



RAPPORT

Författare Anna Broberg Kristian Rosenqvist	Datum 2015-03-31
Telefon direkt +46 10 505 07 15	Projekt-ID 6035359
Mobil/Email +46 07 582 51 37 anna.broberg@afconsult.com	Rapport-ID 6035359-001 rev.01
Granskad Kristian Rosenqvist	Godkänd Fredrik Jareman

Smältasplittring med ånga och svaglut

Sammanfattning

Projektet är en förstudie och har som syfte att utveckla en metod för att analysera splittring av smälta från en sodapanna samt undersöka om svaglut kan ge en likvärdig splittring jämfört med ånga. Splittringsprocessen undersöktes med hjälp av CFD för ett basfall med ånga samt två fall med svaglut som splittringsmedium.

Splittring med svaglut gav en jämnare och mer robust splittring jämfört med när ånga används som splittringsmedium. Svaglutsstrålen är mycket skarp och skär igenom smältastrålen medan ångstrålen har en rundare form som resulterar i en mer ojämn splittring av smältastrålen. En vinklad svaglutsstråle kan hantera större variationer i smältaflöde men ökar risken för skvätt på löpräna och väggar.

För en medelstor svensk anläggning har värdet på ångbesparingarna vid de studerade körsätten uppskattats till 2,56 MSEK/år.



Smelt shattering with steam and weak wash

Summary

This project is a pre-study with the aim to develop a method for analyzing the process of shattering recovery boiler smelt, as well as determine if shattering smelt with weak wash instead of conventional steam can give similar or better shattering efficiency. The shattering process was studied with a CFD model for a base case with steam as well as two cases with weak wash for shattering the smelt.

The shattering turned out to be more even and robust for the cases where weak wash was used. The weak wash jet is very sharp and cuts through the smelt while the steam jet has a rounder shape resulting in uneven shattering. An angled weak wash jet is better for handling variations in smelt flow but increases the risk of runoff on the smelt spouts and tank walls.

For an average sized Swedish recovery boiler the savings on steam when using weak wash for shattering has been estimated to 2.56 MSEK/year.



Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	4
1.1	Arbetsomfattning	4
2	GEOMETRI	5
3	RANDVILLKOR.....	7
3.1	Smälta	7
3.2	Ånga	7
3.3	Svaglut	7
3.4	Ytspänning	7
4	CFD MODELL.....	8
4.1	Mesh	8
4.2	Fysikaliska beräkningsmodeller	8
4.2.1	Basfall med ånga	9
4.2.2	Fall 1 och 2 med svaglut	9
5	CFD RESULTAT.....	9
6	FRAMTIDA FÖRBÄTTRINGAR	11
6.1	Meshstudie	11
6.2	Dysor och dyskonfiguration.....	11
6.3	Materialdata	11
7	ENERGIBESPARING	12
8	SLUTSATSER.....	12
9	KÄLLFÖRTECKNING	13



1 Inledning

Sodapannan är en central funktion på ett sulfatmassabruk i sin funktion som återvinningsställe för kokkemikalier och försörjare av ånga. En sodapanna har beroende på storlek 2-10 stycken löprännor, via vilka smältan från eldstaden rinner ner i sodalösartanken där den löses upp med svaglut och bildar grönlut. För att förbättra inblandningen och upplösningen av smältan samt minska buller splittras smältan i mindre droppar med hjälp av någon typ av dysa. Vanligt är splittring med mellantrycksånga, men även andra olika medier har varit aktuella: vatten, vatten i kombination med luft, grönlut samt svagluft. En undermålig splittring ger sämre inblandning men framförallt ökat buller och ökad risk för smältaexplosion i lösartanken. Eftersom dagens metoder ofta ger en ojämn splittring som har svårt att hantera smältarusningar från sodapannan samt att ångsplittring kräver runt 0.5-1.5 t/h mellantrycksånga finns stor potential till förbättringar.

Fokus i det här projektet är att undersöka möjligheten att splittra smältan med svaglut istället för med ånga och på så sätt ersätta den dyrbara ångan med betydligt billigare pumpenergi.

