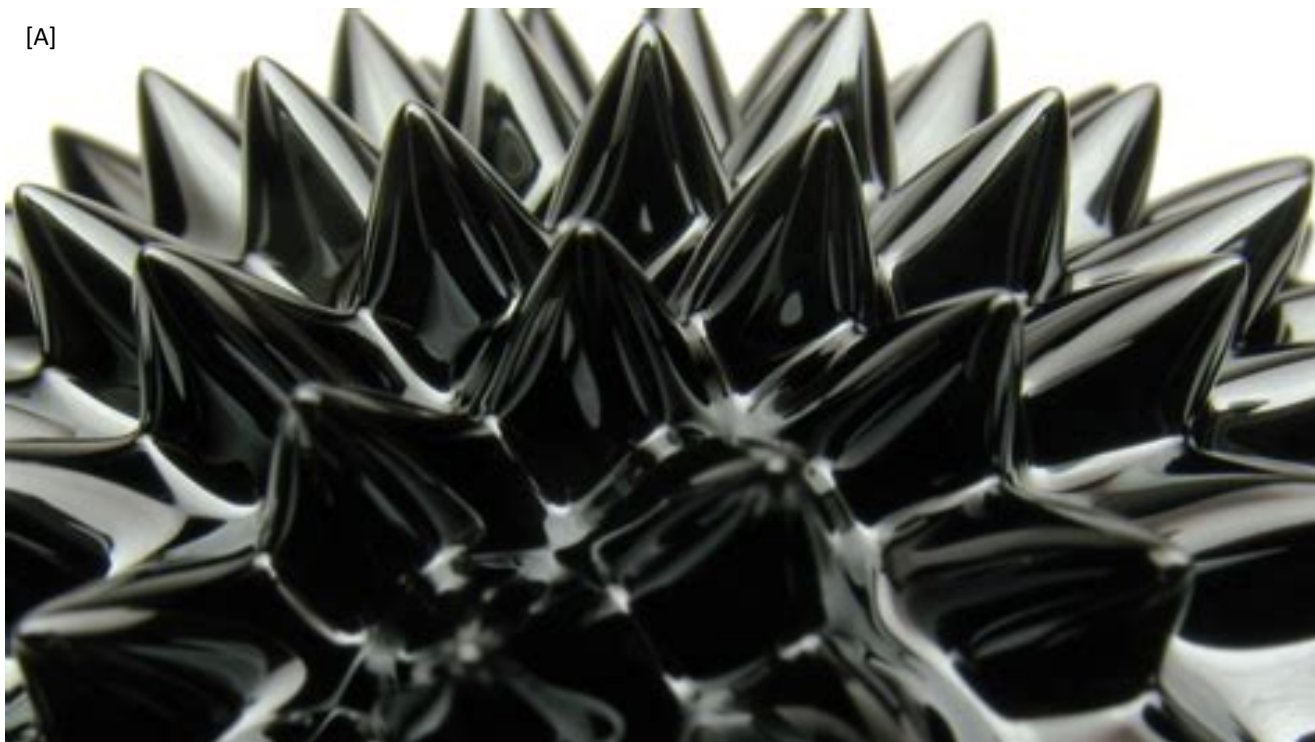


[A]



Ferromagnetiske Væsker og deres evne som industrielt smøremiddel

ET PROJEKT TIL UNGEFORSKERE-SENIOR KONKURRENCEN

MATIAS FOURNAIS-SANCHEZ

Indholdsfortegnelse

Motivation	2
Problemformulering	2
Eksisterende viden	2
Hypotese	3
Metoder	3
Syntese	3
Materialer	4
Kemikalier	4
Risici:.....	4
Syntese af FV	4
Diffraktion	5
Måling af friktionskoefficient	6
Resultater og perspektiver	6
Syntese.....	6
Friktionskoefficient.....	7
Konklusion	8
Bibliografi	8

[A] <https://www.flowvis.org/2015/11/12/the-normal-field-instability-in-a-ferrofluid-results-from-the-concentration-of-the-magnetic-field-by-the-fluid-restrained-by-surface-tension/> by Jean Hertzberg and students at CU Boulder used under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

