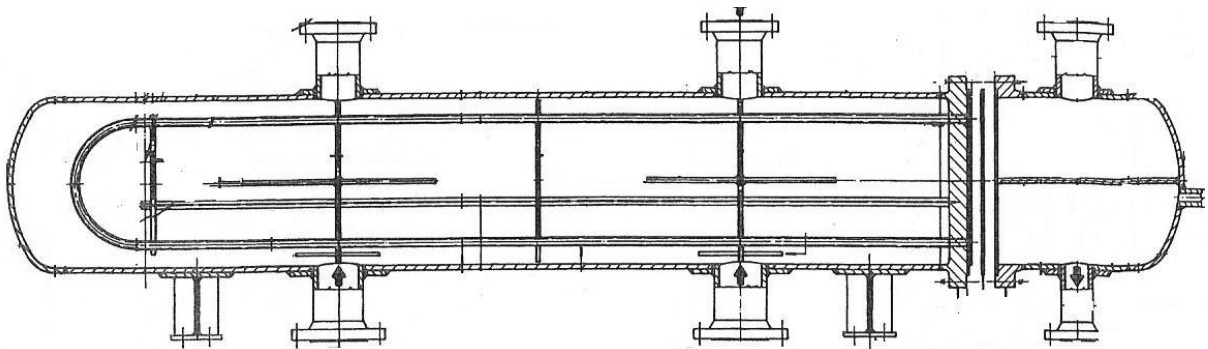




HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Kavitasjon og erosjon på rørsiden i varmeveksler



Hovedprosjektet utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Avd. for ingeniørfag

Studieretning: Maskin

Av: Elias Sandvig

Kandidatnr. 65



Forord

Dette hovedprosjektet er en avslutning på en treårig utdanning som maskiningeniør ved Høgskolen Stord/Haugesund. Oppgaven har et omfang på 12 studiepoeng, og krever kunnskap tilegnet gjennom studiet. I min oppgave har jeg fått bruk for kunnskap fra blant annet strømningslære, korrosjonsteknologi og materiallære.

Hovedoppgaven fikk jeg tildelt av Statoil Kårstø. De ønsket en oppgave som tok for seg korrosjon i varmevekslere.

Oppgaven har vært interessant på flere måter. Prosjektet har gitt meg innsikt i et interessant tema. Samtidig fikk jeg erfare at det var vanskelig å finne informasjon om emnet, og at velviljen ikke var like stor hos alle jeg kontaktet.

Jeg vil rette en stor takk til:

- Kjell Arne Ekornsæter, ekstern veileder Statoil ASA
- Gunn Ersland, intern veileder Høgskolen Stord/Haugesund

I tillegg vil jeg takke

- Audun Tveit, Høgskolen Stord/Haugesund
- Øyvind Hansen, HEAT-CON Varmeteknikk AS

Haugesund, 6. mai 2005

Elias Sandvig



Sammendrag

Oppgaven tar for seg korrosjonsformene kavitasjon og erosjon på rørside i bunnkokerne i Train 300 (Sleipner) ved Kårstø prosesseringsanlegg.

Ut fra litteraturstudie om kavitasjon og erosjon så det ut som at en rørsats i rustfritt stål ville være bedre egnet enn karbonstålet (ASTM A179) som ble brukt tidligere.

Det ble bekreftet av fullskaletesten. Den viste at rørsatser i superduplex SAF2507 (ASTM S32750) og AISI 316 har mye bedre egenskaper mot korrosjonsformene kavitasjon og erosjon enn karbonstål.

Videre tok oppgaven sikte på å finne det materialvalget for rørsatsene som er best med tanke på life cycle cost (LCC).

LCC analysen viste at rørsatser i superduplex er det alternativet som gav de laveste kostnadene. Det er en del usikkerhet knyttet til levetiden til rørsatsene og risikoen for skader. Selv om vi reduserte inspeksjonsintervallet for å redusere usikkerheten når superduplexrørsatsen eldes, vil den fortsatt ha de laveste kostnadene.



Innholdsfortegnelse

1.0 Innledning	1
1.1 Kort om Kårstø prosesseringsanlegg	1
1.2 Bakgrunn.....	1
1.3 Målsetning for oppgaven	1
1.4 Avgrensninger.....	2
1.5 Løsningsmetode	2
2.0 Beskrivelse av bunnkokere i Train 300	2
3.0 Teori om erosjon	3
3.1 Dråpeerosjon	4
3.2 Turbulenskorrosjon	4
3.3 Kavitasjon/kondensslag	4
3.4 Inkubasjons- og propargeringstid	5
3.5 Stållegeringer	5
4.0 Situasjonen.....	6
4.1 Inspeksjon i 1996	6
4.2 Inspeksjon av butansplitterkoker (HA-310) i 1998 og 2004	7
5.0 Mulige årsaker til skader.....	9
5.1 Regulering av pådrag gir kondensslag/kavitasjon	9
5.2 Miljøfaktorer	10
5.2.1 Strømningshastighet.....	10
5.2.2 Temperatursvingninger.....	11
5.2.3 Temperatur og styrke på oksydsjikt.....	11
5.2.4 pH.....	11
6.0 Drøfting årsak	12
6.1 Skade på rørsats i karbonstål.....	12
6.2 Skade på deleplate.....	12
6.3 Skade på rørsats i superduplex.....	12
7.0 Valg av design for å motvirke korrosjon	13
7.1 Materialeegenskaper	13
7.2 Levetid i fullskallatest	14
8.0 Økonomiske betraktninger.....	14
9.0 Konklusjon.....	16
10.0 Referanseliste	17
11.0 Bilag.....	18



1.0 Innledning

1.1 Kort om Kårstø prosesseringsanlegg

Kårstø prosesseringsanlegg i Nord-Rogaland har en nøkkelrolle når det gjelder transport og behandling av gass og kondensat fra viktige områder på norsk kontinentalsokkel.

