunnen verbeteren.

Uit analyses van stenen uit de vierde stookproef bleek dat de hygrische eigenschappen van de verkregen producten op zich goed waren en zelfs (bouwverwerkingstechnisch) beter dan bij de reguliere zaagselvrije producten.



Figuur 3: Stookcurve bakproef 5 Wit

Rood

Bij deze kleisoort zijn uiteindelijk alleen stookproeven uitgevoerd aan proefstenen met toevoeging van 15 gew.% zaagsel.

In verband met de mogelijke productverweking door de toevoeging van zaagsel, is bij deze kleisoort de toptemperatuur in ieder geval met ten minste 40 °C verlaagd, ten opzichte van de in de praktijk bij dergelijke steenproducties toegepaste temperatuur. Ten opzichte van de witbakkende stookproeven lag de toptemperatuur 170 tot 200 °C lager.

Dat verweking van niet-thermisch stabiele kleisoorten wel degelijk een punt van aandacht is, blijkt uit foto 5 van het bakresultaat van de eerste stookproef bij Rood. Bij het programmeren van de stookcurve werd hier namelijk abusievelijk dezelfde toptemperatuur als bij de witbakkende klei ingegeven. Alle proefstenen zijn vervolgens totaal verweekt en het stookpakket is in de laboratoriumoven gesmolten.



Foto 5: Productsmelt door te hoge toptemperatuur bij bakproef Rood

De tweede en derde stookproef zijn uitgevoerd met een toptemperatuur van respectievelijk 1.000 en 1.030 °C, maar verder met een identieke stookcurve. In de tweede stoking hadden de producten een slechte kwaliteit en geen klank ('beschuit'), hetgeen een hogere toptemperatuur in de volgende stookproef noodzakelijk maakte. Ook na de hogere toptemperatuur in de derde stookproef hadden de producten echter nog steeds onvoldoende kwaliteit en te weinig klank.

De proefstenen hadden ook nog steeds veel reductievlekken in de binnenzijde van het ovenpakket (foto 6).



Foto 6: Opengelegd steenpakket bakproef 3 Rood

Omdat de eerste stookproeven een groot verschil tussen de binnenzijde, met nog veel onverbrand koolstof, en de oxiderend gestookte buitenzijde te

zien gaven, is bij de laatste twee proefstokingen de doelstelling geweest om de buitenzijde van het product te verharden, waardoor de overall productkwaliteit zou verbeteren. Om dit te bereiken, zijn aan het einde van de toptemperatuurfase zogenoemde 'reducerende' omstandigheden in de proefoven aangelegd. Hiermee wordt een zuurstofarme atmosfeer in de oven verkregen, die moet leiden tot een kwaliteitverbetering in het product. Dit hangt samen met de vorming van gereduceerde ijzerverbindingen, die tot meer smeltvorming in het product leiden.

De eerste proefstoking (#4 Rood) leverde een sterk verbeterde en alleszins acceptabele kwaliteit op. Als gevolg van het reduceren, was de productbuitenkant wel zwartachtig geworden. Omdat een verdere verlenging van de reductie tot mogelijk tot nog betere productkwaliteit zou kunnen leiden, is de reductiefase in de laatste stookproef verlengd van 1 (stoking 4) naar twee uur (bakcurve in figuur 4). Voor het overige was de bakcurve identiek aan de voorgaande stoking. In figuur 4 is het enigermate oplopen van de toptemperatuur tijdens en als gevolg van het reduceren goed waarneembaar.

De gebakken producten van de laatste bakproef hadden een alleszins acceptabele kwaliteit, die werd bevestigd door de onderzochte hygrische en volumieke eigenschappen van de stenen. Wel waren er nog steeds onvermijdelijke productverkleuringen en reductievlekken zichtbaar (foto 7).

Resumé

Uit de in het onderzoek uitgevoerde stookproeven is vastgesteld dat zowel met witbakkende Westerveld-klei als een reguliere roodbakkende Nederlandse baksteenproductiemassa op zich kwalitatief acceptabele stenen produceerbaar zijn. Wel zijn hiervoor aanmerkelijk langere stookcurves



Foto 7: Reductievlekken stenen bakproef 5 Rood

noodzakelijk, terwijl deels ook onder reducerende ovencondities gestookt zal moeten worden, met name waar dit de roodbakkende rivierklei betreft. Bij de witbakkende klei kan tot een normale productie toptemperatuur van circa 1.200 °C worden gebakken. De stenen zijn echter niet geheel 'schoon' te stoken van het door de zaagsel ingebrachte organisch koolstof. Hiermee blijft er ook een aanzienlijk kwalitatief als esthetisch verschil bestaan tussen de donkere kern en de witte buitenzijde van het product.

