

Kristoffer Aaen Svendsen

Kartlegge og prosjektere mulig løsning for overvåkning av feilseparering av jernmalm i magnetseparator.

Bacheloroppgave i Kjemiingeniør

Veileder: Eirik Sundby

Medveileder: Jan Erik Nilssen

Mai 2023

Kristoffer Aaen Svendsen

Kartlegge og prosjektere mulig løsning for overvåkning av feilseparering av jernmalm i magnetseparator.

Bacheloroppgave i Kjemiingeniør
Veileder: Eirik Sundby
Medveileder: Jan Erik Nilssen
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for materialteknologi



Kunnskap for en bedre verden

Kartlegge og prosjektere mulig løsning for overvåkning av feilseparering av jernmalm i magnetseparator.

Investigate and design a possible solution for monitoring faulty separation of iron ore in a magnetic separator.

Bacheloroppgave

Prosjektnummer: IMA-B-1-2023

Innleveringsdato: 19.05.2023

Gradering: Åpen

Forfatter: Kristoffer Aaen Svendsen

Intern veileder: Eirik Sundby

Oppdragsgiver: Sydvaranger Drift AS

Kontaktperson: Marius Aaen Svendsen &
Jan Erik Nilssen



Institutt for materialteknologi

Forord

Denne rapporten er et resultat av bachelorprosjektet ved 6. semester ved kjemiingeniør-utdanningen på Norges tekniske- og naturvitenskapelige universitet. Oppgaven ble foreslått av Marius Aen Svendsen ved Sydvaranger Drift AS, og har gitt meg anledning til å oppleve hvordan det er å jobbe med prosess tekniske prosjekter.

Jeg vil rette en stor takk til min kontaktperson ved Sydvaranger Drift, Marius Aen Svendsen, og min eksterne veileder Jan Erik Nilssen, og resten av teamet hos Sydvaranger Drift for faglig hjelp og disponibelt kontor.

Jeg ønsker også å takke min interne veileder Eirik Sundby for gode kommentarer og god hjelp til skriving av oppgaven.



Kristoffer Aen Svendsen

Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å kartlegge og projisere mulige løsninger for å overvåke feilseparering ved magnetisk separasjonsteknikk av jernmalm. Problemet når det oppstår feilseparering er tap av magnetisk jern ut i avgangen, som fører til inntektstap. Dette kan løses ved å finne en online måleteknikk for å oppdage økte nivåer av magnetisk jern i avgangen fra magnetseparatoren. Oppdragsgiver, Sydvaranger Drift AS, har per dags dato ikke drift i anlegget, derfor vil oppgaven være en teoretisk studie. For å kartlegge om det finnes slik utstyr, ble de største leverandørene av separasjonsutstyr kontaktet, og i tillegg andre nordiske jernmalmgruver. Av de leverandørene som svarte, hadde ingen av dem tidligere vært borti den type utstyr. På grunn av sin enkelhet samt eksisterende prøveuttak, ble et system hvor en del av avgangsstrømmen hentes ut og sendes gjennom en spole for å detektere induisert spenning foreslått. Enkle utregninger viser at den foreslåtte løsningen vil være sensitiv nok. På grunn av flere usikkerhetsmomenter, samt antakelsene som er gjort må det gjennomføres et pilotprosjekt for å bekrefte/teste om dette vil fungere i praksis.

Abstract

The purpose of this study is to assess and project potential solutions for monitoring error separation in magnetic separation techniques of iron ore. The issue arises when erroneous separation occurs, resulting in the loss of magnetic iron in the output, leading to financial losses. To address this, an online measurement technique is needed to detect increased levels of magnetic iron in the output from the magnetic separator. The client, Sydvaranger Drift AS, currently does not have operational facilities, making this study purely theory based. To determine the availability of such equipment, the major suppliers of separation equipment were contacted, as well as other Nordic iron ore mines. None of the suppliers who responded had prior experience with this type of equipment. Due to its simplicity and existing sampling capabilities, a system involving the extraction of a portion of the waste and passing it through a coil to detect induced voltage was proposed. The proposed system is shown mathematically to be sensitive enough. However, due to several uncertainties and assumptions, a pilot project must be conducted to confirm/test the feasibility of this approach in practical settings.

Innholdsfortegnelse

FORORD	II
SAMMENDRAG	III
1. INNLEDNING	5
1.1 HISTORIE	5
1.2 FRA BRUDD TIL SEPARATOR	5
1.3 BAKGRUNN	6
2. TEORI.....	7
2.1 JERNMALM	7
2.2 MAGNETITT OG HEMATITT	7
2.3 MAGNETISERING OG MAGNETISK SUSCEPTIBILITET	7
2.4 MAGNETISK SEPARASJON.....	8
2.5 SVAK- OG STERKFELTSEPARASJON.....	8
2.6 VÅTTROMMEL LAV INTENSITETS MAGNETSEPARATOR (LIMS).....	9
2.7 PARAMETERE	10
2.8 MÅLETEKNIKK	10
2.9 MAGNETFELTSSENSOR.....	11
2.9.1 Hall effekt sensor.....	12
2.9.2 Magnettransistor.....	12
2.9.3 Flukssensorer.....	12
2.10 FARADAYS LOV OG ELEKTROMAGNETISK INDUKSJON.....	13
2.11 BEREGNING AV INDUSERT SPENNING	13
2.12 BEREGNE AVGITT MAGNETISK FLUKS FRA EN MAGNET	14
2.13 MAGNETISK STØY	14
2.14 SKJERMING AV MAGNETISK STØY.....	14
2.15 DATABEHANDLING.....	15
3. METODE.....	16
4. DISKUSJON OG RESULTAT	17
4.1 FORSKJELLIGE SENSORER.....	17
4.2 TEORETISKE VERDIER VED FEILSEPARERING	19
4.3 Plassering av sensorer.....	19
4.4 MAGNETISK STØY	20
4.5 FORSTERKNING AV MAGNETFELT FRA SPOLE	20
4.6 RESTMAGNETISME	21
4.7 DRIFTSPARAMETRE	21
4.8 HOMOGENITET	21
4.9 SPLITTE STRØMMEN	21
4.10 UKRAINSK STUDIE.....	22
5. LØSNINGSFORSLAG.....	23
6. KONKLUSJON.....	27
REFERANSELISTE.....	28
VEDLEGG.....	29
Vedlegg 1: utregninger.....	29