Motivation

Friktion er et problem, som vi døjer meget med i denne verden. Tandhjul slides ned i tungt maskineri, og tog er begrænset af friktion på en sådan måde at de hurtigste tog i dag er MagLev-tog, som kræver upraktiske superledere, det vil sige elementer, som skal køles ned til ca. 100° K. Ferromagnetiske væsker (FV'er) er en lovende kandidat til at kunne virke som friktionsreducerende smøremiddel, som vil kunne bruges både til at formindske togs friktion med deres skinner, og samtidig blive brugt som et industrielt smøremiddel, som kan forlænge de smurte elementers levetid og formindske den tunge industris nuværende forbrug af smøremiddel på over 35 mio. årlige tons [5]. Dette skyldes, at FVer er blevet vist til at have friktionsreducerende effekter, når de er påvirket af et magnetisk felt [1]. Jeg vil sammenligne en FV med eksisterende industrielle smøremidler for at efterprøve om man burde erstatte de eksisterende smøremidler med FVer. Hvis dette bliver tilfældet, kunne man forvente, at det ville føre til hurtigere kinetiske tog, længere tid mellem at dele i tungt maskineri skal erstattes, samt en kraftig formindskning i industriens brug af forbrug af olieprodukter i form af smøremiddel.

Problemformulering

I denne undersøgelse ønsker jeg at undersøge hvor svært det er at producere FVer, og hvordan FVer effektivitet som smøremiddel forholder sig til konventionelle industrielle smøremidler. Jeg vil gøre dette ved at finde svar på følgende spørgsmål:

- Hvor følsom er den kemiske produktionsproces af FV?
- Hvad er en FVs friktionskoefficient når den er udsat for et magnetisk felt, og hvordan forholder denne sig til bærevæskens og andre industrielle smøremidlers?
- Hvad er den FVs forblivelsesgrad på det smurte element og hvordan forholder dette sig til bærevæskens og andre industrielle smøremidlers?
- Hvad er den FVs øvrige fysiske egenskaber og hvordan forholder dette sig til bærevæskens og øvrige industrielle smøremidlers?

Eksisterende viden

Der er tre yderst vigtige punkter for projektet. De er som følger:

- En FV er en colloidal suspension af magnetiske nanopartikler, oftest magnetit, i en bærende væske. Denne bærende væske kan være kulhydrater, vand, kulfluorider, estere, diestere, organo-metaller eller polyphenylestere. En sådan FV kan ændre viskositet, når den udsættes for et magnetisk felt [2] og tiltrækkes af magneter for at danne et friktionsreducerende lag [3] [1].
- Det er vist, at en FV har en friktionsreducerende effekt under høje hastigheder når påvirket af en permanent magnet [1].
- Det er muligt at lave FVer gennem en relativt simpel kemisk proces ved at blande vandige opløsninger af Jern(II)chlorid og Jern(III)chlorid [3].

Ved først at syntetisere FVen og derefter undersøge væskens fysiske karakteristika som bl.a. friktionskoefficient og bevarelse på det smurte element, er det muligt at bedømme væskens egnethed som smøremiddel, samt hvordan smøremidlet bedst bruges i en industriel kontekst. Nogle kilder [1] kunne tyde på, at det kan bruges på skinner til brug ved høje hastigheder, mens andre [2] foreslår brug af FVer til hydrauliske systemer, hvor det kan forventes, at brug af FVer vil nedbringe mængden af spildt hydraulisk væske, hvilket vil forbedre disse hydrauliske systemers bæredygtighed; samt smøring af tandhjul på bedre maner end normale smøremidler, hvilket ville formindske slid på tandhjulene og forlænge deres levetid.

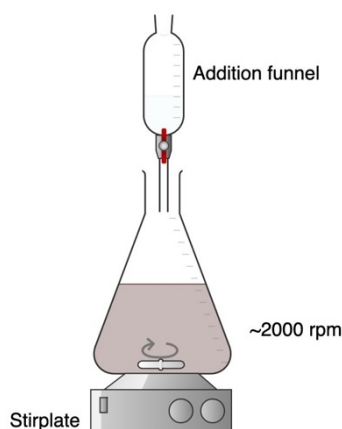
Hypotese

Min hypotese, baseret på mine kilder, er at FVer vil være et mere effektivt smøremiddel end konventionelle smøremidler når det smurte element er af magnetisk natur. Det vil sige at FVen vil have en lavere friktionskoefficient samt en højere bevarelse på det smurte element.