De conclusie kan dan ook zijn dat er bij de gehanteerde zaagseldoseringen geen reguliere steenproductie haalbaar is, maar er grijs/zwartgeklepte, genuanceerde stenen zullen ontstaan. Gevolg van dit laatste is dat ook alle steenpakketten gemixt zullen moeten worden, hetgeen kostenverhogend kan werken.

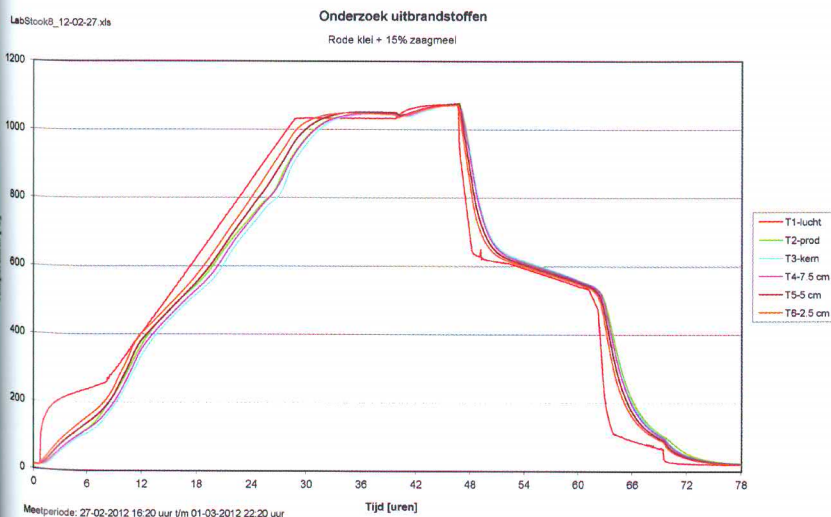
Met betrekking tot de roodbakkende klei liggen de zaken aanzienlijk gecompliceerder. In de eerste plaats kunnen met zaagsel geproduceerde stenen vanwege de gereede kans op opblazen niet met een reguliere stookcurve worden gebakken. Er zal hierbij voldoende aanhoudtijd op lagere temperatuur moeten zijn voor de verbranding van organisch koolstof uit het zaagsel. Verder zal vanwege de kans op productverweking (smelt) niet op een reguliere toptemperatuur kunnen worden afgestookt, maar tenminste 40 °C lager. Dit heeft tot gevolg dat de productkwaliteit achter zal blijven.

Om dit te verbeteren zal tijdens de stookcurve in de oven op toptemperatuur tijdelijk een zuurstofarme ovenatmosfeer (reductie) aangelegd moeten worden.

Ook voor deze productsoort geldt dat deze als een aparte steensortering beschouwd moet worden, met een rood/zwart genuanceerd uiterlijk.

Energetische beschouwing

Bij de toepassing van vaste biobrandstof komt de energieoverdracht hiervan in de klei op een andere wijze tot stand, dan het gebruik van fossiele brandstoffen in de ovenatmosfeer in een regulier keramisch bakproces plaatsvindt. Zoals



Figuur 4: Stookcurve bakproef 5 Rood

blijkt uit de grafische weergave van de DSC-opnamen in figuur 1, van de witbakkende en roodbakkende klei met 15 gew.% zaagsel bij verhitting tot ruim 1.000 °C, vindt een sterke exotherme reactie plaats vanaf 250 °C met een piek bij 350 °C, eindigend bij circa 500 °C. De warmtetoevoer vindt vanuit de producten en productpakketten plaats naar de ovenatmosfeer.

In Nederland worden nagenoeg alleen tunnelovens gebruikt voor de productie van bouwkeramiek. De temperatuur van de producten loopt tijdens het bakproces in de oven min of meer lineair op van omgevingstemperatuur naar top-temperatuur. Hierna volgt een aanhoudtijd op de hoogste temperatuur om de gehele productstapel voldoende te sinteren, waarbij najling van de temperatuur plaatsvindt. Daarna volgt een afkoelingsperiode waar de producten in tegenstroom met omgevingslucht volgens een gewenst temperatuurverloop afkoelen.

In reguliere productiesituaties, waarbij vrijwel altijd met aardgas wordt gestookt, vindt de grootste brandstoftoevoer vanaf circa 800 °C tot het bereiken van het einde van de aanhoudtijd op toptemperatuur plaats. In veel gevallen wordt met behulp van vlambewaakte branders ook nog gestookt vanaf 500 °C, aansluitend op de standaard stookgroepen die niet vlambewaakt zijn boven 800 °C.