1.1 Arbetsomfattning

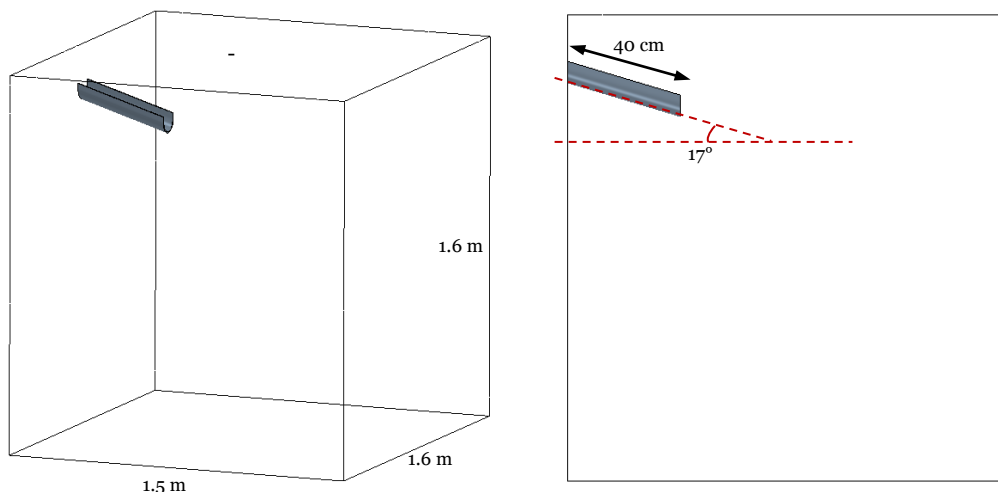
Projektet är en förstudie och har som syfte att utveckla en metod för att analysera splittring av smälta från en sodapanna och undersöka om svaglut kan ge en likvärdig splittring jämfört med ånga.

Smältasplittringen kommer att analyseras med hjälp av Computational Fluid Dynamics (CFD), som är ett verktyg för att simulera gaser och vätskor i alla typer av system och kan användas för att få fram tredimensionella flödesbilder. Ett basfall där smältan splittras med ånga kommer att jämföras med svaglutssplittring där två olika positioner för svaglutsdysan kommer att studeras. Därutöver kommer en processmässig studie över potentiella energibesparingar att utföras.



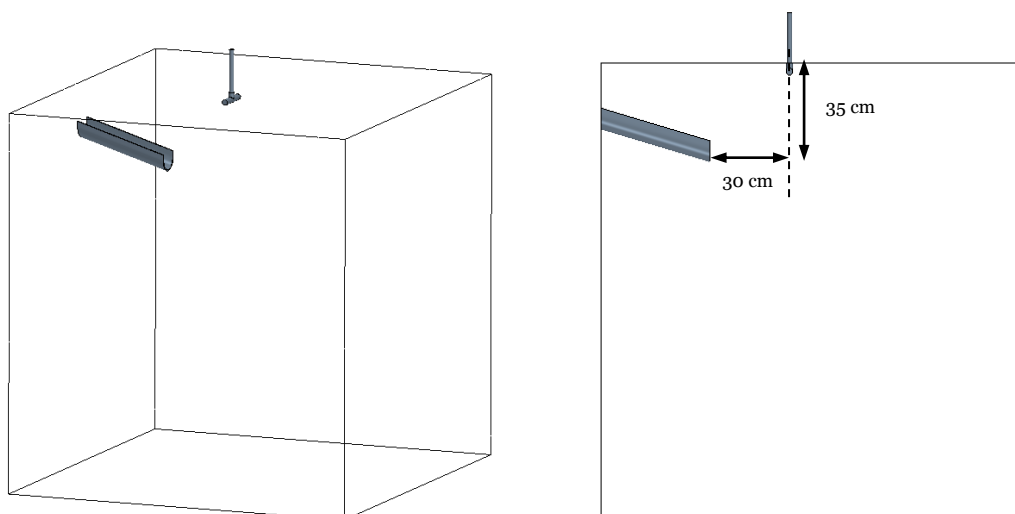
2 Geometri

Geometrin består av en fiktiv tank med dimensionerna 1.6 x 1.6 x 1.5 m och en löpränna (Figur 1) som har designats baserat på vanligt förekommande löprännor [1]. Tank och löpränna är gemensamma för alla undersökta fall. Löprännan är U-formad med bredden 10 cm och längden 40 cm och har en lutning på 17°.



