

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Ny kolvringslösning till stirlingmotorer för elproduktion från solen	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska New piston ring solution in stirling engines for electricity production from the sun	
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet	Avdelning/institution Institutionen för teknikvetenskap och matematik
Adress Luleå tekniska universitet, 97187 Luleå	
Namn på projektledare Pär Marklund	
Namn på ev övriga projektdeltagare Marcus Björling, Yijun Shi, Pontus Johansson	
Nyckelord: 5-7 st Piston ring, Polymer material, stirling engine, tribology	

Förord

Projektet är finansierat av energimyndigheten och har genomförts i samarbete mellan Luleå tekniska universitet och Azelio. Företaget Azelio hette vid projektstart Cleanergy, men bytte namn under 2018 i samband med att deras produktportfölj utökades med att de lanserade en termisk energilagrings-lösning som komplement till deras stirlingmotor-baserade elektriska generator. Stirlingmotorn är även central i energilagringslösningen som har utvecklats av Azelio och projektets huvudmål, att förlänga livslängden för stirlingmotorn, är således lika aktuellt i denna produkt som i t.ex. CSP (Concentrated Solar Power) systemen.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	5
Ny testupställning för polymera material till kolvringer för Stirlingmotorer	5
Cylinderyta i kombination med polymera material	6
Arbetsfördelning	6
Resultat	7
Polymer material till kolvringer för Stirling motorer.....	7
Cylinderyta i kombination med polymera material	10
Diskussion.....	10
Publikationslista.....	12
Referenser, källor.....	13
Bilagor	13

Sammanfattning

Projektet har fokuserat på att förlänga livslängden och minska servicekostnaderna för Stirlingmotorn. Syftet med detta är att öka nyttjandegraden och minska driftskostnaderna för stirlingmotorn vid framställning av förnybar el via CSP (Concentrated Solar Power) och t.ex. förbränning av biogas från avfallsanläggningar. De framtagna resultaten kan även bidra till längre livslängd och minskade driftskostnader vid lagring av elektrisk energi i form av termisk energi vid anläggningar som producerar mer elektricitet när behovet inte är lika stort som tillgången. Detta är ofta fallet vid förnybar el-framställning från sol och vindenergi som inte är möjlig att lagra och anpassa till efterfrågan på samma sätt med exempelvis vattenkraft.

För att CSP ska vara ekonomisk fördelaktigt i jämförelse med PV (Photo Voltaic), vilket i dagligt tal brukar benämnas som ”solceller”, krävs att kostnad för drift och underhåll av CSP-anläggningar som använder sig av stirlingmotorer för omvandling av termiskt- till elektrisk energi kan reduceras. Detta åstadkoms i sin tur genom att minska slitaget på motorns kolvringer vilket ger ett ökat serviceintervall och en längre total livslängd hos motorn. Endast vid minskade servicekostnader kan en CSP-anläggning få en lägre kostnad per kWh än en PV-anläggning vilket i praktiken är nödvändigt för att få genomslag på energimarknaden och därmed kunna ge sekundära fördelar gentemot PV-tekniken, såsom minskad miljöbelastning vid tillverkningen. På samma sätt är stirlingmotorns livslängd och serviceintervall av stor relevans vid lagring av elektrisk energi via omvandling till termisk energi där den termiska energilagringen som involverar stirlingmotorn konkurrerar med batterier.

Den huvudsakliga anledningen till servicekostnader på en stirlingmotor är kolring/foder-kontakten som arbetar vid höga temperaturer, höga glidhastigheter och utan smörjning. Denna tribologiskt utmanande kontakt har därmed legat i fokus under projektet och detaljerade testmetoder har utarbetats för att kunna

vidareutveckla nya kombinationer av kolvrings-/foder-material och -ytstrukturer. Ett antal nya kolvringsmaterial har också tagits fram och utvärderats i projektet och dessa undersökningar kommer att ligga till grund för framtida kolvringslösningar till stirlingmotorn som kan komma att kunna förlänga serviceintervallet på stirlingmotorn väsentligen och därmed markant minska de totala driftskostnaderna.