1. Innledning

1.1 Historie

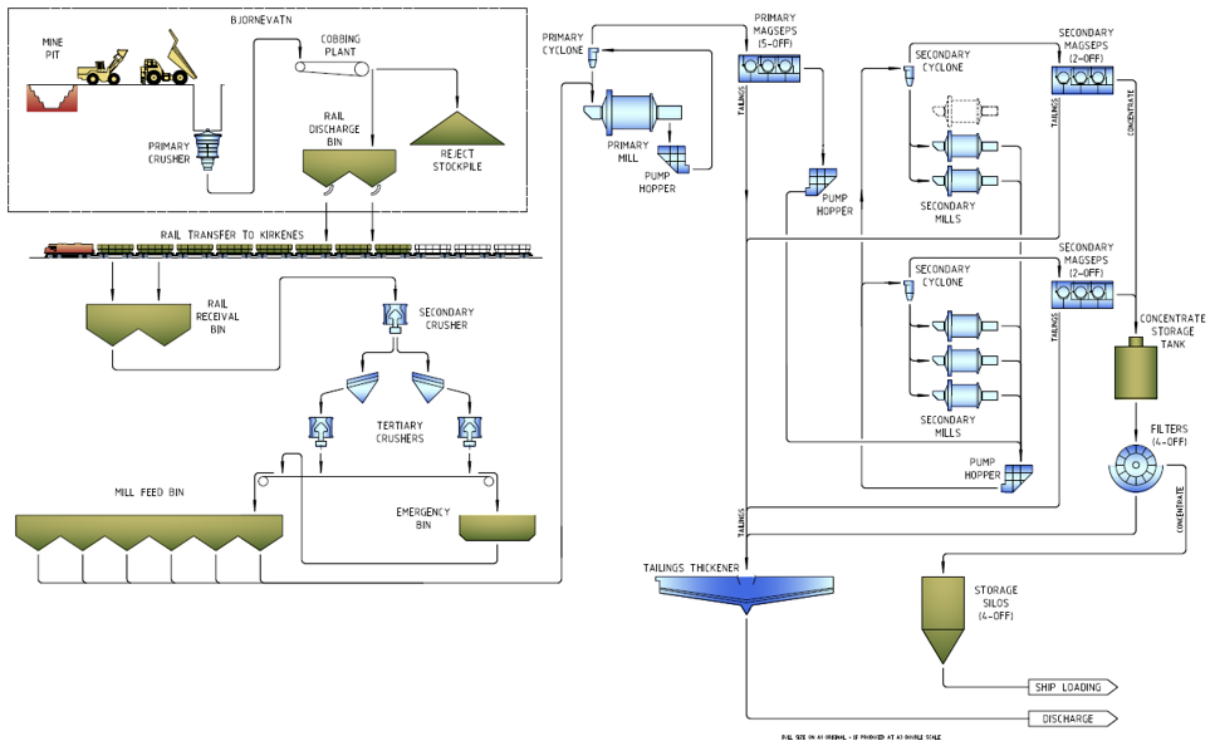
Det ble først påvist malmforekomster i Bjørnevatn-feltet i 1866, og allerede i 1906 ble det hentet inn privat kapital fra Norge, Sverige og Tyskland. Etter en kapitalinnhenting til å starte drift av gruen, ble driften raskt satt i gang. Det første toget med jernmalm gikk fra Bjørnevatn til Kirkenes allerede i 1910. Gruven ble driftet fra dette første toget i 1910 og frem til 1997, det ble under denne perioden produsert 200 millioner tonn jernmalm av varierende kvalitet. Under andre verdenskrig tok tyskerne over gruen, og den ble deretter bombet av russiske styrker. På grunn av dette, samt dens posisjon ved den russiske grensen ble gruen igjen bygd opp med Marshall-hjelpen. Gruven meldte oppbud i 1997 på grunn av synkende pris på jernmalm, og den var derfor ikke levedyktig. [1]

I 2009 ble gruen startet opp igjen, da med kapital fra Australia, det var da drift i gruen frem til slutten av 2015, da det på nytt ble meldt oppbud. Etter dette kom Orion Mine Finance inn på banen som eier, og det har blitt lagt inn store ressurser til å gjennomføre en mulighetsstudie, sertifisering, og oppgraderinger av gruen i påvente av ny drift. [1]

1.2 Fra brudd til separator

Hele prosessen starter i dagbruddet i Bjørnevatn, hvor brutt stein kjøres inn til et knuseverk, her kjøres berget gjennom en knuse- og forseparering, hvor berget blir knust ned til en mer håndterbar størrelse. Denne knuste massen blir deretter kjørt gjennom en magnetisk tørresparasjon, som forseparerer gråberget fra magnetittholdig malm. Gråberget kjøres tilbake til bruddet, mens malmen lastes på tog for frakt ned til oppredningsverket som ligger i Kirkenes. Når malmen ankommer Kirkenes dumpes den ned i en knusersilo, som sender malmen gjennom en ny knusesløyfe for å redusere kornstørrelsen til massen videre. Etter knusesløyfen sendes massen inn på en primærmølle, som fortsetter å male ned malmen til en enda finere kornstørrelse. Herfra sendes malmen igjennom et syklobatteri for klassifisering, etter sikteverket sendes produktet igjennom en primær magnetseparator, som videreforedler jernmalmen og dermed øker magnetittkonsentrasjonen. Dette konsentratet kjøres igjennom en sekundærmølle for å male malmen til et enda finere produkt, før konsentratet kjøres inn på en sekundær magnetseparator for videre oppkonsentrering av magnetittinnholdet. Dette konsentratet sendes igjennom nye hydroykloner, hvor partikler av korrekt størrelse sendes på en tertiær magnetseparator og sikteverk for oppkonsentrering til endelig produkt. Dette

produktet tørkes før det lastes på skip for eksport. Figur 1 viser et flytskjema som gir et oversiktsbilde av alle stegene i prosessen, fra dagbruddet til produktet er klart for eksport. [2]



Figur 1 viser et forenklet flytskjema fra dagbruddet i Bjørnevatn, og alle stegene før produktet er ferdigbehandlet og klar til eksport. Hentet fra [3]

1.3 Bakgrunn

Per dags dato har gruen en utslippstillatelse som er på 4 millioner tonn tørrstoff som utslipp per år [4]. Laboratoriedata fra perioden 27. mars 2015 frem til 19. november 2015 viser et gjennomsnittlig tap av produkt på 0.69% per dag av avfallsmassene som deponeres [5]. Dette utgjør et totalt produkttap på 27 600 tonn, med en malmpris på 130 USD per tonn per 20. mars 2023 tilsvarer dette et tap på 3 588 000 USD per år [6]. Valutakursen fra DNB var per 20. mars 2023 10.76 NOK/USD, noe som betyr et tap på ca. 38,6 millioner NOK [7]. Det er også verdt og merke seg at dersom denne mengden hadde blitt tatt ut som produkt ville gruen kunne produsert mer malm før de ville truffet utslippsgrensen satt av miljødirektoratet.

2. Teori

2.1 Jernmalm

Jernmalm er en type mineral som inneholder forskjellige jernforbindelser, og brukes derfor som råmateriale for å utvinne jern. Generelt finner man to viktige mineraler i jernmalm, da hematitt (Fe_2O_3) med jerninnhold på 70%, og magnetitt (Fe_3O_3) med jerninnhold på 72,4%. I Sydvaranger gruve hentes det ut jernmalm som kun inneholder magnetitt. Det finnes også andre jernholdige mineraler, men da med lavere jerninnhold, som vanskeliggjør utvinningen med tanke på et økonomisk bærekraftig perspektiv. Jernmineralene er ofte også blandet sammen med andre mineraler som ønskes fjernet, eksempler på hva jernmalm kan inneholde er vist i figur 1. Det finnes områder med svært rike magnetitt- og hematittforekomster, men en stor del av det som utvinnes på verdensbasis er jernmalmer med lavere magnetitt og hematittinnhold. Disse malmene kalles; Takonittmalm (Banded iron formation), som er en blanding av magnetitt og kvarts, hvor Fe utgjør fra ca 18 til 35%, det er slik malm som utvinnes i gruveanlegget i Sør-Varanger. De to andre malmene er Itabirittmalm, som er en blanding av hematitt og kvarts, og den siste malmen er Minnettemalm, som er en blanding av limonitt, hematitt og kvarts. [8]

2.2 Magnetitt og hematitt

Magnetitt er et ferri-magnetisk jernoksid [9]. Det at et mineral er ferri-magnetisk betyr at det er magnetisk, men ikke like sterkt magnetisk som ferromagnetiske mineraler som spontant kan danne permanente magneter [10]. Hematitt er et annet jernoksid, men hematitt er i forskjell til magnetitt, ikke magnetisk, og disse to jernoksidene kan derfor separeres fra hverandre ved hjelp av magnetisk separasjon. [8]

2.3 Magnetisering og magnetisk susceptibilitet

Det at magnetitt er ferri-magnetisk betyr at det er mulig å påføre mineralet et magnetfelt, og på denne måten gjøre at partiklene vil avgi et sterkere magnetfelt [8, 11]. Dersom et sterkt nok magnetfelt brukes, kan mineralet gjøres om til en permanentmagnet. Magnetisk susceptibilitet er et mål på om, og hvor sterkt magnetfelt som eventuelt kreves for å magnetisere et mineral [11, 12]. Etersom magnetitt har svært høy magnetisk susceptibilitet, som vist i tabell 1 betyr dette at det ikke vil kreve mye for å gjøre magnetitt mer magnetisk, i forhold til eksempelvis hematitt som har betraktelig lavere magnetisk susceptibilitet. [11]