Før gassen blir prosessert på Kårstø kalles den rikgass. De tyngre komponentene i rikgassen blir skilt ut til våtgass. Våtgassen (LPG) splittes til produktene propan, normal butan, isobutan, nafta og etan før den eksporteres med skip. Kårstø-anleggene er verdens tredje største utskipningshavn for LPG. Produktet vi får når våtgassen har blitt skilt ut er tørrgass, som komprimeres og eksporteres direkte i rør til kontinentet.



Bilde 1-1 Kårstø prosesseringsanlegg

Ref. /9/

1.2 Bakgrunn

Statoil har fra 1989 til 1997 byttet ut 20 av 23 varmevekslere i karbonstål med lavtrykkdamp på grunn av korrosjon. Korrosjonen har ført til stor bruk av ressurser på inspeksjon og utskiftning. Noen av skadene førte til lekkasje og varierende nedetid for anlegget. Som en fullskalatest ble rørsatsene i Slepner (Train 300) erstattet med rørsatser i rustfritt stål (superduplex).

1.3 Målsetning for oppgaven

Hensikten med oppgaven er å ta for seg korrosjonsformene erosjon og kavitasjon. Dersom det er mulig skal jeg finne hvilket material for rørsatsene som er mest lønnsomt i henhold til LCC.



1.4 Avgrensninger

For at ikke oppgaven skal bli for omfattende har jeg begrenset meg til å se på bunnkokerne i Sleipner (Train 300). Her har jeg spesielt sett på butansplitterkokeren (24-HA-310).

1.5 Løsningsmetode

Oppgaven baserer seg hovedsakelig på litteraturstudie. I tillegg bruker jeg erfaringene fra fullskalatesten på Kårstø.

2.0 Beskrivelse av bunnkokere i Train 300

Kondensatet som Kårstø mottar fra Sleipner-området blir stabilisert og fraksjonert i et eget anlegg, Train 300. Rundt fire millioner tonn stabilisert kondensat blir årlig produsert i dette anlegget. Etan, propan og butan separeres ut i sine respektive destillasjonskolonner. Ref. /9/

I Train 300 er det 3 bunnkokere som varmer opp væsken. Kokerne er etankoker (24-HA-302), propankoker (24-HA-304) og butansplitterkoker (24-HA-310).

Bunnkokerne er u-rørs varmevekslere som er montert horisontalt. På rørsiden går vanddamp som tilfører varme til prosessen på skallsiden. Mediet som går på skallsiden er hydrokarboner fra bunnen av destillasjonskolonnen. Fra bunnkokeren går produktet tilbake til destillasjonskolonnen.

Det er naturlig sirkulasjon på skallsiden i varmevekslerne. Forskjellen i tetthet i prosessen driver sirkulasjonen.

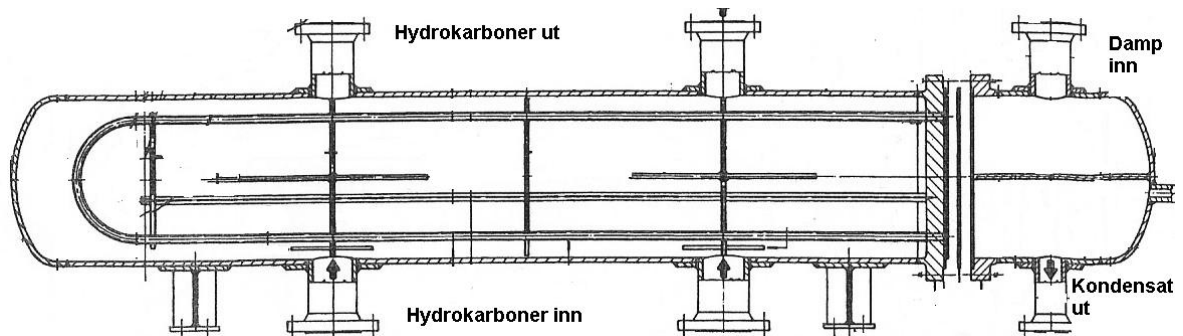
Koketemperaturene i de 3 bunnkokerne er:

Etankoker (HA-302)	84 °C
Propankoker (HA-304)	82 °C
Butansplitterkoker (HA-310)	54 °C

Vanndampen inn har trykk 6,8 bar / 164 °C.

Målte dampmengder til kokerne er:

Etankoker (HA-302)	26 tonn / time
Propankoker (HA-304)	39 ”
Butansplitterkoker (HA-310)	38 ”



Figur 2-0 Skisse av HA-310

Fullstendig skisse av butansplitterkoker (HA-310) i vedlegg 1 og 2.

3.0 Teori om erosjon

Erosjon er slitasje på et materiale som resultat av fluidstrøm med høy hastighet.

Ved veldig høye strømningshastigheter kan erosjonen være generell. Vanligvis finner vi erosjon i nærheten av forstyrrelser i strømmingen. Bend, t-skjøter, pumper, ventiler og innløp og utløp i varmevekslere er steder som ofte angripes.

Erosjon er avhengig av miljøfaktorer og metallegenskapene.

Miljøfaktorer er:

- Strømningshastighet. Denne blir ofte ansett som den viktigste miljøfaktoren. For mange metaller finnes en kritisk hastighet. Under denne hastigheten er metalltapet neglisjerbart, mens over den kritiske hastigheten øker metalltapet med stigende hastighet.
- Temperatur. Generelt øker korrosjonsraten med økende temperatur.
- pH. Effekten av pH varierer med metallet og miljøet. Ved lav pH går korrosjonshastigheten raskere pga. at elektronene fra det oksiderte jernet har mange mottakere (H^+). Ved alkalisk løsning ($pH > 7$) vil hydroksidutfelling være dominerende. Erosjon på stål minimeres ved pH på 9 eller høyere. Ref. /5/
- Korrosivitet. Generelt øker metalltapet med økende korrosivitet på fluidet. Her kan strømningshastigheten spille inn. Høye strømningshastigheter kan øke korrosjonsraten dersom fluidet inneholder korrosjonsfremmende komponenter som oksygen hvis materialet er stål. Tilsvarende kan høye strømningshastigheter senke korrosjonsraten dersom fluidet inneholder inhibitorer. Inhibitorer er passiverende stoffer, eksempelvis natriumsilikat som danner et passiverende oksidsjikt på aluminium.