Summary

This project has focused on extending the service life and reducing service costs for the Stirling engine with regard to enabling the use of and reducing the operating costs for the Stirling engine in the production of renewable electricity via CSP (Concentrated Solar Power) and also from e.g. combustion of biogas from waste facilities. The results obtained can also contribute to longer service life and reduced operating costs for storing electrical energy in the form of thermal energy at plants that produce electricity when the need is not as great as the supply. This is often the case with renewable electricity production from solar and wind energy that is not possible to store and adapt to demand in the same way as what is possible with e.g. hydropower.

In order for CSP to be economically advantageous in comparison with PV (PhotoVoltaic), which in everyday speech is usually referred to as "solar cells", it is required that the cost of operation and maintenance of CSP plants that use Stirling engines, for the conversion of thermal to electric energy, is reduced. This is enabled by increased service interval and prolonging service life for the Stirling engine which in turn is accomplished by lowering wear of the piston rings used in the engine. Only with reduced service costs can a CSP plant have a lower cost per kWh than a PV plant, which in practice is necessary to have an impact on the energy market and thus be able to provide secondary advantages over PV technology such as reduced environmental impact during production. The same applies to storage of electrical energy via conversion to thermal energy via Stirling engines, where the energy storage competes with batteries.

The main reason for service costs on a Stirling engine is the piston ring/ liner contact that operates at high temperatures, high sliding speeds and without lubrication. This tribologically challenging contact has thus been in focus in the project and detailed test methods have been developed to be able to further develop new combinations of piston ring / lining materials and surface structures. A number of new piston ring materials have also been developed and evaluated in the project and these investigations will form the basis for future piston ring solutions for the Stirling engine, which will enable an extended service interval for the Stirling engine and thus greatly reduce the total operating costs.

Inledning/Bakgrund

Förnybar energi förväntas bli en allt större del av den globala elproduktionen. Detta projekt förväntas öka potentialen till ytterligare användning av förnybar energi, samt även förbättra system som lagrar energi vid intermittent energiproduktion.

Generering av elektrisk energi från solen via CSP (Concentrated Solar Power) har miljömässiga fördelar gentemot PV-teknologi (Photo Voltaic, eller i dagligt tal "solceller"). CSP-system som använder Stirlingmotorer för omvandling av termisk energi till elektrisk energi lider dock av en högre LCC (Life cycle cost) än PV-system, främst beroende på servicekostnaden hos Stirlingmotorn p.g.a. nötning i motorns kolvring/foder-kontakter. En förlängning av motorns serviceintervall skulle kraftigt reducera LCC för systemet och göra det ekonomiskt fördelaktigt att investera i en CSP-anläggning istället för en PV-anläggning vilket i sin tur skulle ge en minskad miljöbelastning i och med minskade utsläpp och föroreningar i samband med tillverkning av energianläggningen samt i ett eventuellt tillhörande energilager.

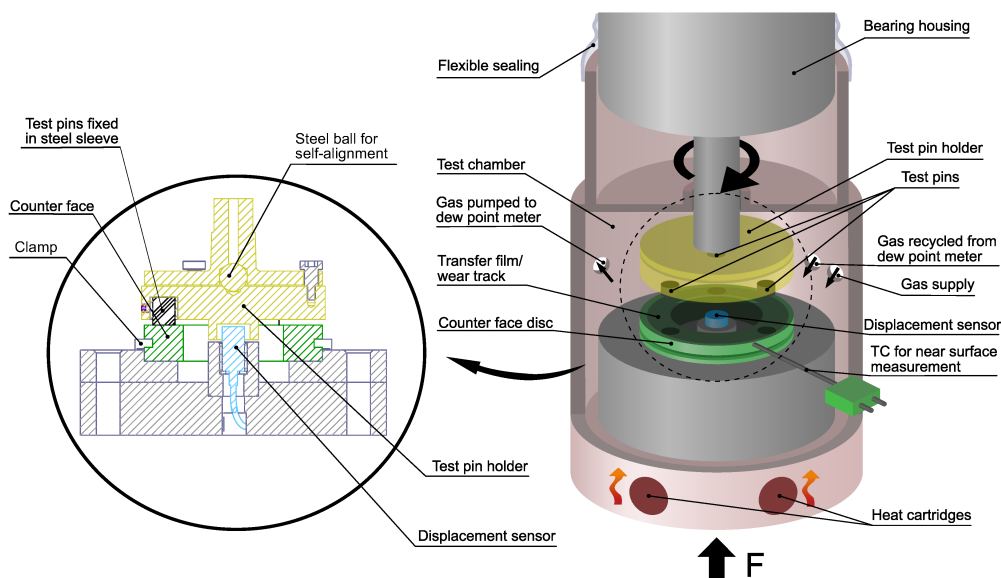
Kolvring/foder-kontakten i en Stirlingmotor arbetar vid höga temperaturer, höga glidhastigheter och helt utan smörjning. Förbättring av nötningsmotståndet i denna tribologiskt utmanande kontakt har legat i fokus och detaljerade testmetoder har utarbetats i projektet för att kunna vidareutveckla nya kombinationer av kolvrings/foder-material och ytstrukturer. Inom projektet har ett antal nya kolvringsmaterial tagits fram och utvärderats och dessa undersökningar kommer att ligga till grund för framtida kolvringslösningar till stirlingmotorn som planeras att testas och utvärderas i motortest hos Azelio i en nära framtid. Azelio är tillverkare av Stirlingmotorbaserade CSP-system och lagringssystem av elektrisk energi genom omvandling mellan elektrisk och termisk energi via en Stirlingmotor av samma typ som i CSP-systemen.

