Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetická separace materiálů

Vedoucí práce : RNDr. Libor Machala, Ph.D.

Obor: Přístrojová fyzika, 3.ročník

Olomouc, květen 2009 **Vypracoval: Michal Sigmund**

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu na konci práce.

Podpis bakaláře

……

Datum: Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

Rád bych velmi poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Liboru Machalovi Ph.D., za jeho podnětné návrhy a čas, který mi věnoval. Rovněž bych chtěl poděkovat zaměstnancům Centra pro výzkum nanomateriálů za jejich vstřícný přístup a pomoc při řešení problémů souvisejících s bakalářskou prací.

Obsah

1. Úvod……..……6

2. Současný stav problému……..……7

3. Rozdělení magnetické separace podle separačního prostřed.….8

3.1. Separace v tekutém prostředí……...……..8

3.2. Separace na vzduchu…….....8

4. Rozdělení magnetických separátorů podle konstrukce……..9

4.1. Deskové magnety……...…….....9

4.2. Magnetické separátory pro sypké materiály.....10

4.3. Skluzové separátory….....11

4.4. Trubkové separátory…….....11

4.5. Kaskádové magnetické separátory…….....12

4.6. Bubnové magnetické separátory.....13

4.7. Pásové separátory…….....14

4.8. Shrnutí…….....15

5. Magnetické prvky…….....16

5.1. Permanentní magnety……..……17

5.1.1. Feritové magnety…….18

5.1.2. Magnety ze vzácných zemin…….....19

5.2. Elektromagnet….....20

5.2.1. Ampérovo pravidlo pravé ruky…….20

5.2.2. Indukčnost cívky……...……21

5.2.3. Magnetická indukce…….....21

5.2.4. Napájení elektromagnetu…….22

6. Vlastní magnetický separátor……..…….22

6.1. Jímka na suspenzi…….23

6.2. Magnetický prvek……....23

6.2.1 Cívka elektromagnetu……24

6.2.2. Permanentní magnet…….....25
6.3. Čerpadlo suspenze…….....25
6.4. Provzdušňovací čerpadlo…….....25
6.5. Konstrukce vlastního separátoru……..…….....26
7. Vyhodnocování experimentů…….....28
7.1 Mössbauerova spektroskopie…….....28
7.2. Struktura a magnetismus hematitu α-Fe_2O_3, Mössbauerovo spektrum….29
7.3. Struktura a magnetismus magnetitu Fe_3O_4, Mössbauerovo spektrum.....30
7.4. Úspěšnost separace…….....31
7.5. Přepočet na hmotnostní poměr……..…32
8. Výsledky experimentů…….....33
8.1. Parametry a nastavení experimentů…….…….33
8.2. Experiment SM1…….33
8.3. Experiment SM2…….35
8.4. Experiment SM3…….36
8.5. Experiment SM4…….37
8.6. Experiment SM5…….38
8.7. Experiment SM6…….38
8.8. Experiment SM7…….39
8.9. Experiment SM8…….40
8.10. Experiment SM9……..……40
8.11. Experiment SM10…….41
8.12. Tabulka výsledků…….42
9. Závěr…….43
10. Seznam použité literatury…….44

1. ÚVOD

Poprvé v praktickém využití byla magnetická separace použita v roce 1940, kdy byl vyvinut plochý magnet na zachytávání nežádoucích magnetických částeček při zpracování obilí. Samotné využití magnetické separace materiálů v dnešní době je velice různorodé a uplatňuje se v mnoha odvětvích lidské činnosti.

Nejčastěji můžeme tuto techniku využít v čistících procesech, kdy se snažíme odstranit určitou nežádoucí složku našeho produktu. Tu může látka buď přirozeně obsahovat nebo tento nežádoucí produkt může vzniknout, či se přidat během námi prováděných procesů.

Dalším velice častým využitím magnetické separace je třídění, kdy se materiál automaticky rozděluje podle jeho magnetizace. Například v třídírnách odpadů, kde se zbavuje papír železných spon. Můžeme ji aplikovat také v potravinářství, kde se kontroluje, zda potraviny neobsahují nebezpečné materiály, které se tam mohly dostat například nedokonalostí výrobního procesu, či selháním lidského faktoru.

Magnetickou separaci můžeme naopak použít i k získávání materiálů, které mají námi požadované vlastnosti. Navíc magnetická separace materiálů nemusí nutně souviset jen s magnetickými vlastnostmi materiálů, ale také například s velikostí separovaných částí (částic), kdy se magnetické vlastnosti materiálů liší. Vždy však zůstává základní myšlenka tohoto procesu. Oddělení určitého materiálu, který může vykazovat různé druhy magnetismu či stupně magnetizace od látky s odlišnými, výše uvedenými, vlastnostmi (např. feromagnetický od diamagnetického materiálu).

Tato práce mi byla zadána Centrem pro výzkum nanomateriálů (dále CVN), což je pracoviště patřící pod Přírodovědeckou fakultu Univerzity Palackého v Olomouci.

Samotným cílem této práce bylo postupně vypracování literární rešerše na dané téma a návrh s následnou konstrukcí magnetického separátoru. Poté jsem měl za úkol testování jeho provozních parametrů a účinnosti na částicích na bázi železa a železitých oxidů. Separátor jako hotový produkt bude sloužit na totožném pracovišti například k separaci magnetických nanočástic maghemitu, kdy původní vzorek může obsahovat příměs amorfního oxidu železitého nebo hematitu.

Součásti potřebné ke konstrukci magnetického separátoru byly financovány ze zdrojů CVN. Pro vyhodnocení výsledků a úspěšnosti experimentálních pokusů bylo využito Mössbauerovy spektroskopie.

2. Současný stav problému

Jak jsem již v úvodu předeslal, má magnetická separace materiálů širokého využití v různých oborech lidské činnosti. Bohužel o oblasti, kterou jsem se zabýval, tedy separací velice malých částic a oxidů na bázi železa, jsem příliš prací nenašel. Rád bych ovšem krátce nastínil tři práce, které mě zaujaly a z kterých jsem čerpal jak odborné poznatky a znalosti, tak ambice v oblasti dosahovaných výsledků. Tyto práce se zabývají podobným problémem, jakým jsem se zabýval já. Ovšem každá popisuje separační procesy z jiného úhlu pohledu.

První práce byla zpracována týmem devíti japonských vědců z fakulty inženýrství Univerzity Niigata [1]. Zabývá se separací pomocí magnetického pole generovaného vysokoteplotním supravodivým (dále HTS) magnetem. Ovšem, kromě separace pomocí tohoto magnetu, nabízí ke srovnání i separaci pomocí elektromagnetu a supravodivého solenoidového magnetu. Jako separační prostředí je v separátoru použita voda, která obsahovala částice Fe_3O_4.

Druhá práce se zabývá spíše samotnou technikou separace použitou při separaci nanočástic. Byla zpracována panem Jianfei Sun a jeho spolupracovníky z laboratoře bioelektroniky Jihovýchodní Univerzity Nanjing v Číně [2].

Nakonec bych si ještě dovolil krátce zmínit práci pana Nicola Pamma a jeho spolupracovníků [3]. Ta se zabývá separací nanočástic podle jejich velikosti. Při tomto experimentu je využito poznatku, že s rozdílnou velikostí nanočástic se mění i jejich magnetické vlastnosti. Pro mou práci byla přínosem informace o způsobu přečerpávání suspenze magnetickým separátorem.

3. Rozdělení magnetické separace podle separačního prostředí.

Magnetické separátory můžeme v zásadě rozdělit na dva typy podle separačního prostředí. Na separátory využívající kapaliny, kdy materiál určený k separování tvoří tekutou suspenzi a na separátory ve kterých separace probíhá na vzduchu. Využití jedné či druhé metody se dá odvodit podle rozměrů částic v separovaných materiálech.

3.1. Separace v tekutém prostředí

Pro malé částice, například nanočástice, se jako separační prostředí využívá tekutá suspenze, kdy je materiál pomocí tekutiny rozmíchán do homogenní směsi. Ta se většinou poté čerpadlem či systémem čerpadel přečerpává přes určitý magnetický prvek, pomocí něhož dochází k záchytu magnetických částic z protékající suspenze. Pokud se magnetická složka uvažuje jako parazitní, například v čistících procesech apod., je výsledná suspenze, zbavená magnetických částic, odvedena k dalšímu zpracování. Naopak pokud se snažíme získat magnetickou složku, stává se nám výsledná suspenze jako odpadní. Často jsou také tyto suspenze vedeny zpět do magnetického separátoru, kde dochází k opakování separačních procesů z důvodu zvýšení účinnosti samotné separace. Oproti separačnímu prostředí na vzduchu je zde nevýhoda, že může docházet k zacpávání magnetického separátoru z důvodu shlukování částic v suspenzi. Proto se často používají různá doplňková zařízení s cílem zabránit tomuto jevu. Jako příklad bych uvedl ultrazvuk, který jsem používal při svých experimentech.

3.2. Separace na vzduchu

Pro separování větších magnetických částic či částí se zpravidla používá jako separační prostředí vzduch. Důvod je jasný. Pokud bychom použili pro separaci tekutého prostředí, mohlo by docházet k zanášení soustavy a průchodnost takovéto suspenze by mohla být velice problematická. Také to může být z důvodu znehodnocení

separovaných materiálů nebo zbytečné technické náročnosti řešení. Např. při separaci magnetických částí na skládkách nebo při separaci železných spon při recyklačních procesech v papírenství. Z těchto a dalších důvodů se používá separace na vzduchu. Narozdíl od tekuté suspenze se zde nepoužívá čerpadel, ale speciálních pásových dopravníků. Mimo těchto dopravníků může být použita i spousta jiných alternativních způsobů lišících se svou konstrukcí. Např. skluzové či trubkové separátory.