Figur 1. Tank och löpränna. Samma design gäller i samtliga simuleringsfall.

Ångdysan i basfallet placerades rakt ovanför smältastrålen (vinkel 0 grader) 30 cm in i tanken från det att smältastrålen lämnar löprännan (Figur 2). Det innebär att ångdysan sitter ungefär 60 cm ovanför interaktionspunkten mellan smälta och ånga, vilket är enligt rekommendation från Taranenko [1].



Figur 2. Geometri för basfallet. Ångdysan är placerad rakt ovanför smältastrålen ca 30 cm från kanten på löprännan.

Ångdysan består av ett rör som övergår i ett munstycke med fyra öppningar som är 8 mm i diameter (Figur 3). De två mittersta öppningarna är förskjutna mot mitten

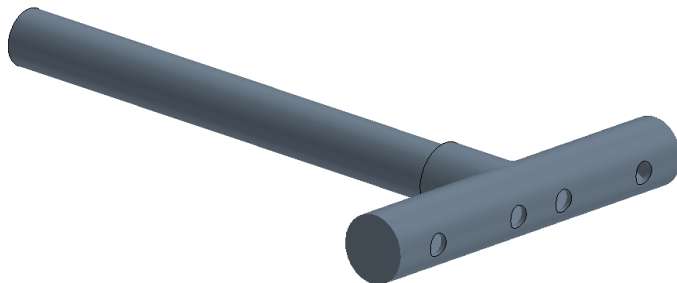


RAPPORT

RAPPORT-ID: 6035359-001 rev.

6 (13)

av dysan. Detta gör att ångstrålen blir kraftigare i mitten, vilket också är den del som träffar den tjockaste delen av smältastrålen.



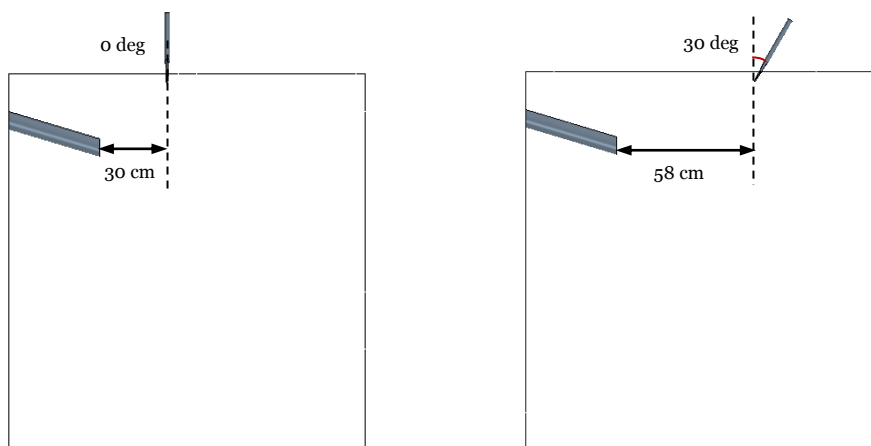
Figur 3. Ångdysan har fyra öppningar à 8 mm i diameter. De två mittersta hålen är förskjutna mot mitten för att få en kraftigare ångstråle i mitten som också kommer träffa den tjockaste delen av smältastrålen.

När svaglut används som splittringsmedium ökar risken för igensättning av dysan avsevärt, och ett munstycke med små hål likt ångdysan riskerar att snabbt bli obrukbart. Därför används här ett så kallat spaltmunstycke till svagluten (Figur 4). Spaltmunstycket ger en skarp svaglutsstråle som potentiellt kan hantera ökade smältaflöden då den har en bred spridning. Spalten har dimensionerna 70 x 2 mm.