Arbetet har genomförts i ett treårigt samarbetsprojekt mellan Luleå tekniska universitet (Ltu) och Azelio (tidigare Cleanergy) och har finansierats av energimyndigheten. I det vetenskapliga arbetet har Ltu huvudsakligen stått för den tribologiska kartläggningen och utvecklingen av nya polymera kolvringsmaterial och cylinderfoder medan Azelio har stått för anpassning av, tillämpning och testning av nya material i applikation.

Genomförande

Ny testuppställning för polymera material till kolringar för Stirlingmotorer

En ny testuppställning har tagits fram för att bättre kunna efterlikna de driftsvillkor som materialen kommer att utsättas för i stirlingmotor-applikationen. I tidigare testriggar har det varit begränsad möjlighet att reglera temperatur eller atmosfär för att efterlikna driftsvillkoren i en Stirlingmotor. I ett tidigt skede av projektet påvisades fukten vara en extremt viktig parameter då nötning och friktion påverkades kraftigt av fuktnivån i gasatmosfären för modelltesterna. Gasanalyser har även visat att gasatmosfären i Azelio's stirlingmotorer är väldigt torr. Stort fokus lades därför på att utveckla ett system för att noggrant mäta och kontrollera fukten under modelltesterna för att bättre imitera atmosfären i en stirlingmotor. Fukten ansågs vara den viktigaste gasparametern där typ av gas ansågs spela mindre roll för gaser av liknande karaktär. Av denna anledning användes kvävgas istället för helium i modelltesterna. Den utvecklade testuppställningen är av typen tri-pin-on-disc och kan ses i figur 1.



Figur 1-Illustration av testuppställning.

En testmetod har arbetats fram för att uppnå hög repeterbarhet och ge resultat relevanta för slutapplikationen. Repeterbarheten verifierades genom upprepade tester med samma driftsvillkor.

En utredning utfördes för att undersöka hur friktion och nötning påverkades av fukt. Tester utfördes vid tre olika fuktnivåer inom och utanför fuktspannet inne i Azelio's motorer. I denna studie undersöktes två polymera komposit, dels den som används av Azelio idag, samt en liknande kommersiellt tillgänglig PTFE-kolfiberkomposit. Två motytematerial användes också i denna studie där den ena

var tillverkad av samma sorts gjutjärn som Azelio's cylinderfoder och det andra var ett seghärdat stål, SS2541.

Modelltester har utförts på tre olika polymerkompositer, inkluderat det material som används av Azelio i nuläget, i liknande driftsvillkor som i Azelio's stirlingmotorer. De material som testades mot nuvarande kolvringsmaterial var PTFE baserade och innehöll olika typer av fibrer och tillsatser.

Cylinderyta i kombination med polymera material

Som tidigare nämnts testades två olika cylindermaterial i fuktstudien. Detta gjordes för att se om materialet på motytan påverkade effekten av fukten på friktion och nötning.