De warmteoverdracht van de brandstof naar de vormelingen vindt hier in eerste instantie plaats door straling van de gasvlam en gasstraling van H₂O en CO₂ naar de producten. Daarnaast ontstaat convectie van de rookgassen langs en door de productstapels en geleiding in de productstapels. Hierdoor wordt een beheerste en geregelde opwarmcurve bereikt vanaf 500 °C tot en met het einde van de sinterperiode. De producten in de opwarmzone worden vanaf omgevingstemperatuur tot de stookgroepen opgewarmd door de vrijgekomen rookgassen. De rookgassen koelen in tegenstroom af tot circa 150 °C.

Gesteld kan worden dat de warmteoverdracht van vaste biobrandstof in de klei gedeeltelijk van binnen naar buiten de producten plaatsvindt en bij fossiele brandstoffen alleen vanuit de ovenatmosfeer naar de producten. Als gekeken wordt naar de ontbrandingseigenschappen van het toegepaste zaagsel, vindt de energielevering in theorie plaats tot circa 500 °C. Bij het gebruik van fossiele gasvormige brandstof start de energielevering grofweg pas bij deze temperatuur en loopt door tot het einde van de sintering.

Door de afsluiting van de vaste biobrandstof in de klei en het bakken van producten in stapels, vertraagt in de eerste fase de temperatuuroploop. In de kern van de productstapels ontstaat vergassing van de biobrandstof zonder ontbranding en wordt in de

tweede fase CO₂ uitgestookt. Hierdoor kan zuurstof moeilijk tegen deze gasstromen in, in de producten diffunderen, om de verbranding van de vaste brandstof te laten plaatsvinden. Hierdoor treedt de verbranding van organisch koolstof in de kern van het product pas bij hoge(re) temperatuur op. Door deze effecten vertraagt de ontbranding van de vaste biobrandstof sterk, en kan vaak niet volledig plaatsvinden. Reductieverschijnselen, zwarte kernen of zelfs opblaasverschijnselen door gasbellen in het sinterende product zijn hiervan het gevolg. De gasvormige componenten ontbranden boven de ontbrandingstemperatuur daarvan wel. Afhankelijk van de omstandigheden is de verbranding volledig of onvolledig. Door de sterke vertraging van de uitbranding van de vaste biobrandstof ontstaat toch een min of meer geleidelijke temperatuuroploop in een tunnelovensituatie.

Kanttekeningen en procesaanpassingen

Bij de voorgaande energetische beschouwing is nog een aantal aandachtspunten te noemen. Zo moet de dosering en de calorische waarde van de vaste biobrandstof constant zijn. Verder is het door tempoverschillen, productstapelwijzigingen, productsoort en productformaat-wisselingen moeilijk om het evenwicht in brandstoftoevoer en brandstofverbruik te handhaven. Ook de opwarmingssnelheid kan in de opwarmzone niet volgens een noodzakelijke curvevertraging verlopen, benodigd voor het doorlopen van de faseovergang van α - naar β -kwarts bij 573 °C. Bovendien is het nabij het sintertraject van de producten zeer lastig om de exacte sintertemperatuur en aanhoudtijd te bereiken en te handhaven om de vereiste productkwaliteit te realiseren. Tenslotte kunnen de door de vroegtijdige ontgassing van de vaste biobrandstof, tijdens de tegenstroomopwarming van de producten met de rookgassen, vrijkomende gassen geheel of gedeeltelijk ontbranden en de temperatuurcurve in de opwarmzone sterk en te snel doen stijgen. Hiermee stijgt de rookgastemperatuur bij het inrijden van de producten bijvoorbeeld al direct tot 500 °C of hoger, waardoor opwarmingsscheuren in de producten kunnen ontstaan bij het inrijden van de producten. De voorgaande aandachtspunten leiden tot een aantal noodzakelijke randvoorwaarden en/of procesaanpassingen. Een gravimetrische dosering van de vaste biobrandstof is noodzakelijk, met correctie op het vochtgehalte van de klei, de calorische waarde en ontbrandingseigenschappen van de biobrandstof. Verder zal gestreefd moeten worden naar een zo gelijkmatig mogelijk tempo, productsoorten en -formaten, wat in de praktijk vrijwel niet mogelijk is. De kleireceptuur zal ook zo kwartsarm mogelijk moeten zijn en het productietempo zal teruggenomen moeten worden tot de maximum haalbare opwarmingssnelheid tijdens de kwartsomzetting.

Dit is in de praktijk maar in zeer beperkte mate mogelijk. Verder moet de toevoeging van vaste biobrandstoffen gecombineerd worden met fossiele gasvormige brandstoffen om de stookcurve en sintertemperatuur te kunnen beheersen. Als laatste is een voorwaarde dat door toepassing van luchtinjecties en rookgasrecirculatiesystemen in de opwarmzone, de extreme temperatuur-oploop beperkt zal moeten worden. De stapelwijze van de producten zal daarbij ook aangepast moeten worden teneinde het optreden van opwarme-scheuren te voorkomen.