Figur 4. Svaglutsdysan är av typen spaltmunstycke och har en öppning på 70 x 2 mm.

Initialt (Fall 1) placerades svaglutsmunstycket på samma position som ångdysan för att underlätta en jämförelse mellan de två splittringsmedierna. I Fall 2 vinklades svaglutsdysan istället 30 grader mot horisontalplanet för att undersöka om det kan ge en stabilare drift vid varierande smältaflöde. Dysan flyttades samtidigt 30 cm bort från löprännan för att undvika att smälta ska skvätta upp på löprännan vid splittring (Figur 5).



Figur 5. Svaglutsdysans position för Fall 1 (vänster) och Fall 2 (höger).

3 Randvillkor

3.1 Smälta

Smältan rinner typiskt med hastigheten 1.5 m/s vilket för vald löpränna innebär ett totalt smältaflöde på 10 800 kg/h. Detta flöde motsvarar också rekommenderat maxflöde per löpränna av Sodahuskommittén [2]. Temperaturen sattes till 800 °C och smältan antas ha en densitet på 1999 kg/m³. Viskositeten ligger vanligtvis mellan 2.5 och 5 cP och sattes därför till 4 cP.

3.2 Ånga

Ångan som används för att splittra smältan är mellantrycksånga vid 11 bar (a) och 200 °C. Ångflödet sattes till 0.5 t/h, vilket är i det lägre spannet (typiskt ångflöde är 0.5-1.5 t/h per löpränna). Ångan approximeras som en ideal gas.

3.3 Svaglut

Svagluten antas vara vid 55°C och modelleras som vatten där densiteten justerats till 992.1 kg/m³ på grund av dess saltinnehåll. För Fall 1 sattes svaglutsflödet till 21.8 m³/h, vilket motsvarar ett tryck på 9.5 bar (a) vid inloppet. I Fall 2 sänktes svaglutsflödet till 20 m³/h efter Sodahuskommitténs rekommendationer, vilket gav ett inloppstryck på 8.5 bar (a).

3.4 Ytspänning

Smältans ytspänning är en viktig parameter för splittringsprocessen. En högre ytspänning resulterar generellt i större medeldroppstorlek. Ytspänningen är mycket svår att mäta och beror av smältans sammansättning och temperatur. Inga värden på ytspänning för smälta från sodapannor har kunnat hittas, därför har ett



RAPPORT

RAPPORT-ID: 6035359-001 rev.

8 (13)

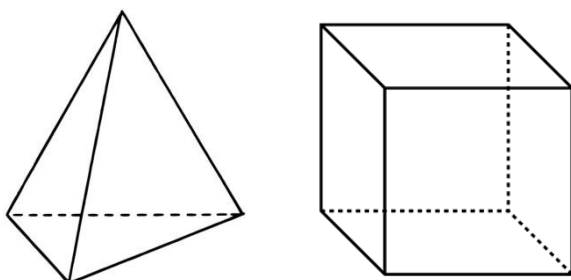
approximativt värde på 1.3 N/m^2 använts, vilket är i samma storleksordning som ytspänningen för många metallsmältor [3].

4 CFD modell

4.1 Mesh

Geometrin har delats upp i små volymer där varje volym utgör en tredimensionell meshcell. Fler celler ger högre noggrannhet men kräver desto mer datorresurser. Meshen är skapad i programvaran ANSA och består till största delen av hexaedrar vilket ger en mycket hög meshkvalitet. Längs tankens väggar och tak där närvaron av smälta, ånga eller svaglut är liten består meshen av tetraedrar (Figur 6). Cellstorleken i interaktionsområdet (smälta/svaglut/ånga) är 2.5-3 mm och växer upp till 400 mm vid tankens väggar och tak. Totalt består meshen av 20-25 miljoner celler.

För att minimera numerisk diffusion har hexaedrarna som täcker svaglutstrålen i Fall 2 vinklats på samma sätt som svaglutsdysan.



Figur 6. Meshen består av tetraedrar (vänster) och hexaedrar (höger).