Preliminära tester på olika ytfinheter på motytan har också utförts och jämförts med tidigare forskning.

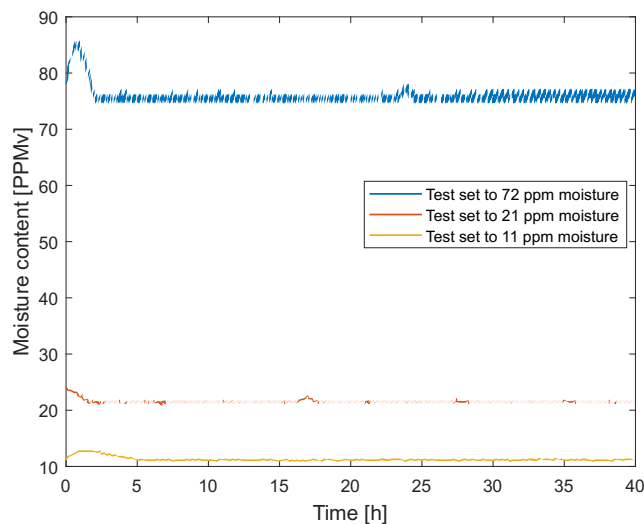
Arbetsfördelning

Huvuddelen av arbetet har utförts av doktoranden Pontus Johansson under handledning och assistans av Pär Marklund, Marcus Björling och Yijun Shi. Pär och Marcus har huvudsakligen varit involverade i konstruktionen av den nya testriggen samt försöksplaneringen. Yijun Shi har huvudsakligen varit involverad i materialfrågor. Ett flertal anställda på Azelio har varit behjälpliga med bland annat driftsvillkor och mätningar på stirlingmotorer.

Resultat

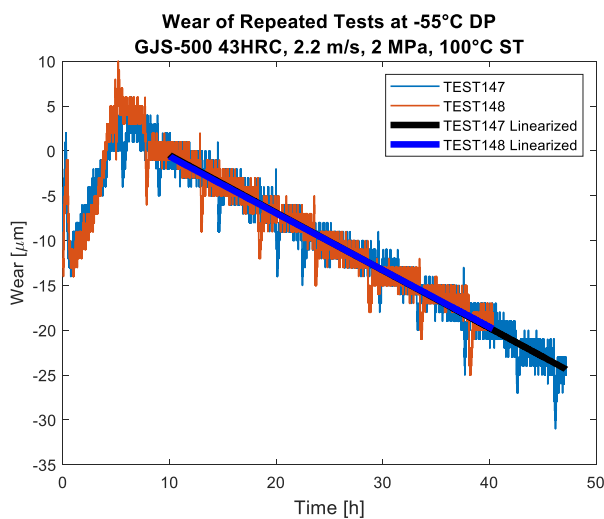
Polymera material till kolringar för Stirlingmotorer

Med den utvecklade testuppställningen kan både fukthalt och temperatur styras med hög noggrannhet och kontrolleras för att överensstämja med den atmosfär som kolringarna arbetar i. Ett exempel på hur konstant en specificerad fuktnivå kan hållas under testning kan ses i figur 2.



Figur 2- Prestanda på fuktkontrollering för tre fuktnivåer i utvecklad testuppställning.

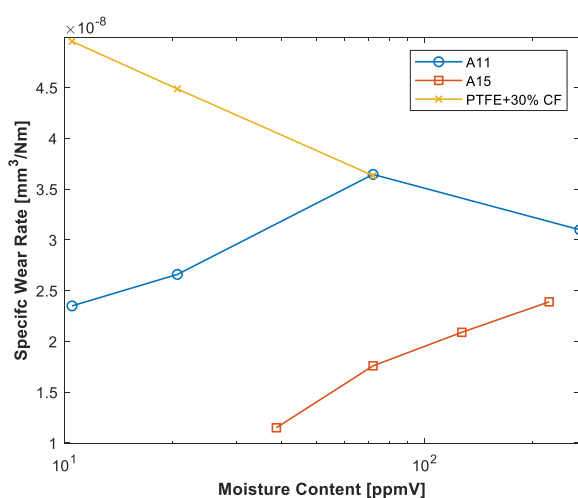
Den slutgiltiga testmetoden visade på hög repeterbarhet. För de allra flesta testade driftsförhållanden och materialpar kunde en variation på lägre än 10% för både nötning och friktion erhållas för repeterade tester. Figur 3 visar ett exempel på hur repeterbar nötning som kan erhållas med denna testmetod. Nötningshastigheten representeras av den linjäriserade lutningen på nötningsskurvan. Den genomsnittliga nötningshastigheten tas efter 10 timmar då inkörningsperioden är avslutad och konstant temperatur är uppnådd.