2.4 Magnetisk separasjon

Magnetisk separasjon er en separasjonsteknikk som utnytter forskjellen i den magnetiske permeabiliteten til forskjellige stoffer [13]. Magnetseparasjon ble innen oppredning tatt i bruk som metode på 1800-tallet, og to fordeler med denne separasjonsmetoden er én, at det er et vidt størrelsesspekter på partiklene, da fra to mikrometer, opp til 200 millimeter. Den andre fordelen er at metoden ikke benytter kjemikalier, og dette medfører at prosessen er rimelig, og bedre med tanke på HMS knyttet til kjemikaliehåndtering. Separasjonsmetoden kan deles inn i to kategorier, da svakfeltseparasjon, og sterkfeltseparasjon. [13]

2.5 Svak- og sterkfeltseparasjon

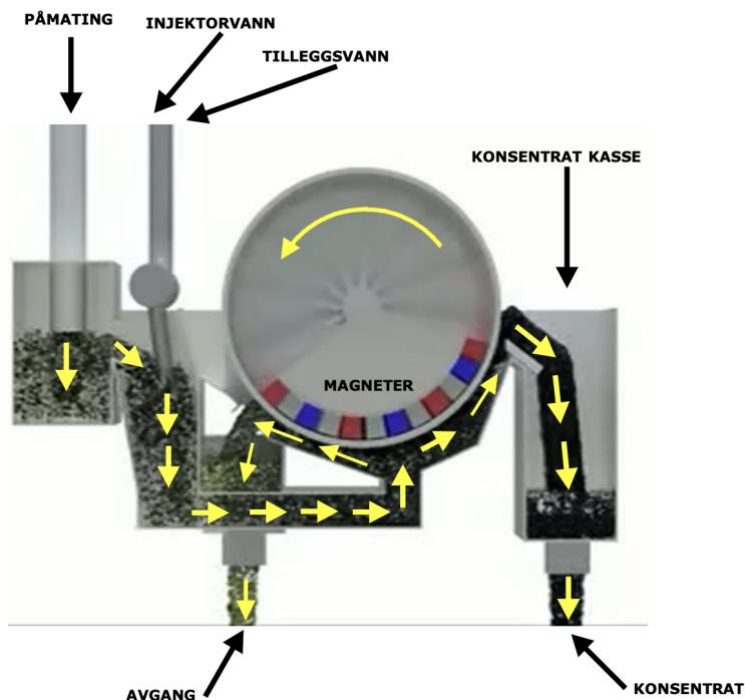
Svakfeltseparasjon som metode bruker et relativt svakt magnetfelt for å kunne tiltrekke seg sterkt magnetiske mineraler, her er det ofte brukt permanente magneter som kilde til magnetfeltet. Sterkfeltseparasjon bruker da sterke magnetfelt, gjerne ved bruk av en eller fler elektromagneter, for å tiltrekke seg andre mineraler med lavere magnetisk susceptibilitet. Videre kan metoden også deles inn i tørr- og våtseparasjon, hvor tørrseparasjon egnes best for større partikler, gjerne grovere enn 70 mikrometer. Grunnen til at tørrseparasjon egner seg bedre for større partikler er at det er vanskelig å lage en våt miks av partikler med større diameter. Våtseparasjon egner seg best for mindre partikler, fra 2-3 millimeter og ned til 2-3 mikrometer [13]. Tabell 1 viser forskjell i magnetisk susceptibilitet for forskjellige mineraler som gjerne finnes i jernmalm. Her ser man forskjellen i magnetisk susceptibilitet mellom magnetitt og hematitt, hvor susceptibiliteten til magnetitt er fra 100-1000 ganger høyere enn for hematitt. Det er denne forskjellen i susceptibilitet som muliggjør bruk av svakfeltseparasjon for å separere mineralene.

Tabell 1 viser en tabell med forskjellige verdier for magnetisk susceptibilitet for forskjellige mineraler. Hentet fra [13].

Mineral	Formel	Spesifikk susceptibilitet [10 ⁻⁹ m ³ /kg]
Kalkspat	CaCO ₃	-45,2
Flusspat	CaF ₂	-7,9
Kvarts	SiO ₂	-5,7
Barytt	BaSO ₄	-3,8
Sinkblende	ZnS	-3,3
Dolomitt	MgCa(CO ₃) ₂	15,1
Rutil	TiO ₂	12 - 50
Ilmenitt	(Fe,Mg,Mn)TiO ₃	200 - 1500
Sideritt	FeCO ₃	380 - 1500
Hematitt	Fe ₂ O ₃	500 - 7000
Magnetitt	Fe ₃ O ₄	500.000 – 50.000.000

2.6 Våttrommel lav intensitets magnetseparator (LIMS)

Våttrommel lav intensitets magnetseparator er et eksempel på en medstrøms våt svakfeltseparator, figur 1 viser et eksempel på hvordan en slik separator ser ut, sett fra siden. Påmatning er da oppmalt og grovseparert jernmalm, som blandes med ekstra vann i en blandingskasse før det føres inn mot magnettrommelen. Det er kun trommelen som roterer, mens magnetstellet henger i ro innenfor trommelen. Dermed tiltrekkes de sterkt magnetiske partiklene magneten og fester seg på utsiden av trommelen, der de blir fraktet opp til konsentratkassen, hvor de deponeres og kan videreforedles. Det som ikke er magnetisk, vil sendes ut igjennom avgangsrøret og føres videre til et deponi. Noen av de situasjonene som kan oppstå er for eksempel at matehastigheten er for høy, og at det dermed ikke blir separert ut alt av magnetisk jern som vil medføre tap av ønskelig produkt i avgangsstrømmen. Det er også en mulighet for at uønsket materiale innkapsles av magnetisk materiale og blir med videre til konsentratkassen, og dermed med videre i foredlingen. Problemet med at ikke-magnetisk materiale blir med videre kan forhindres, eller motarbeides ved å plassere flere slike tromler i serie. [13]



Figur 2 viser et eksempelutsnitt av en våt trommel medstrøms LIMS, som brukes i Sydvaranger Gruve

2.7 Parametere

De to viktigste parameterne som kan endres på for å endre prosessvilkårene på en våttrommel LIMS er raten for påmatning, og vanntilførselen. Dette har tidligere vært gjort manuelt etter at laboratorieresultatene har kommet tilbake. Her har det i hvert enkelttilfelle vært gjort en vurdering om hvilken av de to parameterne som skal endres på [14]. Det som vil være viktigst når parameterne endres på er at totalraten for påmatningen må være innenfor produsentens spesifikasjoner på separatoren [15]. En reduksjon i påmatningen kan føre til mindre tap av produkt, men det vil også føre til en lavere produksjonsrate, som ikke vil være ønskelig. Ved en online analyse av avgangen kan optimal vannmengde og føderate reguleres øyeblikkelig, og tap av produkt i avgangen kan minimeres.

2.8 Måleteknikk

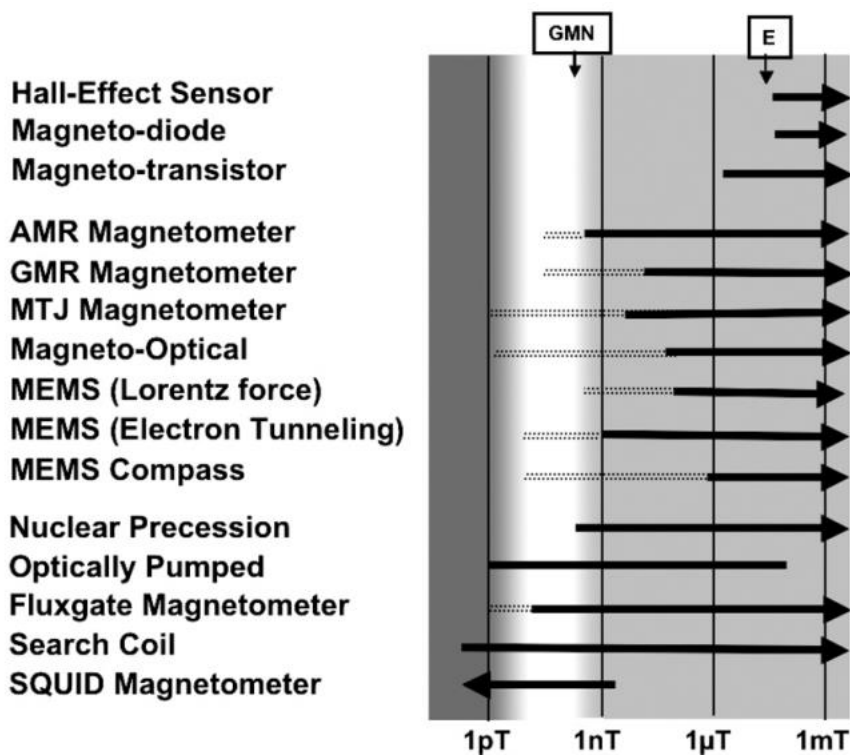
Flere forskjellige måleteknikker ble utforsket, eksempler på dette er spektroskopiske metoder som XRF, LIBS og ramanspektroskopi. Likheten mellom alle disse tre er at de er spektroskopiske analysemetoder. Røntgenfluorescens, ofte forkortet XRF, er en metode som undersøker hvordan et stoff «reagerer» når det blir strålt med røntgenstråling [16]. Laser induced breakdown spectroscopy, ofte forkortet LIBS, er en analysemetode som bruker en kraftig laser for å gjøre prøven om til plasma. Deretter kan emisjonsspekteret til plasmaet

