



CHALMERS



Kalkkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer Ett problem under kontroll?

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Filip Söderberg
Linus Sjöman

RAPPORTNR. SI-16/182

Kalkkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer

Ett problem under kontroll?

Filip Söderberg
Linus Sjöman

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2016

Kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer

- Ett problem under kontroll?

Cold corrosion in large marine two-stroke engines

- A problem under control?

Filip Söderberg

Linus Sjöman

© Filip Söderberg, 2016

© Linus Sjöman, 2016

Rapportnr. SI-16/182

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag: B&W 6L90GBE ombord på Atlantic Compass (Sjöman, 2015)

Tryckt av Chalmers

Göteborg, Sverige, 2016

Kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer

Ett problem under kontroll?

Filip Söderberg

Linus Sjöman

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Under finanskrisen år 2008 drabbades sjöfarten av den efterföljande lågkonjunkturen. Många rederier var tvungna att vidta åtgärder för att minska sina utgifter. En följd av detta var att fartyg började framföras med reducerad fart för att minska bränsleförbrukningen. Detta ledde till att tillverkarna av stora tvåtaktsmotorer utvecklade nya modeller som skulle passa de nya driftförhållandena bättre. Designen av dessa nya motormodeller medförde att många av motorerna drabbades av kallkorrosion. Motortillverkare och andra aktörer i branschen jobbade hårt med att identifiera och lösa problemet. Detta har de lyckats relativt bra med även om delar av problemet kvarstår. För att anse kallkorrosionsproblemet vara helt löst behövs djupare förståelse de bakomliggande kemiska processerna. Denna rapport undersöker vad som är de bakomliggande orsakerna till uppkomsten av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer samt vilka åtgärder som finns för att minska eller helt eliminera problemet. Syftet med rapporten är att granska huruvida kallkorrosionsproblemet är löst, och i så fall vilken åtgärd som föredras av motortillverkare. Dessutom undersöks möjliga sidoeffekter av de olika lösningarna. Resultatet som presenteras i rapporten baseras främst på intervjuer med personal hos MAN Diesel & Turbo, Wärtsilä, Winterhur Gas & Diesel, Univar, Maersk Oil Trading Lubricants och Federal-Mogul. Genom att komplettera informationen från intervjuerna med vetenskaplig litteratur och tekniska rapporter ges en övergripande bild av problematiken kring kallkorrosion. Intervjuerna visar att kallkorrosion inte längre är det stora problemet det en gång var då bra lösningar tagits fram. Forskning pågår däremot fortfarande då åtgärderna har förbättringspotential.

Nyckelord: korrosion, kallkorrosion, sjöfart, slitage, slow-steaming, smörjolja, svavel, svavelsyra, tvåtaktsmotorer.

Abstract

During the financial crisis in 2008 the shipping industry was heavily affected by the following recession. Many shipping companies had to take action to reduce their expenses. As a result of this, vessels began slow-steaming to reduce their fuel consumption. This resulted in the development of new engine models from the manufacturers to better cope with the new operating conditions. The design of the new engine models resulted in that many engines were affected by cold corrosion. The manufacturers of marine engines and other key players worked hard identifying and solving the problem and have done so with good result even though parts of the problem still remain. To consider the cold corrosion problem completely solved, more knowledge about the underlying chemical processes is needed. This report explores contributing factors to the origin of the problem as well as what actions can be taken to minimize or completely eliminate cold corrosion in large marine two-stroke engines. The purpose of the report is to examine whether the cold corrosion problem is solved and, if so, which method is preferred by the engine manufacturers. Furthermore, the possible side effects of the solutions are investigated. The result presented in the report is primarily based on interviews with personnel at MAN Diesel & Turbo, Wärtsilä, Winterhur Gas & Diesel, Univar, Maersk Oil Trading Lubricants and Federal-Mogul. By completing the information from the interviews with scientific literature and technical reports, an overview of the issues regarding cold corrosion is provided. The interviews show that cold corrosion no longer is the major problem it once was thanks to good solutions. However, research in the area is still in progress as there is room for improvement.

Keywords: corrosion, cold corrosion, shipping, wear, slow-steaming, lubrication oil, sulphur, sulphuric acid, two-stroke engines.

Förord

Författarna vill tacka projektets handledare Mats Jarlros, samt de på MAN Prime-Serv, MAN Diesel & Turbo, Winterthur Gas & Diesel, Wärtsilä, Univar, Maersk Oil Trading Lubricants och Federal-Mogul som bistått med information.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Förord	iii
Figurförteckning	Error! Bookmark not defined.
Tabellförteckning	vi
1 Introduktion/Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Frågeställning	2
1.3 Avgränsningar.....	2
2 Teori	3
2.1 Bakgrund till slow-steaming.....	3
2.2 Motorer med lång slaglängd.....	4
2.3 Smörjolja	4
2.4 Kemi	5
2.4.1 Svavel	5
2.4.2 Kallkorrosion.....	6
2.4.3 Cylindersmörjolja.....	6
2.4.4 Bränsle.....	6
2.5 Komponentslitage.....	7
2.6 Metoder för att reducera kallkorrosion	10
2.6.1 Cylindersmörjolja.....	10
2.6.2 Temperaturhöjning av cylinderfodret.....	14
3 Metod	16
4 Resultat	20

4.1	<i>Smörjoljebaserade åtgärder</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
4.2	<i>Temperaturbaserade åtgärder</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
4.3	<i>Inverkan av motorns geometri och dess omgivningsförhållanden.....</i>	20
4.4	<i>Bränslets inverkan.....</i>	20
5	Diskussion	23
6	Slutsatser	26
7	Litteraturförteckning.....	27

Figurförteckning

Figur 1: Samband mellan ett fartygs fart och framdrivningseffekt baserat på beräkningar med.....	3
Figur 2: Uppskattad daggpunkt för svavelsyra, som funktion av tryck och svavelinnehåll i bränslet (Hengeveld, Schenk, & Aabo).....	5
Figur 3: Spolportsinspektion B&W 6L90GBE (Sjöman, 2015)	9
Figur 4: Exempel på Feed rate sweep test (MAN Diesel & Turbo, 2014).....	11
Figur 5: Alkaliska avlagringar på kolv och kolvringar (Federal-Mogul, 2016)	13

Tabellförteckning

Tabell 1: Vanlig kemisk sammansättning av HFO (Chevron Marine Lubricants, 2016)	7
Tabell 2: Ungefärlig prislista för komponenter till MAN Diesel & Turbo 6G80ME-C9.2 (MAN PrimeServ, 2016)	8
Tabell 3: Rekommendationer gällande svavelhalt och BN-tal från MAN Diesel & Turbo (Jensen & Jakobsen, 2014)	12

1 Introduktion

Miljökraven som ställs på handelsfartygen blir allt hårdare (International Maritime Organization, 2016). Rederier och motortillverkare gör allt i sin makt för att möta dessa krav på ett så ekonomiskt sätt som möjligt. Som ett steg i att ytterligare reducera fartygs miljöpåverkan skapades av IMO (International Maritime Organization) det index kallat Energy Efficiency Design Index (EEDI) som ställer krav på fartygs energieffektivitet. Målet med detta är att sänka energiförbrukningen hos större delen av världshandelsflottan med tio procentenheter vart femte år (International Council on Clean Transportation, 2011). På senare år har detta lett till att fartygen reducerat sin marschfart för att minska både utsläpp och bränsleförbrukning (Wiesmann, 2010). Det är inte bara på grund av miljökraven som rederier väljer att reducera marschfarten på sina fartyg, sjöfartsbranschen har sedan tiden kring finanskrisen år 2008 varit hårt ekonomiskt ansträngd. Bränslepriser steg initialt, operationella kostnader har stigit, men konkurrensen och utbudet har samtidigt ökat då många nya fartyg färdigställts. Fartygen beställdes under den tidigare högkonjunkturen och eftersom det kan ta flera år mellan beställning och sjösättning av fartyg kunde inte mycket göras för att stoppa överskottet (Wiesmann, 2010).

För större fartyg, som nästan uteslutande använder sig av större lågvarviga tvåtaktsmotorer, är den största utgiften bränslet för framdrivning (Woodyard, 2004). Vidare är det enklaste sättet att sänka bränsleförbrukningen att reducera farten, då en reduktion av farten minskar den krävda framdrivningseffekten och därför bränsleförbrukningen hos framdrivningsmotorn drastiskt. Då fartygen går med reducerad fart reduceras vanligen även temperaturen i motorns förbränningsutrymme. Den reducerade temperaturen bidrar till en minskning av bildningen av kväveoxider (NO_x), vilket ses som positivt ur miljösynpunkt (Woodyard, 2004). Det svavel som finns i nästintill alla fossila bränslen (Statens Hydrologiska och Meteorologiska Institut, 2012; Zumdahl & DeCoste, 2013) och det vatten som alltid är närvarande i förbränningen (American Bureau of Shipping, 2001) reagerar tillsammans under förbränningsprocessen och bildar svavelföreningar. En för stor temperaturreduktion kan därför leda till att dessa svavelföreningar kondenserar mot ytorna i förbränningsutrymmet i form av svavelsyra och svavelsyrighet efter att förbränningen skett (Priest & Sautermeister, 2012). Förekomsten av detta fenomen ökar också ju högre svavelhalt motorns bränsle har, mer tillgängligt svavel ger potentiellt större mängd svavelföreningar.

Ett av miljökraven som kontinuerligt skärps är det gällande svavelhalter i bränslet. På senare år har de tillåtna svavelhalterna i framförallt svavelutsläppskontrollerade områden (SECA) drastiskt minskats (Transportstyrelsen, 2016) vilket eventuellt kan minska förekomsten av problemet. Både svavelsyra och svavelsyrighet är frätande och kan leda till korrosivt slitage på framförallt cylinderfoder och kolvringar. Det sliter också på kolvar och avgasventiler, vilket leder till att komponenter behöver bytas ut i förtid. Den kemiska reaktionen som ger upphov till detta slitage benämns som kallkorrosion. Problemet är inte nytt och de flesta motortillverkare önskar en kontrollerad nivå korrosivt slitage (Kuiken, 2012). Anledningen till och omfattningen av det önskvärda korrosiva slitaget beskrivs närmare under punkt 2.4.2.

Det finns två huvudmetoder för att förhindra det oönskade korrosiva slitaget. Den första innebär att neutralisera svavelföreningarna innan de orsakar skada. Denna metod utgör grunden för att byta till en cylindermörjolja med högre Base Number-tal (BN-tal) vilket innebär ökad förmåga att neutralisera syror, denna metod förklaras närmare under punkt 2.6.1. Den andra metoden syftar till att förhindra att svavelångorna når sin daggpunkt. För att åstadkomma detta krävs en högre temperatur på utsatta delar. Tillvägagångssätt för detta finns beskrivna under punkt 2.6.2.

1.1 Syfte

Denna rapport syftar till att undersöka vad som är de bakomliggande orsakerna till uppkomsten av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer, samt vilka åtgärder som finns för att minska eller helt eliminera problemet. Vidare är syftet att undersöka vilken åtgärdsmetod som idag används mest, samt vilka sidoeffekter dessa metoder kan ge upphov till.