Figur 3-Nötningsskurvor och linjäriserad nötningshastighet för repeterat test.

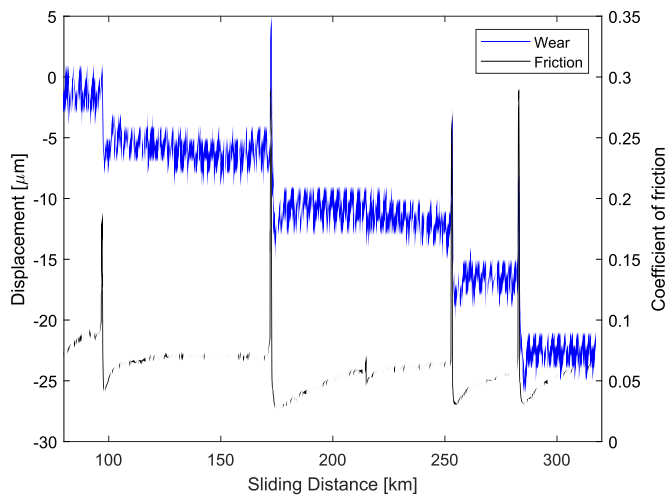
Fuktstudien visade att fukten har stor betydelse på nötningen av polymera material och t.o.m. en spridning på olika fukthalt på ppm-nivå ger stor spridning i nötningstakt. Inom spannet av testade fuktnivåer kunde en skillnad på uppemot 40% i nötning ses. Hittills har endast kvävgas använts men studier visar på liknande beteenden av friktion och nötning av polymera material för helium och kvävgas. Fuktstudien resulterade i en artikel som är publicerad i journalen Tribology International [1]. Studien presenterades även på Tribology Days 2020 för över 100 deltagare. Tribology Days är en internationell konferens som årligen anordnas av Luleå tekniska universitet.

Resultat från modelltesterna, Figur 4, visar att ett av de testade materialen, A15, ger mer än halverad nötningstakt för de flesta fuktnivåer jämfört med A11 som i nuläget används i Azelio's motorer. Friktionskoefficienten för A15 kunde anses likvärdig med den för A11 för de flesta fuktnivåer.



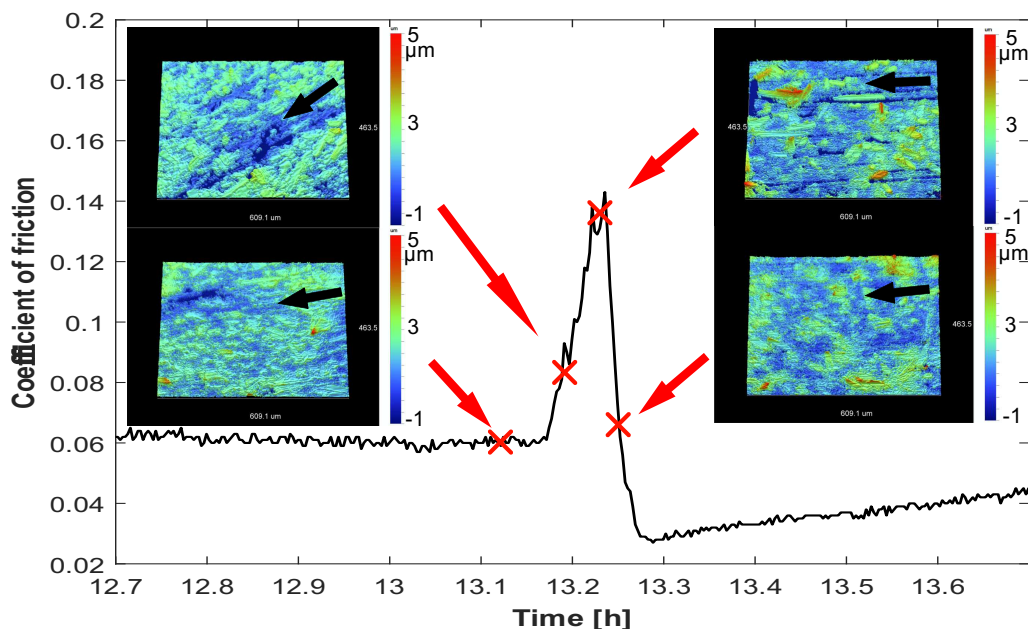
Figur 4- Nötningstakter av tre kolvringsmaterial för olika fuktnivåer.