Door de langzame ontgassing van de in de klei verwerkte biobrandstof in de opwarmzone van de tunneloven in een zuurstofarm milieu, onder de ontbrandingstemperatuur van de vrijkomende gassen, ontstaat verder onvolledige verbranding. Om de vrijkomende gassen volledig te verbranden tot CO₂ en H₂O is een temperatuur van zeker 800 °C noodzakelijk. Zoals eerder aangegeven, start de ontgassing van de biobrandstof in de opwarmzone echter al bij 250 °C. In de onverbrande of onvolledig verbrande gassen kunnen vrijwel alle vormen van vluchtige organische (koolwater)stoffen (VOS) voorkomen, naast mogelijke andere gasvormige schadelijke stoffen. Gezien de strenge wettelijke emissierichtlijnen met betrekking tot VOS en meer bijzondere vormen van afvalgassen, is het vrijwel zeker dat voor het verkrijgen van een omgevingsvergunning op milieugebied een reinigingsinstallatie wordt vereist voor het mogen toepassen van biobrandstoffen in klei. Dat betekent in de praktijk dat in serie met de meestal reeds aanwezige kalksplit-reactor, ten behoeve van de afvang van fluoriden uit de rookgasstroom, in het rookgassysteem een naverbrandingssysteem moet worden geplaatst.

Energiebesparing en slotconclusies

Met betrekking tot het mogelijke energetische besparingspotentieel is in het onderzoek berekend dat het verbruik van fossiele brandstof (aardgas) bij toepassing van zaagsel als bio-brandstof daalt tot circa 25 procent van de reguliere brandstofbehoefte in baksteenproducties. De totale energiebehoefte bij toepassing van biomassa ligt echter circa 2,5 maal hoger dan bij reguliere baksteenproducties. Dit hangt samen met het feit dat door de langzame opwarming van de producten en de biomassa in de opwarmzone, veel vluchtige calorische componenten onverbrand door de schoorsteen verdwijnen, zonder bijdrage aan de warmtevraag. Tevens loopt de temperatuur in de opwarmzone snel op door de vroegtijdige ontbranding van vrijkomende gassen en daarmee ook de rookgastemperatuur. Daarnaast neemt het rookgasdebiet toe door het streven naar een zo hoog mogelijk zuurstofgehalte in de verbrandingsgassen en de noodzaak om luchtinjecties in de opwarmzone toe te passen.

Zoals hierboven aangegeven, zijn bij de eventuele toepassing van biobrandstoffen hoge investeringen in proces- en milieumaatregelen (thermische naverbranding van vluchtige organische stoffen) noodzakelijk. Verder is gebleken is dat de kostprijs van biobrandstoffen in het algemeen verhoudingsgewijs hoog ligt. Dit geldt ook voor het in het onderzoek toegepaste zaagsel.

Ondanks de besparing op primaire brandstofkosten, is berekend dat de overall kostprijs van baksteenproductie tenminste 75 % zal stijgen ten opzichte van het huidige kostprijsniveau. De met de beperking van het aardgasverbruik bereikte reductie van de niet-duurzame CO₂-emissie, is vanwege de lage CO₂-emissiehandelsprijs dermate gering, dat dit geenszins opweegt tegen de kostprijsverhoging. Op basis van een tijdens de rapportageperiode van het onderzoek geldende CO₂-emissiehandelsprijs van circa € 7,- zou namelijk een besparing bereikt kunnen van maximaal ongeveer € 42.500,-, ofwel een kostenreductie van € 0,45 per ton keramisch product. Dit bedrag ligt echter ruim een factor 25 lager dan de berekende meerkosten van zaagseltoevoeging. Het is duidelijk dat de CO₂-emissiehandelsprijs zeer fors zal moeten toenemen om tenminste enige kostprijsverevening te verkrijgen.

Samenvattend is op basis van de resultaten van het uitgevoerde onderzoek dan ook geconcludeerd, dat de toepassing van biomassa in de baksteenindustrie momenteel bedrijfseconomisch niet haalbaar is. Gezien de sterke kostprijsverhoging, die dit met zich mee brengt, is aanbevolen om voorlopig geen verdere activiteiten te ontplooiën met betrekking tot de eventuele toepassing van biomassa, in de vorm van zaagsel, in de metselbaksteenproductie met het doel fossiele brandstoffen te besparen. Hernieuwde inspanningen in dit kader zijn alleen zinvol als de kostprijs van zaagsel en/of de CO₂-emissiehandelsprijs respectievelijk zodanig daalt dan wel stijgt, dat dit kostprijs technisch gunstig genoeg wordt. ■