Ref. /1/

Oksidsjiktet som dannes på metallene er av stor betydning for motstanden mot erosjon. Hvor fort filmen dannes og dens mekaniske egenskaper er viktig. Ved varierende



temperaturer er det viktig at filmen har samme utvidelseskoeffisient som stålet, ellers kan det oppstå spenninger i filmen som fører til at den sprekker. Det er ikke bare oksidsjikt som dannes på passive metaller som rustefrie stål og titan som virker beskyttende. Magnetittsjiktet (Fe_3O_4) som dannes på jern vil også beskytte mot erosjon.

Avhengig av miljø og forhold kan vi gruppere erosjon i:
Dråpeerosjon, turbulenskorrosjon, kavitasjonskorrosjon og slitasjekorrosjon.

3.1 Dråpeerosjon

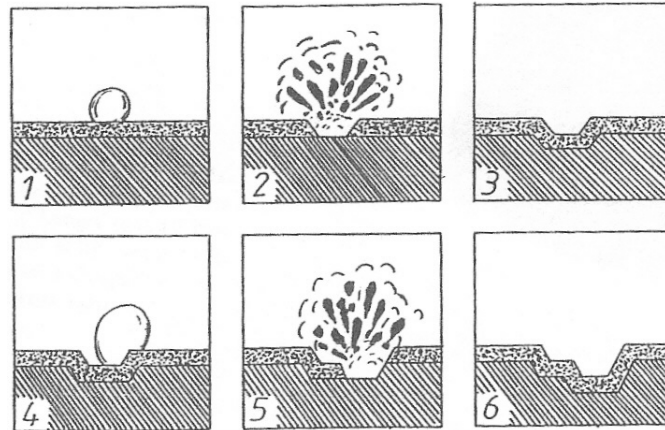
Damp som inneholder kondensatdråper kan være spesielt skadelig for stål. "Dersom en har væskedråper som treffer ei metallflate med høy hastighet vil en få store trykkstøt som kan gi mekanisk avvirkning av korrosjonsproduktet. I tillegg vil en få skjærspenninger når væsken strømmer utover fra treffstedet, og disse kan bidra til å fjerne korrosjonsproduktet". Stadig dannelse av nytt oksidsjikt fører til korrosjon av metallflaten. Ref. /5/

3.2 Turbulenskorrosjon

Det oppstår turbulens dersom vi har høy strømningshastighet ($\text{Re} > 2300$), ved plutselige tverrsnittsendringer og ved fremspring i rørveggen. Strømvirvlene som turbulensen skaper kan rive løs oksidsjikt som ikke er spesielt sterke. Turbulenskorrosjon er vanlig i innløp og utløp av varmevekslere. Ref. /2/

3.3 Kavitasjon/kondensslag

Damp som treffer kondens fører til kondensslag. Kondensslag har samme virkemåte som kavitasjon. Der kaviteten imploderer blir den beskyttende filmen slått i stykker. Kavitasjon er dannelsen av små dampbobler som imploderer øyeblikkelig. Kavitasjonsskaden stammer fra kreftene som frigjøres ved implosjon av boblene. Implosjonene sliter på oksidlaget og kan river vekk partikler fra materialet. Skadene vil begrense seg til områdene der boblene kollapser, vanligvis umiddelbart nedstrøms etter lavtrykkssonen. Ref. /1/



Figur 3-3 Skjematisk fremstilling av mekanismen ved kavitasjon - Ref. /2/

3.4 Inkubasjons- og propageringstid

Både dråpeerosjon og kavitasjon har en tidsavhengighet. I inkubasjonsperioden er liten eller ingen skade mulig å oppdage. Når inkubasjonstiden er over kan metalltapet stige kraftig. Etter å ha nådd en maksimumsrate kan metalltapet reduseres eller fluktuere uforutsigbart. Propageringstiden er tidsrommet fra inkubasjonstiden er over til skaden har nådd en viss størrelse, eksempelvis at det går hull på et rør.

Ved kavitasjon vil inkubasjons- og propageringstiden avhenge av antall bobler som kollapser, energien som blir overført ved kollaps av en boble og materialeegenskaper.

Ved dråpeerosjon er det flere faktorer som spiller inn. Den viktigste er hastigheten til den lokale dråpen. Økende dråpehastighet reduserer inkubasjonstiden. Økende dråpestørrelse har tilsvarende effekt. En tredje faktor er vinkelen som dråpen treffer materialet i. 90 grader er minst gunstig. Materialeegenskaper er en fjerde faktor. Ref. /6/

3.5 Stållegeringer

Karbonstål er et lavlegert stål. Det vil si at det er tilsatt få legeringselementer for å forbedre egenskapene.

Rustfritt stål er høylegert og er tilsatt store mengder legeringselementer. Et viktig legeringselement er krom. For at stålet skal regnes som rustfritt må det inneholde minimum 13 % krom. Krom reagerer med oksygen og danner et passiverende oksidsjikt på overflaten som beskytter mot videre korrosjon.

AISI 316 er et austenittisk stål som i tillegg til krom inneholder nikkel og molybden. Molybden gjør at AISI 316 under visse forhold har god motstand mot pitting korrosjon



forårsaket av klorider. Dette forutsetter blant annet at stålet ikke utsettes for spaltekorrosjon (stillestående vann i spalte).