4. Rozdělení magnetických separátorů podle konstrukce [4]

Jednoznačné rozdělení magnetických separátorů podle jejich konstrukce je prakticky nemožné. Velice často se totiž používá řešení, kdy se zkombinuje několik typů konstrukce z důvodu dosažení takových parametrů, které jsou potřeba k provádění co nejúčinnějších separačních procesů v konkrétních případech. Použitá konstrukce je vždy více či méně odvozena od výše zmiňovaného prostředí, v němž magnetická separace probíhá.

Na konstrukci má také nemalý vliv požadovaná kvalita separace, kdy například u úpravy pitné vody musí být kladeny vysoké nároky na spolehlivý chod použitého řešení. Dalších faktorů, které ovlivní výběr konstrukce magnetického separátoru je celá řada, avšak jsou určité druhy, které se v praxi aplikují nejčastěji a nebo se z nich při návrhu konstrukce vychází. Základní součástí všech magnetických separátorů je vlastní magnetický prvek, který má největší podíl na výsledných parametrech samotného separátoru. Jedním z nejčastěji použitých magnetických prvků jsou **deskové magnety** (obr. *1*)

4.1. Deskové magnety

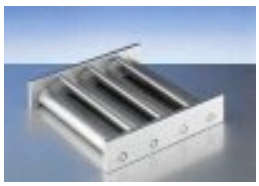
Slouží k odstraňování větších feromagnetických částí ze směsice magnetických i nemagnetických komponent z průběžného pásu. Povrch těchto magnetů bývá potažen vrstvou z tvrdého materiálu, např. nerezavějící oceli. Velmi často bývají tyto magnety za kryty, aby nedocházelo k jejich poškození či nadměrnému opotřebení. Samotné čištění těchto magnetů se provádí buď ručně, nebo se používá speciálních extraktorů.

Obrázek 1 (deskový magnet)

4.2. Magnetické separátory pro sypké materiály

Pro separaci menších částic se používají magnetické separátory pro sypké materiály, které jsou schopny zachytit magnetické částice o daleko menší velikosti než v předešlém případě.

Častým řešením tohoto typu jsou tzv. „Magnetické rošty“ což jsou, jak již z názvu vyplývá, rovnoběžné tyče z magnetického materiálu spojené dohromady. Tyto konstrukce se umisťují do již existujících potrubních systémů či skluzů. Vzhledem k tomu, že při separaci dochází k přímému kontaktu těchto roštů se separovaným materiálem, je kladen velký důraz na kvalitu materiálů. Tyto rošty bývají většinou z nerezové oceli a jádra jsou tvořena buď feritovými, nebo silnějšími neodymovými magnety. Čištění se provádí ručně nebo se tyto rošty dají opatřit extraktory pro snadnější údržbu. Uvedené rošty mohou být také přizpůsobeny do mnoha tvarů podle daného umístění, např. čtvercové, obdelníkové či kruhové.



Magnetický rošt čtvercového tvaru

Magnetický rošt kruhového tvaru

Často se používá i kombinace několika takových magnetických roštů. Toto uspořádání se potom nazývá magbox a používá se ke zvýšení spolehlivosti separace materiálů.

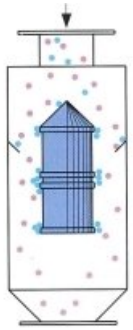
4.3. Skluzové separátory

Skluzové separátory (*obr. 2*) separátory se příliš nehodí na separaci malých až prachových částic ale jejich využití je větší tam, kde je potřeba odseparovat hrubší feromagnetické částice. Lze ho úspěšně aplikovat i v olejnatých či lepkavých materiálech. Jeho nespornou výhodou je i to, že u skluzových separátorů je značně snížena možnost ucpání procházejícím materiálem. Vyroben bývá opět z nerezové oceli a je vzduchotěsný. Tento separátor se skládá z dvojice permanentních magnetů, které jsou uchyceny proti sobě z vnější strany, takže nedochází ke kontaktu magnetů s materiálem. Tyto magnety lze odstranit, čímž dojde k samovolnému uvolnění magnetických částic. Separátory se dají provozovat v různých polohách, takže je lze využít nejen tam kde probíhá separace při volném pádu, ale například při pohybu materiálu pod tlakem.

Obrázek 2 (skluzový separátor)

4.4. Trubkové separátory

Jsou primárně určeny pro montáž do již existujících potrubí, a to buď do středu nebo na jeho konec. Narozdíl od skluzového separátoru je již permanentní magnet umístěn uvnitř *(obr. 3)*, tudíž je jeho separační účinnost vyšší. Z tohoto důvodu je potřeba počítat s fyzickou velikostí magnetu v závislosti na velikosti potrubního systému a také s případnými negativními vlivy materiálu na magnet. Konstrukčně je tento separátor vyroben ze stejných materiálů jako separátor předchozí.



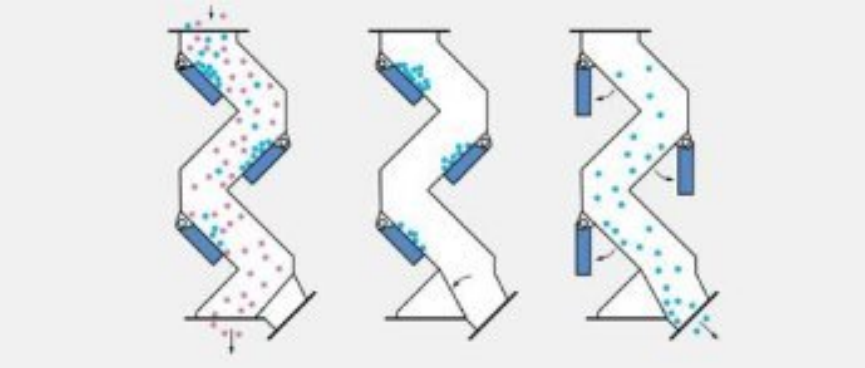
Obrázek 3 (trubkový separátor)

4.5. Kaskádové magnetické separátory

Vzhledem k tomu, že předchozí technická řešení jsou poměrně dost limitovaná množstvím separovaného materiálu, jsou pro větší objemy separovaného materiálu použita řešení na bázi několika separačních segmentů za sebou. Jak již z názvu vyplývá, separace je zde prováděna v jakýchsi kaskádách, kde v každé části je umístěn jeden permanentní magnet *(obr. 4)*.

Funkce tohoto separátoru je tedy taková, že materiál postupně prochází jednotlivými kaskádami a magnetický materiál se na nich zachytává. Permanentní magnety jsou opět umístěny vně separátoru a odseparovaný materiál se tedy zachytává na stěnách. Počet takovýchto kaskád není pevně určen a může být přizpůsoben množství či charakteru separovaného materiálu. Jeho možnost použití je velice rozmanitá a jeho velkou výhodou je i snadná instalace do již existujících systémů. Tento separátor je na

jeho konci opatřen záklopkou, pomocí které lze buď odvádět materiál zbavený magnetických částic nebo k odvádění odseparovaného materiálu do zásobníku. Ovládání této záklopky je možno buď manuálně, nebo automaticky. Konkrétní popis činnosti tohoto separátoru je patrný z obrázku



Obrázek 4 (kaskádový magnetický separátor)

1. Při průchodu materiálu separátorem dochází k postupnému zachytávání magnetického materiálu na stěnách separátoru v místech působení magnetů. Záklopka je v poloze, při které dochází k odvodu materiálu zbaveného magnetických částic.

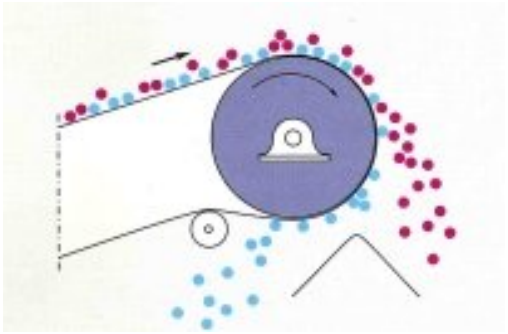
2. Průchod materiálu separátorem je přerušen a dochází k překlopení záklopky do druhé polohy.

3. Dochází k odpojení magnetů, čímž se magnetický materiál uvolní a je odveden do zásobníku.

4.6. Bubnové magnetické separátory

Dalším velice rozšířeným typem separátorů jsou bubnové magnetické separátory vyznačující se velice jednoduchým principem činnosti se dvěma rozdílnými konstrukčními způsoby.

Například při využití magnetického hnacího válce *(obr. 5)* se tento válec umístí na konec pásového dopravníku, či může nahradit stávající. Válec má magnetické vlastnosti, takže při kontaktu s magnetickými částicemi dojde, na rozdíl od nemagnetických částic, k jejich přichycení k dopravníkovému pásu. Jakmile přestane mít dopravníkový pás kontakt s magnetickým válcem, částice na něm uchycené samovolně odpadnou.

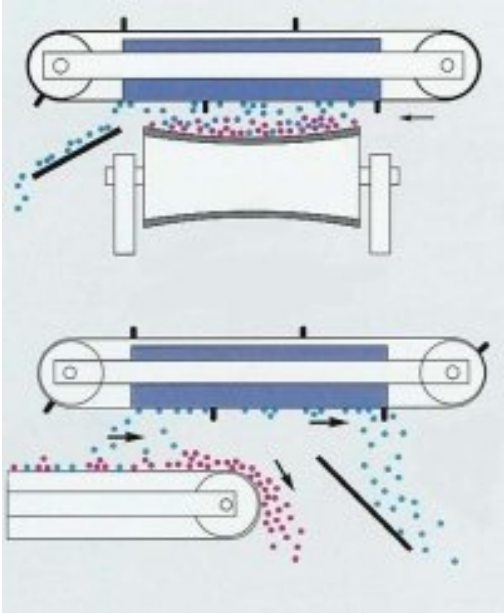


Obrázek 5 (bubnový magnetický separátor)

4.7. Pásové separátory

Podobným separátorem, který se aplikuje na pásových dopravnících, jsou pásové separátory *(obr. 6)*. Ty se ovšem neumisťují na konec dopravníků, ale umisťují se nad ně. To je v mnoha konstrukcích nesporná výhoda. Konstrukčně je tento separátor tvořen pásovým dopravníkem, na který se přichytávají magnetické částice a permanentním magnetem, jehož parametry jsou přizpůsobeny separovanému materiálu.