Alla de testade materialen i Figur 4, inklusive nuvarande kolvringsmaterial, visade ett önskat nötningsbeteende med stundvis hög nötningstakt, se figur 5.



Figur 5-Typiskt nöttnings- och friktionsbeteende för testade polymerkompositer och driftförhållanden.

Som ses i figuren förekommer periodvis korta stunder med allvarlig nötning. Detta beteende undersöktes genom att stanna repeterade tester i olika tidpunkter innan och under friktionstoppar vilka var kopplade till den snabba nötningstakten, se figur 6. Glidytan på polymerkompositen och motytan undersöktes med optisk interferometri. Studien indikerade att den stundvis höga nötningstakten berodde på yt-utmattning. Det framgick även att yt-utmattningen skedde betydligt mer sällan för de högpresterande materialen än de lågpresterande.



Figur 6-Topografin på en polymerkomposit vid olika tidpunkter innan och under en friktionstopp.

Cylinderyta i kombination med polymera material

Från fuktutredningen visades det att trenden för nötning och friktion över olika fuktnivåer varierade beroende på cylindermaterialet. För de två testade cylindermaterialen gav gjutjärnsytan aningen lägre nötning för nuvarande polymerkomposit. Däremot kunde en trefaldig minskning av friktionen ses för tester på stålytan.

De preliminära testerna med olika ytfinhet på motytan, dvs cylinderfodret, visar att ytfinhet påverkar nötningen signifikant. Detta överensstämmer med tidigare forskning som ofta visar på att en optimal ytfinhet går att finna. Däremot varierar detta optimum beroende på material och driftsförhållanden, varför fler tester bör göras innan någon slutsats kan dras om vilken ytfinhet som leder till lägst nötning för de olika kolvringsmaterialen.

Diskussion

För att uppnå relevanta resultat och kunna jämföra olika kolvringsmaterial under liknande driftsvillkor som i Stirlingmotorn behövde mycket tid läggas på utvecklingen av testuppställningen. Då fukten visades ha stor påverkan på nötning och friktion behövdes ett system för att mäta och reglera fukten tas fram, samt fuktens påverkan undersökas innan något av arbetspaketet kunde genomföras. Detta ledde till att vissa av arbetspaketet var tvungna att prioriteras ner. På grund av fuktens inverkan på nötning och friktion prioriterades tester i kolvringsrigg ner då en kontrollerad gasatmosfär i en kolvringsrigg hade krävt stora ombyggnationer och tagit för mycket tid av projektet. Därför valdes istället att prioritera modelltester i en tri-pin-on-disc-maskin för att senare ha mer genomarbetade resultat att validera vid motortest i stirlingmotorriggar hos Azelio.

Det rigorösa arbetet med testuppställning har lett till en mycket välfungerande metod att undersöka och jämföra olika material och ytor för användning i stirlingmotorer. Fuktstudien har visat att enbart genom att optimera och kontrollera fukten i stirlingmotorerna så skulle en stor del av projektmålet kunna uppfyllas.

Då utvecklingen av testuppställning och testmetod tog längre tid än väntat har inte alla kolvringsmaterial testats ännu. Därmed finns det möjlighet att andra polymera material som inte hunnit testats ännu presterar ännu bättre än de som hittills testats. Flertalet andra undersökningar kan också göras för att minska nötningstakten ytterligare. Genom djupare utredningar av yt-utmattningen som vissa material visade skulle nya material möjligtvis kunna tas fram med högre motstånd mot yt-utmattning och därmed lägre total nötningstakt. En utförligare utredning av påverkan av cylinderytans ytfinhet och kemiska sammansättning skulle också behöva göras. För att verifiera resultat från modelltesterna skulle fältprov i applikation i slutändan behöva utföras.