4.2 Fysikaliska beräkningsmodeller

Smältasplittring är en slags atomiseringsprocess som består av primär och sekundär splittring. Den primära splittringen sker då ång/svaglutsstrålen träffar smältan och delar upp den i droppar. Därefter sker den sekundära splittringen genom att dessa droppar i sin tur delas upp i mindre droppar. I detta projekt undersöker vi främst den primära splittringsprocessen.

Alla simuleringar är transienta och har utförts i programvaran Star-CCM+. I ett multifassystem (gas/vätska/fast form) behövs särskilda modeller för att lösa utbredningen av respektive fas och interaktionen mellan faserna. I samtliga simuleringar har VOF (Volume of Fluid) metoden använts eftersom faserna (ånga/svaglut, smälta, luft) är tydligt separerade från varandra, till skillnad från exempelvis partiklar i ett gasflöde där de enskilda partiklarna är spridda i gasen.

VOF är en numeriskt effektiv metod och lämpar sig framförallt för system där fluiderna inte kan bilda en homogen blandning, vilket stämmer väl in på smältasplittring. VOF modellen beräknar utbredningen av varje fas genom att i varje tidssteg spåra hur gränsen mellan faserna förändras. En begränsning med VOF metoden är att meshen därför måste vara tillräckligt fin för att lösa upp gränsen mellan faserna [4]. Ytterligare en begränsning med VOF är att det svårt att få en bra uppskattning av smältans droppstorlek efter splittringen eftersom VOF modellen



RAPPORT

RAPPORT-ID: 6035359-001 rev.

9 (13)

inte behandlar smältadropparna som enskilda droppar utan som delar av ett smältakontinuum.

Turbulensen modelleras med LES (Large Eddy Simulations) vilket är en transient turbulensmodell med relativt hög noggrannhet eftersom de stora dragen i turbulensen beräknas explicit och enbart de mindre skalorna approximeras med modeller. LES är att rekommendera vid VOF simuleringar då gränsen mellan fluiderna behöver lösas upp med hög noggrannhet [4].

4.2.1 Basfall med ånga

I basfallet innehåller multifasmodellen två faser: en gas och en vätska. Smältan utgör vätskefasen och gasfasen består av en blandning av vatten, kväve och syre. För att urskilja vattenångans utbredning från luftblandningen används en transportekvation för varje ämne (H_2O , N_2 , O_2), vilket gör att något fler ekvationer måste lösas och simuleringstiden blir längre. Ångans höga temperatur och tryck gör att densiteten inte kan anses konstant och därför modelleras densiteten med ideala gaslagen. Även en energiekvation inkluderas.

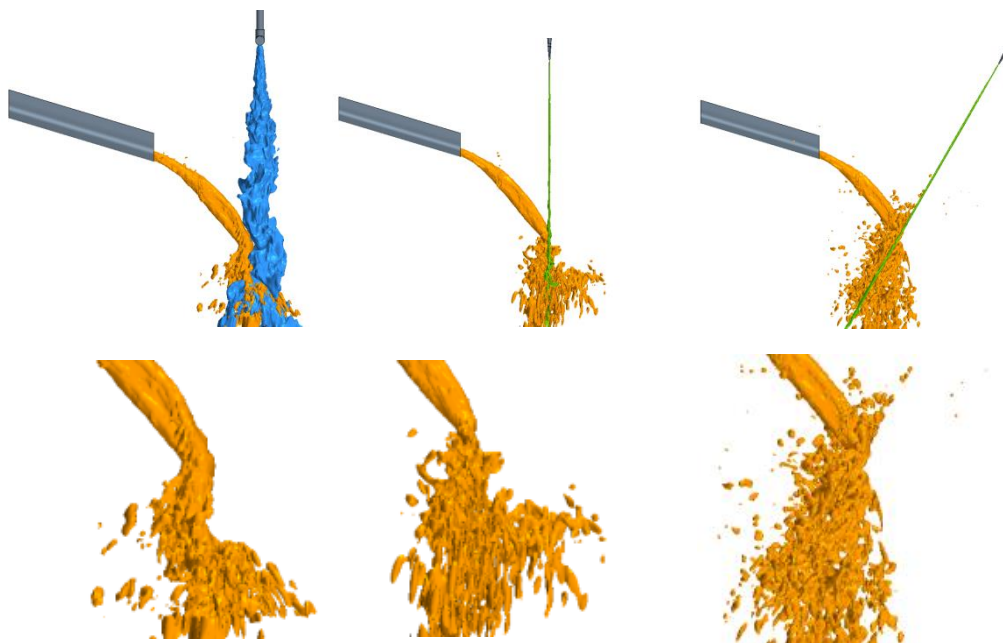
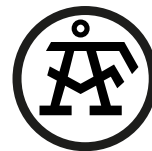
4.2.2 Fall 1 och 2 med svaglut