Může být umístěn jak podélně, tak příčně. Sílu magnetického pole lze též efektivně regulovat změnou vzdálenosti tohoto separátoru od dopravníkového pásu. Permanentní magnet bývá umístěn ve středu pásového separátoru a tedy na okrajích, kde již nepůsobí magnetické pole magnetu, dochází k samovolnému oddělení magnetických částic od pásu. Tyto částice jsou poté zachyceny do připravených záchytných systémů.



Obrázek 6 (pásový separátor)

4.8. Shrnutí

Pokud přistoupíme ke shrnutí a zhodnocení výše popsaných typů magnetických separátorů, vidíme, že z hlediska technické realizace se jedná o jednoduchá řešení. Výhodou je tedy velice jednoduchý princip činnosti a jedná se většinou o bezporuchové řešení při použití kvalitních součástí. Nevýhodou je ovšem skutečnost, že modifikace těchto řešení je často obtížná a z tohoto hlediska neefektivní. Například použijeme-li separátor, který využívá jako separační prostředí vodu, bude docházet k dobrým výsledkům při separaci malých částic. Nicméně pokud se stejný separátor upotřebí při separaci hrubších materiálů, jeho účinnost bude značně klesat.

Uspokojivým řešením může být kombinace jednotlivých separátorů například jejich sériovým řazením za sebou, kdy u každého jednotlivého separačního prvku bude docházet k separaci materiálů rozdílných vlastností. V takovémto případě platí pravidlo, že jako první se zařazuje prvek, který odstraňuje hrubší materiál a poté se řadí prvky, které jsou schopné odseparovat částice menších rozměrů. Je tedy dobré již dopředu vědět, jaké vlastnosti bude mít materiál, u kterého chceme provádět magnetickou separaci částic. Dále je také velice důležité vědět, zda-li bude docházet ke změnám

vlastností separovaného materiálu do té míry, že bude nutná změna nastavení magnetického separátoru či jeho modifikace.

To se potom také odráží ve výběru komponent magnetického separátoru. Pokud bude magnetický separátor aplikován např. v průmyslovém prostředí a budou na něj kladeny stejné nároky po celou dobu jeho provozu, není potřeba se touto otázkou zabývat tak důkladně, jako v případě jeho použití např. k vědeckým či experimentálním účelům. Tam je totiž větší předpoklad, že se budou vlastnosti separovaného materiálu výrazněji měnit. Z této myšlenky jsem vycházel i při vlastní technické realizaci magnetického separátoru. Při konstrukci byl tedy kladen velký důraz na co možná největší schopnost magnetického separátoru podstoupit příslušné modifikace potřebné k tomu, aby jej bylo možné snadno přizpůsobit více druhům materiálů či odlišným podmínkám. Z tohoto důvodu nebylo použito žádné nerozebíratelné spojení a těsnost jednotlivých spojů byla zajištěna pomocí izolační pásky. Toto řešení se ukázalo pro potřeby experimentálních pokusů jako dostačující.

5. Magnetické prvky

Za nejdůležitější součást magnetického separátoru lze považovat magnetický prvek. Ten má zásadní a určující vliv na funkci a na konečné parametry magnetického separátoru. Možnosti aplikace jednotlivých typů magnetických prvků jsou v mnoha případech silně provázány se zvoleným konstrukčním řešením, a proto často není dodatečná záměna za jiný typ magnetického prvku možná. Magnetický prvek je objekt, který díky jeho magnetickému poli přitahuje magnetickou složku k sobě. Při použití magnetických prvků s nastavitelnými parametry magnetických účinků lze separovat i část magnetické složky se specifickými parametry. Magnetické prvky nejčastěji používané v magnetických separátorech můžeme rozdělit do dvou odlišných skupin.

- **Permanentní magnety**

- **Elektromagnety**

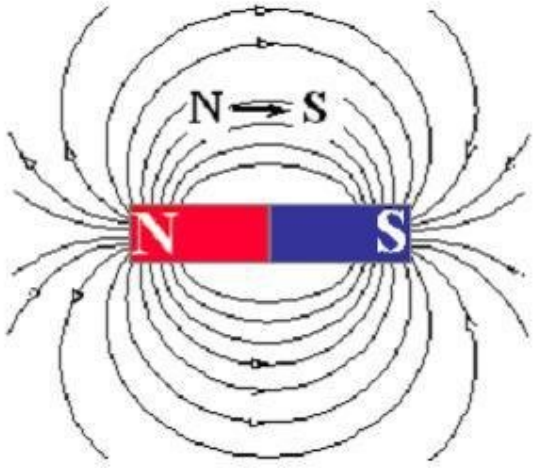
5.1. Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou nejčastěji používaným magnetickým prvkem. Jejich výhodou je jednoduchá údržba, spolehlivost, nulová spotřeba, malé nároky na údržbu i na samotnou aplikaci tohoto prvku. Velkou nevýhodou při použití permanentních magnetů je ovšem malá adaptace na materiál s odlišnými magnetickými vlastnosti než na materiál, pro který byl tento magnetický prvek určen. Každý permanentní magnet je tvořen dvěma póly:

1. **Severní** – tento pól bývá označován také písmenem **N** podle anglického slova North.

2. **Jižní** – podle anglického slova označovaný jako **S** (South).

Mezinárodně dohodnutý směr působení siločar v magnetu je od severního pólu k jižnímu. Ze severního pólu poté dochází k vystupování těchto siločar z magnetu, přičemž se následně vrací zpět k jižnímu pólu. Tímto vznikají křivky ve tvaru víru. Takovému magnetickému poli se proto říká vířivé *(obr. 7)* [6].



obrázek 7 (vířivé magnetické pole)

Fyzikální princip permanentního magnetu je založen hlavně na vlastnostech elektronů v atomových obalech materiálů. Každý elektron má určitou spinovou rotaci kolem jádra. Tímto pohybem dochází ke vzniku dílčích magnetických momentů. Pokud jsou tyto magnetické momenty zcela nahodilé, výsledné magnetické pole materiálu je téměř nulové. Pokud jsou ovšem tyto magnetické momenty uspořádány, dochází k magnetickým projevům. Čím větší je toto uspořádání, tím silnější magnetické pole je. K takovému uspořádání může dojít buď působením vnější magnetické síly, kdy dojde k ovlivnění spinu elektronu, nebo je toto uspořádání magnetických momentů v materiálu již přirozené.

V prvním případě se po přerušení působení vnější magnetické síly buď vrátí pohyb elektronů v atomech do původního stavu, čímž bude mít těleso stejné magnetické vlastnosti jako před magnetizací, nebo můžou magnetické účinky přetrvávat. Ve druhém případě hovoříme o remanentním magnetismu.

Permanentních magnetů je mnoho druhů jak z hlediska magnetických vlastností, tak materiálu ze kterého jsou vyrobeny.

5.1.1. Feritové magnety.

Jsou pro svou nízkou cenu a dobrou odolnost hojně využívány. Dají se rozdělit na magneticky tvrdé či měkké ferity. Magneticky tvrdé ferity bývají vyrobeny pomocí práškové metalurgie lisováním při vysokých tlacích. Lze je vyrobit dvěma způsoby.

- Anizotropní feritové magnety bývají lisovány za přítomnosti vnějšího magnetického pole a mají pouze jednu osu magnetizace. Tyto magnety jsou tedy účinné jen v jednom směru, který je shodný s tím, kterému byl vystaven při magnetizaci. Při stejné velikosti mívají proti izotropním magnetům větší indukční tok a vykazují i větší remanentní magnetismus
- Izotropní feritové magnety jsou vyráběny bez přítomnosti magnetického pole a jejich možnost magnetizace je ve všech osách stejná. Z toho vyplývá, že magnetické vlastnosti jsou v těchto směrech rovněž shodné.

Lisování těchto magnetů je z technologického hlediska prováděno buď za mokra, kde původní materiál tvoří suspenzi nebo za sucha, kde původní materiál tvoří sypkou směs.

Za mokra se vyrábí anizotropní a za sucha izotropní feritové magnety. Tyto magneticky tvrdé magnety jsou vyrobeny zhruba z 86% z Fe_2O_3 a zhruba ze 14% z BaO_2 .Naproti tomu magneticky měkké magnety jsou vyrobeny z 80% z Fe_2O_3 a zhruba z 20% z $BaCO_3$ či $SrCO_3$.

Z tohoto důvodu jsou feritové magnety odolné mnohým kyselinám. Z magnetického pohledu jsou tyto magnety ferimagnetické. Pracovní teplota těchto magnetů se pohybuje v rozmezí

-40 °C až +250 °C. Při vzrůstající teplotě klesá magnetická remanence zhruba o 0,2 % na 1K a spolu s ní koercitivní intenzita pole stoupá o 0,3% na 1K. Při klesající teplotě dochází k opačnému efektu. [7]

5.1.2. Magnety ze vzácných zemin

V mnoha případech ovšem není velikost magnetických účinků feritových magnetů dostatečná. V těchto případech můžeme zvolit magnety ze vzácných zemin. Rozdělit je lze na dva typy, které využívají rozdílné vzácné zeminy.

- Magnety Neodymové
- Magnety Samariové

Neodymové magnety jsou směsicí neodymu, železa a boru (NdFeB). Jedná se o jedny z nejsilnějších magnetů. I malý magnet tohoto typu je schopen působit velmi silným magnetickým polem. Často používaným magnetem je $Nd_2Fe_{14}B$, který je v současné době považován za nejsilnější. Nevýhodou těchto magnetů je malá povrchová odolnost vůči vnějším vlivům. Proto se u nich přistupuje k povrchové úpravě. Výhodou je velká odolnost oproti demagnetizačním účinkům díky jejich vysokým hodnotám koercitivity. NdFeB je tvořen dvěma fázemi. První je fáze

magnetických zrn $Nd_2Fe_{14}B$ a druhá je fáze z černých nemagnetických zrn čistého neodymu.

