

# SUVREMENI MAGNETSKI MATERIJALI

---

Jozić, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:756666>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**SUVREMENI MAGNETSKI MATERIJALI**

**Završni rad**

**Matej Jozić**

**Osijek, 2022.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac ZIP - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 19.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Matej Jozić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4764, 23.09.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	72246087126
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Dr.sc. Venco Ćorluka
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Suvremeni magnetski materijali
<b>Znanstvena grana rada:</b>	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
<b>Zadatak završnog rad:</b>	
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	19.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 21.09.2022.

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Matej Jozić
<b>Studij:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4764, 23.09.2019.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Suvremeni magnetski materijali**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dr.sc. Venco Ćorluka

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME RADA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. MAGNETIZAM</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1. Osnovne značajke magnetizma</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2. Dijamagnetizam</b> .....	<b>5</b>
<b>3.3. Paramagnetizam</b> .....	<b>7</b>
<b>3.4. Feromagnetizam</b> .....	<b>8</b>
<b>3.5. Ferimagnetizam</b> .....	<b>9</b>
<b>3.6. Antiferomagnetizam</b> .....	<b>10</b>
<b>3.7. Vrste magnetskih materijala</b> .....	<b>12</b>
3.7.1. Dijamagnetski materijali.....	12
3.7.2. Paramagnetski materijali .....	13
3.7.3. Feromagnetski materijali .....	14
3.7.4. Meki feromagnetski materijali.....	17
3.7.5. Tvrdi feromagnetski materijali .....	17
3.7.6. Feriti .....	18
3.7.7. Meki feriti .....	19
3.7.8. Tvrdi feriti .....	19
<b>4. SUVREMENI MAGNETSKI MATERIJALI</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1. Magnetski materijali na bazi Nd-Fe-B</b> .....	<b>20</b>
<b>4.2. Magnetski materijali na bazi Sm-Co</b> .....	<b>22</b>
<b>4.3. Magnetski materijali na bazi Sm-Fe-N</b> .....	<b>23</b>
<b>4.4. Lutecij feriti</b> .....	<b>25</b>
<b>4.5. Kobalt feriti</b> .....	<b>26</b>
<b>4.6. Željezov oksid</b> .....	<b>27</b>
<b>4.7. Heksaferiti tipa M</b> .....	<b>29</b>

<b>5. PRIMJENA SUVREMENIH MAGNETSKIH MATERIJALA .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1. Magnetski separatori .....</b>	<b>31</b>
5.1.1. Magnetski bullet separator.....	31
5.1.2. Magnetski valjkasti separator .....	32
5.1.3. Magnetske cijevi.....	33
5.1.4. Magnetski rešetkasti separatori.....	34
<b>5.2. Neodimijski magneti u generatorima vjetroelektrana.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3. Motor s pokretnom zavojnicom.....</b>	<b>36</b>
<b>5.4. Linearni aktuator s pomičnim magnetom .....</b>	<b>38</b>
<b>5.5. Magneti u automobilskoj industriji.....</b>	<b>39</b>
<b>5.6. Magnetski senzori .....</b>	<b>40</b>
<b>5.7. Magnetski enkoder.....</b>	<b>42</b>
<b>5.8. Suvremeni magnetski materijali u robotici .....</b>	<b>44</b>
<b>5.9. Magnetski ionizatori .....</b>	<b>45</b>
<b>5.10. Suvremeni magnetski materijali i svemirska istraživanja .....</b>	<b>46</b>
<b>5.11. Pravci razvoja Nd-Fe-B magneta .....</b>	<b>47</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>48</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>49</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>52</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>52</b>

# **1. UVOD**

Sve vrste materijala i tvari posjeduju neku vrstu magnetskih svojstava, samo što su ona kod nekih slabija izražena, a kod nekih jače. Magneti se u današnje vrijeme koriste posvuda od ukrasnih magneta za hladnjak, pa sve do najsuvremenijih tehnologija u svemirskim istraživanjima, robotici i automobilskoj industriji. Razvojem industrije i automobila počeli su se primjenjivati magnetski materijali na bazi rijetkih zemnih elemenata, tj. suvremeni magnetski materijali, koji imaju bolja magnetskim svojstva, veću otpornost na koroziju i bolje temperaturne karakteristike. Završni rad sastoji se od 6 glavnih poglavlja. Poslije uvoda u temu završnog rada, u drugom poglavlju objašnjene su osnove magnetizma, tj. povijest magnetizma, osnovne značajke magnetizma, vrste magnetizma i podjela magnetskih materijala. U trećem poglavlju prikazana je struktura i razvoj trenutno najzastupljeniji suvremeni magnetski materijali, u četvrtom poglavlju prikazane su različite primjene suvremenih magnetskih materijala. U petom poglavlju, tj. zaključku opisan je kratak osvrt na završni rad i u šestom poglavlju nalazi se korištena literatura.