1.2 Frågeställning

Huvudfråga

Vilken är den mest fördelaktiga åtgärden för att hämma de negativa effekterna av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer?

Delfrågor

Hur påverkar faktorer såsom motorns geometri och omgivningsförhållanden uppkomsten av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer?

Hur påverkar bränslets innehåll samt motorns driftsförhållanden uppkomsten av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer?

Finns det några, och i så fall vilka, miljömässiga aspekter att ta hänsyn till gällande åtgärder för att hämma de negativa effekterna av kallkorrosion i större marina tvåtaktsmotorer?

1.3 Avgränsningar

De motorer som behandlas i rapporten är uteslutande större marina tvåtaktsmotorer av typen tvärstycksmotorer.

Den kemiska teorin behandlas endast på ett grundläggande plan för förståelse av problemet. Svavelsyrighet behandlas inte i denna rapport då det är en mycket svagare syra än svavelsyra och bidrar inte alls i samma utsträckning till kallkorrosion (Hengeveld, Schenk, & Aabo).

Endast kallkorrosion på komponenter i motorernas cylindrar behandlas.

2 Teori

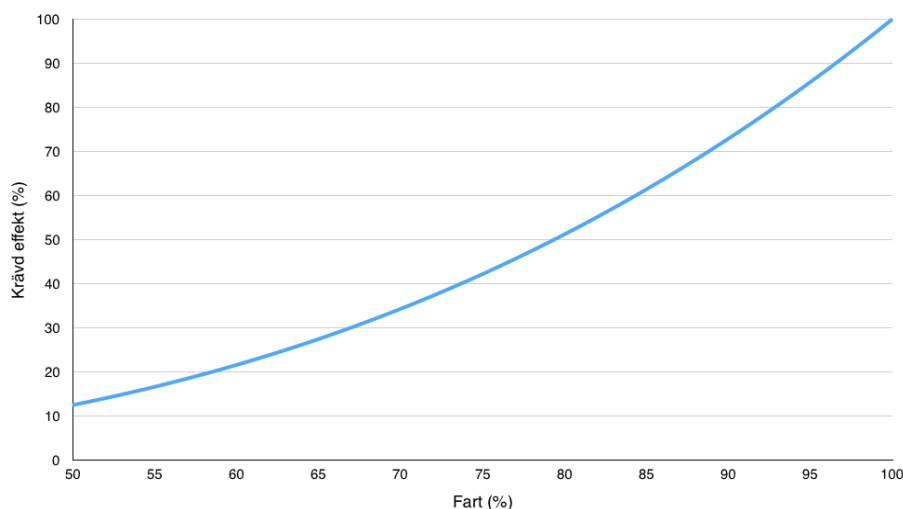
I kapitlet som följer presenteras viktig bakgrundsfakta som syftar till att skapa en förståelse för problemet kallkorrosion, både dess omfattning och uppkomst. Kapitlets innehåll bygger främst på sammanställd information som inhämtats från vetenskapliga skrifter och andra källor publicerade av motortillverkare och andra aktörer i branschen. Delar av informationen kommer från intervjuer genomförda av författarna.

2.1 Bakgrund till slow-steaming

Ett flertal faktorer bidrog till att det efter finanskrisen år 2008 blev allt populärare bland rederier att framföra sina fartyg med reducerad fart. Minskade fraktrater i kombination med höga bränslepriser och dyrare operationella kostnader var de största anledningarna till detta. Eftersom den enskilt dyraste utgiften för ett rederi är dess fartygs bränslekostnad, är fartreduktion en enkel åtgärd för att minska sina utgifter (Wiesmann, 2010). Då fartygens fart minskas kan mindre mängd gods transporteras under en tidsperiod. För att täcka upp för detta krävs av rederier att fler fartyg sätts in. Detta är oftast ekonomiskt fördelaktigt då minskningen i bränslekostnad överstiger ökningen av övriga operationella kostnader. I ett exempel från Wärtsilä (2010) minskade ett rederi sina utgifter med 37.5% genom att använda 11 fartyg som framfördes med reducerad fart, jämfört med att använda 8 fartyg som framfördes med normal fart. Den krävda framdrivningseffekten (P) är proportionerlig mot fartygets fart (v) i kubik, se figur 1 nedan. Bränsleförbrukningen korrelerar med framdrivningseffekten och kan antas följa denna med liten felmarginal (Wiesmann, 2010). För att styrka detta påstående kan den allmänt accepterade tumregeln amiralitetsformeln användas (MAN Diesel & Turbo, 2011):

$$P = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} * v^3}{C_{adm}}$$

Beräkningar med denna formel förutsätter konstant displacement (Δ). Amiralitetskonstanten (C_{adm}) är unik för varje fartyg och baseras på skrovets utformning och konstruktion. Med hjälp av amiralitetsformeln kan som exempel visas att en sänkning av farten från 100% till 80% ger en reduktion av krävd effekt med närmare 50%.



Figur 1: Samband mellan ett fartygs fart och framdrivningseffekt baserat på beräkningar med amiralitetsformeln

2.2 Motorer med lång slaglängd

För att möta dagens krav på hög effektivitet och låg bränsleförbrukning, genom bland annat EEDI, hos fartygs framdrivningsmotorer har motortillverkarna introducerat motorer med betydligt längre slaglängd än tidigare (Wärtsilä, 2012; MAN Diesel & Turbo, 2012). En längre slaglängd bidrar till en högre termisk verkningsgrad (Elovsson & Alvarez, 2012) eftersom förbränningsgaserna får en längre expansionsväg och gasernas energi kan utnyttjas bättre. En ökad verkningsgrad innebär att mindre energi i form av värme går till spillo då mer värmeenergi går till rörelseenergi och rökgaserna får en lägre temperatur. Även tiden för expansionen ökar vanligtvis då den långa slaglängden möjliggör ett lägre motorvarvtal. Tack vare det låga motorvarvtalet uppnås ett lågt propellervarvtal eftersom tvåtaktsmotorer vanligen är direkt kopplade till propellern. Vanligen innebär en lägre rotationshastighet på propellern en bättre verkningsgrad för denna (MAN Diesel & Turbo, 2011). Exempel på långslagiga tvåtaktsmotorer är MAN Diesel & Turbos G-typ motorer (MAN Diesel & Turbo, 2012) och Wärtsiläs¹ X-typ motorer (Wärtsilä, 2012).

2.3 Smörjolja

Smörjolja används i stor utsträckning i förbränningsmotorer. Dess uppgift varierar beroende på var i motorn oljan används. Smörjoljans främsta uppgifter är att smörja och kyla, men också att täta, rena och dämpa ljud (Kuiken, 2012). Där rörliga delar finns, finns ofta smörjolja för att förhindra metall-mot-metallkontakt. Friktionen mellan rörliga delar genererar värme som måste kylas bort vilket smörjoljan också ansvarar för i många fall. I marina motorer finns vanligen ett gemensamt smörjoljesystem för motorn. Alla delar som kräver smörjolja förses då från samma system. Cylindrarna i mindre trunkmotorer smörjs via så kallad stänksmörjning. Detta innebär att smörjolja stänks upp i cylindern när vevaxeln kommer i kontakt med sumpen vid varje motorvarv. I tvärstycksmotorer och större trunkmotorer fungerar cylindersmörjningen annorlunda (Kuiken, 2012). Hos tvärstycksmotorer är slaglängden för lång i kombination med att tvärstycket förhindrar att smörjoljan rör sig mellan vevhuset och cylinderfodret, därför är inte stänksmörjning möjlig. Istället smörjs cylindrarna i dessa motorer via separata munstycken inne i cylindrarna (Kuiken, 2012). Den separata cylindersmörjningen möjliggör användning av en annan typ av olja i cylindern som är bättre anpassad för sitt syfte (Hunt et al., 2002). Ändamålet med cylindersmörjoljan är främst att skapa en oljefilm mellan kolvrängarna och cylinderfodret, detta för att minska friktion och förhindra både abrasivt och adhesivt slitage. En annan anledning till att cylindersmörjoljan är viktig är dess förmåga att neutralisera de syror som bildas i förbränningsprocessen. Att överföra värme mellan kolv, kolvring och cylinderfoder är ytterligare en uppgift (Kuiken, 2012).

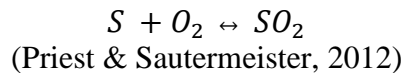
¹Wärtsiläs tvåtaktsavdelning togs 2015 över av Winterthur Gas & Diesel (WinGD), som till 30 % ägs av Wärtsilä och till 70 av China State Shipbuilding Corporation (CSSC) (Wärtsilä, 2015)

2.4 Kemi

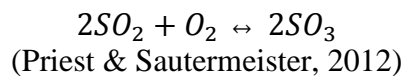
För att förstå uppkomst och reduktion av kallkorrosion beskrivs i detta kapitel den bakomliggande kemiska teorin.

2.4.1 Svavel

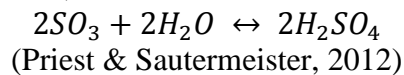
Svavel finns närvarande i de allra flesta fossila bränslen (Statens Hydrologiska och Meteorologiska Institut, 2012; Zumdahl & DeCoste, 2013). I förbränningsprocessen förenas allt svavel (S) med tillgängligt syre (O) och bildar svaveldioxid (SO_2):



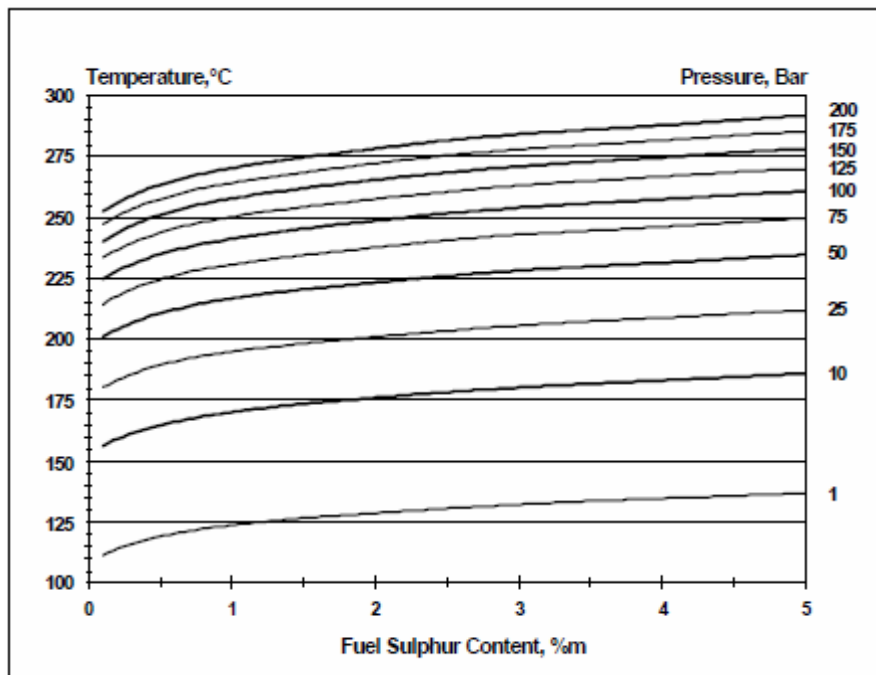
En del av svaveldioxiden, mellan 0.3% och 7%, reagerar ytterligare med syre och bildar svaveltrioxid (SO_3):



Svaveltrioxiden reagerar med vattenånga från bränslet och luften och bildar svavelångor. Då temperaturen hos komponenter i cylindern hamnar under kondenseringstemperaturen för dessa svavelångor faller svavelsyra (H_2SO_4) ut:



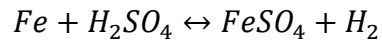
Se figur 2 för uppskattad daggpunkt för svavelsyra. Som framgår av grafen leder ett högre tryck till högre kondenseringstemperatur. Risken för att den svavelsyra som finns i gasform i cylindern skall kondensera är relativt liten så länge den inte kommer i kontakt med cylinderväggen eller andra relativt svala komponenter (Priest & Sautermeister, 2012).