analyseres for å bestemme sammensetningen av prøven [17]. Ramanspektroskopi er en metode hvor prøven påsettes EM-stråling, som fører til svingninger i molekylet, eller gitterstrukturen og dette kan måles og sier noe om strukturen til stoffet i prøven [9]. Problemet med alle disse tre analysemetodene er at det er flere magnetseparatorer hvor avgangen skal analyseres, og hvert målepunkt hadde hatt behov for et spektroskop, som hadde vært kapitalkrevende, og plasskrevende. Samt at det hadde vært svært vanskelig, om ikke umulig å ha on-line kontinuerlig måling med disse målemetodene.

To andre analysemetoder det ble sett på er satmagan og Davis tube tester. Satmagan er et måleredskap som er laget spesifikt for å bestemme magnetittkonsentrasjonen i en prøve. Metoden går ut på å måle kraften et magnetfelt utøver på en prøve, og dette vil gi en antydning over hvor mye av prøven som er magnetisk [18]. Davis tube tester er et måleutstyr hvor prøven påsettes et glassrør som er plassert mellom to elektromagneter, og blir påsatt magnetfelt. Dette fører til at det magnetiske materialet holdes igjen mellom disse magneten og ikke-magnetisk materiale vil vaskes ut [19]. Problemet med både satmagan og davis tube tester er at de ikke kan utføre kontinuerlige målinger, og at de ikke kan kobles opp som on-line måleutstyr, dermed havner de utenfor rammene for prosjektet. En annen sensortype er magnetfeltsensorer, eller magnetometer, som av navnet er en sensor som måler magnetfelt. Det er også mulig å detektere et magnetfelt ved hjelp av Faradays lov. [20]

2.9 Magnetfeltsensor

Magnetfeltsensor er sensorer som kan måle flukstettheten til et magnetfelt, og slike sensorer kan derfor også måle endringen i styrken til et magnetfelt [21]. Magnetfeltsensorene kan deles inn i to hovedgrupper, den ene gruppen kalles skalarsensorer på grunn av at de måler det totale magnetfeltet. Den andre gruppen er sensorer som måler vektorproduktet, disse kan måle forskjellige parametere som hastighet, retning, etc. til kilden til et magnetfelt. Figur 3 viser forskjellige magnetfeltsensorer, og følsomheten til de respektive sensorene. E står for styrken på jordens magnetfelt, mens GMN står for geomagnetisk støy [22]. På grunn av deres enkelhet og sensitivitet vil sensorene som vil være aktuelle for dette prosjektet være hall-effektsensor, magnettransistor og magnetisk flukssensor (search-coil).



Figur 3 viser forskjellige magnetfeltsensorer og hvor sensitive de forskjellige sensorene er. E står for jordens magnetfelt, og GMN for geomagnetisk støy. Hentet fra [22]

2.9.1 Hall effekt sensor

Hallsensoren er en sensor som utnytter at elektriske ladninger som vandrer i et magnetfelt opplever en kraft, som er vinkelrett på bevegelsesretningen til elektronet, og retningen til magnetfeltet. Halleffekten kan derfor forklares som et resultat av disse kreftene på de elektriske ladningene [22]. En slik sensor kan detektere et nivå på mellom 0.1 til 10 milligauss. [22]

2.9.2 Magnettransistor

Magnettransistor er en *npn*-transistor, og utnytter Hall-, og Suhl-effekter for å detektere endringer i et magnetfelt. Suhl-effekten oppstår når ikke Lorentzkraften (kraften som virker på en elektrisk ladning i et magnetfelt) kompenseres, dette medfører at ladningene forskyves i retningen de vandrer. Denne forskyvningen fører til variasjon i spenningen som detekteres. Resultatet av disse effektene satt sammen gjør at sensoren kan måle endringen i et magnetfelt, og slike sensorer er ca 100 ganger mer sensitive enn hallsensorer. [22]

2.9.3 Flukssensorer

Sensoren utnytter Faradays lov om induksjon, som sier at dersom et magnetfelt passerer gjennom en kveil av en leder, vil dette indusere en spenning [20]. Spenningen som induseres

gjennom lederne til sensoren vil være proporsjonal med styrken på magnetfeltet som passerer over kveilen. Dette fenomenet forsterkes ved at det ofte plasseres en ferromagnetisk stang inne i kveilen, som en mottaker, for å oppkonsentrere/samle magnetfeltet og dermed gjøre sensoren mer sensitiv for endringer i feltet. Slike sensorer kan blant annet variere i lengde på kveilen og kjernematerialet, disse parameterne kan endres for å gjøre sensoren mer eller mindre sensitiv. [22]

2.10 Faradays lov og elektromagnetisk induksjon

Faradays lov sier at dersom et magnetfelt passerer gjennom en spole av en leder vil det induseres en spenning i spolen, i form av en elektromotorisk spenning, som også måles i volt [20]. Heretter vil elektromotorisk spenning kun skrives som spenning. Dette fenomenet utnyttes blant annet til strømproduksjon i generatorer og liknende. Hvor stor spenningen som induseres er avhenger av hovedsakelig tre ting, da antall vindinger i spolen, styrken på magnetfeltet som passerer igjennom spolen, og til slutt magnetfeltets relative hastighet i forhold til spolen [23]. Dette kan utnyttes for å lage en relativt sensitiv målemetode for å måle magnetitt i avgangen fra en magnetseparator. Hvor spolen kobles til et voltmeter, og endringen i spenning vil gi en indikasjon på hvor mye magnetitt som passerer igjennom spolen [24].

2.11 Beregning av induisert spenning

Den induerte elektromotoriske spenningen fra magnetfeltet som beveger seg gjennom spolen kan beskrives via formel (1). Den elektromotoriske spenningen er også i volt, og kan sees på som induert spenning. Hvor ϵ er spenningen, N er antall vindinger, $d\Phi$ er endringen i magnetfelt, og dt er endringen i tid. [24]

$$\epsilon = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Formel 2 for å beregne endringen i magnetfelt kan så settes inn i formel 1, hvor B er endringen i magnetfeltstyrken, og $\pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$ er arealet i spolen. [24]

$$\Delta\Phi = \Delta B * \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

Innsatt i formel 1 gir dette formel 3, som kan brukes for å regne ut den induerte spenningen fra spolen. [24]

$$\epsilon = -N * \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N * \frac{\Delta B * \pi * d^2}{4 * \Delta t} \quad (3)$$

2.12 Beregne avgitt magnetisk fluks fra en magnet

Den magnetiske fluksen som avgis fra en magnet kan beregnes fra magnetisk permeabilitet, som igjen kan beregnes fra magnetisk susceptibilitet. Formel 4 viser hvordan magnetisk permeabilitet, μ , har sammenheng mellom den relative magnetiske permeabiliteten, μ_r , og permeabiliteten i vakuum, μ_0 . [25]

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

Formel 5 viser hvordan den relative magnetiske permeabiliteten kan beregnes ved hjelp av magnetisk susceptibilitet, X_m , ved å legge til 1. X_m oppgis ofte i cgs/cm³, men når verdien brukes i utregninger er den dimensjonsløs. [26]

$$\mu_r = X_m + 1 \quad (5)$$

Formel 6 viser sammenhengen mellom magnetisk permeabilitet, μ , magnetfeltstyrke, H , og avgitt magnetisk fluks, B . [26]

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6)$$

Dersom alle disse tre formlene kombineres kan den avgitte magnetiske fluksen regnes ut i Tesla, som vist i formel 7.

$$B = \mu * H = \mu_0 * (X_m + 1) * H \quad (7)$$

2.13 Magnetisk støy

Alle komponenter som har elektriske kretser, og en spenning vil avgi et magnetisk felt. Et eksempel på dette er høyttalere i en telefon, eller en elektrisk motor på en pumpe. Dette fører til at det kan oppstå magnetisk støy ved en magnetfeltsensor. [27] Dette kan medføre et behov for å benytte noe som enten kan skjerme sensoren mot denne støyen, eller noe som avgir et konstant magnetfelt som er sterkt nok til å «overdøve» disse andre støykildene.