Metoder

Syntese

Jeg har først været nødsaget til at syntetisere en FV for at kunne udføre mine øvrige eksperimenter. Jeg har her valgt at gøre brug af Nigel Brauns metode [3] fordi den var succesfuld, veldokumenteret og let tilgængelig. Jeg valgte dog at lave eksperimentet i mindre skala for at gøre det mere overkommeligt. Dette betyder, at jeg har brugt $4,53 \cdot 10^{-2} mol$ jern(II)chlorid og $7,4 \cdot 10^{-2} mol$ Jern(III)chlorid. Da reaktionen kræver dobbelt så meget jern(III) som Jern(II), er den begrænsende faktor Jern(III) med et maksimalt teoretisk udbytte på $3,7 \cdot 10^{-2} mol$. Dette er dog ikke det faktiske maksimale udbytte, da Jern(II) oxiderer til Jern(III) under aerobe forhold. Syntesen blev lavet i en konisk kolbe og omrøring blev udført ved en teflondækket magnetomrører. En tegning af opstillingen kan ses nedenfor:



En tremundet, rund kolbe blev originalt valgt for at tillade at lave en yderligere syntese under et nitrogen flow, der skal undersøge om det ændrer på produktets renhed at lave syntesen i et iltfattigt system, givet at Jern(II) oxiderer til Jern(III) når det kommer i kontakt med ilt. Denne udgave af syntesen blev i sidste ende ikke udført pga. at den runde bund formindskede den maksimale omrøringshastighed, samt tidsbegrænsninger og det at flasken viste sig at være upraktisk. Efter en succesfuld syntese blev en konisk kolbe valgt da

den flade bund tillod højere omrøringshastighed. En detaljeret beskrivelse af syntesen er som følger:

Materialer

- 1 2L konisk kolbe
- Magnetisk- omrører og rørepind
- 1 tilføjelsestragt
- 1 25 mL bægerglas
- 1 magnet
- 250 mL bægerglas
- 1 desikator
- 1 Rørepind af glas
- pH-indicating paper

Kemikalier

- 0.0453 mol Jern(II)klorid tetrahydrat
- 0.0740 mol Jern(III)klorid hexahydrat
- Ca. 150 g Koncentreret ammoniumhydroxid
- 100 ml isopropanol
- 7,5 g mineraloile
- 11 g oliesyre
- Demineraliseret vand
- saltsyre

Risici:

Koncentreret ammoniumhydroxid er kaustisk og kan forårsage forbrændinger og øjenskade.

Mineralolie og isopropanol er letantændelige.

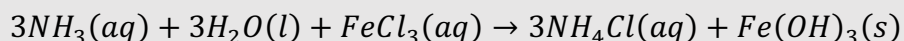
Nanopartikler kan være kræftfremkaldende hvis de bliver indåndet.

Syntese af FV

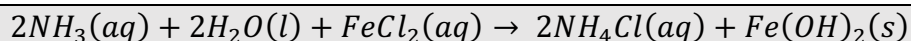
For opstilling se figur 1:

1. Hæld 0,75 L demineraliseret vand i en 2 L konisk kolbe. Omrør ved ca. 450 rpm ved stuetemperatur.
2. Hæld 0,0453 mol Jern(II)klorid tetrahydrat og 0,0740 mol Jern(III)klorid hexahydrat i kolben. Omrør i ca. 10 min.
3. Gennem en tilføjelsestragt, tilsæt 50 g ammoniumhydroxid over et tidsrum på 20 min. Omrør med en hastighed på ca. 1200 rpm.

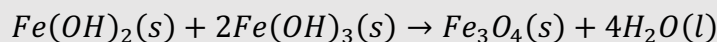
Når blandingen når en pH på 4 sker følgende reaktion:



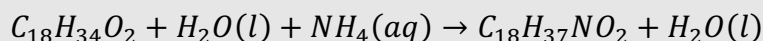
Når blandingen når en pH på 9 sker følgende reaktion:



Derefter sker følgende reaktion:



4. Omrør i yderligere 15 min.
5. Mens der omrøres, bland 4 g oliesyre, 5 mL demineraliseret vand og 2,5 mL ammoniumhydroxid i et 25 mL bægerglas. Omrør ved håndkraft indtil blanding har en tyktflydende tekstur. Reaktionen som foregår, er som følger:



6. Tilsæt yderligere 7,5g ammoniumhydroxid til blandingen i kolben. Kontroller at blandingen har en pH på over 8.
7. Tilsæt ammoniumoleatet til kolben når pH er over 8. Omrør for yderligere 20 min. mens omrøringshastigheden forøges til 1900 rpm.
8. Tilsæt langsomt saltsyre indtil blandingen har en pH mellem 6 og 7.
9. Stop omrøringen og lad magnetiten falde til bunden.
10. Hæld vandet ind i et 250 mL bægerglas og separer vandet fra magnetiten med en magnet. Hæld vandet fra.
11. Tilsæt nok demineraliseret vand til at dække magnetiten. Separer vandet fra magnetiten med en magnet og hæld vandet fra. Gentag 3 gange.
12. Tilsæt nok isopropanol til at dække magnetiten. Separer isopropanolen fra magnetiten med en magnet og hæld isopropanolen fra. Gentag 3 gange.
13. Efter vaskene, tør magnetiten i en desikator. Sænk trykket langsom for at undgå bobler.
14. Efter at det har tørret, vej det resulterende pulver og sammenlign med det teoretiske maksimum.
15. Tilsæt mineralolie som svarer til 85% af magnetitens masse. Omrør med håndkraft indtil suspensionen er koloidal.

Diffraktion

For at måle på det syntetiserede produkts renhed er en røntgendiffraktion af stoffet blevet lavet. Dette fungerer ved at bestråle stoffet med en gammastråle med kendt bølgelængde, som så reflekteres, eller træder ind i krystalstrukturen og bliver diffrakteret. Disse diffrakterede bølger vil så kun interfererer hinanden konstruktivt når følgende ligning gælder:

$$n\lambda = 2\sin\theta d$$

hvor n er et helt tal og d er afstanden mellem atomerne i stoffets krystalgitter.

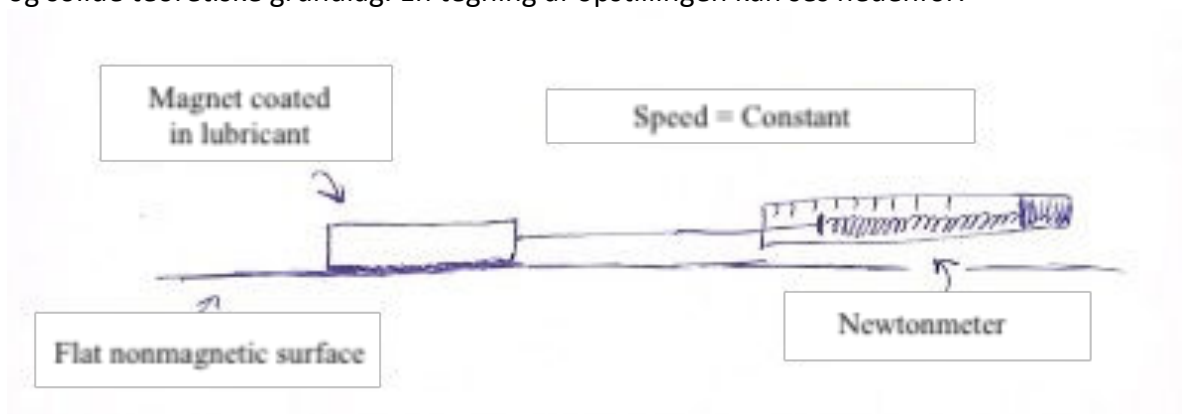
Vi kan gøre brug af denne metode, fordi det ønskede stof, magnetit, [jern(II,III)oxid] har en krystallisk struktur. Da vi arbejder med et pulver antager vi at krystallerne er tilfældigt orienterede så en statistisk signifikant mængde af alle lag i krystalstrukturen har en orientering der tillader dem at diffrakterer bølgerne.

Måling af friktionskoefficient

For at måle friktionskoefficienter er en magnet blevet smurt ind i smøremiddel og trukket ad en vandret overflade med konstant hastighed. Et newtonmeter har så målt hvor meget kraft, der skulle bruges. Da summen af alle de kræfter, der påvirker et element i konstant hastighed er nul, ifølge Newtons anden lov, kan man så udregne friktionskoefficienten μ ved følgende formel:

$$\mu = \frac{F}{g \cdot m}$$

Hvor F står for den påførte kraft i newton g står for tyngdeaccelerationen $9,82 \text{ m/s}^2$, og m står for magnetens masse i kilogram. Metoden er blevet valgt på grund af dens simplicitet og solide teoretiske grundlag. En tegning af opstillingen kan ses nedenfor:



En overflade af glatlakeret træ blev valgt som et eksempel på en umagnetiske overflade. Det antages at lakken giver en approksimation af umagnetiske metaller's glathed.