Figur 2: Uppskattad daggpunkt för svavelsyra, som funktion av tryck och svavelinnehåll i bränslet (Hengeveld, Schenk, & Aabo)

2.4.2 Kallkorrosion

Då den svavelsyra som bildas enligt 2.4.1 kommer i kontakt med komponenterna i cylindern kan följande korrosiva reaktion ske:



(Panossian, de Almeida, de Sousa, de Souza Pimenta, & Marques, 2012)

Järnsulfat bildas och vätgas frigörs som följd av reaktionen. Eftersom syrorna faller ut då ytttemperaturen hos komponenterna i cylindern är för låg kallas fenomenet kallkorrosion, eller i vissa fall lågtemperaturkorrosion.

2.4.3 Cylindersmörjolja

Dagens smörjor är komplexa, både vad gäller kemisk sammansättning och matchning (Jensen & Jakobsen, 2014). Förutom egenskaper som till exempel viskositet, operationella toleranser, flampunkt, miljövänlighet och värmeledningsförmåga anges dagens cylindersmörjoljors BN-tal. I cylindersmörjoljan finns tillsatssämnen vars syfte är att neutralisera de syror som finns i förbränningsutrymmet för att bland annat förhindra effekterna av svavelsyra på komponenterna. Kalciumföreningar hör till de vanligaste basiska tillsatserna i cylindersmörjor (Woodyard, 2004), men Per Samuelsson² (intervju 1 april 2016) förklarar att olika typer av magnesiumföreningar också används. För att kunna jämföra olika typer av basiska tillsatser och deras förmåga att neutralisera syror är BN-talet angivet i kaliumhydroxidekvivalent (Chevron Marine Products LLC, 2013). Ett BN-tal på 70 motsvarar alkalinitet ekvivalent till 70 miligram kaliumhydroxid per gram cylindersmörjolja (mg KOH/g) oavsett vilken den basiska tillsatsen är. Därför kommer KOH att användas som standardbenämning för basiska tillsatser i denna text.

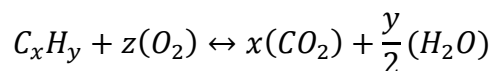
2.4.4 Bränsle

I det bränsle som vanligen används i marina motorer finns en andel svavel, upp till 3.5% (International Maritime Organization, 2016; Transportstyrelsen, 2016). Svavlet i bränslet följer med från bränslets ursprungliga form, råolja (Hunt, o.a., 2002). Som nämnt under punkt 2.4.1, bildar svavlet svavelhaltiga ångor som reagerar med vattenånga. Generellt innehåller bränslen med längre kolvätekedjor, såsom restbränslet tjockolja (HFO), mer svavel än de med kortare kolvätekedjor, såsom destillatbränslet marin gasolja (MGO) (American Bureau of Shipping, 2001). År 2014 låg det globala medelvärdet av svavel i HFO på 2.7% (MAN Diesel & Turbo, 2014). Svavlet är löst i olja och kan därför inte avlägsnas från bränslet via centrifugering, en metod som annars används ombord fartyg för att avlägsna oönskade komponenter i ett bränsle.

Vanadin används som katalysator i framställningen av svavelsyra för till exempel kemitekniska applikationer (Costigan, Cary, & Dobson, 2001). Detta gör vanadininnehåll i bränsle till en möjligt bidragande faktor för uppkomsten av kallkorrosion. Vanadin är en bidragande orsak till andra typer av korrosion och vanadininnehåll i bränsle ses därför generellt som ett problem (American Bureau of Shipping, 2001).

² Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

Många bränslen innehåller en andel vatten (American Bureau of Shipping, 2001). Även detta är en bidragande orsak till möjlig ökad kallkorrosion eftersom vatten måste finnas för att svavelsyra skall kunna bildas, vilket beskrivs under 2.4.1. Förbränning av kolväten leder till bildande av vattenånga då vätet i bränslet binder med syret i förbränningsluften förutsatt att tillräcklig mängd luft finns att tillgå. Nedan följer en generell formel för förbränning av ett kolväte:



där x är antalet kolatomer i kolvätet, y är antalet väteatomer i kolvätet och z är antalet syreatomer som krävs för förbränningen (Fedechko, o.a., u.d.).

Väte i bränslet är i många fall helt oundvikligt och vattnet är i de flesta fall svårt att helt avlägsna då typen av bränslen som orsakar kallkorrosion ofta har en densitet som närmar sig den hos vatten. Detta innebär att reningsmetoder som bygger på densitetsskillnader försvåras (Woodyard, 2004).

ISO-kraven för RMG 380, ett relativt vanligt tjockolja-bränsle, ser ut som nedan i tabell 2.1.

Tabell 1: Gränsvärden för HFO RMG380 (Chevron Marine Lubricants, 2016)

Kinematisk viskositet vid 50°C	max	380.0 (mm ² /s)
Densitet vid 15°C	max	991.0 (kg/m ³)
Svavel	max	Varierar med krav (mass%)
Syranummer (BN)	max	2.5 (mgKOH/g)
Vatten	max	0.5 (volym%)
Vanadin	max	350 (mg/kg)
Natrium	max	100 (mg/kg)
Aluminium och kiesel (cat-fines)	max	60 (mg/kg)

2.5 Komponentslitage

Nedanstående avsnitt beskriver en del av det slitage som kallkorrosion kan orsaka på de mest utsatta komponenterna i cylindern. För att få en ökad förståelse för den ekonomiska aspekten kring komponenters slitage visas i tabell 2.2 nedan en ungefärlig prisbild för nya komponenter hos en av MAN Diesel & Turbo större tvåtaktsmotorer (MAN Diesel & Turbo Sweden, 2016).

Tabell 2: Ungefärlig prislista för komponenter till MAN Diesel & Turbo 6G80ME-C9.2 (MAN Diesel & Turbo Sweden, 2016)

Cylinderfoder	SEK 450 000
Kolvkrona	SEK 200 000
Avgasventil	SEK 150 000

Cylinderfoder

Som tidigare nämnt är en viss del korrosivt slitage av cylinderfodret oftast önskvärt. Anledningen till detta är att det korrosiva slitaget leder till mikroskopisk gropbildning på cylinderväggen. I och med dessa gropar får cylindermörjolan en både större och bättre fästyta mot cylinderväggen vilket underlättar att oljefilmen bibehålls (Kuiken, 2012). Detta gäller dock inte för Winterthur Gas & Diesel, de anser inte att det finns något som kallas korrekt eller önskvärt korrosivt slitage, vilket styrks av Pieter Zandt³ (mailintervju 11 april 2016). För att uppnå motsvarande fästyta utför de istället en så kallad platåhoning som innebär att cylinderytan bearbetas för att eliminera toppar på den något ojämna ytan och samtidigt öka kontaktytan. En konsekvens av det korrosiva slitaget är att järn från cylinderfodret lossnar och samlas upp i cylindermörjolan. Detta leder till att cylinderns diameter gradvis ökar. Ett mått på att cylindern slits lagom är att cylinderdiametern ökar med maximalt 0.1 mm per 1000 gångtimmar (The Royal Institution of Naval Architects, 2014), vilket relativt enkelt kan mätas manuellt. Då större slitage än detta förekommer finns anledning att misstänka okontrollerad kallkorrosion. (The Royal Institution of Naval Architects, 2014). Per Samuelsson⁴ (intervju 1 april 2016) menar dock att det inte alltid går att direkt koppla detta till korrosivt slitage eftersom det i vissa fel kan ha gått så långt att slitaget till största del är av abrasiv karaktär. Vidare kan ovalitet i cylinderfodret uppstå då temperaturen på cylinderväggen inte nödvändigtvis är enhetlig. Ett ovalt cylinderfoder kan precis som slitna kolvringar leda till blow-by. Områden med lägre temperatur kan vara mer slitna vilket också är en indikation på att motorn kan vara drabbad av kallkorrosion.

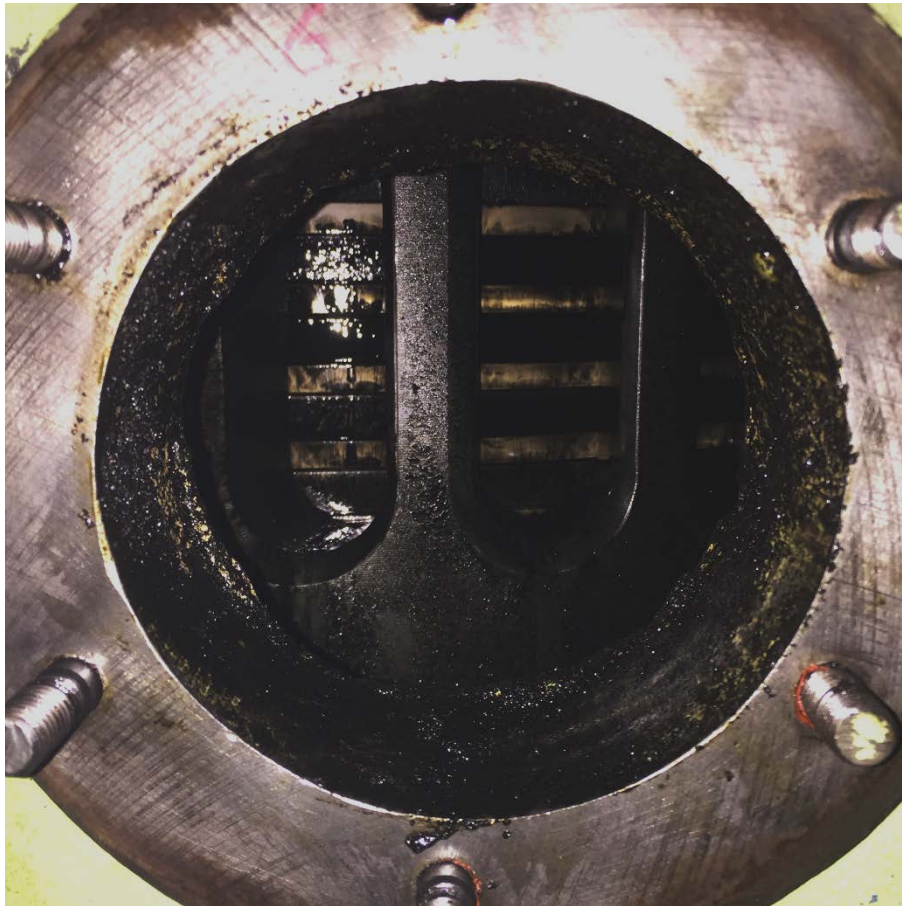
Kolvringar

Svavelsyrans korrosiva effekt leder till att kolvringarna slits fortare än normalt. Till en början är slitaget mestadels av korrosiv karaktär, men allt eftersom kolvringarnas yta angripits går slitaget mot mer abrasiv karaktär. Denna kombination av både korrosivt och abrasivt slitage ökar effekten av varandra och slitageförloppet kan vara svårt att förhindra. Då kolvringarna slits finns risk att de inte längre sluter tätt mot cylinderfodret vilket resulterar i en lägre kompression. En följd av detta är försämrad verkningsgrad och lägre effekt för motorn. Det finns även risk för att en så kallad blow-by inträffar, vilket innebär att förbränningsgaser passerar både kolvringarna och kolven.