Pracovní bod je u těchto magnetů mezi +110 až +220 °C. Výroba těchto magnetů je prováděna práškovou metalurgií. Jsou lisovány za vysokého tlaku pomocí forem za přítomnosti magnetického pole. Vzhledem k tomu, že tento magnet má anizotropní strukturu, dosahuje se u něj vysokých hodnot remanentní magnetizace.[8]
Druhým typem magnetu ze vzácných zemin je **Samariový magnet** (SCO), tedy magnet na bázi Samaria a Kobaltu. Jeho historie vývoje je starší než u NdFeB a oproti novým typům NdFeB je i magneticky slabší. Je křehčí, snadno dochází k odštěpu částeček, ale dokáže pracovat až do teploty +350 °C. Používané intermetalické fáze při výrobě tohoto magnetu jsou $SmCo_5$ a Sm_2Co_{17}. [9]

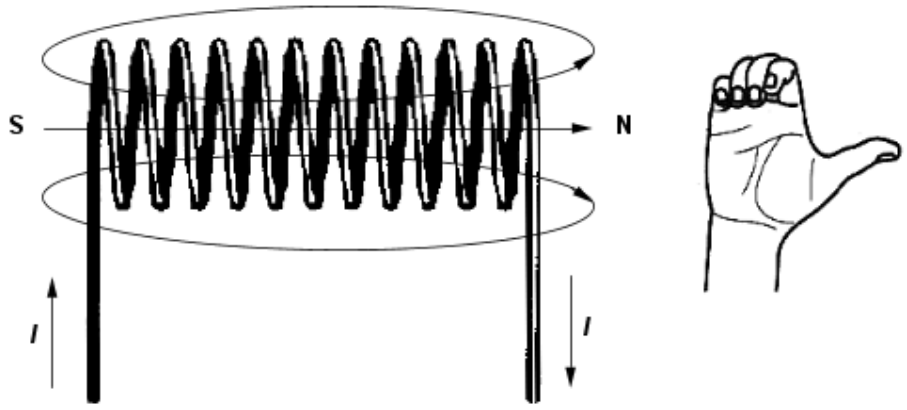
5.2. Elektromagnet

Dalším magnetickým prvkem, velice často používáným při magnetické separaci, je elektromagnet. Jeho největší výhodou oproti permanentním magnetům je jeho schopnost regulace. Elektromagnet je tvořen cívkou s navinutým vodičem na nemagnetické kostře. Vodič na cívce se volí takový, aby měl co nejnižší rezistivitu, při které by nedocházelo k tepelným ztrátám. Z tohoto důvodu jsou tyto dráty často vyrobeny z mědi. Někdy je cívka tvořena několika vrstvami závitů, které jsou vzájemně izolované.

Pro zvýšení magnetických účinků se do cívky přidává jádro, které je tvořeno magneticky měkkou ocelí (s feromagnetickými účinky) s malou zbytkovou remanentní magnetizací. Elektromagnet funguje z fyzikálního hlediska na principu elektromagnetické indukce, přičemž hlavní roli hraje napětí a procházející proud. Pomocí změny veličin ovlivňující elektromagnetickou indukci v elektromagnetu lze ovlivnit magnetické parametry tohoto magnetického prvku. Nejčastěji se jedná o změnu napětí na cívce elektromagnetu, která je z provozního hlediska nejjednodušší. Tímto způsobem lze změnit jeho parametry bez fyzického zásahu do konstrukce elektromagnetu, což je v porovnání s permanentními magnety nespornou výhodou.

5.2.1. Ampérovo pravidlo pravé ruky

Elektromagnet má také dva póly, a to jižní (S) a severní (N). Jejich umístění je definováno podle Ampérova pravidla pravé ruky. Toto pravidlo, upravené pro cívky, nám říká, že pokud pokrčené prsty pravé ruky ukazují směr proudu v cívce, vztyčený palec nám ukazuje severní pól cívky *(obr. 8)*.



Obrázek 8 (Ampérovo pravidlo pravé ruky)

5.2.2. Indukčnost cívky

Parametrů, kterými můžeme ovlivnit magnetické účinky elektromagnetu, je mnoho. Jednou z hlavních fyzikálních veličin, která popisuje tyto účinky je indukčnost cívky. Značí se *L* a jednotkou je 1H (Henry). Je definována vztahem

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} = \frac{\mu N^2 V}{l^2}$$

Kde μ je permeabilita jádra, S je plocha jednoho závitu , N je počet závitů cívky, V je objem jádra cívky a l je délka cívky.

5.2.3. Magnetická indukce

Z pohledu magnetických separátorů je určujícím faktorem síly elektromagnetu **magnetická indukce** *B*. Jednotka magnetické indukce je 1T (Tesla). Podle velikosti této fyzikální veličiny lze odhadnout, jaký materiál bude možné separovat. Výpočet magnetické indukce ve středu dlouhé cívky válcovitého tvaru se provádí pomocí vztahu

$$B = \frac{\mu NI}{l}$$

5.2.4. Napájení elektromagnetu

Napájení elektromagnetů může být prováděno jak stejnosměrným napětím (DC), tak střídavým (AC). Pokud je napájen DC napětím, elektromagnet vytváří konstantní magnetické pole. Při napájení střídavým napětím dochází ke vzniku proměnného magnetického pole. Toto je také provázeno odporem cívky vůči procházejícímu proudu, tzv. induktancí. Dochází také k fázovému posunu proudu za napětím, který činí $\pi/2$.

Další vlastností elektromagnetu, jíž je nutno se zabývat, je jeho zahřívání. To je způsobeno odporem, který klade vodič průchodu elektrického proudu. Velikost zahřívání elektromagnetu je tedy dána jednak materiálem z něhož je vodič vyroben a jednak velikostí elektrického proudu, který jí prochází.
Limitující veličinou elektromagnetu je také procházející proud. Při příliš vysokých hodnotách napětí a proudu by mohlo dojít k porušení izolace ve vinutí cívky a jejímu následnému poškození.

6. Vlastní magnetický separátor

Jednou z hlavních součástí mé bakalářské práce bylo sestavení vlastního separátoru magnetických částic. Jak jsem již v závěru kapitoly o magnetických separátorech předeslal *(str. 8)*, z technického hlediska se jedná o poměrně jednoduché

zařízení. Přesto splňovalo nároky, které na něj byly kladeny během provedených experimentů. Separačním prostředím bylo zvoleno vodní vzhledem k tomu, že separační suspenze byla tvořena z velice malých částic magnetitu (Fe_3O_4) a hematitu (α-Fe_2O_3) smíchaných s vodou.

Tomuto prostředí byla přizpůsobena i konstrukce. Ta sice nevychází z žádného výše uvedeného typu, nicméně principiálně má nejblíže trubkovému separátoru. Mnou zkonstruovaný magnetický separátor je tedy složen z těchto částí:

6.1. Jímka na suspenzi

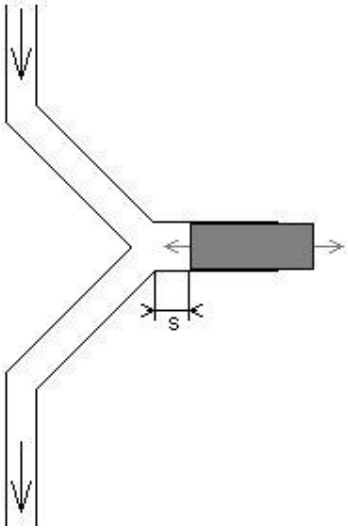
V této nádobě se kumuluje suspenze materiálů, která poté prochází magnetickou separací. Objem této jímky je 1l, nicméně pro experimentální účely byla využita z 60% jejího objemu. Je opatřena dvěma otvory tak, že spodní otvor má schopnost regulace průtoku.

6.2. Magnetický prvek

Jako magnetický prvek byl během experimentů použit elektromagnet anebo permanentní magnet. Způsob aplikace těchto dvou magnetických prvků byl, vzhledem k jejich odlišným vlastnostem, rozdílný. Při magnetické separaci za užití permanentního magnetu, byl tento prvek magneticky přichycen k jádru.

Toto jádro bylo zasunuto do otvoru v T článku *(obr. 9)*, který byl součástí obvodu magnetického separátoru. Tímto bylo tedy jádro v přímém kontaktu s vodní suspenzí a při separačních procesech docházelo k usazování separovaného materiálu na jádře. V případě elektromagnetu je opět použito jádro, které je zasunuto do T členu. Cívka elektromagnetu je poté nasunuta na toto jádro. To se stává součástí elektromagnetu a je upraveno na velikost válcové cívky elektromagnetu a na šířku otvoru v T článku. Dále je zavedena veličina *s*, která je definována velikostí prostoru pro separovaný materiál (*obr. 9*).

Jádro bylo vyrobeno z železného šroubu velikosti č.8 odstraněním závitu a zpilováním do požadovaného rozměru.

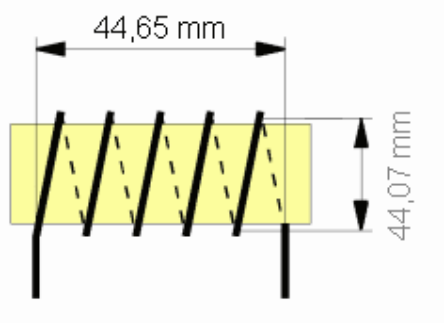


Obrázek 9 (T člen)

6.2.1 Cívka elektromagnetu

Cívka byla namotána na umělohmotnou kostru. Jako drát byl použit izolovaný vodič s průměrem 8mm, přičemž izolace byla tvořena nevodivým lakem. Celá cívka byla poté zaizolována lepící páskou.