När svaglut används som splittringsmedium innehåller multifasmodellen tre faser: en gasfas och två vätskefaser. Gasfasen är i det här fallet luft som antas ha en fix komposition av syre och kväve. Därför behövs bara en transportekvation för gasfasen. Luften antas dessutom vara inkompressibel. Konstant densitet och viskositet har antagits för samtliga medier och därför har ingen energiekvation inkluderats för svaglutssimuleringarna. Den något enklare fysiken innebär färre antal ekvationer att lösa vilket gör att svaglutssimuleringarna går betydligt fortare än ångsimuleringarna. De två vätskefaserna utgörs av smälta och svaglut.

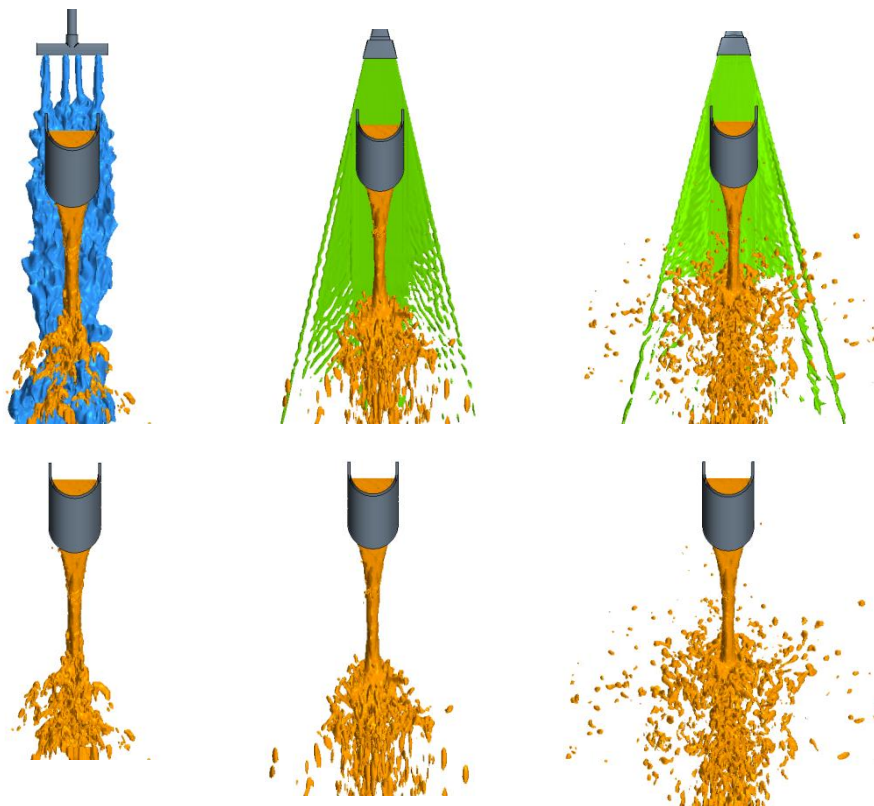
5 CFD Resultat

Tre simuleringar har utförts: ett basfall med ånga, Fall 1 med svaglutsdysan placerad rakt ovanför löprännan 30 cm bort och Fall 2 med svaglutsdysan vinklad 30 grader och placerad 58 cm bort från löprännan (Figur 5). Figur 7 och Figur 8 visar splittringen för fallen sett från sidan och från pannväggen. I samtliga fall splittras smältan. Ångstrålen har en ojämn, bullig form när den träffar smältan, vilket gör att splittringen blir något oregelbunden och smältan tenderar att splittras i större sjok. Svaglutstrålen är mycket skarpare än ångstrålen och skär mer effektivt genom smältastrålen vilket ger en mer jämn splittring och större finfördelning av smältan än i basfallet. Svaglutstrålen ger en större spridning på smältan, framför allt i sidled.