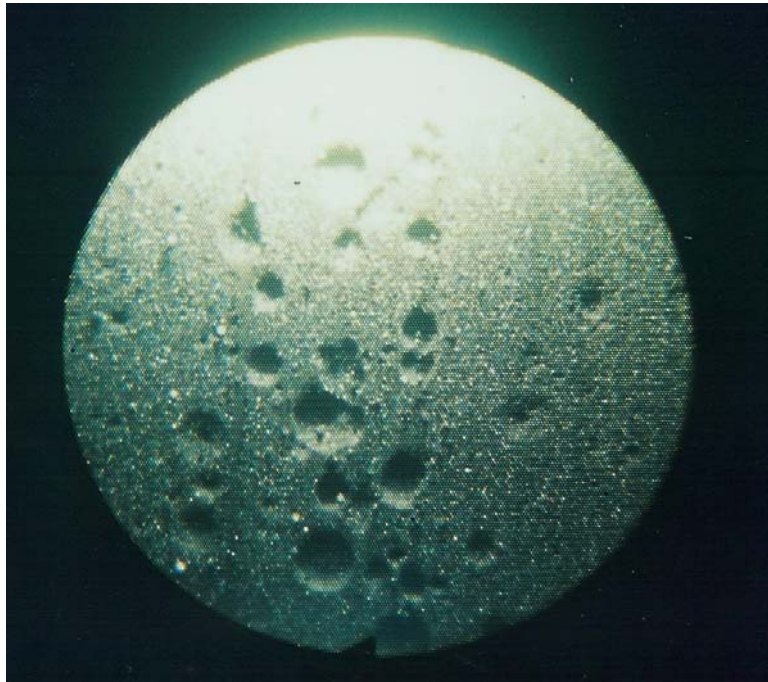
Superduplex består av 50/50 austenitt og feritt. Superduplex er dobbelt så sterkt som AISI 316 og har gode korrosjonsegenskaper mot blant annet erosjon ved relativt høye strømningshastigheter.

Ref. /3/

4.0 Situasjonen

4.1 Inspeksjon i 1996

Etter 3 år i drift ble det funnet korrosjonsskader i kokerne i Train 300. Rørsatsene var da av karbonstål. I butansplitterkoker (HA-310) fant man skader i rørsatsen på omtrent samme sted i rørene, om lag 1 meter fra innløp.



Bilde 4-1 Korrosjon rørsats i HA-310 (1996)

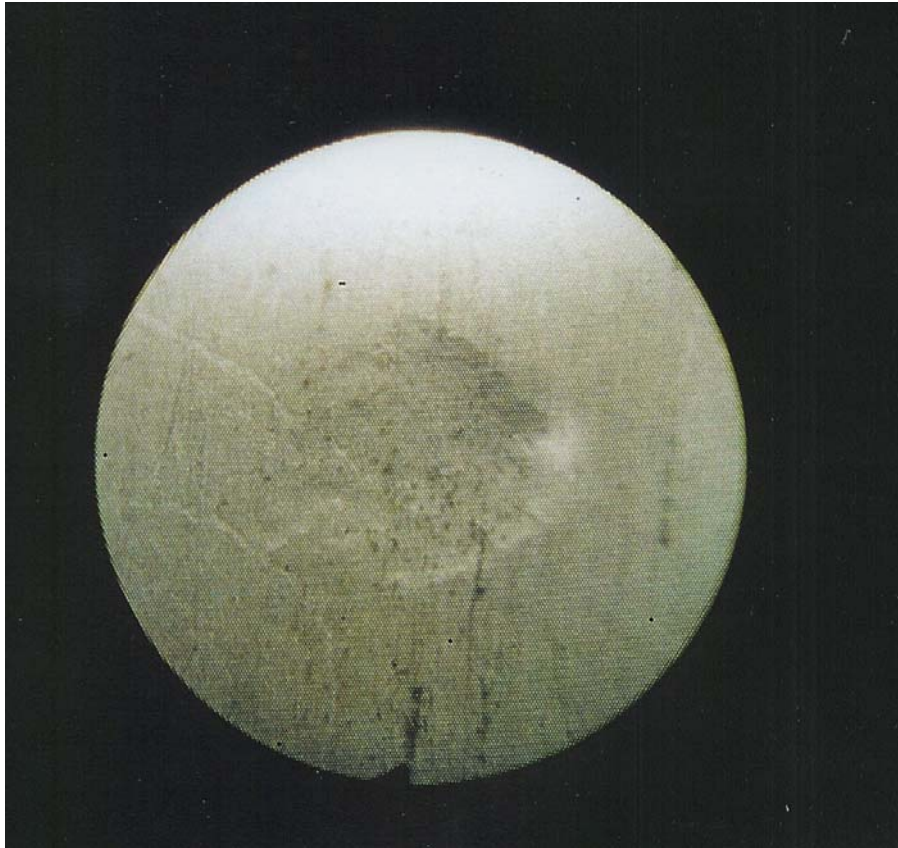
Dybden på gropene var vanskelig å anslå ved bruk av fiberoptikk, men skyggene viser tydelig at det er groper. Det ble også funnet skader ved utløp, men av mindre omfang. Området som ble kontrollert er begrenset til 1,8 meter fra inn- og utløp da dette er maksimal innstikkslengde på instrumentet.



Ved dampinnløp ble det funnet korrosjon på deleplate. Korrosjonsdybden varierte fra 0,2 til 0,4 mm. Ref. /7/

Det ble funnet tilsvarende skader i etankoker (HA-302) og propankoker (HA-304).

4.2 Inspeksjon av butansplitterkoker (HA-310) i 1998 og 2004



Bilde 4-2.1 Mulig korrosjon rørsats HA-310 (1998)

Ved inspeksjon av HA-310 i 1998 ble det funnet noen lokale nedtyninger, se bilde 4-2.1. Oppfølging i 2004 viser tilnærmet samme skader som i 1998. Dybdenyansen fra 1998 til 2004 er vanskelig å anslå. Utvendig diameter på rørsatsen er 19,05 mm (3/4"). Tykkelsen er 2,11 mm. Innerdiameteren er da 14,83 mm. En tilnærming viser at 100 mm på bilde 4-2.2 tilsvarer 14,83 mm. Forholdet blir da 1:6,74. Avtrykket klokken 9 på bildet 4-2.2 er om lag 10 mm i lengde og bredde.

$$\frac{10}{6,74} = 1,5 \text{ mm}$$



Avtrykket er altså ca 1,5 mm, eller omtrent som et knappenålshode. Det viser at det er vanskelig å bedømme om det er en skade. Boblene som ses på bildet klokken 7 er fuktighet.