Napájení bylo provedeno pomocí zdroje stejnosměrného napětí. Přesné rozměry cívky jsou uvedeny na *obr. 10*. Při maximálním nastavení proudu (1,5 A) a napětí (3,5 V) byla na jádře elektromagnetu naměřena indukce B = 160 mT. Při vyšších hodnotách proudu a napětí již docházelo k značnému zahřívání elektromagnetu.



Obrázek 10 (cívka elektromagnetu)

6.2.2. Permanentní magnet

Jako permanentní magnet posloužil neodymový magnet o velikosti magnetické indukce B = 360 mT. Byl tedy silnější než použitý elektromagnet. Díky tomu bylo možné provádět magnetickou separaci za většího průtoku suspenze separátorem než při použití elektromagnetu.

6.3. Čerpadlo suspenze

Čerpadlo použité pro magnetický separátor bylo dávkovacího typu. Dovolovalo proto postupně přečerpávat suspenzi separátorem. Při každém nadávkování byla tedy určitá časová prodleva, což přispělo k lepšímu odseparování materiálu magnetickým prvkem.

Čerpadlo bylo schopno regulace, takže jsem byl schopen v jednotlivých experimentech měnit rychlost průtoku suspenze. Toto se nakonec ukázalo jako zásadní parametr při ovlivňování úspěšnosti separace.

Regulace se prováděla pomocí potenciometru, který dovoloval nastavování rychlosti průtoku mezi 9 stupni. Nastavení čerpadla bylo v rozmezí 3–9, přičemž dá se říci, že u stupně 9 se již jednalo o kontinuální přečerpávání suspenze.

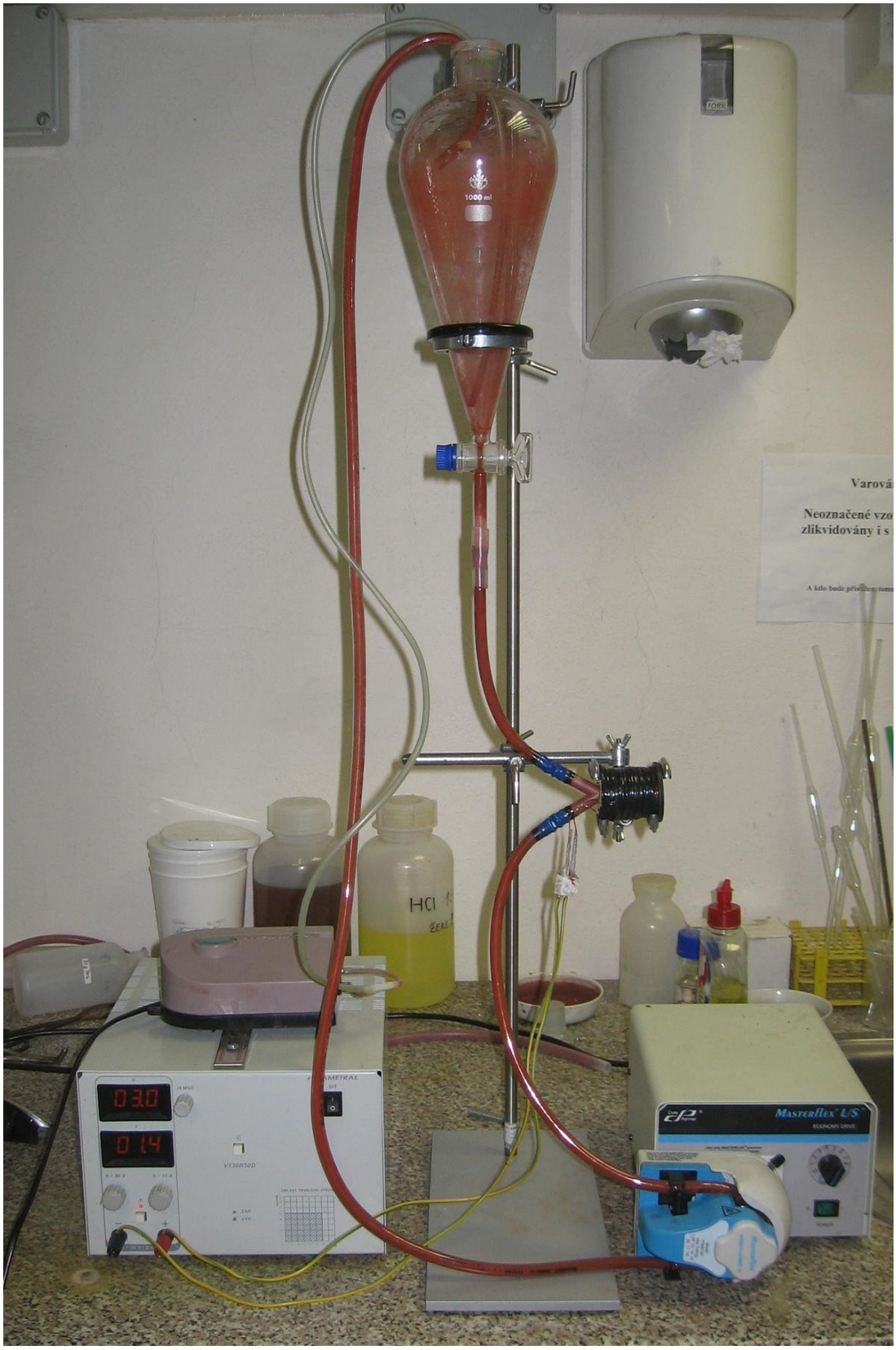
6.4. Provzdušňovací čerpadlo

Toto čerpadlo mělo za úkol postupně provzdušňovat suspenzi v jímce, takže si tato suspenze udržovala homogenitu po celou dobu separačního procesu. Čerpadlo bylo použito jednoduché, bez možnosti dalších nastavení.

6.5. Konstrukce vlastního separátoru

Všechny součásti magnetického separátoru byly spojeny pomocí silikonové trubice, jejíž vlastnosti zajišťovaly těsnost i při maximální rychlosti přečerpávání suspenze. Jako kostra pro uchycení jednotlivých součástí byly použity hliníkové úchyty, které byly opět uchyceny na ocelovém stojanu. Díky tomu, že hliník není magnetický, nedocházelo k interakci úchytů s magnetickými prvky. Celá konstrukce byly vysoká jeden metr *(magnetický separátor viz. obr. 11)*

Dále byly kromě laboratorního skla použity přesné váhy a v jednom z experimentů se stala součástí magnetického separátoru i sonifikační vana. Ta byla kromě tohoto případu vždy využita před separačním procesem na zlepšení homogenity suspenze. Čištění tohoto separátoru bylo prováděno čistou vodou po každém experimentu a po několika experimentech se nechala na zhruba 20 minut přečerpávat kyselina chlorovodíková, která byla schopna většinu usazeného hematitu odstranit. Nicméně zbytky neodstraněného hematitu na povrchu silikonových trubek již kvalitu separace neovlivňovaly.



Obrázek 11 (vlastní magnetický separátor)

7. Vyhodnocování experimentů

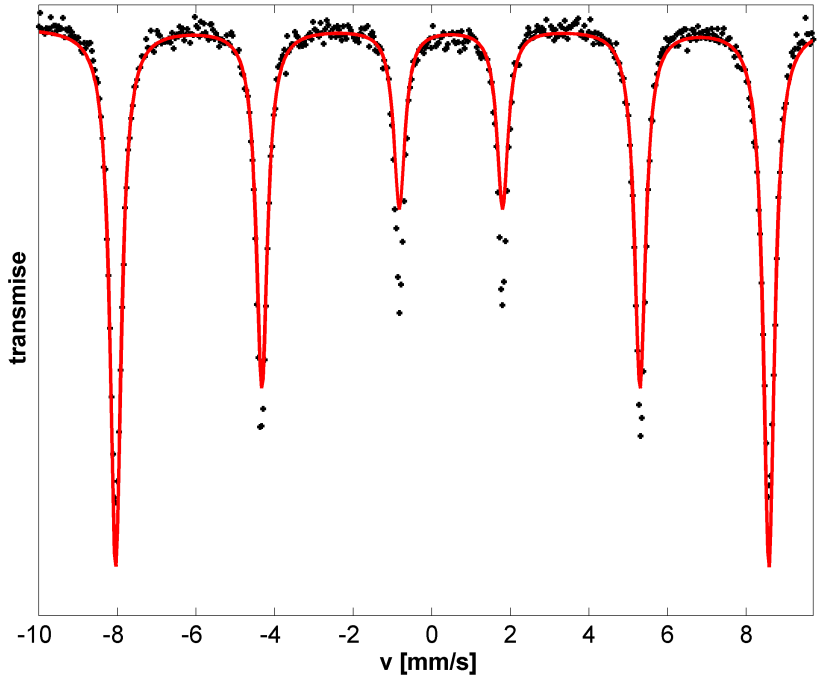
7.1 Mössbauerova spektroskopie

Kvantitativní zastoupení železo obsahujících fází (konkrétně zastoupení hematitu a magnetitu) bylo stanovováno užitím transmisní ^{57}Fe Mössbauerovy spektroskopie [5]. Jedná se o metodu sloužící ke studiu strukturních a magnetických vlastností železo obsahujících látek. Je založena na jevu bezodrazové jaderné rezonanční emise a absorpce záření γ. V transmisním režimu je měřený vzorek vystaven monochromatickému záření γ a jím prošlé záření se detekuje scintilačním detektorem. V důsledku hyperjemných interakcí mezi jádrem a elektrony v jeho nejbližším okolí dochází k posunutí, či rozštěpení hladin energie v jádrech ^{57}Fe měřeného vzorku. Fotony emitované mössbauerovským zdrojem záření (^{57}Co v Rh matrici, poločas rozpadu 270 dní, E_f = 14,4 keV) tedy nemohou být vzorkem rezonančně absorbovány. Rezonanční absorpce je možné dosáhnout dopplerovskou modulací energie fotonů, kdy se pohybuje zářičem vůči vzorku rychlostí řádově v jednotkách mm/s. Mechanický pohyb zářiče vůči studovanému vzorku je zabezpečen přesným pohybovým zařízením (transducerem). Mössbauerovo spektrum je pak závislostí intenzity záření gama prošlého vzorkem na rychlosti pohybového zařízení.