Måling af fordampningsrate

1 mL smøremiddel lagdes på et urglas, og blev efterladt i 16 timer. Derefter blev det vurderet kvalitativt hvor meget stof der var fordampet.

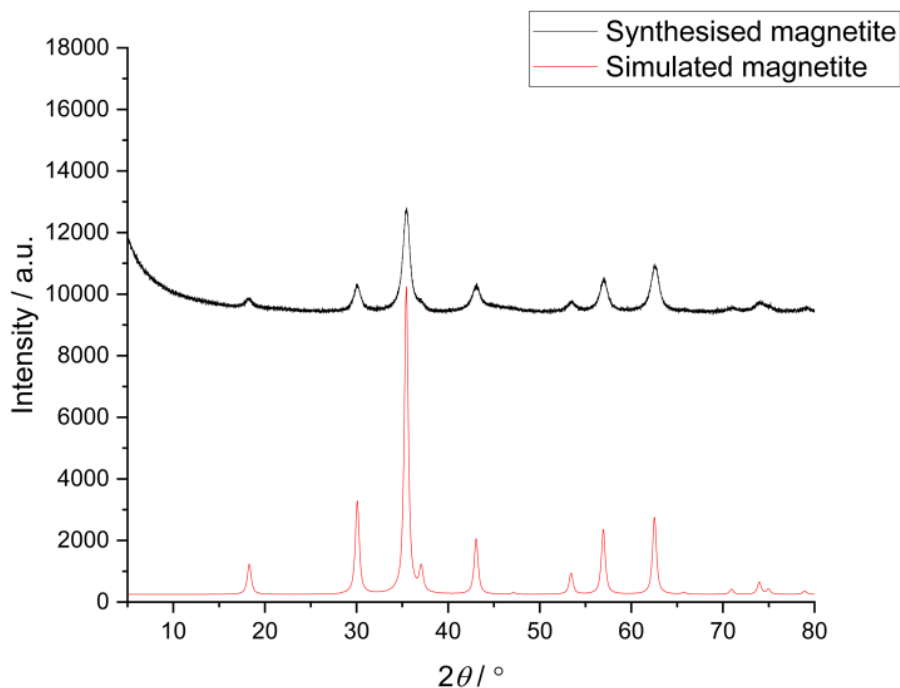
Resultater og perspektivering

Syntese

Syntesen foregik succesfuldt, med 8,8g produceret magnetit. Det svarer til $3,8 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$ magnetit. Det giver os et teoretisk udbytte på:

$$\frac{3,8 \cdot 10^{-2} \text{ mol}}{3,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol}} = 103\%$$

Dette resultat er ikke som sådan overraskende da den begrænsende faktor ville forøges under forsøget da Jern(II) oxideres til Jern(III). Det er også muligt at bekræfte at produktet er magnetit ved at se på røntgendiffractionen af produktet, som følgende graf viser.



Det kan ses at målingen viser udsving de samme steder, som det simulerede stof. Dette betyder at det målte stof er det samme som det simulerede stof. Udsvingenes bredde i målingen i forhold til simulationen kan enten skyldes små urenheder eller det at krystallerne formodes at være på nano-skala, hvilket muligvis kunne have en effekt på hvordan strålingen reflekteres fra stoffet.

Friktionskoefficient

Friktionskoefficienten og smøremiddelsbevarelse for en svag magnet (masse = 64,4g) ved grænesmøring på en umagnetisk overflade af glatlakeret træ er blevet fundet til at se ud som følger:

Smøremiddel:	Trækraft / N	Friktionskoefficient	Bevarelse af smøremiddel
Uden smøremiddel	0,22 N	0,35	Ingen
Mineralolie	0,10 N	0,16	begrænset
Mineralolie baseret ferromagnetisk væske	0,34 N	0,54	høj

Syntesen blev lavet endnu en gang hvor højere omrøringshastighed blev opnået, hvilket medførte en mindre partikelstørrelse. Med denne så resultaterne ud som følger:

Smøremiddel:	Trækraft / N	Friktionskoefficient	Bevarelse af smøremiddel	Udtørring efter 16 h ved 16°C
Uden smøremiddel	0,20 N	0,35	- -	- -
Mineralolie	0,12 N	0,16	middel	Ingen ændring
WD-40	0,16 N	0,25	middel	50% af volumen

Mineralolie baseret ferromagnetisk væske	0,10 N	0,54	høj	Ingen ændring
--	--------	------	-----	---------------

Det ses at FVen, når den har en egnet partikelstørrelse, har en lavere friktionskoefficient end både kontrol, mineralolie og WD-40. Samtidigt med at den også har den bedste bevarelse på det smurte element. Fordampningsraten ser ikke ud til at have ændret sig i forhold til bærervæsken. Det bør kommenteres at både bevarelsen af smøremidlet på det smurte element og mængden af fordampet stof er estimeret med det blotte øje.