Bilde 4-2.2 Mulig korrosjon i rørsats HA-310 (2004)



5.0 Mulige årsaker til skader

5.1 Regulering av pådrag gir kondensslag/kavitasjon

Vanligvis bestemmes pådraget i varmevekslere ved å regulere tilførselen av damp. I noen oppsett velger en å regulere pådraget ved å tillate kondensat på dampsiden. I slike oppsett regulerer en ventil på utløpssiden kondensatnivået på dampsiden. Kondensatet endrer heteflaten og dermed arealet som påvirkes av dampen. Effekten er at utløpstemperaturen på mantelsiden kontrolleres.

Når pådraget reguleres ved å bestemme kondensatnivået er det viktig at varmeveksleren er designet med tanke på formålet.

I det opprinnelige systemet skulle pådraget reguleres ved tilførselen av damp. Bunnkokerne var imidlertid overdimensjonerte. Dette er et vanlig problem. Ved dimensjonering av varmevekslere legges det til foulingfaktorer (i tilfelle begroing) og sikkerhetsfaktorer for å være sikre på at varmeveksleren er stor nok. Heteflaten blir da større enn nødvendig. Dette medfører at varmeoverføringskapasiteten også blir større enn den som behøves. Damptrykket blir lavere enn i en varmeveksler som er perfekt dimensjonert for oppgaven. Det lavere damptrykket vil føre til lavere gjennomstrømning av kondensat enn antatt. I dette tilfellet ble damptrykket så lavt at gjennomstrømningen av kondensat stoppet opp og en fikk stall. Kondensat samlet seg opp inntil dampventilen åpnet seg igjen. Denne driftsmåten gir svingninger og kondensslag.

Driftsfilosofien ble etter kort tid lagt om til å regulere pådraget via kondensatnivået. Damptrykket inn ble satt til 3,5 bar og kondensatventilen ble styrt av temperaturen i kolonnen. Det oppstod da problemer med innbyrdes svingninger mellom ventilene.

Driftsfilosofien ble endret til dagens. Nå er damptrykket inn satt til 6,8 bar og kondensatventilen blir styrt av temperaturen i kolonnen.



5.2 Miljøfaktorer

5.2.1 Strømningshastighet

Strømningshastigheten er som nevnt en viktig miljøfaktor. Dersom strømningshastigheten er større en den kritiske øker metalltapet med økende hastighet. Da kokerne ikke er like har jeg som en forenkling kun beregnet strømningshastighet i butansplitterkokeren (HA-310).

Tørrhet i prosent	Spesifikt volum damp (m ³ /kg)	Volumstrøm per rør (m ³ /s)	Strømningshastighet (m/s)
100	0,280401	0,00285	16,52
90	0,252471	0,00257	14,88
80	0,224542	0,00228	13,23
70	0,196612	0,00200	11,59
60	0,168683	0,00172	9,94
50	0,140754	0,00143	8,29
40	0,112824	0,00115	6,65
30	0,0848947	0,00086	5,00
20	0,0569653	0,00058	3,36
10	0,02900359	0,00030	1,71
1	0,00389945	0,00004	0,23

Tabell 5-2-1 Strømningshastighet i HA-310 ved tørr rørsats

Antar her ingen trykktap gjennom varmeveksleren, ingen plomberte rør og tørr rørsats.

Om rørsatsen er tørr vil ha påvirkning på strømningshastigheten. Kolonnen har et varierende effektbehov. Pådraget i kokeren reguleres ved å endre den effektive heteflaten. Når effektbehovet er lavt reduserer kondensen heteflaten. Volumstrømmen av damp per rør øker, med økt strømningshastighet som resultat.

Heteflate i prosent	Spesifikt volum damp (m ³ /kg)	Volumstrøm pr rør (m ³ /s)	Strømningshastighet (m/s)
100	0,280401	0,00285	16,52
80	0,280401	0,00357	20,65
60	0,280401	0,00475	27,54

Tabell 5-2-2 Strømningshastighet ved mettet damp og fuktig rørsats

For beregning av strømningshastigheter, se vedlegg 3.

Skadde rør som er plombert vil på tilsvarende måte føre til at strømningshastigheten øker.

Kritisk hastigheter i ferskvann/damp:

Karbon stål 2,1 m/s

Rustfrie stål 30,5 m/s

Ref. /8/



Jeg antar her at AISI 316 har samme kritiske hastighet som rustfritt stål er oppgitt til generelt. Superduplex har nok noe høyere kritisk hastighet på grunn av høyere hardhet enn AISI 316.

Beregningen viser at strømningshastigheten i butankokeren overskrider den kritiske hastigheten for karbon stål. Ved bruk av rørsats i karbon stål får vi altså et metalltap som ikke kan neglisjeres. Rustfrie stål har langt høyere kritisk hastighet enn karbon stål. Ved bruk av rørsats i rustfritt overskrider ikke strømningshastigheten den kritiske. Metalltapet på grunn av strømningshastigheten er da neglisjerbart.

5.2.2 Temperatursvingninger

Stål og oksidsjiktet som dannes på stålet har forskjellige utvidelseskoeffisienter. ”Ved vesentlige temperatursvingninger fører dette til at det blir dannet spenninger i sjiktet som sprekker opp og faller av” Ref. /2/

Dampen på rørsiden av bunnkokerne vil bli kjølt ned fra om lag 164 °C til en kondensasjonstemperatur som tilsvarer koketemperaturen på skallsiden.

Bunnkoker	Dampstemperatur inn	Koketemperatur på skallside	Temperatursvingning
Etan (HA-302)	164 °C	84 °C	80 °C
Propan (HA-304)	164 °C	82 °C	82 °C
Butansplittkoker (HA-310)	164 °C	54 °C	110 °C

Tabell 5-2-2 Temperatursvingning i bunnkokere

Vesentlige temperaturendringer er om lag 540 °C. Ref. /14/

Temperatursvingningene i kokerne er derfor for lave til at vi får noe overflateproblem som skyldes avskalling.