Z poloh minim (píků) v Mössbauerově spektru lze získat informace zejména o chemických stavech studovaných fází, o vlastnostech krystalové mřížky, či vnitřních magnetických a elektrických polích. Tato metoda je prvkově selektivní s ohledem na použitý mössbauerovský zářič. ^{57}Fe Mössbauerova spektroskopie tak umožňuje například stanovení valenčního stavu Fe, odlišení neekvivalentních strukturních pozic atomů železa, posouzení magnetického chování, či kvantifikaci relativního zastoupení železo obsahujících fází ve vzorku. V rámci bakalářské práce se jednalo o kvantitativní vyhodnocení relativního zastoupení magnetitu a maghemitu v odseparovaném materiálu na základě ploch příslušných subspekter. Pro korektní vyhodnocení bylo důležité znát hyperjemné parametry Mössbauerových spekter těchto dvou látek. Důležité je také zmínit, že pravděpodobnost Mössbauerova jevu (tzv. f-faktor) je u hematitu i magnetitu stejná.

7.2. Struktura a magnetismus hematitu α-Fe_2O_3, Mössbauerovo spektrum

Hematit je velmi rozšířeným oxidem železa v přírodě a jedná se o jednu z několika krystalografických modifikací Fe_2O_3. Jeho krystalová struktura je hexagonální a je izostrukturní s korundem. Oktaedrické pozice tohoto oxidu jsou ze dvou třetin obsazeny Fe^{3+}. Mřížkové parametry jsou a = 5,032; c = 13,737; Z = 6 [9]. Hematit je při pokojové teplotě slabě feromagnetický, při nízkých teplotách pod 260 K je antiferomagnetický. Mössbauerovo spektrum měřené při pokojové teplotě (při takové teplotě byla prováděna Mössbauerova spektroskopie u odseparovaných vzorků) dává pro α-Fe_2O_3 následující charakteristické hyperjemné parametry: izomerní posun δ_{Fe} = 0,37 mm/s, kvadrupólový posun ε_Q = –0,21 mm/s, hyperjemné magnetické pole B = 51,7 T. Tyto hodnoty byly při fitování spekter jednotlivých vzorků zafixovány. Hematit je v Mössbauerově spektru reprezentován pouze jedním sextetem. Mössbauerovo spektrum čistého hematitu použitého při experimentech je prezentováno na *obr. 12*. Důležitou fyzikální veličinou, která popisuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli je magnetická susceptibilita. Ta má v případě hematitu (při pokojové teplotě) hodnotu $\kappa = 605{,}9 \cdot 10^{-6}$.



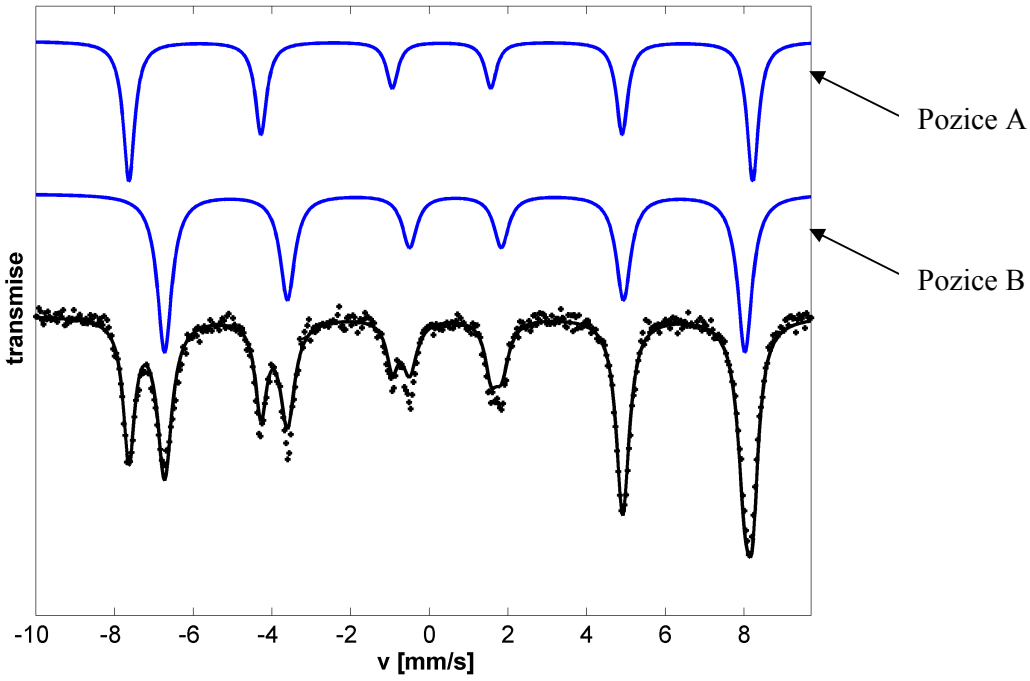
Obrázek 12 (spektrum čistého α-Fe_2O_3)

7.3. Struktura a magnetismus magnetitu Fe_3O_4, Mössbauerovo spektrum

Jedná se o jeden z nejdéle známých minerálů s magnetickými vlastnostmi. Dvě odlišné strukturní pozice atomů železa vedou k ferimagnetismu magnetitu při pokojové teplotě. Tetraedrické (A) pozice jsou obsazeny ionty Fe^{3+} a oktaedrické (B) ionty Fe^{3+} a Fe^{2+}. Magnetické momenty atomů železa v neekvivalentních pozicích jsou vzájemně antiparalelní a navíc nevykompenzované, což vede ke zmiňovanému ferimagnetismu. Přítomnost magnetitu ve vzorku se v Mössbauerově spektru (*obr. 13*) projevuje dvěma sextety. První sextet s hyperjemnými parametry δ_{Fe} = 0,29 mm/s, ε_Q = –0,017 mm/s, B = 49,2 T náleží pozici A a druhý s hyperjemnými parametry δ_{Fe} = 0,65 mm/s, ε_Q = –0,017 mm/s, B = 45,7 T náleží pozici B [10]. Poměr spektrálních ploch těchto sextetů je přibližně 1,94 ve prospěch pozice B, tedy vzorek magnetitu využitý při experimentech je prakticky stechiometrický (ideální poměr činí 2:1). Hodnoty hyperjemných parametrů

a zmíněného poměru spektrálních ploch byly při vyhodnocování Mössbauerových spekter odseparovaných vzorků fixovány. Magnetická susceptibilita je oproti hematitu daleko vyšší a při pokojové teplotě je její hodnota

$\kappa = 276\,496{,}4 \cdot 10^{-6}$.



Obrázek 13 (spektrum čistého Fe_3O_4)

7.3. Úspěšnost separace

Pro konečné vyhodnocení experimentu byla zavedena nová veličina označená jako úspěšnost separace. Jako označení jsem zvolil *U* a její hodnota je procentuální. Tato veličina definuje úspěšnost experimentu z hlediska procentuálního zastoupení hematitu a magnetitu v odseparovaném vzorku. Vzhledem k tomu, že se v suspenzi vyskytoval jen hematit a magnetit, úspěšnost separace se vypočítá pomocí procentuálního zastoupení hematitu v odseparovaném vzorku. Toto zastoupení hematitu v suspenzi je označeno jako *K* a jeho hodnota je opět procentuální. Účinnost *U* může nabývat hodnot od 0 do 100 %.

- **Výpočet** : $U = 100 – 2K$ [%]

7.4. Přepočet na hmotnostní poměr

Při prováděných experimentech byla počáteční koncentrace hematitu a magnetitu v suspenzi shodná z hlediska jejich hmotnosti. Proto bylo nutné uvažovat o přepočtu poměru mössbauerovských spektrálních ploch na hmotnostní poměr. Důvodem je, že Mössbauerova spektroskopie poskytuje poměr zastoupení jednotlivých fází z hlediska počtu atomů železa. Ten je v případě hematitu a magnetitu od hmotnostního odlišný.

- Přepočet:

Fe_2O_3 ... m_1
Fe_3O_4 ... m_2
$2N_1$.....počet atomů železa v hematitu
$3N_2$.....počet atomů železa v magnetitu

Předpokládaný poměr spektrálních ploch výše zmíněných oxidů železa činil 1:1

$$\frac{2N_1}{3N_2} = \frac{2\dfrac{m_1}{M_{m_1}}}{3\dfrac{m_2}{M_{m_2}}} = \frac{2}{3}\cdot\frac{m_1}{m_2}\cdot\frac{M_{m_2}}{M_{m_1}}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{3}{2}\cdot\frac{M_{m_1}}{M_{m_2}} = \frac{3\cdot(2\cdot 55{,}8+3\cdot 16)}{2\cdot(3\cdot 55{,}8+4\cdot 16)} = \underline{1{,}0343}$$

Vzhledem k tomu, že je rozdíl mezi poměrem spektrálních ploch (1:1) a hmotnostním poměrem (1,0343:1) minimální, rozhodl jsem se tento přepočet při vyhodnocování experimentů neprovádět.

8. Výsledky experimentů

8.1. Parametry a nastavení experimentů

Možností nastavení či přímo modifikace magnetického separátoru bylo poměrně hodně. Šlo jednak o změnu magnetických účinků magnetických prvků, redukci prostoru pro odseparovaný materiál, změnu navážky hematitu a magnetitu pro suspenzi, změnu rychlosti přečerpávání vodní suspenze, či přidání dodatečných prvků jako provzdušňovacího čerpadla či sonifikační vany.