³ Pieter Zandt, Manager Global Operations Support, Winterthur Gas & Diesel Ltd

⁴ Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

Kraftigt förhöjd temperatur hos kolringarna i och med kontakt med förbränningsgaser är en följd av detta, och kolringarna blir därmed ännu sprödare. I långt gångna fall kan kolringarna brytas sönder. Då detta sker kan ännu mer av förbränningsgaserna tränga förbi kolven vilket, enligt Per Samuelsson⁵ (intervju 1 april 2016), i värsta fall kan leda till en spolluftsbrand.



Figur 3: Spolportsinspektion B&W 6L90GBE (Sjöman, 2015)

En spolportsinspektion genomförs ofta på tvåtaktsmotorer. Kolringarnas kondition kontrolleras då visuellt för att slitage skall upptäckas. Vid en spolportsinspektion kan även replikor av enskilda kolringar skapas. Per Samuelsson⁵ (intervju 1 april 2016) beskriver att detta görs genom att pressa en speciell typ av silikon hårt mot den berörda kolringen under en viss tid. Det blir senare möjligt att granska avtrycket i silikonet i mikroskop vilket gör att det enklare kan avgöras hur slitaget uppkommit. I vissa fall kan slitage se ut att komma från cat-fines, som är en oerhört hård och icke önskvärd restprodukt från raffineringen av bränslet, men med mikroskopgranskning av en replika kan det avgöras om slitaget beror på korrosion.

Avgasventil

Även avgasventilen kan utsättas för kallkorrosion. Om detta sker kan det leda till att den inte längre sluter tätt mot ventilsetet. Förbränningsgaser kan då passera avgasventilen under förbränningsförloppet. En första indikation på detta är att avgastemperaturen för den aktuella cylindern stiger. I långt gångna fall kan brand inträffa då oförbrända partiklar från förbränningsprocessen antänds i avgasröret (Fellmann, Gross, & Ludwig, 2004).

⁵ Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

Kolv

Vad gäller kallkorrosion på kolven är det främst kolvkronan som drabbas. Liksom i fallet kolvringar kan kolvkronan drabbas av gropfrätning. Materialet som gröps ur tack vare det korrosiva slitaget kan leda till skador av abrasiv karaktär på cylinderfoder och kolvringar. Kolvkronans slitage kan, liksom kolvringarnas, undersökas genom att en replika skapas med silikon som sedan studeras i mikroskop (MAN Diesel & Turbo, 2014).

2.6 Metoder för att reducera kallkorrosion

Det finns två huvudmetoder att reducera kallkorrosion. Som skrivet i inledningen bygger den ena på att neutralisera svavelsyran innan den orsakar korrosiva angrepp på cylinderns komponenter. Den andra innebär att förhindra temperaturer som låter svavelföreningarna fällas ut som svavelsyra.

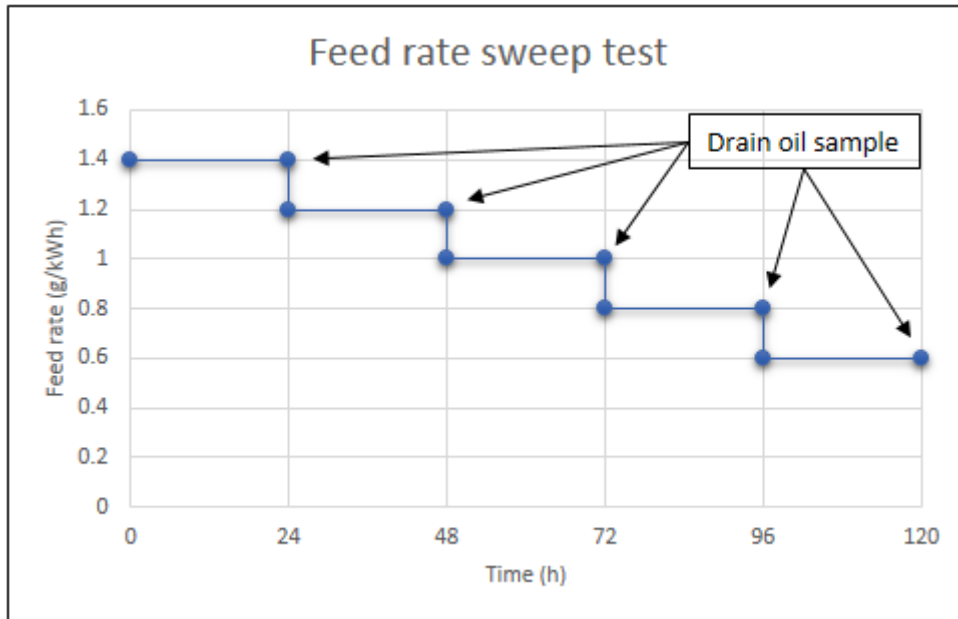
2.6.1 Cylindersmörjolja

Cylindersmörjolan har stor inverkan på uppkomsten av kallkorrosion, flera faktorer påverkar resultatet och de mest väsentliga behandlas i detta avsnitt.

BN-tal

Fram till för några år sedan var BN-70 den cylindersmörjolja på marknaden med högst BN-tal. Då problem med kallkorrosion på nytt uppkom lanserades BN-100 hos de större smörjoljeföretagen, berättar Per Samuelsson⁶ (intervju 1 april 2016). Denna olja innehåller cirka 43% mer *KOH* än hos BN-70 olja och har därmed en mycket större förmåga att neutralisera syror. Doseringen av smörjolja i cylindern anges i gram smörjolja per kilowatt axeleffekt på motorn (*g/kWh*). Cylindersmörjolan appliceras vanligen via mekaniskt drivna pumpar genom munstycken placerade i cylinderfodret. För att säkerställa hur mycket cylindersmörjolja som behöver matas in för det aktuella bränslet görs ett test ombord på fartyget. Testet kallas feed rate sweep och går till så att en basmatningsmängd, som fås ur motorns instruktionsmanual, ställs in. Därefter mäts BN-talet och järnhalten på ett cylindersmörjoljeprov som tas vid packboxen efter 24 timmar. BN-talet förväntas sjunka från oljans initialvärde. Järnhalten i provet påvisar hur mycket material som fallit av från komponenter på grund av slitage. Om provsvaren är inom gränserna sänks matningsfrekvensen (ACC) av cylindersmörjolja och ett nytt prov tas efter 24 timmar, jämför figur 4. Enligt MAN Diesel & Turbo (2014) skall BN-talet hållas över 20 mg *KOH*/g olja och järninnehållet skall ligga under 200-300 mg *Fe*/g. Provet fortsätter tills lämpliga nivåer på BN-tal och av järnhalt har uppnåtts (Jensen & Jakobsen, 2014). Ett exempel på testets struktur kan ses nedan i figur 4.

⁶ Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB



Figur 4: Exempel på Feed rate sweep test (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Viktigt att observera under detta test är att motorn skall arbeta under konstant last och att testet endast är applicerbart då bränsle med svavelhalt mellan 2.8% och 3.5% används. Om en lägre svavelhalt används riskeras att motorn körs med ett överskott av cylindermörjolja med avseende på neutraliseringsförmåga av syror (The Royal Institution of Naval Architects, 2014), de negativa aspekterna av detta nämns nedan. En tumregel på hur mycket olja som erfordras kan beräknas enligt nedanstående formel (Kuiken, 2012):

$$0.34 \text{ g/kWh} * S\% = ACC$$

$$\text{Exempel: } 0.34 * 2.9 = 0.986 \text{ g/kWh}$$

Vid byte till en cylindermörjolja med annat BN-tal bör testerna utgå från samma förhållande mellan svavelhalt och dosering. Omräkning görs då med följande formel (här exemplifierat med byte från BN 100 till BN 85):

$$ACC (BN 100) = 0.986 \text{ g/kWh}$$

$$ACC (BN 85) = 0.986 * \frac{100}{85} = 1.16 \text{ g/kWh}$$

Inkörning av komponenter såsom kolvringar, cylinderfoder eller kolvar kan ge upphov till ökade mängder järn i cylindermörjolan, något som bör tas i beaktande vid genomförande av oljeprov. Att använda cylindermörjolor med högt BN-tal har även nackdelar. Ett för högt BN-tal kan neutralisera en för stor mängd syror vilket ökar risken för blankslitning av cylinderfodret. Med anledning av detta rekommenderas följande uppdelning:

Tabell 3: Rekommendationer gällande svavelhalt och BN-tal från MAN Diesel & Turbo (Jensen & Jakobsen, 2014)

Applikation	BN-tal
Destillatbränslen och flytande naturgas (LNG)	≤ 40
Lågsvavliga bränslen ($\leq 1.5\%$ svavel)	40-60
Högsvavliga bränslen ($\geq 1.5\%$ svavel)	70-100

Fördelning

Fördelningen av cylindermörjolja på berörda komponenter kan vara problematisk. För att förbättra fördelningen har Maersk Fluid Technology testat cylindermörjoljor med betydligt högre viskositet än normalt, detta för att oljefilmen enklare skall stanna i position. De har gjort tester i deras så kallade slitageriggar och jämfört olika oljor med olika viskositet (Maersk Fluid Technology, 2016). Martin Olsson⁷ (mailintervju 3 maj 2016) menar dock att detta inte påverkat smörjoljefilmens vidhäftningsförmåga i någon större utsträckning. Vidare har kolvringarnas utformning en viktig inverkan på hur väl smörjoljefilmen fördelas. Federal-Mogul har tagit fram ett koncept benämnt eWave, där ringarna har en vågig kontaktyta mot cylinderfodret som bidrar till att distribuera cylindermörjoljan på ett bättre sätt. Översta och nedersta ringen har dessutom en profil som ser till att mer cylindermörjolja skrapas med vid kolvens oscillerande rörelse. På senare tid har kolvringspaket med en gastät toppring med undantag för gasgenomsläppningsspår blivit vanligare. Detta bidrar till ett kontrollerat tryckfall över ringen vilket i sin tur innebär en mer kontrollerad belastning på oljefilmen och resterande ringar.