5.2.3 Temperatur og styrke på oksidsjikt

Styrken på oksidsjiktet avhenger av temperaturen. Høye temperaturer svekker oksidsjiktet. ”Temperaturen kan ha svært forskjellige effekter på strømningspåvirket korrosjon. For massetransportkontrollert korrosjon og i de fleste tilfeller øker korrosjonshastigheten med temperaturen” Ref. /5/

5.2.4 pH

Prøver av vannkjemien viser at pH ligger i området 9,2 til 9,8. Som nevnt er pH over 9 gunstig for stål. Dette antyder at vannkjemien ikke er årsak til erosjonen.



6.0 Drøfting årsak

6.1 Skade på rørsats i karbonstål

Innløpsside:

Generell erosjon ville vi observert over et større område. Den kontrollerte lengden av rørene er bare 1,8 meter inn fra innløp og utløp, men jeg mener likevel at vi burde observert erosjon over et større område dersom det var generell erosjon vi hadde.

Turbulenskorrosjon kan vi få i de områdene hvor vi har turbulens. Beregning av Reynoldstall viser at strømmingen er turbulent ved innløpet [vedlegg 3]. Dersom skaden er forårsaket av turbulenskorrosjon burde den ha startet nærmere innløpet av rørene.

Antar derfor at skaden i hovedsak skyldes kondensslag/ kavitasjon. Samtidig er det i innløpet strømningshastigheten er størst. Den faller med økende grad av kondensert damp. Det kan derfor tenkes at dråpeerosjon er en medvirkende faktor.

Utløpsside:

Skadene som ble observert ved utløp var av mindre omfang enn skadene ved innløp. Vi ser av tabell 5-2-1 at strømningshastigheten synker med kondenseringsgraden til dampen. Ved utløpet er strømningshastigheten lav. Jeg tror derfor ikke dråpeerosjon spiller inn her. Dersom skaden skulle vær forårsaket av turbulenskorrosjon fra utløpet burde skaden vært nærmere utløpet.

6.2 Skade på deleplate

Ved innløpet til varmeveksleren kan dampen inneholde væskedråper. Strømmingen er turbulent [vedlegg 3]. Jeg tror at skadene på deleplaten er forårsaket av at væskedråper som treffer deleplaten og fører til dråpeerosjon og/eller av turbulenskorrosjon.

6.3 Skade på rørsats i superduplex

Nedtyningen i den nye rørsatsen kan være starten på en kavitasjons/erosjons skade.



7.0 Valg av design for å motvirke korrosjon

Ved valg av design kan vi enten forsøke å fjerne årsaken til at vi får korrosjon eller velge et materiale som har større motstandsevne mot korrosjonen.

Utenom materialvalg kan vi motvirke erosjon med en god konstruksjon som reduserer hastighet, turbulens, støtintensitet og støthypighet. Ref. /5/

Endring av størrelse på ventiler har allerede blitt utført for å redusere uroen i kokerne.

Oppgaven er som nevnt begrenset til å se på materialvalg, men jeg gir her en kort oversikt over noen mulige endringer av konstruksjon/driftsmåte:

Kondenspumper

For å fjerne kondensslag kan det monteres pumper som holder rørsatsen tørr. Ved montering av pumper må det installeres dobbelt sett, ett for drift og ett for backup. Dette gjør det til et kostbart og lite aktuelt alternativ. Ref. /10/

Redusert damptrykk/temperatur

Ved montering av kondenspumper kan damptrykket/temperaturen på rørsiden senkes. Dette fører til lavere temperatursvingninger. Det er tvilsomt om det har noen praktisk betydning da temperaturredifferansene fra før er lave.

Redusere størrelse på rørsats

Beregninger utført av Den Norske Kjeleforening viser at en mindre rørsats som gjør at kokerne kan kjøres tørre ved 2,5 bara fører til en utblåsning av damp på 10 tonn / time eller 8.300.000 kr / år [Vedlegg 4]. Denne driftsmåten kan dermed ikke forsvares.

7.1 Materialeegenskaper

Materialeegenskaper som har betydning for erosjonsmotstanden er deformasjonsenergi til brudd (definert ved arealet under spennings-tøyingskurven), hardhet, strekkfasthet, utmattingsfasthet, duktilitet, kornstørrelse, kaldbearbeidingssegenskaper og korrosjonsmotstand. Med unntak av økende kornstørrelse øker erosjonsmotstanden med økende verdi av de andre egenskapene. Ref. /4/

Hardhet blir av mange sett på som den egenskapen som har best korrelasjon med erosjonsmotstanden. Som en forenkling vil jeg derfor bruke hardhet og kritisk hastighet når jeg sammenligner hvilket materiale som er mest gunstig med tanke på å motstå påkjenningene fra kavitasjon og erosjon i kokerne.

	Hardhet (HB)	Kritisk hastighet
Karbonstål	120	2,1 m/s
AISI 316	217	30,5 m/s
Superduplex	310	”



Ref. /11/, /12/

Som diskutert over er det bare de rustfrie legeringene AISI 316 og superduplex som har kritisk hastighet som er høyere enn strømningshastigheten i kokerne. Karbonstål har også langt lavere hardhet enn de rustfrie stålene. Det skiller seg dermed ut som mindre egnet til formålet. Ut fra mine kriterier er superduplex det beste materialet å bruke i rørsatsen.

7.2 Levetid i fullskalatest

Rørsatsene i karbonstål i Train 300 ble byttet ut på grunn av korrosjon etter 4 år. Rørsatsene i superduplex har nå vært i drift i 8 år uten større antydninger til korrosjon. Levetidene kan ikke sammenlignes direkte uten forbehold siden driftsforholdene ble endret flere ganger de første 4 årene.

Dersom vi tenker oss at skadene på rørsatsene i karbonstål oppstod som følge av økningen i damptrykk / temperatur vil levetiden være enda kortere enn 4 år når vi sammenligner med rørsatsene i superduplex. Dette trenger ikke være tilfelle. Skader oppstår når inkubasjonstiden er over, noe som tilfeldig kan ha falt sammen med endringen i driftsforhold. Skadene på rørsatsene kan altså tenkes å ha skjedd uavhengig av de endrede driftsforholdene.