Från de modelltester som gjorts tyder resultaten på att både nötningshastigheten och friktionen kan minskas markant genom att byta material på kolvringsarna och cylinderfodret. Målet att uppnå en halverad nötningstakt och minska

frikionsförlusterna har inte verifierats med fältprov i applikation men modelltester visar starka tecken på att målet kan uppfyllas genom rätt materialkombination på kolringar och cylinderfoder. Att byta ut dagens kolvringsmaterial mot det bäst presterande kolvringsmaterialet, samt byta ut gjutjärnsmaterialet i cylinderfodret till ett annat material, till exempel det testade SS2541 stålet, skulle mycket möjligt kunna ge halverad nötningstakt i kombination med minskad eller bibehållen friktion i applikation. Eftersom en bättre materialkombination i kolring/cylinderfoder-kontakten även, förutom minskad nötning, kan ge en lägre friktion skulle en optimerad kontakt inte bara minska service och livscykelkostnaderna utan även leda till ökad verkningsgrad i stirlingmotorerna. Den ökade verkningsgraden skulle i sin tur leda till att mer energi skulle kunna utvinnas från solen på samma storlek av anläggning. Lägre nötningshastighet skulle leda till längre serviceintervaller, minskade underhållskostnader och lägre LCC. Detta i sin tur skulle kunna vara nyckeln för att öka intresset för applikationen och nå ut till fler kunder och öka den totala elproduktionen av solenergi i samhället.

Publikationslista

Examensrapport:

- P. Johansson
New piston ring solution for Stirling engines
DiVA, 2019, tillgänglig från:
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-75236>

Artiklar:

- P. Johansson, P. Marklund, M. Björling, Y. Shi
Effect of humidity and counterface material on the friction and wear of carbon fiber reinforced PTFE composites
Tribology International, 2021,
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106869>
- P. Johansson, K. Kalliorinne, P. Marklund, M. Björling
Method for evaluating dry sliding environments for polymer composites *Under review, MethodsX*

Konferenser:

- P. Johansson, P. Marklund, M. Björling
Effect of humidity and counterface material on the friction and wear of carbon fiber reinforced PTFE composites
Tribology Days, 2020-11-10, internationell digital konferens given av Luleå tekniska universitet

Övriga publikationer i t.ex. dagstidningar och populärvetenskapliga tidningar:

- <https://www.ltu.se/research/subjects/Maskinelement/Nyheter-och-aktuellt/Lagrad-solenergi-kan-ge-framtida-exportsucce-1.168554?l=en>
- <https://www.nyteknik.se/energi/stirlingmotorns-detalj-kan-bli-succe-for-solenergin-6873843>
- <https://kuriren.nu/nyheter/lulea/sa-ska-ltu-skapa-nasta-exportsucc-nm4652494.aspx>
- <https://nsd.se/nyheter/lulea/sa-ska-ltu-skapa-nasta-exportsucc-nm4652494.aspx>
- <https://affarerinorr.se/nyheter/2017/september/forskare-ska-foerbaettra-stirlingmotorer/>
- <https://pt.se/nyheter/pitea/lagrad-solel-kan-bli-succ-10642344.aspx>

Referenser, källor

- [1] P. Johansson, P. Marklund, M. Björling, and Y. Shi, “Effect of humidity and counterface material on the friction and wear of carbon fiber reinforced PTFE composites,” *Tribology International*, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2021.106869.

Bilagor

- Administrativ bilaga
- Vetenskaplig artikel: Publikation i Tribology International (filnamn: Paper1_Tribology_International_publicerad.pdf)
- Vetenskaplig artikel: Inskickat manus under review i MethodsX (filnamn: Paper2_MethodsX_under_review.pdf)
- Presentationsmaterial från konferensen Tribology days 2020 (filnamn: Tribodays_2020_presentationsmaterial.pdf)