Överdoserering

Samtidigt som det är viktigt att tillse att en tillräcklig mängd cylindermörjolja matas in i cylindern måste överdoserering undvikas. Vid inkörning av nya komponenter slits dessa på plats under en kortare period och mer järnpartiklar hamnar då i cylindermörjoljan. Detta kan vid oljeprover kan ge indikationer på att cylindermörjoljedosereringen bör ökas trots att slitaget är av en karaktär som inte direkt påverkas av kallkorrosion (Woodyard, 2004). Vid användning av lågsvavliga bränslen kan liknande situation uppstå (Woodyard, 2004). Mängden *KOH* i förhållande till svavel blir vid överdoserering för hög och gipsliknande alkaliska avlagringar kan bildas på bland annat kolvringarna, se figur 5 nedan. Dessa avlagringar blir väldigt hårda och skrapar bort oljan från cylinderväggen säger Per Samuelsson⁸ (intervju 1 april 2016). Den viktiga smörjoljefilmen försvinner då och metall-mot-metallkontakt mellan kolvringarna och cylinderväggen leder till polering av den sistnämnda. Då cylinderväggen poleras försvinner de mikroskopiska groparna som tillser att cylindermörjoljan kan fästa. Tillslut kan denna polering leda till att kolven skär. Avlagringar kan bildas även vid korrekt BN-tal, men dessa avlagringar tenderar att vara mjukare och därför inte ställa till med samma problem (Woodyard, 2004). Vid

⁷ Martin Olsson, Technical Project Manager, Maersk Oil Trading Lubricants

⁸ Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

skifte till ett bränsle med lägre svavelinnehåll, exempelvis vid inträde i SECA, måste det säkerställas att *KOH*-halten i cylindermörjolan inte är för hög. Liknande problem som vid överdosering kan då uppstå. För att undvika detta måste doseringen av cylindermörjola sänkas. Doseringen får dock inte sänkas under minimidoseringen som är specificerad av motortillverkaren. Oavsett cylindermörjoljans BN-tal och bränslets svavelinnehåll måste en tillfredsställande oljefilm bibehållas. Ett alternativ till att sänka doseringen är att cylindermörjolan byts ut mot en med lägre BN-tal. Per Samuelsson⁹ (intervju 1 april 2016) menar dock att manuella byten av denna typ kan ge upphov till problem då den mänskliga faktorn alltid är närvarande vilket kan leda till misstag både vad gäller dosering och BN-tal.



Figur 5: Alkaliska avlagringar på kolv och kolvringar (Federal-Mogul, 2016)

Andra tester

Förutom det tidigare nämnda feed rate sweep testet görs tester av cylindermörjolan efterhand för att säkerställa kvalitet och prestanda hos denna. Till exempel tas vissa föroreningstester där bland annat vattenhalten mäts. Vidare förklarar Geir Eikemo¹⁰ (mailintervju 20 april 2016) att en spektroskopi kan genomföras för att upptäcka föroreningar och spårämnen såsom kalcium,

⁹ Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

¹⁰ Geir Eikemo, Nordic Technical Manager Lubricants, Univar AS

kalium, magnesium, järn och bly. En spektroskopi innebär att elektromagnetisk strålning används för att undersöka kemiska koncentrationer och sammansättningar. Dessa tester görs i laboratorier iland där de lagras och jämförs mot ursprungs- och gränsvärden.

Blending-on-Board

Olika metoder finns för att säkerställa att BN-talet på den cylindermörjolja som går in i motorn är optimal. Maersk Fluid Technology har utvecklat en teknik, döpt till Blending-on-Board, som bygger på kontinuerlig analys av bränslets svavelhalt och fartygets driftsförhållanden. Utifrån dessa värden tillsätts sedan tillfredsställande mängd basiskt additiv till oljan. Cylindersmörjoljan som används har väldigt lågt BN och additivet är olja med relativt högt BN-tal, upp emot 300 (Maersk Fluid Technology, 2016). Svend S. Eskildsen¹¹ (mailintervju 12 maj 2016) berättar att MAN Diesel & Turbo arbetar med ett liknande system som de kallar ACOM (Automated Cylinder Oil Mixing).

2.6.2 Temperaturhöjning av cylinderfodret

Traditionellt kyls hela cylinderfodret med ett gemensamt flöde av kylvatten med samma mängd och samma temperatur vilket innebär liten flexibilitet. Tillräcklig kylning av den övre delen av cylinderfodret leder ibland till att den nedre delen kyls till en så låg temperatur att bildning av svavelsyra riskeras. Därför finns ett antal metoder och åtgärder för att höja, och att jämna ut, cylinderväggens temperatur.

Jacket water By-pass Basic (JBB)

En av de enklaste lösningarna till detta problem är att förbikoppla delar av cylinderkylvattnet. MAN Diesel & Turbo har genom att endast låta 15% av mantelkylvattnet passera genom cylinderfodret höjt cylinderväggens temperatur med 15°C. Att förbikoppla ännu mer är fullt möjligt. Detta är en robust metod som kan installeras i efterhand på befintliga motorer, men den ger ingen flexibilitet eftersom förbikopplingen är konstant (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Jacket water By-pass Controlled (JBC)

Ett mer flexibelt system från MAN Diesel & Turbo är JBC, som i sin princip är väldigt lik JBB. Principen är här att förbikopplingen är proportionell mot motorns last genom att en termostatventil reglerar flödet. En högre last, och därför ett varmare kylvatten, ger mindre förbikoppling medan en lägre last, och därför kallare kylvatten, ger mer förbikoppling. (MAN Diesel & Turbo, 2014). Pieter Zandt¹² (mailintervju 3 maj 2016) meddelar att Winterthur Gas & Diesel har ett snarlikt system där vatten förbikopplas beroende på last samtidigt som vattenflödet till cylinderfodret särskiljs från det som kyler topplocket och avgasventilen.

Load Dependent Cylinder Liner (LDCL)

En metod under utveckling är LDCL. Genom att separera kylvattenflödena för cylinderfoder och topplock, med hjälp av en trevägsventil, kan temperaturerna anpassas och justeras i realtid.

¹¹ Svend S. Eskildsen, Research Engineer, MAN Diesel & Turbo SE

¹² Pieter Zandt, Manager Global Operations Support, Winterthur Gas & Diesel Ltd

Tidiga tester av MAN Diesel & Turbo har visat att tillämpning av denna metod även kan minska förbrukningen av cylindermörjolja. Detta kan också kombineras med förhöjd kylvattentemperatur, genom att minska mängden bortförd värme hos kylvattnet kan temperaturen på cylinderfodrets väggar höjas ytterligare (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Isolerande rör

En metod för att sänka effekten av kylvattnet som passerar kring cylinderfodret är, enligt Pieter Zandt¹³ (mailintervju 6 april 2016), att montera teflonrör i kylkanalerna. Detta både minskar flödet och isolerar kylvattnet från cylinderfodret (Woodyard, 2004). Genom denna isolering minskar värmeutbytet mellan kylvattnet och cylinderfodret vilket resulterar i en högre cylinderfodertemperatur. Detta görs både på nybyggen och på befintliga fartyg, och i vissa fall kombineras denna metod med minskning av antalet kylkanaler kring cylinderfodret.

¹³ Pieter Zandt, Manager Global Operations Support, Winterthur Gas & Diesel Ltd

3 Metod

För att kunna beskriva uppkomst och åverkan av kallkorrosion samt åtgärder för att hämma effekten användes flera olika metoder i en metodkombination (Denscombe, 2009). Styrkan i detta tillvägagångssätt är att de enskilda metodernas svagheter vägs upp av de andras styrkor. En deskriptiv metod (Ejvegård, 1996) användes för att presentera slutsatser som kunde dras av den fakta insamlad i granskade artiklar och litteratur. Detta för att ge en bred bakgrund till problemet kallkorrosion. Öppet riktade intervjuer (Höst, Regnell & Runeson, 2006) genomfördes med tekniskt kunnig personal hos både motortillverkare och andra aktörer i branschen som har kunskap och erfarenhet inom ämnet. En öppet riktad intervju innebär att intervjun anpassas till intervjuobjektet. Eftersom studiens intervjuobjekt har olika spetskunskap var en annan intervjumetod inte att föredra. Inför samtliga intervjuer tillsågs att de intervjuade personerna givit sitt godkännande att delar av konversationen kunde komma att användas i denna rapport. Viktigt att tillse var också att de intervjuade personerna själva, eller deras företag, inte skulle kunna lida skada av den information som inkluderats i denna rapport.

Intervjuer

Nedan listas intervjuer med utvalda personer.

Per Samuelsson, Senior Application Engineer, Federal-Mogul Göteborg AB

Samuelsson har många års erfarenhet av tvåtaktsmotorer då han länge jobbat med att ta fram och utveckla kolvringar till dessa. Federal-Mogul har nära samarbete med de största motortillverkarna på marknaden för att de tillsammans skall kunna nå bästa resultat. Tack vare detta är Per Samuelsson mycket insatt i förbränningsutrymmesrelaterade problem, däribland kallkorrosion. Intervjun spelades in och transkriberades för att författarna skulle få möjlighet att sälla ut relevant information.

- När märkte ni av problemet med kallkorrosion och när började ni först arbeta med det?
- Vad är den första indikationen på kallkorrosion som märks av på kolvringar?
- Vad gör ni för att stävja slitage på grund av kallkorrosion?
- Hur samarbetar ni med motortillverkare för att handskas med kallkorrosion?
- Vad anser ni om lösningarna som finns i dagsläget med avseende på tillämpbarhet, miljö, och ekonomi?
- Hur påverkar metoderna för NO_x -reduktion uppkomsten av kallkorrosion?

Mailintervjuer genomfördes med följande personer:

Pieter Zandt, Manager Global Operations Support, Winterthur Gas & Diesel Ltd

Zandt har lång erfarenhet av tvåtaktsmotorer då han jobbat med dessa under sin tid hos Wärtsilä, senare Winterthur Gas & Diesel. Mailkorrespondensen med Zandt genomfördes på engelska och översattes till svenska av författarna.

- Vilken metod för reduktion av kallkorrosion föredrar ni?
- Hur påverkar dessa metoder följande aspekter?

Motorns verkningsgrad

Miljöpåverkan

Spillvärmeåtervinning

Driftekonomi

- Skiljer sig val av metod för reduktion av kallkorrosion mellan nybyggen och ombyggnader?
- Anser ni att någon av följande smörjoljölösningar är fullgoda fristående lösningar?

Maersk Fluid Technologys Blending-on-Board

Mixing tank (t.ex. BN40 och BN100)

Två separata oljor

Möjlig egen lösning

- Hur säkerställs korrekt grad av kallkorrosion?
- Var, när och hur är kallkorrosion mest utbredd?
- Kan problem med kallkorrosion förvärras på grund av metoder för att reducera NO_x ?
- Finns metoder för att beräkna eller förutspå kallkorrosion?
- MAN har ett antal metoder för att reducera kallkorrosion såsom JBB, JBC och LDCL, har ni några liknande?
- Har ni någon uppfattning om hur bränslekvalitet och föroreningar kan påverka uppkomsten av kallkorrosion?
- Anser ni att kallkorrosionsproblematiken är löst?