8.2. Experiment SM1

Jako magnetický prvek se pro úvodní experimenty aplikoval elektromagnet, který byl napájen zdrojem stejnosměrného napětí. V tomto experimentu nebylo použito provzdušňovací čerpadlo a prostor pro separaci měl délku s = 1,4 cm (*obr. 11*). Nastavení úvodního experimentu se dá považovat za základní. Při následujících experimentech docházelo k postupným změnám, které měly za cíl zvýšit úspěšnost magnetické separace. Pokud se dospělo k závěru, že provedená změna nastavení měla pozitivní vliv na úspěšnost separace, byla při následných experimentech ponechána. V opačném případě došlo k návratu k původnímu nastavení. Experimentů bylo provedeno 10 a byly označovány jako SM1, SM2 – SM10.

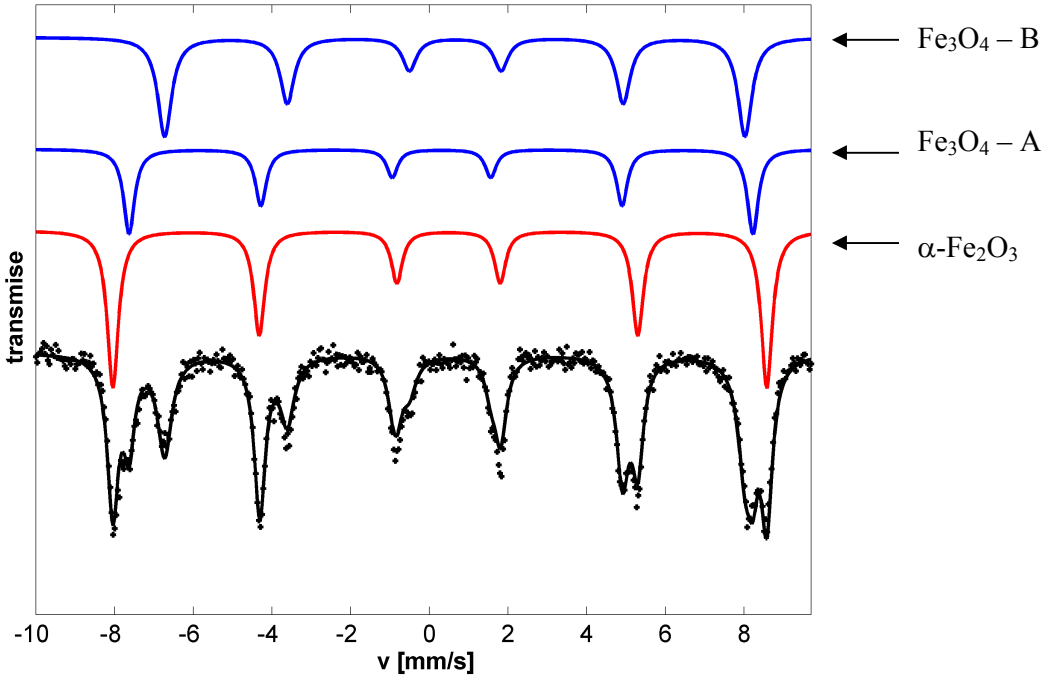
Parametry úvodního experimentu (SM1)

Vzhledem k tomu že se jednalo o první experiment, očekávání uspokojivého výsledku nebylo velké. To se bohužel potvrdilo a úvodní experiment nemohu považovat za úspěšný. Při zkoumání důvodů proč tomu tak bylo, jsem dospěl k závěru, že při separaci docházelo k usazování hematitu v prostoru pro odseparovaný materiál, a to bez ohledu na magnetické účinky magnetického prvku. V porovnání s ostatními experimenty byl co do úspěšnosti separace nejméně zdařilý. (*spektrum vzorku viz. obr. 14*).

• Vodní suspenze	-	0,5 g hematitu + 0,5 g magnetitu + 600 ml vody
• Nastavení elektromagnetu	-	3,5 V 1,5 A (DC)
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	1
• Doba sonifikace	-	3 minuty
• Prostor pro separaci	-	s = 1,2 cm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 43%**

- **Úspěšnost separace U = 14%.**



Obrázek 14(spektrum vzorku SM1)

8.3. Experiment SM2

V tomto měření bylo oproti minulému experimentu přidáno provzdušňovací čerpadlo, což pozitivně ovlivnilo úspěšnost separace. Ostatní parametry předchozího experimentu zůstaly zachovány.

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 36,8%**
- **Úspěšnost separace U = 26,4%.**

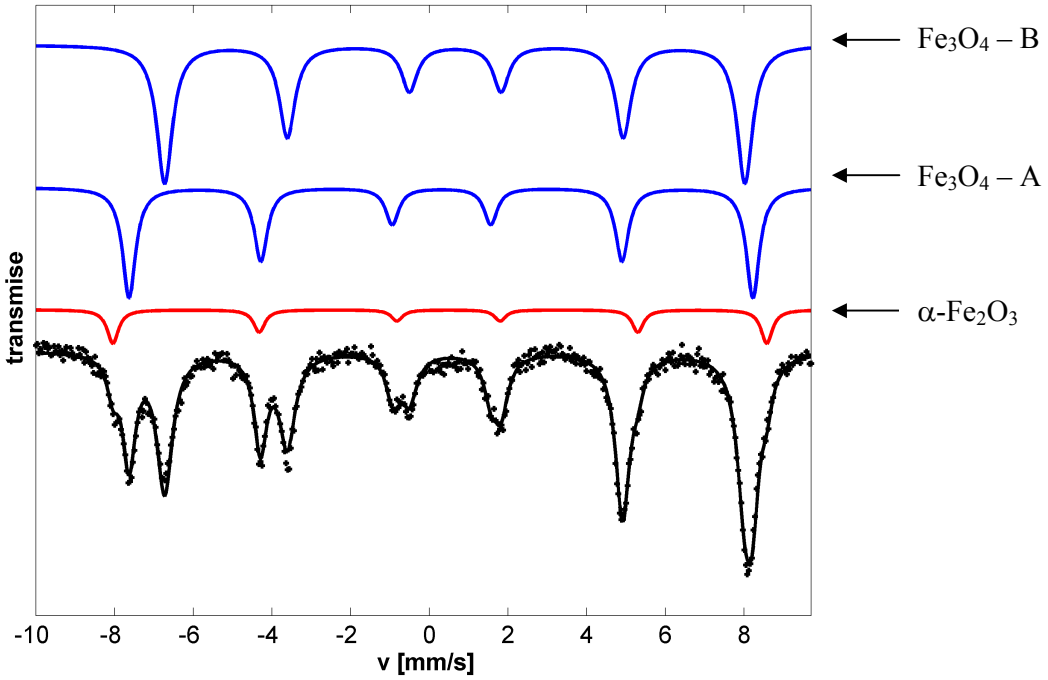
8.4. Experiment SM3

Úspěšnost separace byla v tomto experimentu v porovnání s ostatními nejvyšší. Toho bylo dosaženo změnou velikosti prostoru pro separaci. Ta se snížila na s = 4mm, což neumožňovalo usazování hematitu v magnetickém prvku v takovém množství, jako u předešlých experimentů. Dále byla zvýšena rychlost cirkulace suspenze o 50 % na stupeň 1,5. Tímto se snížil objem odseparovaného materiálu, nicméně pro potřeby Mössbauerovy spektroskopie bylo toto množství dostatečné. (*spektrum vzorku viz. obr. 15*) .

• Vodní suspenze	-	0,5 g hematitu + 0,5 g magnetitu + 600 ml vody
• Nastavení elektromagnetu	-	3,5 V 1,5 A (DC)
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	1,5
• Doba sonifikace	-	3 minuty
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 9,5%**

- **Úspěšnost separace U = 81%.**



Obrázek 15(spektrum vzorku SM3)

8.5. Experiment SM4

V tomto experimentu byl jako magnetický prvek aplikován permanentní magnet. Úpravy v nastavených parametrech magnetického separátoru z předchozího experimentu byly ponechány. Bohužel v tomto experimentu se ukázalo, že permanentní magnet je natolik silný, že dokázal přitahovat i částice hematitu, což snižovalo úspěšnost separace.

• Vodní suspenze	-	0,5 g hematitu + 0,5 g magnetitu + 600 ml vody
• Permanentní magnet	-	B = 300 mT
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	1,5
• Doba sonifikace	-	3 minuty
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 27,1%**

- **Úspěšnost separace U = 45,8%.**

8.6. Experiment SM5

V tomto experimentu byl opět použit elektromagnet, nicméně jako suspenze byl použit vzorek suspenze vytvořený v CVN smíchaný s vodou. Složení tohoto vzorku bylo ovšem, od mnou používaných suspenzí, značně odlišné. Vzhledem k tomu, že tento výsledek by nebylo možno porovnat s ostatními, výsledky tohoto experimentu zde nebudou prezentovány.

8.7. Experiment SM6

Zde proběhla změna navážky. Ta se snížila o polovinu. Tedy 0,25g hematitu a 0,25g magnetitu. Objem vody zůstal zachován. Byl opět aplikován elektromagnet a vzhledem k nižší navážce byla prodloužena doba trvání experimentu na 30minut.

• Vodní suspenze	-	0,25 g hematitu + 0,25 g magnetitu + 600 ml vody
• Nastavení elektromagnetu	-	3,5V 1,5A (DC)
• Doba trvání experimentu	-	t = 30 minut
• Rychlost přečerpávání	-	2
• Doba sonifikace	-	Po celou dobu experimentu
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 23,3%**

- **Úspěšnost separace U = 53,4%.**

8.8. Experiment SM7

Zde bylo využito sonifikační vany. Ta byla v obvodu magnetického separátoru zařazena mezi jímku na suspenzi a magnetický prvek. Díky typu konstrukce separátoru se nejednalo o složitý proces. Při vyhodnocování Mössbauerova spektra se ovšem objevila parazitní paramagnetická složka (4,5%). Přítomnost této složky mohla být zapříčiněna přidáním sonifikační vany do obvodu, čímž mohlo dojít k nechtěnému obohacení suspenze o materiál, který se nacházel na povrchu přidaných součástí. Dále byla zvýšena rychlost čerpání suspenze na stupeň 2.