## **1.1. Zadatak završnog rada**

U ovome završnom potrebno je prikazati povijesni razvoj magnetizma, vrste magnetizma i podjela magnetskih materijala, istaknuti trenutno najzastupljenije suvremene magnetske materijale, te prikazati njihovu strukturu, razvoj i primjenu.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME RADA

U literaturi [1] opisano je otkriće magnetizma kroz povijest, od samih početaka pojave kompasa krajem 11. stoljeća, pa sve do početka 19. stoljeća kada je otkriven pravi izvor magnetizma zahvaljujući otkrićima u elektrostatici. U knjizi [2] definirani su osnovni izrazi i značajke magnetizma kao što su magnetski tok, magnetsko polje, permeabilnost, susceptibilnost, te relativna permeabilnost za različite vrste magnetskih materijala. U literaturi [3] prikazano je grafičko određivanje  $(BH)_{\max}$  koji predstavlja gustoću magnetske energije. Kroz literaturu [4] autor navodi osnove vrste magnetskih materijala. Meissnerov efekt prikazan je i objašnjen u literaturi [5]. Jednu od glavnih podjela magnetizma autori objašnjavaju u literaturama [6] i [7], dok je u literaturi [8] prikazana tablica feromagnetskih materijala.

Ž. A. Spasojević i Z. V. Popović u knjizi [9] objašnjavaju osnovnu podjelu i karakteristike magnetskih materijala kroz teoretske i grafičke primjere. Autori u literaturi [10] prikazuju strukturu, svojstva, razvoj suvremenih magnetskih materijala.

U literaturama [11], [12], [13] prikazana je sama primjena suvremenih magnetskih materijala na primjeru magnetskih separatora koji imaju funkciju odvajanja otpada iz mješavine različitih materijala. Primjena suvremenih magnetskih materijala koji se koriste u raznim motorima, aktuatorima i električnim automobilima objašnjeni su u literaturama [14], [15], [16], [17] i [18].

Magnetski senzori koji se aktiviraju pomoću magnetskog polja i koji se koriste za mjerenje i izračunavanje brzine, položaja, smjera, kuta rotacije objašnjeni su u literaturi [19], primjeri magnetskih senzora prikazani su u literaturi [20]. Magnetski senzori položaja rade na principu Hallovo elementa koji je prikazan u literaturi [21]. Autori u literaturi [22] objašnjavaju primjenu i prikaz magnetskih senzora na primjeru magnetskog enkodera koji pruža informacije o rotacijskom položaju, a sastoje se od trajnog magneta i magnetskog senzora.

U literaturama [23], [24], [25] prikazana je primjena suvremenih magnetskih materijala u robotici, magnetskim ionizatorima te u svemirskim istraživanjima, autori u literaturi [26] objašnjavaju razvoj Nd-Fe-B magneta koji je usmjeren prema stvaranju praha idealnog za 3D ispis trajnih magneta.