Geir Eikemo, Nordic Technical Manager Lubricants, Univar AS

Eikemo arbetar för den nordiska avdelningen hos en av världens största kemikaliedistributörer Univar där han specialiserat sig på just smörjoljor.

- Är det någon skillnad i pris mellan cylindermörjoljor med högt BN-tal respektive lågt BN-tal?
- Har ni någon uppfattning om miljövänligheten hos de olika oljorna, finns det mer eller mindre bra oljor?
- Finns det skillnader i försäljningsmängd mellan oljor med olika BN-tal? Har det förändrats sedan de nya svavelkraven trädde i kraft?
- Gör ni analyser av smörjoljor, i så fall hur och vilka värden kan ni få ut?
- Vilka BN-tal rekommenderar ni till olika bränslen med varierande svavelhalt?

Oskar Collander, Tribology Expert, Component Expertise, Engines R&D,

Wärtsilä Finland Oy

Collander är i sin roll som tribologiexpert hos Wärtsilä mycket kunnig inom komponenters slitning, och hur detta skall undvikas samt smörjning.

- Hur vanligt, eller hur stort, är problem rörande kallkorrosion i fyrtaktsmotorer?
- Vilka är de huvudsakliga orsakerna till skillnaderna?
- I vilken utsträckning försöker man åtgärda problemet?
- Vilka metoder föredrar ni för att stävja uppkomsten?

Martin Olsson, Technical Project Manager, Maersk Oil Trading Lubricants

Olsson är enligt utsago från andra kunnig i ämnet, han har bland annat doktorerat i tribologi och arbetat ihop med Per Samuelsson på MAN Diesel & Turbo.

- Anser ni att någon av följande lösningar är tillräcklig som enda lösning för att bekämpa kallkorrosion?

Blending-on-Board

Mixing tank (t.ex. BN40 och BN100)

Två separata oljor

Eventuell annan smörjoljebaserad lösning

- Om inte, varför, samt vilken annan metod ser ni som lämplig att komplettera med?
- Vilka basiska tillsatser i smörjoljor föredrar ni, och varför? (Exempelvis kalcium eller magnesiumföreningar)

- Hur har testerna gått med olika viskositeter, fanns det en skillnad i kampen mot just kallkorrosion?
- Vilka skillnader i pris kan det röra sig om mellan både olika oljor (exempelvis BN40 och BN100) och olika smörjoljebaserade metoder?
- Krävs det någon extra kompetens hos ombordpersonalen för att arbeta med Blending-on-Board-systemet?

Svend S. Eskildsen, Research Engineer, MAN Diesel & Turbo SE

Eskildsen har gedigen erfarenhet inom forskning kring bland annat tribologi och har de senaste åren arbetat med större tvåtaktsmotorer. Hans forskning har bland annat rört just kallkorrosion, kolringar, cylinderfoder, friktion och slitage, ämnen som alla berörs i denna rapport. Mailkorrespondensen med Eskildsen genomfördes på engelska och översattes till svenska av författarna.

- Vilken metod anser ni vara bäst vad gäller korrekt BN-tal?
- Finns det några miljömässiga aspekter vad gäller lösningarna för kallkorrosion?
- Finns det några egenskaper hos bränslet som inverkar på uppkomsten av kallkorrosion?
- Vad är er syn på situationen med kallkorrosion idag? Är problemet fullständigt löst eller finns det fortfarande utmaningar?

4 Resultat

MAN Diesel & Turbo uppger i deras tekniska dokument om tvåtaktsmotorer från 2014 att den bästa metoden för att hämma effekterna av kallkorrosion i dagsläget är att använda en välfördelad cylindermörjolja med ett högre BN-tal i kombination med att låta motorn arbeta med en högre komponenttemperatur än tidigare. Detta påstående stöds av samtliga respondenter i de genomförda intervjuerna.

4.1 Inverkan av motorns geometri och dess omgivningsförhållanden

En modern fartygsmotor är en komplex maskin där många parametrar påverkar varandra. Allt påverkar dock inte kallkorrosion. Nedan presenteras det mest relevanta gällande motorns geometri och omgivningsförhållanden.

Slaglängd

En motor med längre slaglängd än en motor med i övrigt samma dimensioner erhåller generellt lägre avgastemperatur. En lägre temperatur på komponenter såsom cylinderfoder är en följd av detta, vilket är en av anledningarna till att motorer med längre slaglängd är mer utsatta för kallkorrosion. I en av intervjuerna framkom att i och med en ökad slaglängd ökar även cylinderfoderytan vilket innebär en större yta som behöver värmas upp. Även detta leder till en lägre temperatur hos cylinderfodret vilket möjligen också leder till mer kallkorrosion.

Varvtal

Varvtalet hos motorn har inverkan på bildningen av svavelsyra. Ett lägre motorvarvtal innebär en längre uppehållstid i cylindern för rökgaserna och mer svavelsyra kan bildas och kondenseras vid cylinderfodret. Detta leder till att mer tid finns för de kemiska reaktionerna att ske. Vidare innebär ett lägre motorvarvtal generellt lägre temperaturer i cylindern.

Luftfuktighet och omgivningstemperatur

En av respondenterna menar att fuktigare luft ger ett högre vatteninnehåll i förbränningsförloppet och därför kan potentiellt mer svavelsyra bildas. Vatten i förbränningen sänker även förbränningstemperaturen. Vad gäller omgivningstemperatur så påverkar den direkt förbränningstemperaturen, varmare luft in till förbränningen ger något högre förbränningstemperatur och kallare luft något lägre förbränningstemperatur. Under en annan intervju framkom att olika luftfuktigheter och omgivningstemperaturer dock i praktiken borde leda till en väldigt marginell skillnad för uppkomsten av kallkorrosion.

4.2 Bränslets inverkan och motorns driftsförhållanden

Som nämnt i bakgrundskapitlet är det främst svavel som ger upphov till kallkorrosion. Det svavel som introduceras i förbränningen kommer uteslutande från bränslet som används. Därför är det intressant att undersöka hur bränslets svavelinnehåll påverkar uppkomsten av kallkorrosion. Vidare innehåller bränslet andra komponenter som potentiellt kan påverka kallkorrosionen.

Svavel

En av respondenterna menar att bränslets svavelinnehåll påverkar uppkomsten av kallkorrosion linjärt. Ju större mängd svavel som tillförs förbränningsprocessen desto mer ökar uppkomsten av svavelsyra och därmed risken för kallkorrosion.

Vanadin

Sambandet mellan vanadin och kallkorrosion har enligt en av intervjuernas respondent inte kunnat säkerställas.

Vatten och väte

En representant från en av motortillverkarna som intervjuats menar att det vatten som förekommer i bränslet är i så låga halter att de har marginell påverkan på den totala mängden vatten i förbränningsprocessen. Merparten av mängden vatten i förbränningsprocessen bildas då väte, främst från bränslet, och syre, främst från förbränningsluften, reagerar med varandra under förbränningen.

Driftförhållanden

Under en av intervjuerna framkommer från en av motortillverkarna att nybyggda fartyg har motorer med cylinderkomponenter som är temperaturmässigt anpassade till de driftförhållanden motorerna är avsedda för. Detta gäller både statiska förhållanden som motors märkeffekt och dynamiska likt aktuell belastning. Ett fartyg som är optimerat för att operera under låg last är optimerat för en relativt sett högre cylinderfodertemperatur för att undvika kallkorrosion. Detta innebär en ökad investeringskostnad, men leder förhoppningsvis till att färre åtgärder behöver vidtagas i ett senare skede.

4.3 Miljöaspekter

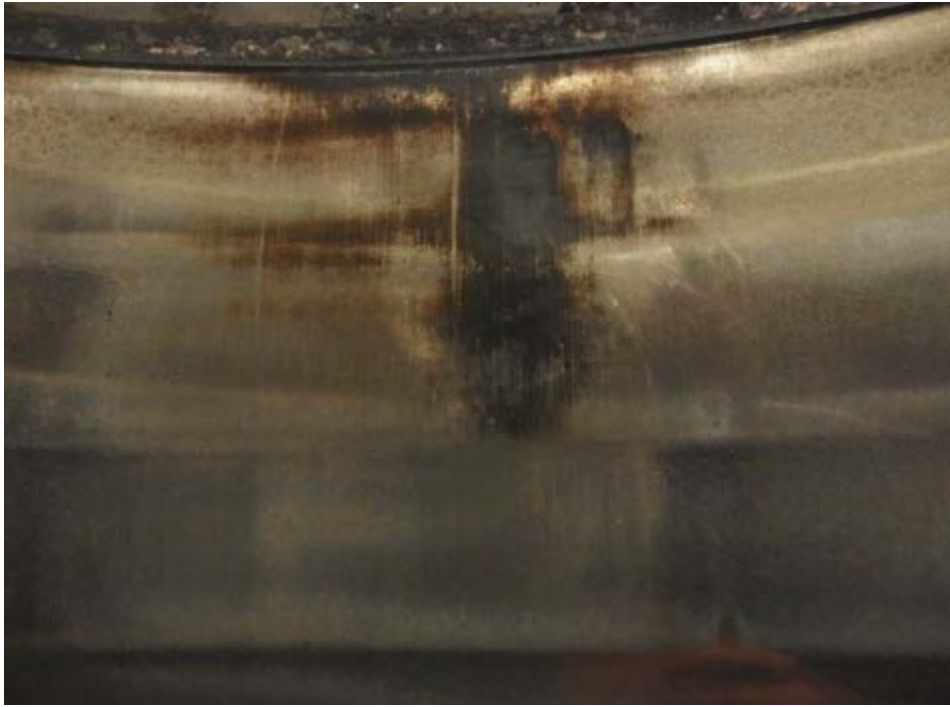
Genom att använda cylindermörjolja med ett högt BN-tal kan oljeförbrukningen reduceras eftersom mindre mängd olja krävs för att neutralisera samma mängd syra. Företagen MAN Diesel & Turbo, Winterthur Gas & Diesel och Wärtsilä ställer sig alla bakom detta. Detta har en miljömässigt positiv effekt då det potentiellt förbränns och förbrukas mindre cylindermörjolja. Gällande smörjoljorna i sig själva menar flera av respondenterna att det inte finns väsentliga skillnader mellan smörjoljor med olika BN-tal vad gäller miljövänlighet.

Då temperaturen på cylinderfodret höjs för att reducera uppkomsten av kallkorrosion minskar dess kylande effekt av rökgaserna. Teoretiskt erhålls då en något högre förbränningstemperatur vilket leder till bildning av mer NO_x-partiklar. Detta är dock i så liten utsträckning att det enligt en av de svarande kan anses försumbart. En höjning av genomsnittstemperaturen i cylindern genom förhöjd cylinderväggstemperatur har, om någon alls, en minimal inverkan på både verkningsgrad och effektuttag enligt rapportens handledare.