2.14 Skjerming av magnetisk støy

Det er umulig å blokkere et magnetfelt [28], men det kan brukes flere forskjellige verktøy for å skjerme en sensor fra uønskede magnetiske felt. Sammenhengen mellom alle disse metodene er at det som skal skjerme sensoren avgir et eget magnetfelt som overdøver de andre magnetfeltene som kan bidra til støy. Et eksempel på noe som «skjermer» sensoren er ferromagnetiske plater som kan dekke til et felt av røret hvor sensoren sitter [29]. En annen mulighet er ved å utnytte Faradays lov om induksjon av magnetfelt ved å påføre en leder som

er kveilet opp spenning [20]. Dette kan oppnås ved å tvinne en leder rundt røret i området ved sensoren og påføre denne spolen en elektrisk spenning, dette vil indukere et magnetfelt som overdøyer andre støykilder.

2.15 Databehandling

Ettersom at sensoren kun måler endring i magnetfeltet må det skrives en algoritme som kan gi en indikasjon på hvor mye magnetitt som tapes. Dette kan gjøres ved at det brukes kjente konsentrasjoner av magnetitt i lik slurry som det som brukes i driften. Disse dataene danner da grunnlaget for at algoritmen skal kunne gi en indikasjon på produkttapet [30]. Denne algoritmen på skrives med bakgrunn i bedriftens gjeldene SCADA system, slik at algoritmen er kompatibel. SCADA er et akronym for «Supervisory Control and Data Acquisition», og er som navnet sier et program som kan ta imot data fra produksjonsprosessen, og kan kontrollere og styre de forskjellige komponentene som inngår i prosessen [31]. Det er data fra et slikt program som gir beslutningsgrunnlag for operatørene i anlegget.

3. Metode

Alle markedsledende leverandører av gruve- og separasjonsutstyr ble forsøkt kontaktet for å undersøke om de hadde et produkt, eller kunne levere et produkt som tilfredstilte rammene rundt prosjektet. Mindre aktører som leverer magnetisk separasjonsutstyr, samt andre nordiske gruveselskaper ble også forsøkt kontaktet. Alle eksterne ble kontaktet via enten e-post eller eget kontaktskjema, og alle ble sendt samme tekst som inneholdt informasjon om prosjektrammene, samt oppdragsgiver og utdanningsinstitusjon, og spørsmål om de hadde mulighet til å levere et slikt produkt.

4. Diskusjon og resultat

Det var få av leverandører som ble kontaktet som gav svar på e-posten, de som svarte hadde ikke hørt om, eller utforsket et slik system tidligere. Andre hadde sett på samme problem tidligere, men ikke utviklet det og de hadde dermed ikke mulighet til å kunne levere dette.

Category 3 High Sensitivity	10⁻⁵ G	Category 2 Medium Sensitivity	1 G	Category 1 Low Sensitivity
Definition <ul style="list-style-type: none"> Measuring field gradients or differences due to induced (in Earth's field) or permanent dipole moments 		Definition <ul style="list-style-type: none"> Measuring perturbations in the magnitudes and/or direction of Earth's field due to induced or permanent dipoles 		Definition <ul style="list-style-type: none"> Measuring fields stronger than Earth's magnetic field
Major Applications <ul style="list-style-type: none"> Brain function mapping Magnetic anomaly detection 		Major Applications <ul style="list-style-type: none"> Magnetic compass Munitions fuzing Mineral prospecting Traffic control 		Major Applications <ul style="list-style-type: none"> Noncontact switching Current measurement Magnetic memory readout
Most Common Sensor <ul style="list-style-type: none"> SQUID gradiometer Optically pumped magnetometer 		Most Common Sensor <ul style="list-style-type: none"> Search-coil magnetometer Flux-gate magnetometer Magnetoresistive magnetometer 		Most Common Sensor <ul style="list-style-type: none"> Search-coil magnetometer Hall-effect sensor Magnetoresistive magnetometer

Figur 4 viser en tabell hvor magnetfeltsensorene er kategorisert etter hvor sensitive de er, og hva som er bruksområdet for de forskjellige kategoriene. 1 gauss tilsvare 100 mikrotlesla Hentet fra [22]

4.1 Forskjellige sensorer

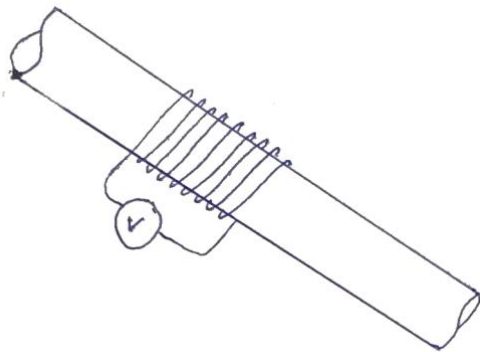
De tre sensorene som er nevnt i teksten har veldig ulik oppbyggelse, og de varierer mye i forhold til hvor sensitive de er. Hall-effekt sensoren er den minst sensitive, etterfulgt av magnettransistor før den magnetiske flukssensoren er den mest sensitive av de tre sensorene. Figur 2 viser forskjellen mellom de tre med tanke på sensitivitet. Figur 3 viser bruksområdene til de tre forskjellige sensorene. Fordelen ved å bruke en sensor med lavere sensitivitet, som en hall-effekt-sensor er at det kanskje ikke trengs å ta hensyn til magnetisk støy fra eksempelvis elektromotorer o.l. i nærheten. Her er dog ulempen at sensoren kan være for lite sensitiv til å detektere en endring i magnetfeltet som forårsaket av en magnetittpartikkel, dette da slike sensorer ofte brukes som brytere etc, som vist i figur 3. Fordelen med sensorer med lav sensitivitet er at de ikke vil ta opp like mye bakgrunnsstøy som en sensor med høy sensitivitet vil [22]. Her kan for eksempel elektriske installasjoner, telefoner eller høyttalere i nærheten gi støy som fører til feilavlesning, eller «overdøver» endringer brakt av magnetitt [27]. Fordelen med slike sensorer er at det er større sannsynlighet for at de kan detektere endringen fra en magnetittpartikkel. Her bør det også

tenkes på at de er mulig at ikke en magnetisk flukssensor er sensitiv nok til å nettopp detektere denne endringen i magnetfeltet rundt. Det er også verdt å ha i bakhodet at sensorene kan bli såpass sensitive at det ikke er mulig å beskytte de for magnetisk støy, eller at et induisert magnetfelt som skal «skjerme» sensoren har egne fluktuasjoner som bidrar med støy.

En fjerde måleteknikk vil være en spole som tar utgangspunkt i Faradays induksjonslov som vist i figur 5. Dersom magnetittpartiklene innehar sterk nok restmagnetisme fra magnetfeltet fra magnetseparatoren så kan det tenkes at de kan sendes igjennom en spole som ligger om røret til avgangen, slik at det induseres en målbar spenning [20]. Fordelen ved denne løsningen er at den er svært enkel, rimelig, og det er enkelt å øke sensitiviteten. Den vil være enkel og rimelig ved at det kun er en leder som ligger kveilet rundt røret, og det trengs kun et voltmeter for å kunne gi en indikasjon på hvor mye magnetitt som er i avgangen.