### 3. MAGNETIZAM

Prve spoznaje o magnetizmu primijetili su Grci kada su pronašli crni mineral, koji privlači željezo, u blizini grada Magnesia i nazvali ga magnetit. Grčki filozof Sokrat primijetio je da se na željezo prenosi svojstvo magnetskog privlačenja. Neki znanstvenici i fizičari otkrili su da se komadić magnetita obješen o nit uvijek postavlja u isti smjer. Bila je to početna verzija kompasa, a prvi zapis o kompasu datira iz Kine, krajem 11. stoljeća, od britanskog redovnika Alexandera Neckama koji u svom djelu „De utensilibus“ objašnjava kako na brodovima postoji magnet sa željeznom iglom koji uvijek pokazuje smjer Sjevera. Nova otkrića detaljno zabilježena potječu od Petrusa Peregrinusa koji je u svom pismu „Epistola de Magnete“, objavljeno 8. kolovoza 1269. otkriva da na Zemlji postoje polovi koji privlače željeznu iglu. Otkrio je da se magnetit ne može rastaviti, te ako ga razdvojimo dobit ćemo samo dva manja magnetita. Britanski liječnik William Gilbert je 1600. godine objavio knjigu „De Magnete“ u kojoj je izveo sve poznate eksperimente sa magnetitom, također u knjizi navodi da je Zemlja jedan veliki magnet i da je to uzrok zašto se kazaljka na kompasu zakreće [1]. Do velikog napretka u području magnetizma dolazi početkom 19. stoljeća zahvaljujući otkrićima u elektrostatici. U travnju 1820. godine danski fizičar Hans Christian Ørsted otkrio je da struja stvara magnetski učinak. Ako se kompas postavi u blizini žice kroz koju teče struja kompas će se zakrenuti. André-Marie Ampère izveo je Amperov zakon kako struja stvara magnetsko polje, pokazuje da se dvije žice u kojima teče struja, međusobno privlače ili odbijaju ovisno o smjeru struje. Sredinom 19. stoljeća britanski fizičar Michael Faraday pretpostavio je ako struja može proizvesti magnetsko polje onda i magnetsko polje može proizvesti struju, također je dizajnirao prvi generator i prvi motor. Objašnjene svih pojava o magnetizmu i magnetizmu tvari nije bilo moguće sve do razvoja kvante fizike, a tu su presudne uloge dali Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli i tek 1930-ih godina je na temelju kvantnih spoznaja otkrivena priroda i izvor magnetizma.

### 3.1. Osnovne značajke magnetizma

Magnetizam je pojava kojim materijali postižu privlačnu ili odbojnu silu na druge materijale. Magnetske sile su temeljne sile koje nastaju zbog gibanja nabijenih čestica. Nastanak i ponašanje ovih sila opisuju Maxwellove jednadžbe, a prostor u kojem djeluju magnetske sile zovemo magnetsko polje. Magnetsko polje možemo opisati jednadžbom: [2]

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ [T]} \quad (3-1)$$

gdje B predstavlja magnetsku indukciju ili gustoću magnetskih silnica, silnice su zamišljene linije pomoću kojih se opisuje magnetsko polje, H je jakost magnetskog polja, a  $\mu_0$  je konstanta, tj. permeabilnost vakuuma i iznosi  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [Tm/A]. Broj silnica koje prolaze kroz površinu S zovemo magnetski tok  $\Phi_m$  i može se objasniti jednadžbom: [2]

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos\alpha \text{ [Wb]} \quad (3-2)$$

gdje je  $\alpha$  kut između magnetske indukcije i normalne na površinu S. Veličina kojom opisujemo osobine magnetskih materijala je permeabilnost  $\mu$  koja je jednaka: [2]

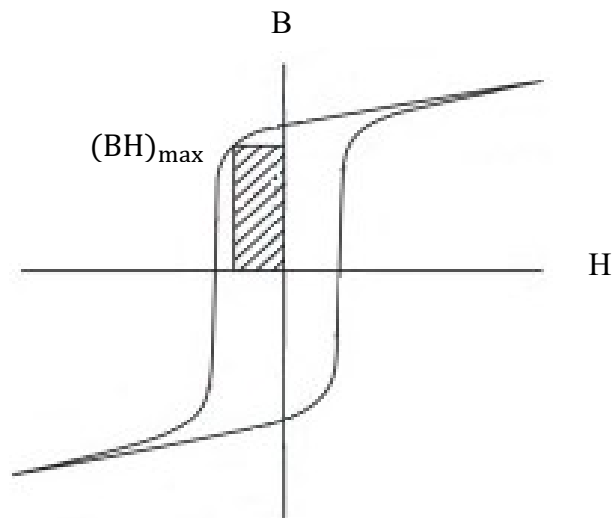
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (3-3)$$

$\mu_r$  je relativna permeabilnost vakuuma koja je različita za svaki magnetski materijal. Za dijamagnetske materijale je  $\mu_r < 1$ , kod paramagnetskih materijala  $\mu_r > 1$ , a za feromagnetske materijale  $\mu_r \gg 1$  i za vakuum  $\mu_r = 1$ . Magnetsko polje može se opisati pomoću magnetske susceptibilnosti koja predstavlja koliko se  $\mu_r$  razlikuje od 1. [2]

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (3-4)$$

Magnetizam proizlazi iz dvije vrste gibanja elektrona u atomima, jedno je gibanje elektrona oko jezgre, slično gibanju planeta u Sunčevom sustavu oko Sunca, a drugo je gibanje elektrona oko svoje osi, analogno rotaciji Zemlje oko vlastite osi. Orbitalno i spinsko gibanje neovisno daju magnetski moment svakom elektronu i tako se svaki elektron ponaša kao mali magnet. Neki od ostalih značajnih magnetskih svojstava su magnetska anizotropija. Feromagnetski materijali sadrže domene i svaka domena se spontano magnetizira do zasićenja, ali smjer magnetizacije varira od domene do domene.