4.4 Huvudfråga

Det framkommer efter de för studien genomförda intervjuerna att MAN Diesel & Turbo, Wärtsilä, Winterthur Gas & Diesel samt Federal-Mogul är alla överrens om att en kombination av de två metoderna, förändrad cylindermörjning och temperaturhöjning av komponenter, behövs för att undvika problem med kallkorrosion.

Det visar sig att det inte finns några större skillnader i pris för olika cylindermörjor med olika BN-tal. Som ett exempel på detta kan Shells två oljor Alexia 50 (BN-70) för \$1.55/liter och Argina T 40 (BN-30) \$1.35/liter jämföras. Dessa priser kan dock enligt en av respondenterna variera mycket mellan olika hamnar och leverantörer. Cylindermörjor tillser att kallkorrosionen hämmas på de ytor där oljan skapar en skyddande oljefilm. En av intervjuobjekten förklarar att detta i praktiken är mellan översta kolringen i övre dödläget samt nedre kolringen i nedre dödläget. Figur 4.1 nedan visar var översta kolringen vänder vid övre dödläget, alldeles under det mörka korroderade området.



Figur 4.1: Korrosivt slitage ovanför övre kolringen i övre dödläget (Federal-Mogul, 2016)

Områden och komponenter som inte täcks av oljans film är alltså fortfarande mer utsatta för korrosivt slitage. På grund av detta behöver även komponenters ytemperatur höjas för att tillse att kallkorrosion hämmas. Vilka metoder som används för att höja ytemperaturer på komponenter eller anpassa BN-talet beror på bland annat tillämpbarhet, ekonomiska och miljömässiga aspekter. Det mest väsentliga för att hämma de negativa effekterna av kallkorrosion är att tillse att cylindermörjorjans BN-tal och fördelning är korrekt och att ytemperaturen på berörda komponenter är tillräckligt hög.

5 Diskussion

I nedanstående kapitel diskuteras rapportens resultat samt tillvägagångssättet för att nå dit. Diskussionen kring framtidsutsikterna är väsentlig då rapportens ämne är ett aktuellt problem där utveckling och framsteg ständigt sker.

5.1 Resultat

Rapportens inledning indikerar att kallkorrosionsproblemet i huvudsak är löst. Däremot finns stor förbättringspotential gällande metoder och åtgärder. Författarna ville undersöka vilka de huvudsakliga bakomliggande faktorerna till uppkomsten av kallkorrosion är, samt hur fenomenet idag vanligen hämmas. Därför ställdes ett antal forskningsfrågor. Svaren som erhöles var i de flesta fall av författarna förväntade. Litteraturen som granskades och intervjuerna som genomfördes är väldigt entydiga vilket gör att resultatens reliabilitet är hög. En del av de resultat som erhöles oväntade. Författarna vill därför i nedanstående stycken reflektera över dessa resultat.

Inverkan av motorns geometri och dess omgivningsförhållanden

Författarna förväntade sig att resultaten kring frågan om förbränningsluftens egenskaper skulle påverka kallkorrosionen mer. Luftfuktighet och omgivningstemperatur har en mycket mindre betydelse än vad författarna förmodade. Att även bränslets vattenhalt påverkar svavelsyrebildningen i förbränningsprocessen relativt lite överraskade författarna. Vid en första anblick kan det förväntas att vatteninnehåll i de två komponenter, bränsle och luft, som utgör förbränningsblandningen har en relativt stor inverkan då vatten i sig är en av de två ämnen som bidrar mest till bildningen av svavelsyra och uppkomsten av kallkorrosion. En nyckelfaktor i bildandet av svavelsyra och uppkomsten av kallkorrosion är temperatur i form av svavelsyrans kondenseringstemperatur, därför antogs det tidigt att just lufttemperatur har en betydande inverkan på just detta, något som visade sig vara felaktigt.

Bränsle och drift

Att svavelinnehållet i bränslet påverkar svavelsyrans bildning var väntat. Under arbetets gång visade det sig att även andra bränslekomponenter såsom vanadin kan ha en inverkan på problematiken kring kallkorrosion. Dessa faktorer tyder på att det i relation till uppkomsten av kallkorrosion kan vara mer fördelaktigt att använda destillatbränsle såsom MGO i jämförelse med restbränslen såsom HFO. Eftersom det är svårare att avlägsna vatten från restbränsle än från destillatbränsle borde detta ytterligare vara en anledning till att restbränsle är ett sämre val. Dock kvarstår det faktum att detta vatten, som tidigare nämnts, har marginell betydelse för bildandet av svavelsyra.

Miljö

Utvecklingen vad gäller smörjoljor med avseende på BN-tal, som har kommit av problematiken kring kallkorrosion, har i vissa fall lett till lägre smörjoljeförbrukning och är en av de oväntat positiva följderna. Detta är enligt författarna ett bra exempel på att problem och utmaningar kan ha positiva följder, något som i många fall glöms bort.

Flertalet metoder för att reducera NO_x -bildning i en motor innebär en sänkning av topptemperaturen i cylindern. Detta kan uppnås genom att tillsätta vatten, antingen i luften, i bränslet, eller direkt i förbränningen. Som tidigare konstaterat innebär en temperatursänkning i

cylindern en ökad risk att komponenters temperatur hamnar under svavelsyrans daggpunkt. Tillskottet av vatten i förbränningsprocessen kan även öka bildandet av svavelsyra. Med detta i åtanke borde det ur kallkorrosionssynpunkt vara mer fördelaktigt att reducera NO_x -bildning med hjälp av avgasrening eftersom detta inte påverkar förbränningsprocessen nämnvärt.

Huvudfråga

Resultatet visar att både metoder med cylindermörjolja och temperaturhöjningar behövs och att det inte finns en enskild universell metod för att minska de negativa effekterna av kallkorrosion. Precis som inom många andra områden där komplexa problem finns måste aktörer samarbeta för att nå ett tillfredsställande resultat. Pieter Zandt bekräftar att kallkorrosion är en komplicerad kemisk process med många variabler vilket gör prediktioner svåra att genomföra. Istället tycks metoderna idag vara utvecklade och utvärderade genom praktiska tester och erfarenhet.

Då priserna för cylindermörjolor med olika BN-tal inte skiljer sig väsentligt bör smörjoljebaserade metoder vara både den första och möjligen den enklaste åtgärden. De prisuppgifter som nämns i rapporten indikerar att den cylindermörjolja med högre BN-tal är något dyrare, men detta borde vägas upp av att mindre olja troligtvis förbrukas. Flera tekniker för att optimera cylindermörjoldosering och optimalt BN-tal är både i drift och under utveckling. Troligtvis kommer dessa i framtiden att integreras och bli en självklarhet ombord på fartyg med motorer som riskerar att drabbas av kallkorrosion. Det finns en lång rad lösningar vad gäller temperaturförhållanden i cylindern, och precis som med lösningarna för cylindermörjoljan finns många av dessa i drift medan andra fortfarande är under utveckling.

5.2 Framtidsutsikter

Per Samuelsson menar att efterfrågan på högsvavligt bränsle kommer sjunka kraftigt, speciellt efter år 2020 då den globala gränsen för svavelinnehåll i bränslet väntas sänkas från dagens 3.5% till 0.5%. Detta kommer med största sannolikhet leda till att priset på den högsvavliga oljan då kommer att vara förhållandevis lågt eftersom efterfrågan förväntas sjunka. Enligt IMOs regelverk är det möjligt att använda bränsle med högre svavelhalt än vad gränserna medger. För att göra det måste dock fartyget vara utrustat med någon form av reningssystem som avlägsnar svavelföreningar ur avgaserna. Sådana system finns redan ombord på ett litet antal fartyg. Att inte fler fartyg använder dessa system beror på att ett mer effektivt och ekonomiskt sätt att framföra fartyg är att använda lågsvavliga bränslen. Om prisskillnaden mellan hög- och lågsvavligt bränsle blir större kommer dock troligen dessa tekniker utvecklas mer och användas i större utsträckning. Detta kommer då med största sannolikhet att medföra nya problem med kallkorrosion då svavelhalten i bränslet har väldigt stor inverkan. Författarna tror att det i den närmaste framtiden kommer vara en generell nedgång av kallkorrosion då mer lågsvavligt bränsle kan komma att användas. Dessutom är åtgärdsmetoderna relativt väl utvecklade och beprövade. Bränslen som LNG och metanol är på framfart som alternativa bränslen till HFO och MGO som en följd av utsläppskrav. Dessa bränslen innehåller i princip inget svavel och är därför ur kallkorrosionssynpunkt mycket bra alternativ. På grund av dessa och andra lågsvavliga bränslen har Geir Eikemo sett en ökning, om än marginell, på efterfrågan vad gäller cylindermörjolor som passar bra ihop med bränslen som har låg svavelhalt.

Samtidigt så ligger idag mycket av ansvaret och viljan att vidareutveckla metoder och åtgärder hos motortillverkarna. Eftersom de stora motortillverkarna är konkurrenter kan det tänkas att utvecklingstakten för temperaturbaserade åtgärder kommer att skilja sig från smörjoljebaserade åtgärder. Här kommer kanske färre samarbeten att ske men å andra sidan kan konkurrens leda

till ökad utvecklingstakt. Något som kan utläsas i resultatet är att metoderna för att kontrollera kallkorrosion i dagsläget främst är i avhjälpande syften. Att reglera temperaturen på cylinderfodret och hög buffrande förmåga hos cylindermörjolan är effektiva och enkla metoder som dock enligt författarnas tycke är kortsiktiga. Om fokus istället skulle läggas på att tillse att komponenter i bränslet som bidrar till kallkorrosion elimineras skulle en mer permanent lösning nås.

5.3 Metod

En litteraturstudie hade i detta projekt också varit lämplig. Tidigare forskning inom ämnet hade då kunnat jämföras och ett mer reliabelt resultat uppnås. Författarna ansåg dock att det fanns för få vetenskapliga publikationer inom ämnet för att möjliggöra en litteraturstudie. Valet föll istället på en deskriptiv metod för att framförallt i kapitel 2 kunna beskriva uppkomsten och de negativa följderna av kallkorrosion. Trots att rapportens målgrupp förväntas ha stor kunskap inom motorteknik upplevde författarna att det fanns ett flertal delar som behövde beskrivas djupare. En initial tanke var att med MATLAB som grund genomföra avancerade beräkningar med avseende på till exempel verkningsgrad och temperaturer vid olika ingångsparametrar såsom till exempel spilluftstryck, slaglängd och varvtal. Författarna insåg dock efter en tid att detta inte var genomförbart då det begränsades både av författarnas teoretiska kunskap samt att utrustning såsom simuleringsprogram var svårtilgänglig. Vidare är fullständiga och korrekta beräkningar av till exempel tryck och temperaturer i en motor mycket komplext, vilket stöds av både Pieter Zandt och Svend S. Eskildsen. Eftersom det av författarna uppfattades finnas en otillräcklig mängd publicerad information inom ämnet valdes intervjuer som kompletterande metod till den deskriptiva. De personer som valdes ut för de öppet riktade intervjuerna var branschfolk inom olika områden som förväntades ha god insikt i vissa, om inte alla, delar av rapportens problemformulering. Att just öppet riktade intervjuer genomfördes grundas i att de intervjuade personerna har så spridd spetskunskap att en annan intervjuform inte hade varit att föredra. En svaghet med rapporten är att antalet genomförda intervjuer är relativt få, fler infallsvinklar hade varit fördelaktigt. Ett större antal personer och aktörer har sökts för intervjuer men få har haft möjlighet att svara eller bistå med information. Intervjuerna var extra givande då det enligt författarnas uppfattning finns sparsamt med vetenskaplig litteratur inom ämnet kallkorrosion. Svend S. Eskildsen menar också att mängden forskningslitteratur gällande förhållanden relevanta för svavelsyreutfällningar i lågvarviga tvåtaktsmotorer är bristfällig. Det hade dock varit önskvärt att fler intervjuer utförts personligen för att på så sätt få ett mer dynamiskt informationsutbyte. Stora delar av resultatet bygger på information från två olika motortillverkare, MAN Diesel & Turbo samt Winterthur Gas & Diesel. Risken finns då att den informationen kan tolkas som något partisk. Däremot har även mer oberoende aktörer såsom Federal-Mogul, Maersk Oil Trading Lubricants och Univar använts som källor och informationen de tillhandahållit kan ses som generellt giltig. Federal-Mogul har avtal med de tre stora tvåtaktsmotortillverkarna MAN Diesel & Turbo, Winterthur Gas & Diesel samt Mitsubishi Heavy Industries och kan därför anses vara relativt oberoende. Författarna har i presentationen av materialet ansträngt sig i det yttersta att vara opartiska för att inte gagna enskilda företag.