Vid varierande smältaflöden kommer smältastrålens kastparabel att ändras och därmed också interaktionspunkten för splittring. Svaglutstrålens vinkel i Fall 2 ger en ökad robusthet för splittring av varierande smältaflöden då den oavsett smältans kastparabel kommer träffa smältastrålen medan Basfallet och Fall 1 riskerar att helt missa smältastrålen vid låga flöden. Den vinklade svaglutstrålen i Fall 2 ger en uppbyggnad av smälta strax ovanför punkten där svaglutten möter smältan och en något ökad spridning i sidled samt bakåt mot väggen. Detta kan öka risken för oönskat skvätt på löpränna och väggar vid smältarusningar och behöver utredas ytterligare.



Figur 7. Vy från sidan. Basfall (vänster), Fall 1 (mitten) och Fall 2 (höger). Smältan är orange, ångan är blå och svaglutet är grön. De övre bilderna visar splittring av smälta samt splittringsmedium (ånga eller svaglut). De nedre bilderna visar en förstoring av enbart smältan.



Figur 8. Vy från pannvägg. Basfall (vänster), Fall 1 (mitten) och Fall 2 (höger). Smältan är orange, ångan är blå och svaglutet är grön. De övre bilderna visar splittring av smälta samt splittringsmedium (ånga eller svaglut). De nedre bilderna visar enbart smältan.



6 Framtida förbättringar

Detta projekt är en förstudie och har som syfte att utveckla en metod för att analysera smältasplittring samt undersöka om svaglut kan ersätta ånga som splittringsmedium. Under projektets gång har dock ett antal olika områden dykt upp där ytterligare studier kan behövas.

6.1 Meshstudie

Meshen och meshstorleken är en viktig del i analysmetoden, men pga av begränsade resurser har ingen meshstudie utförts. Meshen som har använts är något grov och kan enbart ge besked om splittring sker eller ej, och resultaten ska därför endast användas i jämförelse av två olika scenarier. Man kan av dessa simuleringar inte dra några slutsatser om finfördelningen eller spridningen i absoluta mått. Vid denna typ av simulering bör meshens storlek beaktas noga och en kompletterande meshstudie kan behöva göras innan metoden tillämpas på industriella applikationer. Baserat på resultat och erfarenheter från detta projekt kan följande rekommendationer ges:

- Viktigt att lösa upp svaglutsstrålen samt att svaglutsstrålen och meshen har samma riktning för att undvika numerisk diffusion.
- Interaktionsområdet bör lösas upp med celler av storleken ca 1 mm.
- Löprännans kant bör ha en upplösning på 1-2 mm.

För att minimera simuleringstid är det viktigt att inte ha för många celler i meshen. Det är därför rekommenderat att först simulera splittringen på en tämligen grov mesh för att på så sätt se var interaktionsområdet hamnar och var en förfining behövs.

6.2 Dysor och dyskonfiguration

I denna studie har endast en typ av svaglutsdysa använts (Figur 4). Den valda dysan visade sig ge en tillräckligt bra splittring, men också ge en onödigt bred svaglutsstråle. Olika typer av svaglutsdysor behöver därför undersökas för att hitta en dysa som uppfyller följande krav:

- Tillräcklig spridning i sidled för att täcka hela smältastrålens bredd.
- Tillräcklig kraft för att splittra smältan vid ett svaglutsflöde på 15-20 m³ svaglut/löpränna.
- Så stor spaltöppning som möjligt för att förhindra igensättning (öppning var i detta projekt 2 mm).
- Förhindra skvätt på löpränna och lösartankens väggar.
- Ge robust splittring vid varierande smältaflöden.