I andre varmevekslere har det blitt montert rørsatser i AISI 316, men levetiden på disse er heller ikke direkte sammenlignbare på grunn av at disse varmevekslerne har litt andre driftsforhold enn Train 300. Rørsatsene i AISI 316 har, som superduplex, hatt en mye bedre motstand mot korrosjon enn karbonstål.

8.0 Økonomiske betraktninger

For å evaluere hvilket materialvalg som er det mest lønnsomme vil jeg bruke LCC analyse. LCC analyse er en metode for å kvantifisere kostnadene knyttet til valget av et materiale eller konstruksjon. Målet er å velge materialet/konstruksjonen som gir de laveste kostnadene.

LCC består generelt av følgende komponenter:

$LCC = \text{Innkjøpskostnader} + \text{Installasjonskostnader} + \text{Vedlikeholdskostnader} + \text{Utskiftningskostnader} + \text{Kostnader ved tapt produksjon} + \text{Utrangeringsverdi}$

Ref. /13/

Forenklinger / kommentarer til komponentene

- **Installasjonskostnader.** Antar at disse er lik null.



- **Vedlikeholdskostnader** er kostnader knyttet til demontering/forberedelser, inspeksjon og remontering av koker. Estimert kostnad mellom 130.000 – 170.000 NOK. Bruker henholdsvis 24 mnd og 48 mnd inspeksjonsintervall på karbonstålrørsats og superduplexrørsats.
- **Kostnader ved tapt produksjon.** Svikt i en av bunnkokerne i Train 300 fører til nedstengning. Kostnaden med en ikke planlagt stopp i Sleipner/T300 er omlag 23,5 millioner NOK pr dag. Driftssikkerheten blir dermed en viktig parameter ved valg av rørmateriale. Det tar 10-14 dager å bytte ut en defekt rørsats.
- **Utrangeringsverdi** av rørsatsene antas lik null.

Tabell 8-0 Oppsummering kostnader i nåverdi for HA-310

	Karbonstål	Superduplex
Innkjøpskostnader	1 150 000	1 900 000
Inspeksjonskostnader	640 168	308 457
Utskiftningskostnader	1 607 055	0
Sum kostnader	3 397 223	2 208 457
Besparelse ved superduplex rørsats		1 888 767

For utregning se vedlegg 5 og pris rørsatser vedlegg 6.

Forklaringer / kommentarer til utregning

- Levetid karbonstålrørsats antas lik 5 år. Levetid for superduplexrørsatsen antar jeg er 14 år.
- Ønsket levetid for rørsatsene har jeg som en forenkling satt lik den antatte levetiden for superduplexrørsatsen. I en LCC analyse skal levetiden i dette tilfellet egentlig settes lik driftstiden for Train 300.
- Kapitalkostnad lik 5 %. Ser vekk fra inflasjon og skatt.
- Ser vekk fra kostnader ved tapt produksjon på grunn av den store usikkerheten knyttet til denne. Dersom vi eksempelvis regner 10 % sannsynlighet for produksjonsstans i 14 dager i år 11 vil dette gi kostnader med en nåverdi på kr 19 235 949.
- Utskiftningskostnadene er basert på dagens prisnivå. Fremtidens materialkostnader er vanskelig å forutsi på grunn av volatilt marked.
- Tilbudet som ble brukt som grunnlag for beregningen av LCC for superduplexrørsatsen er gitt for SAF2205, men denne har omtrent samme materialkostnad som superduplex.
- Antagelsen om at installasjonskostnadene er null favoriserer rørsatsen i karbonstål da den må skiftes ut flere ganger i løpet av 14 år.



9.0 Konklusjon

Fullskalatesten viser at rørsatser i superduplex og AISI 316 har mye bedre egenskaper mot korrosjonsformene kavitasjon og erosjon enn karbonstål.

LCC analysen viser at rørsats i superduplex er det alternativet som gir laveste kostnader. Det er en del usikkerhet knyttet til levetiden til rørsatsene og risikoen for skader. Selv om vi reduserer inspeksjonsintervallet for å redusere usikkerheten når superduplexrørsatsen eldes, vil den fortsatt ha de laveste kostnadene.



10.0 Referanseliste

Bibliografi:

- /1/ Robert D.Port, Harvey M. Herro. *The Nalco Guide to boiler failure analysis* (McGraw-Hill, New York, 1991).
- /2/ Olsen A. *Korrosjon 1* (Universitetsforlaget, Oslo, 1983)
- /3/ Tveit, A. *Korrosjonsteknologi (HSH, Stord, 2005)*
- /4/ Lichtman, J.C., Kallas, D.H., Rufolo, A. *Handbook on corrosion testing and evaluation* (John Wisley & Sons, 1971)

Rapporter:

- /5/ *Erosjonskorrosjon*, Einar Bardal (Sintef, 1993).
- /6/ *Steam side droplet erosion in titanium tubed condensers- experiences and remedies*, Jüri O. Tavast (ABB STAL)
- /7/ *Inspeksjonsrapport*, K.A.Ekornsæter (Statoil, 1996)
- /8/ *Summary of Corrosion Topics*, Mr. Schillmoller (International Nickel Co., 1966)

Internett:

- /9/ <http://www.statoil.com>
- /10/ Fjerning av kondens - Spirax Sarco
http://www.spiraxsarco.com/learn/default.asp?redirect=html/2_3_01.htm
- /11/ Hardhet karbon stål
<http://www.ditec-dichtungen.de/english/gebraeuchlicheWerkstoffe.htm>
- /12/ Hardhet AISI 316 og superduplex
<http://www.atlasmetals.com.au/index2.html>
- /13/ Life Cycle Cost
<http://www.atlasmetals.com.au/index2.html>



Bedrifter/ personer:

/14/ Høgskolen Stord / Haugesund Audun Tveit audun.tveit@hsh.no

11.0 Bilag

Vedleggsliste:

- [V1] Tegning 24-MA 3812
- [V2] Tegning 24-MD 3830
- [V3] Beregning av strømningshastigheter
- [V4] Beregning av Den Norske Kjeleforening
- [V5] Life Cycle Cost analyse
- [V6] Priser på rørsatser