Sensitiviteten til et slikt måleutstyr vil kunne påvirkes av å endre antall vindinger i spolen, hvor det kan legges til vindinger for å oppnå en høyere sensitivitet, som medfører en lavere deteksjonsgrense. Sensitiviteten vil også bestemmes av hvor følsom voltmeteret som kobles til er, at det kan detektere lave nok spenningsendringer [23]. En annen fordel med denne løsningen er at for at den skal kunne detektere magnetisme må partikkel eller magnetfeltkilde være i bevegelse, dermed vil den ikke ta opp støy fra stasjonært anlegg [20].

Den største ulempen med de andre måleteknikkene vil være at det kreves relativt kostbare sensorer for å gjennomføre samme målingene, da spesielt de mest sensitive sensorene som magnetisk flukssensor. Hvor også sensorplasseringen har svært mye å si for detekterbarheten, og om hvor mye slitasje som vil oppstå på sensorene. En annen ulempe vil være at det må lages et eget målesystem som kan tolke data hentet fra sensorene for å gi et lesbart resultat, i motsetning til en spole som kun avgir en spenning som kan avleses med et voltmeter.



Figur 5 viser hvordan en slik spole som ligger rundt røret vil se ut. Dette er en svært enkel skisse av hvordan det kan løses.

4.2 Teoretiske verdier ved feilseparering

Vedlegg 1 viser teoretiske utregninger for å vise hvor mye utslag en viss prosent magnetitt i avgangen vil ha. Det er svært viktig å huske på at det er gjort mange antagelser for å kunne komme frem til disse tallene. De største antagelsene som gjøres er at det vil være mulig å ta inn hvor stort volum av prøvevolumet i regnestykket hvor den magnetiske fluksen som avgis bestemmes. Dette er gjort da det vil være en ganske mye høyere verdi dersom det antas at hele prøvevolumet var magnetisk, samt at susceptibilitetsverdien for magnetitt som ble valgt er en volumetrisk verdi [32]. Den andre store antakelsen er at alle magnetittpartiklene avgir like stor magnetisk fluks, og at alle partiklene er blitt like sterkt magnetisert av magnetseparatorens magnetfelt. Tiden prøven bruker gjennom spolen er også antatt til å være 10 sekunder, dette er noe som må styres og legges inn i den matematiske modellen dersom det skal gjøres fysiske forsøk. Det er dog enkelt å bestemme dette ved å endre på den volumetriske flytraten, ved å enten ha en pumpe eller en strupeventil inn i systemet. På grunn av at spolen vil vindes om røret er sideveggene av røret tatt med i regnestykket for å prøve å få så rett verdi som mulig. Prøvestørrelsen er satt til 2 liter.

Baselinjeverdien som er valgt har vært gjennomsnittlig magnetittinnhold i avgangen i prosent, da 0.69%. De verdiene som er sett på er dersom avgangen inneholder 1%, 1.5% og 2% magnetitt. Den induerte spenningen vil da være målt til:

$$\epsilon_{1\%} = -1.314 \text{ mV}$$

$$\epsilon_{1.5\%} = -3.435 \text{ mV}$$

$$\epsilon_{2\%} = -5.556 \text{ mV}$$

Utregningene viser stor forskjell ved de forskjellige nivåene av magnetitt i avgangen, noe som kan tyde på at det er en metode som kan gi godt lesbare resultater. Dersom det i virkeligheten skulle vise seg at det er lavere verdier vil det være enkelt å legge til noen vindinger, eller om det er for høye verdier, fjerne vindinger. Det vil også være mulig å bruke en forsterker til målingene, som kan gi mer lesbare resultater dersom de skulle være for lave. [23]

4.3 Plassering av sensorer

Plasseringen av sensorene vil ha stor betydning for at sensoren skal kunne detektere magnetitt i avgangen. Det mest gunstige ville vært å plassere en sensor midt i røret, slik at den kunne detektert likt i alle retninger i røret. Problemet med dette er at avgangen hovedsakelig

inneholder kvarts, som gjør avgangen til en slipepasta. Dette medfører stor slitasje på alle komponenter som ligger i røret eller er i kontakt med avgangsflyten [14]. Dette fører til at sensoren eventuelt må byttes ofte, som gjør det til en uegnet posisjon. En annen mulighet vil være å plassere sensoren i siden av røret, slik at det ikke oppstår noen ujevnheter i røroverflaten, hvor slitasje kan oppstå. Et problem med en slik plassering er at magnetitt som passerer på den siden av røret hvor sensoren sitter vil gi et større utslag enn om det passerer forbi på motsatt side [33]. Dette kan føre til feilrepresentering av mengden magnetitt i avgangen. En siste mulighet vil være å plassere flere sensorer i en ring i siden av røret, da dette fører til at alt blir overvåket likt. Her må resultatene tolkes på korrekt måte, slik at ikke en magnetittpartikkel telles fire ganger, med ulik styrke. Det å plassere sensorene i en ring vil dog være det eneste alternativet som er aktuelt, men det avhenger av at måleutstyret er riktig kalibrert.

4.4 Magnetisk støy

Dersom det skulle trenge så finnes det to måter å skjerme en sensor mot magnetisk støy, den ene måten er med ferromagnetiske plater eller belegg som avgir et eget magnetfelt [28]. Den andre løsningen vil være å utnytte Faradays lov om indusering av magnetfelt ved å påføre spenning på en spole rundt sensorområdet [20]. Dette vil indusere et magnetfelt hvor styrken avhenger av den påsatte spenningen, fordelene med dette er at det kan skjerme mer enn det et belegg vil klare. Hovedfordelen med å bruke en plate eller et belegg rundt røret er at det er et rimelig valg, og det har ikke behov for vedlikehold for å opprettholde opprinnelig tilstand. Et problem med et slikt belegg er at det ikke avgir et veldig sterkt magnetfelt, noe som kan medføre at sensoren vil fortsette å plukke opp støy fra andre kilder i nærheten. Dette kan være problematisk da det skal brukes i en tung industriell applikasjon, hvor det finnes svært mange store, variable elektromotorer i området, som kan endre frekvens og styrke [20, 27]. Dette medfører at relativt sterke magnetfelt kan induseres og forårsake støy i målingene. En ulempe med løsningen hvor en spole legges rundt røret er at det krever flere komponenter, samt at det trekker en konstant strøm. Dette medfører at en slik løsning kan koste en del å montere, og drifte, spesielt dersom strømprisene øker. I motsetning til et belegg/en plate hvor det kun vil være en engangskostnad når det monteres, som gjør løsningen rimeligere. [28]

4.5 Forsterkning av magnetfelt fra spole

Dersom en løsning hvor et magnetfelt induseres om sensoren vil dette potensielt kunne løse to problemer samtidig, ved at det induserte magnetfeltet kan øke egenmagnetismen for magnetittpartiklene [11, 12]. Dermed kan et slikt system føre til at det trengs en mindre

sensitiv sensor da magnetittpartiklene vil avgi et større/sterke magnetfelt. Dette betyr at systemet kan gjøres rimeligere, og mindre komplisert ved å for eksempel velge en hall-effektsensor fremfor en magnetisk flukssensor.

4.6 Restmagnetisme

Magnetfeltet fra magnetseparatoren kan være sterkt nok til at magnetittpartiklene innehar nok restmagnetisme til at de kan detekteres av en hall-effektsensor, og dersom det er nok avstand til støykildene kan det da brukes kun belegg/plate for å skjerme sensoren. Grunnen til dette er at det er en sensor som ikke er like sensitiv, og støy kan dermed være mindre aktuelt. [12]

4.7 Driftsparametre

På grunn av at endringer i driftsparametere tidligere har blitt gjort med skjønn etter vurdering av fagpersonell bør det lages en protokoll for hvordan dette skal gjøres [14]. Grunnen til at en slik protokoll bør utarbeides er slik at det ikke justeres på feil parametere, da dette kan føre til at andre problemer oppstår. Det bør også settes maksimum og minimumsverdier for de forskjellige parametere i kombinasjon, slik at det ikke risikeres at det oppstår overflow, og slik at en minimums produksjonsrate opprettholdes. Dette er spesielt viktig dersom det skrives en algoritme som gjør denne prosessen automatisert og styrt fra en datamaskin.