Neto vektorski zbroj svih domena proizvodi ukupnu magnetizaciju, ovisnost magnetizma o smjeru magnetizacije zovemo magnetska anizotropija  $H_a$  [A/m]. Koercitivnost  $H_c$  [A/m] predstavlja sposobnost feromagnetskog materijala da izdrži djelovanje vanjskog magnetskog polja, a da se pritom ne demagnetizira. Maksimalni energetske produkt  $(BH)_{max}$  predstavlja gustoću magnetske energije. To je umnožak magnetske indukcije  $B$  i jakosti magnetskog polja  $H$  u bilo kojoj točki na krivulji demagnetizacije trajnog magneta,  $(BH)_{max}$  može se i grafički prikazati kao površina najvećeg pravokutnika koji se može nacrtati u drugom kvadrantu petlje histereze (Slika 3.1.).

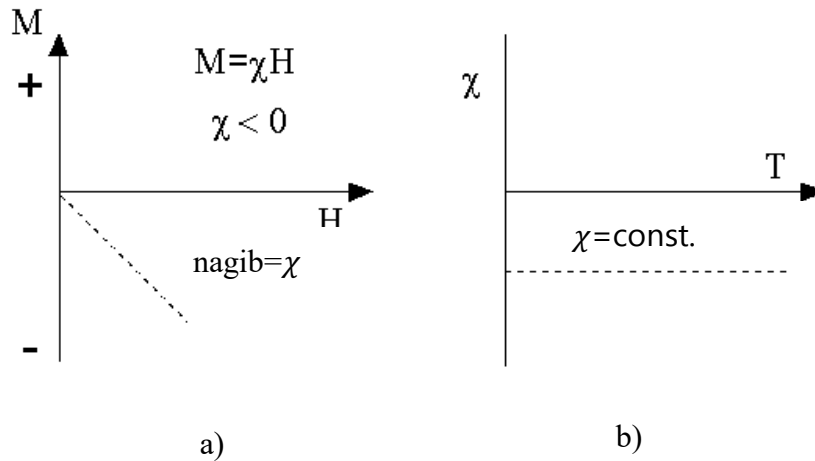


**Slika 3.1.** Grafički prikaz određivanja  $(BH)_{max}$  [3]

### 3.2. Dijamagnetizam

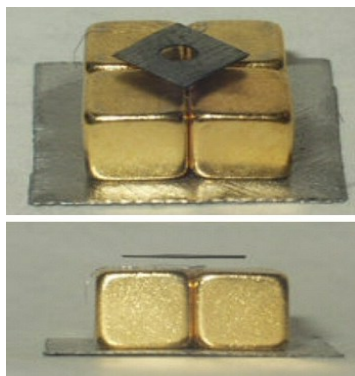
Dijamagnetizam je otkrio Michael Faraday 1845. godine, to je najslabiji oblik magnetizma koji se pojavljuje uz prisutnost vanjskog magnetskog polja. Vanjsko magnetsko polje ima utjecaj na elektrone koji kruže oko jezgre i tako stvaraju struju. Struja stvara magnetsko polje koje je prema Lenzovom zakonu suprotnog smjera od vanjskog magnetskog polja. Orbitalno gibanje elektrona se zbog vanjskog magnetskog polja mijenja. Magnetski moment je mali i suprotnog smjera od vanjskog magnetskog polja. Dijamagnetske tvari sastoje se od atoma koji nemaju magnetske momente, tj. sve su orbitalne ljuske popunjene i nema nesparenih elektrona. Međutim, kada se primjeni vanjsko magnetsko polje, stvara se negativna magnetizacija i zbog toga je susceptibilnost negativna.

Dijamagnetizam se nalazi u svim materijalima, međutim, iako je tako slab može se primijetiti samo u materijalima koji ne pokazuju druge oblike magnetizma, kao što su bakar, zlato, silicij, sumpor, helij, itd. Za dijamagnetske materijale vrijednost magnetske susceptibilnosti je uvijek negativna i ne ovisi o promjeni temperature (Slika 3.2.).