Beregning av strømningshastigheter i HA-310

Ytterdiameter rør 19,05 mm
 Tykkelse 2,11 mm
 Innerdiameter rør 14,83 mm
 Areal pr rør 0,000172644
 Antall rør i vekslar 1038

Butan tonn/time damp 38 kg/s damp 10,56

Tabell 5-2-1, Dampens tørrhet

100 %	Spesifikt volum m ³ /kg (6,8 bara)	Volumstrøm m ³ /s	Volumstrøm m ³ /s (pr rør)	Hastighet m/s	dynamisk viskositet Pas	Densitet kg/m ³
90	0,280401	2,9610	0,00285	16,52	1,44674E-05	3,56632109
80	0,252471	2,6661	0,00257	14,88		
70	0,224542	2,3712	0,00228	13,23		
60	0,196612	2,0762	0,00200	11,59		
50	0,168683	1,7813	0,00172	9,94		
40	0,140754	1,4864	0,00143	8,29		
30	0,112824	1,1914	0,00115	6,65		
20	0,0848947	0,8965	0,00086	5,00		
10	0,0569653	0,6016	0,00058	3,36		
1	0,02900359	0,3063	0,00030	1,71		
	0,00388945	0,0412	0,00004	0,23		

Tabell 5-2-2 (Metttet damp, 6,8 bara)

Hefeflate (%)	m ³ /kg	m ³ /s	m ³ /s (pr rør)	m/s
100	0,280401	2,9610	0,00285	16,52
80	0,280401	2,9610	0,00357	20,65
60	0,280401	2,9610	0,00475	27,54

Forklaring Spesifikt volum og viskositet for dampen er hentet fra Spirax Sarco's tabeller (ref. 10). Trykk er 6,8 bara. Antar at dampstrømmen er likt fordelt i alle rørene.

Reynoldstall

Innløp i rør: Re = 60404 Større enn 2300, dvs turbulent

Foran ledeplate:

Diameter 1397 mm
 Tverrsnittsareal 0,766 m²
 Hydraulisk diameter 854 mm
 Strømningshastighet 3,87 m/s

Re = 813765 Større enn 2300, dvs turbulent

Strømmingen ved tørr damp inne i rørene og strømmingen ved ledeplate er turbulent

Redusert størrelse på rørsats

Metning 2,5 bara	=	125 °C
Dagens midlere kondensattemperatur	=	<u>80 °C</u>
	Δt	<u>45 °C</u>

Kondensatmengde	120 t/h =	33,3 kg/s
$\Delta Q = 4,2 \times 45 \times 33,3$	=	<u>6,3 MW</u>

Dette motsvarer en damputblåsing på	10 t/h
-------------------------------------	--------

Med energipris	15 øre/kWh gir dette	945 kr/h
eller		8.300.000 kr/år

Life Cycle Cost analyse

antar ved karbonstål:
 5 års levetid
 24 mnd inspeksjonsintervall

antar ved superduplex:
 14 års levetid
 48 mnd inspeksjonsintervall

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	sum	utbyting
inspeksjonskostnader	150 000				1 900 000										0	2 757 055
innkjøpskostnad	1 150 000														0	1 607 055
rente	0,05														0	640 168
karbonstål	0															
innkjøpskostnad	1 150 000				1 150 000					1 150 000						
inspeksjon	0	150 000		150 000	150 000	150 000	150 000	150 000	0	150 000	150 000	150 000	150 000	0		
kontantstrøm	1 150 000	0	150 000	1 150 000	1 150 000	1 150 000	1 150 000	1 150 000	0	1 150 000	1 150 000	1 150 000	1 150 000	0		
nåverdi	1 150 000	136 064	0	123 405	901 055	111 932	0	101 526	0	706 000	87 702	0	79 548	0		
sum	3 397 223															
nåverdi innkjøpskostnader	1 150 000	0	0	0	0	0	0	0	0	706 000	0	0	0	0	0	2 757 055
nåverdi inspeksjonskostnader	0	136 064	0	123 405	0	111 932	0	101 526	0	0	87 702	0	79 548	0	0	640 168
superduplex																
innkjøpskostnad	0															
inspeksjon	1 900 000			150 000				150 000				150 000				
kontantstrøm	1 900 000	0	0	150 000	0	0	0	150 000	0	0	0	150 000	0	0		
nåverdi	1 900 000	0	0	123 405	0	0	0	101 526	0	0	0	89 526	0	0		
sum	2 208 457															
nåverdi innkjøpskostnader	1 900 000	0	0	123 405	0	0	0	101 526	0	0	0	89 526	0	0	0	1 900 000
nåverdi inspeksjonskostnader	0														0	308 457
Besparelse superduplex																
																<u>1 188 767</u>

Besparelse superduplex

Forklaring til beregning

Jeg har sett vekk fra inflasjon og skatt. Nåverdien for år n er da gitt ved formelen $1/(1+r)^n$.

Pris rørsatser

Vi viser til din henvendelse og kan tilby:

Alternativ 1

1 stk. Rørsats til Varmevexler E31 med heteflate på ca. 800 m², utført iht. tegning 24-MA-3812 og 24-MD-3830.

Rørsats utført helt i karbonstål, uten SAF 2205 belegg på rørplate.

Heteflaten består av 1038 rør, dim 19,05 x 2,11(14BWG) Rørene vales og sveises til rørplaten.

Tilbudet omfatter ikke montering og trykkprøving av, men dette kan også tilbys

Pris pr. stk. kr. 1.150.000,-

1 stk. Tilsvarende men med alle materialer i SAF2205

Pris pr. stk. kr. 1.900.000,-

Betalingsbetingelser: Etter nærmere avtale

Leveringstid: ca. 20 uker.

Levering netto ekskl. mva. EXW.

Prisene er basert på dagens pris på materialer.

Håper dette kan være til hjelp.

Med vennlig hilsen

Øyvind Hansen

oeyvind.hansen@heat-con.no

HEAT-CON Varmeteknikk AS

Postboks 107, Leirdal

N-1009 OSLO

Telf. +47 23141881, Fax +47 23141889

Mobil +47 97677388