4.8 Homogenitet

Grunnen til at prøven må antas å være homogen er dersom det hentes prøve fra den ene siden av røret, og masseflyten vil ha varierende sammensetning ved forskjellige plasser i røret. Dette kan føre til at målingene som tas ikke vil være representative for den totale sammensetningen. En måte dette kan motarbeides på er at det monteres kniver i røret som gir rotasjon til massestrømmen, da dette fører til at prøven blandes [14]. På grunn av at det da blandes rett før målesystemet så kan det være korrekt å anta at prøven vil være homogen.

4.9 Splitte strømmen

En løsning hvor en magnetfeltsensor brukes kan oppnås ved at en det plasseres en ventil som kan føre noe av strømmen over i et eget rør hvor en sensor sitter plassert. Deretter kan sensoren måle magnetfeltet som avgis og dermed indikere det magnetiske Fe-innholdet i avgangen. Utfordringene med et slikt system vil være å ta ut en helt lik prøvemengde hver gang, samt at det må antas at strømmen er homogen. En annen mulighet er å legge opp strømmen gjennom en spole som kan måle det avgitte magnetfeltet. Fordelen med begge disse måtene er at det allerede er montert ventiler på rørene for å ta prøver, dermed kan disse

brukes og dette vil medføre lavere kostnader. Det finnes også fordeler ved at det er enklere å få en representativ måling av den totale strømmen i røret, når det er en diameter på 2 tommer, fremfor 8 til 10 tommer.

4.10 Ukrainsk studie

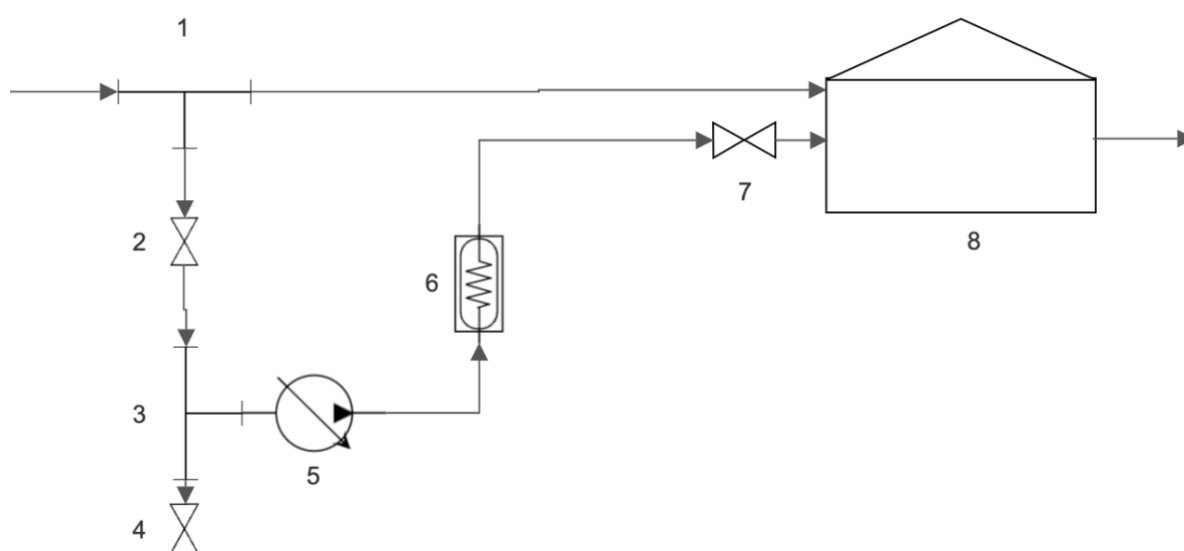
Etter at mangetfeltsensorer ble utforsket som en metode ble det oppdaget en ukrainsk studie som har sett på samme problemstilling som denne oppgaven. Det ble valgt å gjennomføre oppgaven uten å hente informasjon fra den nevnte studien, men heller bruke den som en bekreftelse på at et slikt system kan fungere [34]. Hovedforskjellen mellom oppgavene er at studien har valgt å bruke en ultrasonisk måleenhet i kombinasjon med en magnetfeltsensor, dette for å se på egenskapene til masseflyten. Denne ultrasoniske enheten er plassert før magnetfeltsensoren og vil kunne gi informasjon om sammensetningen samt hastigheten til flyten. Dette vil føre til en utfordring ved at kompleksiteten til system øker, og kostnaden vil øke på grunn av en ekstra sensor. En økning i kompleksitet vil også medføre at det trengs en mer kompleks algoritme som kan samle data fra begge sensorene og kunne kombinere og presentere denne informasjonen på en god måte. [34]

5. Løsningsforslag

På grunn av eksisterende punkter for prøveuttak så er anbefalingen å hente ut en strøm fra samlerørene fra disse punktene. Dette forutsetter da at strømmen som hentes ut representerer strømmen i hele samlerøret. For å kunne anta at dette stemmer anbefales det at det monteres «kniver» inne i røret et lite stykke før prøvepunktet, slik at strømmen får rotasjon og blandes. Dette bør gjøres for at homogenitet skal kunne antas.

Det anbefales å bruke en spole for å måle magnetittmengden, dette fordi det er en svært enkel målemetodikk, samt at det er en relativt rimelig metode. Spolens sensitivitet kan også endres dersom det skulle oppstå behov for dette, for eksempel ved å endre vindingstallet, da dette vil øke sensitiviteten. For å kunne få ut måledata herfra trengs det kun et voltmeter, som gjør at det ikke krever for mye arbeid mot det å designe et målesystem. Et slikt system kan brukes både for å kun detektere endring i magnetismen som passerer spolen, som betyr at det er mer magnetisk produkt, som vil indikere feilseparering.

Det kan også, dersom systemet blir sensitivt nok, skrives en algoritme som kan måle mengden magnetitt i avgangen. Dette vil kreve en del kontrollmålinger med kjente konsentrasjoner for å kunne lage denne algoritmen. Dersom det i en prøvestudie skulle vise seg at det ikke er mulig å bruke en spole som måleinstrument anbefales det å prøve med en ring av Hall-effektsensorer.



Figur 6 viser en enkel skematisk tegning av målesystemet slik det anbefales. Tegnet i SmartDraw

Figur 4 viser en enkel systematisk tegning av den foreslåtte løsningen. Hvor det er plassert en magnetventil (2) på røret slik at prøvetagningen kan automatiseres, eller fjernstyres av operatørene. Det anbefales å splitte røret (3) å montere en manuelt betjent ventil (4) hvor laboratorieprøver kan hentes ut. Det må benyttes en pumpe (5) for å sende strømmen opp forbi sensorlokasjonen (6) for at hastigheten på strømmen skal kunne styres. Dette vil være spesielt viktig da sensortypen som anbefales er en spole, hvor den relative hastigheten har betydning for den induerte spenningen. Etter pumpen sitter sensoren, eller spolen, den er plassert slik at det ikke kan oppstå luftlommer og liknende, da dette kan føre til feilmålinger etc. På grunn av usikkerhet knyttet til detekterbarheten av magnetitt bør det være plass til å montere en magnetiseringsspole mellom pumpen og sensoren.

Etter sensoren må strømmen enten sendes tilbake til samlerøret, eller så må røret trekkes hele veien til samlingsboksen (8), hvor alle rørene er koblet til. Det bør monteres en enveisventil (7) i denne overgangen, for å forhindre at det kommer tilbakestrømming fra røret eller samlingsboksen. Bilde 5 og 6 viser forskjellige eksisterende prøvepunkt på to av samlerørene.

Bilde fra diverter



Figur 7 viser en diverter (gul boks) som sitter montert på røret, denne sender strømmen ned det svarte tynne røret til en prøvetagningsstasjon.

Bilde av kranuttak



Figur 8 viser kranuttak på to av samlerørene, her åpnes kranen for å ta ut en prøve.