• Vodní suspenze	-	0,5 g hematitu + 0,5 g magnetitu + 600 ml vody
• Nastavení elektromagnetu	-	3,5V 1,5A (DC)
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	2
• Doba sonifikace	-	Po celou dobu experimentu
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 20%**

- **Úspěšnost separace U = 55,5%.**

8.9. Experiment SM8

Poté co nedocházelo k růstu úspěšnosti separace pomocí elektromagnetu, rozhodl jsem k opětovnému použití permanentního magnetu. Společně s tím jsem zvýšil rychlost cirkulace suspenze. Díky tomu se podařilo omezit účinek magnetického prvku na částice hematitu. To je možné potvrdit srovnáním výsledků s experimentem SM4, kde k této situaci docházelo.

• Vodní suspenze	-	0,5 g hematitu + 0,5 g magnetitu + 600 ml vody
• Permanentní magnet	-	B = 300 mT
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	3
• Doba sonifikace	-	3 minuty
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 14,1%**

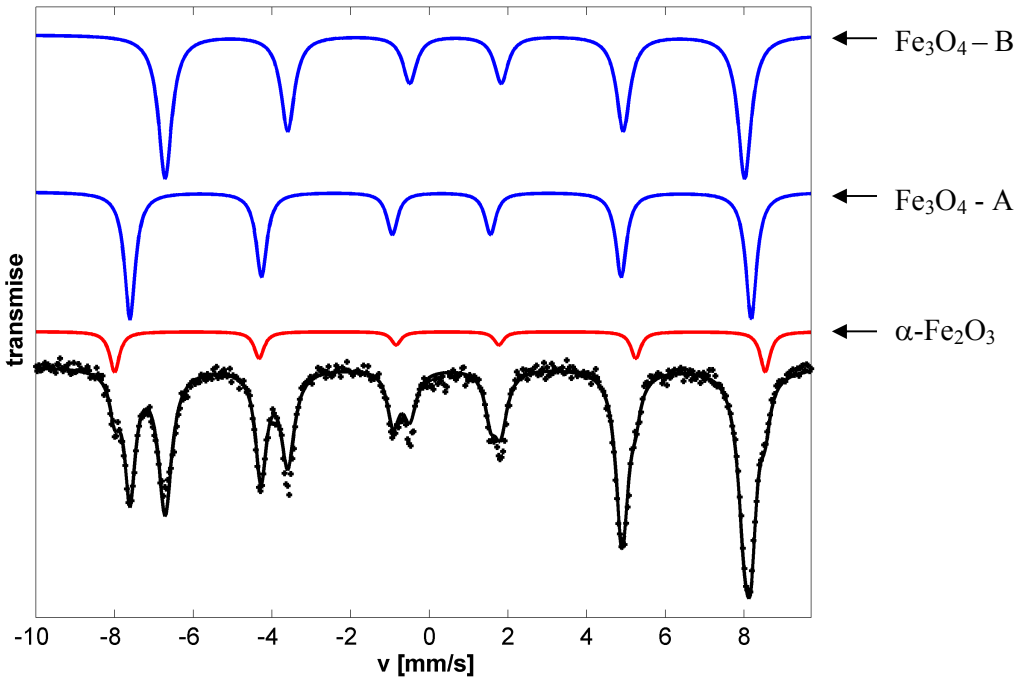
- **Úspěšnost separace U = 71,8%.**

8.10. Experiment SM9

Oproti minulému experimentu jsem učinil jen jednu změnu v nastavení. Zvýšil jsem opět rychlost přečerpávání suspenze. Tentokrát na dvojnásobek, tedy na **stupeň 6**. Z výsledků je patrné, že tento krok přispěl k zvýšení úspěšnosti separace. Z hlediska objemu odseparovaného vzorku došlo k úbytku. Tento experiment je celkově druhý nejúspěšnější. Pokud ho porovnáme jen s těmi, kde byl aplikován permanentní magnet, řadí se v úspěšnosti separace na první místo. (*spektrum vzorku viz. obr. 16*)

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 9,7%**

- **Úspěšnost separace U = 80,6%**



Obrázek 16 (spektrum vzorku SM9)

8.11. Experiment SM10

V tomto posledním experimentu byla rychlost přečerpávání suspenze nastavena na maximum. Spolu s tím byla navážka snížena na polovinu. Bohužel, jak se po experimentu ukázalo, odseparovaného materiálu bylo velmi málo. To může být příčina horšího výsledku oproti minulému experimentu. Je totiž možné, že během vyjmutí odseparovaného vzorku došlo k jeho nepatrnému znečištění hematitem. To mělo

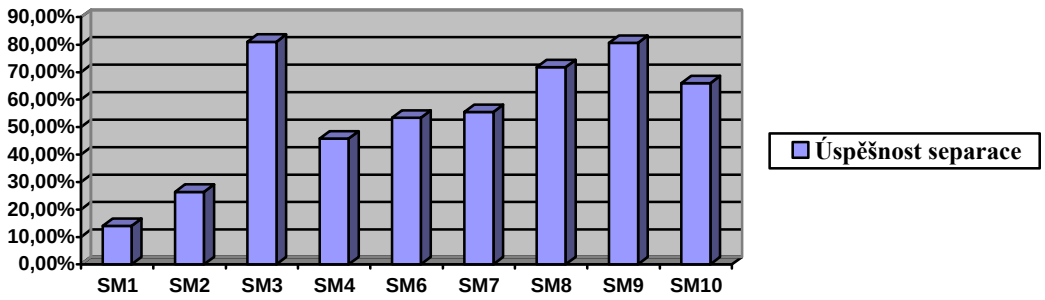
vzhledem k malému objemu odseparovaného materiálu značný vliv na výslednou úspěšnost separace.

• Vodní suspenze	-	0,25 g hematitu + 0,25 g magnetitu + 600 ml vody
• Permanentní magnet	-	B = 300 mT
• Doba trvání experimentu	-	t = 20 minut
• Rychlost přečerpávání	-	9
• Doba sonifikace	-	3 minuty
• Prostor pro separaci	-	s = 4 mm

- **Zastoupení hematitu v suspenzi K = 17,0%**

- **Úspěšnost separace U = 66,0%**

8.12. Tabulka výsledků



9. Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo provedení literární rešerše zabývající se obecně magnetickými separátory a poté konstrukce magnetického separátoru a jeho testování na vybraných magnetických materiálech.

Mnou postavený magnetický separátor byl použit na separaci magnetitových částic z vodní suspenze. Tato suspenze kromě částic magnetitu obsahovala i částice hematitu. Cílem prováděných experimentů bylo získat co nejčistší vzorek magnetitových částic. Jak je vidět z naměřených výsledků, oba dva použité typy magnetických prvků jsou pro tento typ separace vhodné. Permanentní magnet i elektromagnet dosáhly prakticky stejných výsledků, ovšem při různých nastaveních magnetického separátoru.

Dá se tedy říci, že jde o to přizpůsobit nastavení magnetického separátoru konkrétnímu magnetickému prvku. Věřím, že tento separátor může sloužit k separaci i jiných materiálů než těch použitých v rámci bakalářské práce. Jde opět pouze o přizpůsobení magnetického separátoru vlastnostem a parametrům částic v separační suspenzi.

Jak bylo dříve zmíněno, konstrukční řešení tohoto separátoru není složité. Dovolilo mi to však rozmanité možnosti modifikace a myslím, že naměřené výsledky mohu považovat za dobré.

Doufám, že jednou tato práce poslouží jako teoretický základ, či bude přínosem někomu, kdo se bude zabývat magnetickou separací jako já. Rovněž věřím, že magnetický separátor, použitý v mé práci, najde uplatnění v některém projektu či práci zabývající se magnetickými částicemi.

10. Seznam literárních zdrojů

[1] T. OKA, H. KANAYAMA, S. FUKUI, J. OGAWA. *Application of HTS bulk magnet system to the magnetic separation techniques for water purification.* (2008). Faculty of Engineering, Niigata University, China. ISSN: 0921-4534

[2] JIANFEI SUNA, RUI XUB, YU ZHANG, MING MA. *Magnetic nanoparticles separation based on nanostructures.* (2006). State key Laboratory of BioElectronics, School of Biological Science and Medical Engineering, SouthEast University, Nanjing 210096, China. ISSN: 0304-8853

[3] NICCOLE PAMME, JAN C.T. EIJKEL, ANDREAS MANY. *On-chip free-flow magnetophoresis: Separation and detection of mixtures of magnetic particles in continuous flow.* (2006). Department of Chemistry, Imperial College London, South Kensington, London SW7 2AY, UK. ISSN: 0304-8853

[4] SELOS Bohemia, s.r.o. (2009). [URL] http://magnety.selos.cz

[5] MIROSLAV MAŠLÁŇ; LIBOR MACHALA; JIŘÍ TUČEK. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky* (2005). Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého Olomouc. [URL] http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/jaderka.pdf

[6] JÁN SABO, *INTERAKCIA MAGNETICKÝCH POLÍ S TKANINAMI* [URL] http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch10.htm

[7] Sinomag, s.r.o. (2006) [URL] http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf

[8] [URL] http://cs.wikipedia.org/wiki/Neodymový_magnet

[9] RADEK ZBOŘIL, MIROSLAV MAŠLÁN, DIMITRIS PETRIDIS. *Iron(III) Oxides from Thermal Processess-Synthesis, Structural and Magnetic Properties, Mössbauer Spectroscopy Characterization, and Applications.* CHEM. MATER 14, 969-982 (2002).

[10] ROCHELLE M. CORNELL, UDO SCHWERTMANN. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses.* Wiley-VCH Oct 1 (2003). ISBN 3527302743