**Slika 3.2.** Grafički prikaz ovisnosti magnetizacije o jakosti magnetskog polja (a), te ovisnost susceptibilnosti o temperaturi (b) [4]

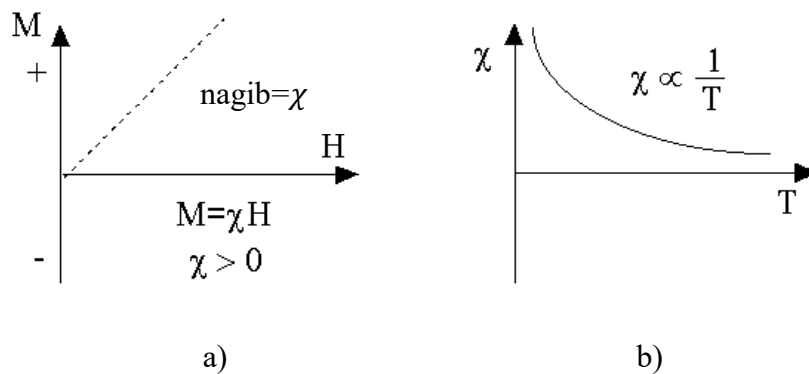
Iznimka kod dijamagnetizma je kada materijal postane supravodljiv. kada su supravodiči izloženi vanjskom magnetskom polju, tada su oni idealni dijamagneti. Supravodljivi magneti su najvažniji elementi sustava magnetske rezonancije i jedan od najvažnijih primjena dijamagnetizma. Pirolitički grafit je dijamagnetski materijal koji može stabilno plutati na magnetskom polju. Ako vodič ima otpor nula i ako mu prinesemo izvor magnetskog polja u njemu će se inducirati vrtložna struja koja će proizvesti polje iste jakosti, ali suprotnog polariteta. Ta se pojava naziva Meissnerov efekt (Slika 3.3.) [5].



**Slika 3.3.** Prikaz pirolitičkog grafita u magnetskom polju neodimijskog magneta [5]

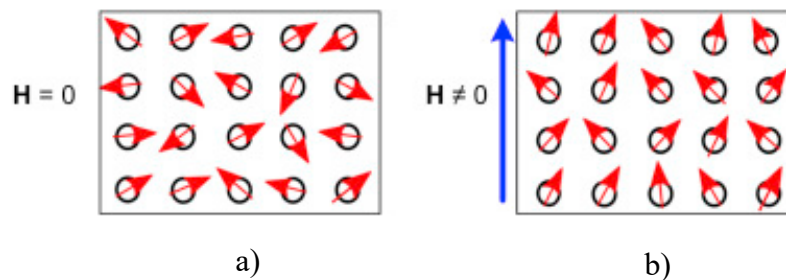
### 3.3. Paramagnetizam

Paramagnetizam pokazuju spojevi koji sadrže željezo, platinu i rijetki zemni elementi. U takvim spojevima atomi elemenata imaju elektronske ljuske koje su nepotpune, zbog čega njihovi nespareni elektroni kruže oko jezgre i tako čine atome trajnim magnetom koji se teže mogu uskladiti i time ojačati primijenjeno magnetsko polje. Ako se kod paramagnetskih materijala magnetizacija povećava, onda se primijenjeno magnetsko polje povećava, a ako se povećava temperatura onda se magnetizacija smanjuje (Slika 3.4.).



**Slika 3.4.** Grafički prikaz ovisnosti magnetizacije o jakosti magnetskog polja (a), te ovisnost susceptibilnosti o temperaturi (b) [4]

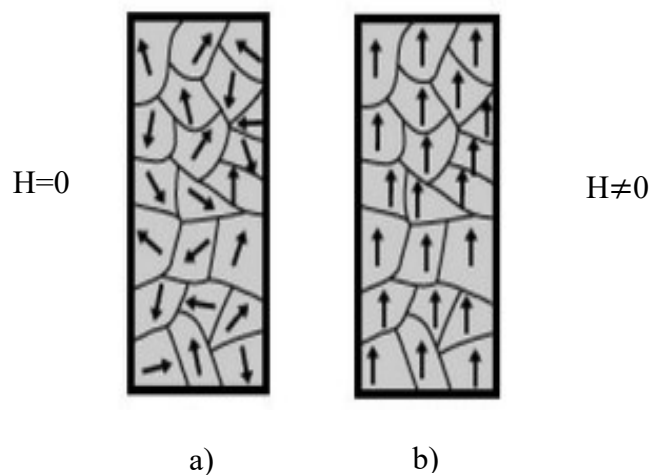
Susceptibilnost za paramagnetske materijale je uvijek pozitivna i na sobnoj temperaturi iznosi od  $10^{-5}$  do  $10^{-4}$ . Atomi i molekule imaju neto orbitalne ili spin magnetske momente koji se mogu poravnati u smjeru primijenjenog magnetskog polja (Slika 3.5.).