6. Konklusjon

Studien som er gjort hittil danner grunnlag for å gjennomføre en pilotstudie med like betingelser som det produksjonen vil ha. Enkle beregninger viser at den foreslåtte målemetodikken i teorien vil være sensitiv nok. Systemet vil også kunne brukes for å kvantitativt bestemme magnetittinnholdet i avgangen, men dette krever at en algoritme skrives med bakgrunn i kjente målinger.

Referanseliste

1. Sydvaranger. History - Sydvaranger gruve AS: Sydvaranger drift AS; 2023 [Available from: <https://www.sydvaranger.com/history>.
2. AUSENCO. SYDVARANGER IRON ORE UPGRADE PROJECT FEASIBILITY STUDY - OVERALL FLOW DIAGRAM. 2019.
3. Sydvaranger. Sydvaranger næringslivsdagen 2023 vgs. 2023.
4. Miljødirektoratet. Tillatelse til virksomhet etter forurensningsloven for Sydvaranger Drift AS. Norske utslipp: miljødirektoratet ; 2023.
5. Sydvaranger. Full Plant Results Lab Data. In: 2016 PR-, editor. 2015.
6. Times F. Iron Ore 62% Fe, CFR China (TSI) Swa FT Markets: Financial Times; 2023 [Available from: <https://markets.ft.com/data/commodities/tearsheet/summary?c=Iron+ore>.
7. DNB. Hovedvalutaer inneværende år DNB Markets: DNB; 2023 [Available from: <https://www.dnb.no/bedrift/markets/valuta-renter/valutakurser-og-renter/HistoriskeValutakurser/Hovedvalutaer-innevarende/hovedvalutaerdaglig-innevarende.html>.
8. Lu L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. 2 ed. United Kingdom: Woodhead Publishing; 2022.
9. Wills BA, Finch JA. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann; 2016.
10. Florio G. Structural Features of Magnetic Materials. Encyclopedia of Smart Materials. 2022;5:8.
11. Voynic S. Admin, editor. rockngem.com: Rock & Gem. 2018. [cited 2023]. Available from: <https://www.rockngem.com/rock-science-magnetite-and-lodestone/>.
12. Gopal R. Magnetization Corrosionpedia.com: corrosionpedia; 2022 [Available from: <https://www.corrosionpedia.com/definition/5019/magnetization>.
13. NTNU. Magnetseparasjon - SYDVARANGER. NTNU; 2009.
14. Nilssen JE. In: Svendsen KA, editor. 2023.
15. Slabbert W. Factors Affecting Magsep Recovery Efficiency. multotec.com: Multotec; 2023.
16. Jacobsen E. røntgenfluorencensspektrometri snl.no: Store norske leksikon; 2022 [Available from: <https://snl.no/r%C3%B8ntgenfluorencensspektrometri>.
17. Hu M, Peng J, Niu S, Zeng H. Plasma-grating-induced breakdown spectroscopy. Advanced Photonics. 2020;2(6).
18. GmbH HI. SATMAGAN hrt-labortechnik.com: HRT labortechnik GmbH; 2023 [Available from: <https://hrt-labortechnik.com/en/products/instruments/satmagan>.
19. Eriez. Davis Tube tester. Eriez; 2005.
20. Grøn Ø, Skaar J. Faradays induksjonslov snl.no: Store norske leksikon; 2021 [Available from: [https://snl.no/Faradays induksjonslov](https://snl.no/Faradays_induksjonslov).

21. Zhang P. Industrial Control Technology: A Handbook for Engineers and Researchers. New York: William Andrew Inc.; 2008.
22. Lenz J, Edelstein A. Magnetic Sensors and Their Applications. IEEE Sensors Journal. 2006;6(3):19.
23. Tutorials E. Electromagnetic Induction electronics-tutorials.ws2023 [Available from: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>].
24. Urone PP, Hinrichs R. 20.3 Electromagnetic Induction Houston, Texas: OpenStax; 2020 [Available from: <https://openstax.org/books/physics/pages/20-3-electromagnetic-induction>].
25. Gregersen E. magnetic permeability. Encyclopaedia Britannica. Britannica.com: Britannica; 2023.
26. Fitzpatrick R. Magnetic susceptibility and permeability. Austin, Texas: The University of Texas at Austin; 2006.
27. EOMYS. What is magnetic noise? EOMYS.com: EOMYS; 2023 [Available from: <https://e-nvh.eomys.com/magnetic-noise-and-vibrations-in-electrical-machines/>].
28. Hathcox K, Marsch G, Ward D. I have heard lead stops nuclear radiation; can you shield or block magnetic fields? uu.edu: Union university; 2004 [Available from: <https://www.uu.edu/dept/physics/scienceguys/2004Feb.cfm>].
29. Zheng Y, Mu R, Zhou J, Tan J. High-spatial-resolving magnetic Bark noise sensor with shielded receiver. Sensors and Actuators A: Physical. 2020;316.
30. Hovde K-O, Grønmo S. algoritme snl.no: Store norske leksikon; 2020 [Available from: <https://snl.no/algoritme>].
31. NOVOTEK. SCADA novotek.no: NOVOTEK; 2023 [Available from: novotek.no/automasjon/scada/].
32. El-Ashry MT, Nejib UR. Magnetic susceptibility, earth materials. Applied Geology. 1984;3.
33. Grøn Ø, Skaar J. elektromagnetisk induksjon snl.no: Store norske leksikon; 2021 [Available from: [https://snl.no/elektromagnetisk induksjon](https://snl.no/elektromagnetisk_induksjon)].
34. Morkun V, Morkun N, Tron V, Porkuian O, Serdiuk O, Sulyma T. APPLICATION OF MAGNETIC AND ULTRASONIC METHODS FOR DETERMINING PARAMETERS OF FERROMAGNETIC COMPONENTS IN IRON ORE SLURRY FLOWS. sciendo. 2021;15(5):8.

Vedlegg

Vedlegg 1: utregninger

Utrekninger:

Prøvevolum: $2L = 2000\text{cm}^3$

Diameter: 0.0608 m

Volumetrisk magnetisk susceptibilitet [32]: 0.55 cm^{-3}

Magnetfeltstyrke, H [13]: 75000 A/m^2

Magnetisk permeabilitet i vakuum [25]: $4 * \pi * 10^{-7}$

Vindinger, N : 50

Tid prøven bruker gjennom spole: 10s

Baselinje, gjennomsnittlig magnetittinnhold i avgang:

$$B_{0.69\%} = 4 * \pi * 10^{-7} * 75000 * (0.55(\text{cm}^{-3}) + 1) * (0.0069 * 2000\text{cm}^3) \quad (7)$$

$$B_{0.69\%} = 0.2016\text{ T}$$

1% magnetitt:

$$B_{1\%} = 4 * \pi * 10^{-7} * 75000 * (0.55(\text{cm}^{-3}) + 1) * (0.01 * 2000\text{cm}^3) \quad (7)$$

$$B_{1\%} = 0.2921\text{ T}$$

$$\epsilon_{1\%} = -50 * \frac{(0.2921 - 0.2016) * \pi * 0.0608^2}{4 * 10} = -1.314 * 10^{-3}\text{V} \quad (3)$$

1.5% magnetitt:

$$B_{1.5\%} = 4 * \pi * 10^{-7} * 75000 * (0.55(\text{cm}^{-3}) + 1) * (0.015 * 2000\text{cm}^3) \quad (7)$$

$$B_{1.5\%} = 0.4382\text{ T}$$

$$\epsilon_{1.5\%} = -50 * \frac{(0.4382 - 0.2016) * \pi * 0.0608^2}{4 * 10} = -3.435 * 10^{-3}\text{V} \quad (3)$$

2% Magnetitt:

$$B_{2\%} = 4 * \pi * 10^{-7} * 75000 * (0.55(\text{cm}^{-3}) + 1) * (0.02 * 2000\text{cm}^3) \quad (7)$$

$$B_{2\%} = 0.5843\text{ T}$$

$$\epsilon_{2\%} = -50 * \frac{(0.5843 - 0.2016) * \pi * 0.0608^2}{4 * 10} = -5.556 * 10^{-3}\text{V} \quad (3)$$