De initiale resultater i forhold til friktionskoefficient modstrider tidligere undersøgelser, som har vist at FVer bør virke friktionsreducerende når de er påvirket af et magnetisk felt ved lave hastigheder [1]. At dette skyldtes partiklerne i FVens størrelse kan deduceres ud fra at bedre resultater blev fundet med en væske med en mindre partikelstørrelse. Det har ikke været muligt at udføre en grundig undersøgelse af det præcise forhold mellem partikelstørrelse og friktionsreducerende effekt, men det ville være et vigtigt og interessant emne at undersøge.

Givet at den tilgængelige mængde FV begrænsede hvor mange yderligere forsøg det var muligt at lave, vil det være hensigtsmæssigt at syntetisere større mængder, hvis yderligere undersøgelser ønskes foretaget. Hvis dette gøres, ville det være interessant at undersøge om det påvirker den bærende væskes andre fysiske egenskaber, som f.eks. frysepunkt og viskositet at omdanne væsken til en FV, samt hvordan henholdsvis den bærende væske og magnetfeltets styrke og retning påvirker FVen. Det forventes at yderligere undersøgelser vil forøge forståelsen for FVer og deres industrielle anvendelsesmuligheder.

Konklusion

Efter en succesfuld syntese og følgende analyser af FVens friktionskoefficient og bevarelsesgrad kan det konkluderes at FVen virker friktionsreducerende i forhold til bærervæsken på en overflade af glatlakeret træ ved grænsesmøring. Det vil derfor give mening at udskifte bærervæsken med FV i situationer hvor et magnetisk felt kan inkorporeres. Samtidigt viser dens forhøjede bevarelse på det smurte element sig lovende i forhold til benyttelser hvor smøremidlet er tilbøjeligt til at blive tabt af det smurte element. Et eksempel på en sådant tilfælde kunne være et tandhjul som samler smøremiddel op ved at køre gennem en pøl af det for blot at tabe det senere i rotationen. I sådanne tilfælde vil benyttelsen af FVer markant kunne formindske den nødvendige mængde af smøremiddel samt forlænge tandhjulets levetid pga. den formindskede friktionskoefficient. Denne reduktion i brug af smøremiddel kunne pga. det globale forbrug på over 35 mio. tons årligt [5] nemt bestå af flere hundrede tusind tons smøremiddel.

Det kan også konkluderes at syntens af FVer er relativt ufølsom, med undtagelse af rotationshastigheden som kan påvirke det endelige resultat markant med en ændring på blot 200-300 rpm. Samt at bærervæskens fordampningsrate ikke ændres ved omdannelse til FV.

Bibliografi

- [1] S. Miyakase og S. Takahashi, »Sliding bearing lubricated with ferromagnetic fluid,« *ASLE Transactions*, årg. 28, nr. 4, pp. 461-466, 1984.
- [2] A. K. Desarkar og B. H. Clampitt, »Evaluation of Ferrofluids as Lubricants,« *Journal of Synthetic Lubrication*, pp. 105-112, 1988.
- [3] N. Braun, »Making ferrofluid from scratch,« 5 July 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=6L8yUY-doNc>. [Senest hentet eller vist den January 2023].
- [4] J. Aizarani, »Global lubricant demand 2000-2028,« 31 January 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/411616/lubricants-demand-worldwide/>. [Senest hentet eller vist den April 2023].

Tusind tak til Professor Kasper Steen Pedersen på DTU for at have tilladt mig at gøre brug af sit laboratorie, et røntgendiffraktometer og et magnetometer. Samt til PhD studerende Anna Schannong Manvell for at have vejledt mig i syntesen og brugen af ovennævnte instrumenter. Dette projekt kunne ikke være blevet udført uden jer.

Tak til Joachim Schwender Produktspecialist Ferrofluid, Ferrotec Europe; og Samir Merano LCA specialist, DTU Biosustain; for at svare på mine spørgsmål i forhold til industrien.