6 Slutsatser

För att på ett enkelt och överskådligt sätt kunna ta del av de viktigaste resultaten i rapporten sammanfattas dessa nedan.

Forskningsfrågor

Som rapportens resultat presenterar finns ingen entydig åtgärd för att hämma negativa effekter av kallkorrosion. En kombination av cylindermörjolja med rätt egenskaper samt en ytemperatur hos komponenter som omöjliggör utfällning av svavelsyra krävs för att säkerställa att kallkorrosion inte förekommer. Rapporten visar att motorer med lång slaglängd är mer utsatta för kallkorrosion än de med kortare. Detta grundar sig i att lägre temperaturer och längre uppehållstid uppnås i cylindern hos de långslagiga motorerna. Bränslet som används inverkar till stor del på bildningen av svavelsyra som leder till kallkorrosion. Bränsle med hög svavelhalt leder till potentiellt mer svavelsyreutfällning. Vatten- och vanadinnehåll bidrar till svavelsyrebildning. Då cylinderväggstemperaturen höjs stiger även förbränningstemperaturen i cylindern. Produktionen av NO_x ökar med ökad temperatur vilket ur en miljösynpunkt är negativt. Ökningen av förbränningstemperaturen är dock så liten att inverkan på NO_x -produktionen inte kommer vara nämnvärt märkbar. Den primära slutsatsen som kan dras av resultatet är att problemet med kallkorrosion generellt är under kontroll, och problemet kan i stora drag anses vara löst. Det finns dock utrymme för fortsatt forskning och förbättringar inom området.

Noggrannhetsanalys

Resultatet som presenteras i rapporten kan anses vara mycket trovärdigt då författarna inte från några källor fått motstridiga uppgifter från någon av källorna. Intervjuobjektens svar och åsikter upplevdes dessutom samstämmiga.

Fortsatt forskning

Författarna anser att vidare forskning mot metoder att konstant hålla rätt BN-tal på cylindermörjoljan, liknande Maersk Fluid Technologys Blending-on-Board, vore lämpligt. Att undersöka vidare automatisering av dosering och byten mellan olika smörjolja för att minska risken för att den mänskliga faktorn spelar in är också lämpligt. För att till fullo kunna förstå problemet kallkorrosion bör även mer forskning kring den komplexa processen för kondensering av svavelsyra bedrivas.

7 Litteraturförteckning

- American Bureau of Shipping. (2001). *Notes on: Heavy fuel oil*. Houston: American Bureau of Shipping. Hämtat från https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/31_HeavyFuelOil/Pub31_HeavyFuelOil den 03 05 2016
- Chevron Marine Lubricants. (2016). *Iso 8217 specifications for marine fuels*. Chevron Marine Lubricants. Hämtat från http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Requirements_for_Residual_Fuel_2010.pdf den 11 04 2016
- Chevron Marine Products LLC. (den 08 04 2013). http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Chevron_InfoBulletin04_BaseNumber_v1013.pdf. Hämtat från Chevron Marine Products: http://www.chevronmarineproducts.com/docs/Chevron_InfoBulletin04_BaseNumber_v1013.pdf 2016
- Costigan, M., Cary, R., & Dobson, S. (2001). *Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium*. Geneva: United Nations Environment Programme, the International Labour Organization, and the World Health Organization, and produced within the framework. Hämtat från <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad29.pdf> den 11 04 2016
- Denscombe, M. (2009). *Forskningshandboken: för småskaliga forskningsprojekt inom samhällsvetenskaperna* (Vol. II). Lund: Studentlitteratur AB.
- Ejvegård, R. (1996). *Vetenskaplig metod* (Vol. 2). Lund: Studentlitteratur AB.
- Elovsson, S. O., & Alvarez, H. (2012). *Energiteknik - Formler och Tabeller* (Vol. 2). Lund: Studentlitteratur AB.
- Fedechko, R., Hanania, J., Heffernan, B., Jenden, J., Stenhouse, K., Toor, J., & Donev, J. (u.d.). *Hydrocarbon Combustion*. Hämtat från Energy Education, University of Calgary: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydrocarbon_combustion#cite_ref-challenge_1-0 den 04 05 2016
- Federal-Mogul. (2016). Alkaliska avlagringar.
- Fellmann, H., Gross, T., & Ludwig, T. (2004). *Typical wear mechanism of 2-stroke exhaust valves*. Royal Belgian Institute of Marine Engineers. Hämtat från http://www.gallois.be/ggmagazine_2006/gg_01_01_2006_7.pdf den 23 03 2016
- Hengeveld, J., Schenk, C., & Aabo, K. (u.d.). *The role of temperature and pressure in the wear process in low speed diesel engines*. Hämtat från

- <http://www.shell.com/content/dam/shell/static/marine-products/downloads/pdf/news-and-library/conference-papers/temperature-pressure/dieselenines.pdf> den 16 03 2016
- Höst, M., Regnell, B., & Runesson, P. (2006). *Att Genomföra Examensarbete*. Studentlitteratur AB.
- Hunt, E. C., Bourneuf Jr, G., Butman, B. S., Butturini, R., Dailey, D. A., Dupuy, P. A., . . . Tiratto, J. (2002). *Modern marine engineer's manual* (III uppl., Vol. II). Centerville: Cornell Maritime Press.
- International Association of Classification Societies. (2016). *Requirements concerning machinery installations*. International Association of Classification Societies. Hämtat från http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Unified_requirements/PDF/UR_M_pdf2793.pdf den 11 05 2016
- International Council on Clean Transportation. (2011). *The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships*. International Council on Clean Transportation. Hämtat från http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTpolicyupdate15_EEDI_final.pdf den 22 03 2016
- International Maritime Organization. (2016). *Prevention of Air Pollution from Ships*. International Maritime Organization. Hämtat från <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> den 01 02 2016
- Jensen, M. C., & Jakobsen, S. B. (2014). *Cylinder Lubrication Update, Adjusting the ACC factor in service*. MAN PrimeServ Copenhagen. Hämtat från <http://primeserv.man.eu/docs/librariesprovider5/service-letter-marine/sl2014-587.pdf?sfvrsn=2> den 17 04 2016
- Kuiken, K. (2012). *Diesel Engines for Ship Propulsion and Power Plants* (Vol. 2). Onnen, Netherlands: Target Global Energy Training.
- Maersk Fluid Technology. (2016). *Blending-on-Board*. Maersk Fluid Technology. Hämtat från <http://www.maerskfluid.com/index.php/blending> den 08 04 2016
- MAN Diesel & Turbo. (2011). *Basic Principles of Ship Propulsion*. MAN Diesel & Turbo.
- MAN Diesel & Turbo. (2012). *G-type engine revolutionary ultra-long-stroke*. MAN Diesel & Turbo. Hämtat från https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/5510-0104-01pp_low.pdf?sfvrsn=12 den 22 03 2016
- MAN Diesel & Turbo. (2014). *Operation on Low-Sulphur Fuels*. MAN Diesel & Turbo.

MAN Diesel & Turbo. (2014). *Service Experience MAN B&W Two-stroke Engines*. MAN Diesel & Turbo.

MAN PrimeServ. (2016). MAN PrimeServ Sweden.

International Maritime Organization. (den 1 februari 2016). Hämtat från <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

Panossian, Z., de Almeida, N. L., de Sousa, R. M., de Souza Pimenta, G., & Marques, L. B. (2012). *Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: A review*. Hämtat från http://ac.els-cdn.com/S0010938X12000595/1-s2.0-S0010938X12000595-main.pdf?_tid=d4ed9bd8-1b5c-11e6-bb34-00000aacb361&acdnat=1463399800_f5b4cfc3f995be87eaf549ead8fde0f2 den 11 03 2016

Statens Hydrologiska och Meteorologiska Institut. (2012). *Svaveldioxid*. Statens Hydrologiska och Meteorologiska Institut. Hämtat från <http://www.smhi.se/reflab/om-luftfororeningar/luftfororeningar/svaveldioxid-1.19621> den 08 02 2016

The Royal Institution of Naval Architects. (2014). *Acid test for modern marine diesels*. The Royal Institution of Naval Architects. Hämtat från http://www.rina.org.uk/Acid_test_for_modern_marine_diesels.html den 08 02 2016

Transportstyrelsen. (2016). *SOx - svaveloxider*. Transportstyrelsen. Hämtat från <https://www.transportstyrelsen.se/sv/sjofart/Miljo-och-halsa/Luftfororening/SOx---svaveloxider/> den 18 04 2016

Wärtsilä. (2012). *Wärtsilä Generation X Low-Speed Engines Set New Milestone In Fuel Efficiency*. Wärtsilä. Hämtat från <http://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ls-x-engine/w%C3%A4rtsil%C3%A4-generation-x-low-speed-egnines-set-new-milestone-in-fuel-efficiency.pdf?sfvrsn=0> den 23 03 2016

Wärtsilä. (2015). *Wärtsilä and China State Shipbuilding Corporation's 2-stroke engine joint venture to start operations*. Wärtsilä. Hämtat från <http://www.wartsila.com/media/news/19-01-2015-wartsila-and-china-state-shipbuilding-corporations-2-stroke-engine-joint-venture-to-start-operations> den 16 04 2016

Wiesmann, A. (2010). *Slow steaming – a viable long-term option?* Wärtsilä. Hämtat från <http://www.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Engine-Services--2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf?sfvrsn=0> den 10 03 2016

Woodyard, D. (2004). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (Vol. IIX). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Zumdahl, S. S., & DeCoste, D. J. (2013). *Chemical Principles, Seventh Edition*. Boston: Brooks.