Även olika dyskonfigurationer (antal dysor och dysornas positioner) bör utredas för att på bästa sätt uppfylla ovanstående kriterier.

6.3 Materialdata

En osäkerhetskälla i utförda simuleringar är smältans viskositet och ytspänningen mellan smälta och svaglut/ånga, där särskilt ytspänningen kan påverka splittringsförloppet och droppstorleken. En mindre litteraturstudie har utförts i detta projekt för att hitta rimliga värden på dessa parametrar men med mindre framgång



RAPPORT

RAPPORT-ID: 6035359-001 rev.

12 (13)

för ytspänningen. Både ytspänning och viskositet kan variera beroende på smältans komposition och temperatur och en större litteraturstudie för att hitta bättre värden kan behövas. Alternativt kan en känslighetsstudie utföras med CFD där de osäkra parametrarna varieras för att se vilken effekt de har på splittringen.

7 Energibesparing

Under denna studie har det gjorts en bedömning av de potentiella energibesparingarna med föreslaget körsätt. När svaglut används som splittringsmedium finns möjligheter att ersätta dyrbar ånga med betydligt billigare pumpenergi.

En sodapanna med fyra löprännor som har flöden och dimensioner enligt CFD-modellerna för detta arbete har ett totalt smältaflöde på 43 200 kg/h. Detta motsvarar med typiska drift- och bränsledata en medelstor svensk sodapanna med en last på 2 440 ton eldad torrsbstans (svartlut) per dygn. Med de ångdata som har använts för CFD-modellen skulle erfordrad splittringsånga för en sådan panna uppgå till 2 t/h, motsvarande 13 458 MWh för en anläggning med 355 driftdygn.

För att värdera ångan har kostnaden för mellantrycksånga hämtats ifrån Värmeforskrapporten "Energy conservation measures for kraft digesters" [5], och har värderats till 190 SEK/MWh. Denna kostnad är baserad på energidata för ett typiskt svenskt massabruk där bark används som marginalbränsle. För att förenkla värderingen har det antagits att fabriken har ett överskott av sekundärvärme som annars hade minskat något vid utebliven splittringsånga till lösartanken.

Med ovan nämnt pris per MWh beräknas de totala ångbesparingarna för smältasplittring med svaglut istället för ånga ligga på nivån 2,56 MSEK/år.

8 Slutsatser

Att använda ånga som splittringsmedium ger en ojämn splittring jämfört med svaglut. Med vald svaglutsdysa och flöde fås en mycket skarp svaglutsstråle som skär igenom smältastrålen och ger en robust splittring. Med en vinklad svaglutsstråle ökar systemets robusthet mot varierande smältaflöden men samtidigt kan risken för skvätt på löpränna och väggar öka.

Ytterligare studier behövs innan tekniken kan användas industriellt, framförallt när det gäller olika dysor och dyskonfigurationer, men också meshstorlek och materialegenskaper kan behöva studeras närmre. Varje splittringsanläggning har olika förutsättningar och krav och därför kommer splittringsprocessen att behöva optimeras och anpassas för varje anläggning.

För en medelstor svensk anläggning har värdet på ångbesparingarna vid de studerade körsätten uppskattats till 2,56 MSEK/år vilket visar på ekonomisk potential.



9 Källförteckning

1. Taranenko A., (2013). *Shattering Kraft recovery boiler smelt by a steam jet*. Master Thesis at the University of Toronto.
2. Rekommendationer från Sodahuskommittén. Nr B4. *Konstruktion och utrustning av smärtlösare*. Utgåva 3, september 2013.
3. Deyev G.F., (2005). *Surface phenomena in fusion welding processes*. CRC Press.
4. Anderson B., Andersson R., Håkansson L., Mortensen M., Sudiyo R., van Wachem B., (2011). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. 7th edition. Gothenburg, Sweden.
5. Lundqvist F., Ivarsson M., (2014). *Energy conservation measures for kraft digesters*. Värmeforsk.