**Slika 3.5.** Orijentacija domena: a) bez magnetskog polja, b) pod djelovanjem magnetskog polja [6]

### 3.4. Feromagnetizam

Feromagnetizam dolazi od izraza "ferrous", što znači željezo. Feromagnetizam je temeljni način na koji spojevi tvore trajne magnete ili ih privlače magnetska polja. Svi feromagnetski materijali imaju maksimalnu temperaturu na kojoj se javljaju feromagnetska svojstva, Curieva temperatura. Kada je temperatura feromagnetskog materijala viša od Curieva temperature, materijal se počinje ponašati kao paramagnet [7]. Materijali koji posjeduju dobra feromagnetska svojstva su željezo, kobalt i nikal. Feromagnetni se sastoje od velikog broja domena i skupina atoma. U nekim domenama, magnetski momenti se mogu sinkronizirati, ali magnetske orijentacije različitih domena ostaju nasumično raspoređene. Kada se vanjsko magnetsko polje primjeni na feromagnetski materijal, magnetske domene su u smjeru magnetskog polja, ako maknemo primijenjeni magnet, magnetske domene se vraćaju u prvobitne položaje i magnetizam nestaje (Slika 3.6.).



**Slika 3.6.** Orijentacija domena: a) bez magnetskog polja, b) pod djelovanjem magnetskog polja

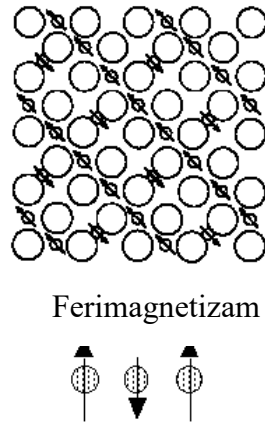
U tablici 3.1. prikazani su feromagnetski materijali, kao što su željezo, kobalt, nikal, disprozij i ostale magnetske legure, te njihove Curieve temperature iznad koje prestaju gubiti feromagnetska svojstva.

**Tablica 3.1.** *Popis feromagnetskih materijala i njihove Curieve temperature [8]*

Materijal	Curieva temperatura [K]
Fe	1043
Co	1400
Ni	627
Dy	88
Gd	292
MnBi	630
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	948
CrO <sub>2</sub>	386
EuO	69

### 3.5. Ferimagnetizam

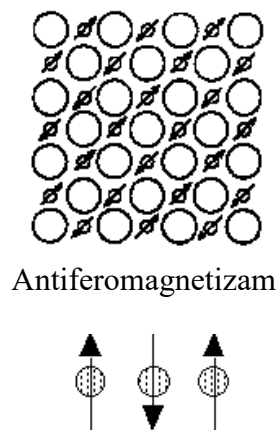
Ferimagnetizma se javlja u materijalima u kojima su prisutne dvije različite vrste magnetskih iona. Ferimagnetizam je vrsta trajnog magnetizma koji se javlja u čvrstim tijelima u kojima se magnetska polja povezana s atomima poravnavaju. Mogu biti paralelna, tj. u istom smjeru (kao u feromagnetizmu) ili antiparalelna, tj. spojena u suprotnim smjerovima (kao u antiferomagnetizmu). Antiparalelni momenti se međusobno ne poništavaju, a magnetizacija se javlja u odsutnosti H ispod karakteristične temperature koja se naziva Néelova temperatura  $T_N$  [4]. Ferimagnetizam se uglavnom javlja u magnetskim oksidima odnosno feritima. Mnogi feriti pokazuju ferimagnetska svojstva, a posebno magnetit. Iznad Néelove temperature materijali poprimaju feromagnetska svojstva. Ovi materijali su također dobri električni izolatori, a to se može zaključiti tako što su električni gubici manji nego kod feromagnetskih materijala.



Slika 3.7. Momenti podrešetke u slučaju ferimagnetizma [4]

### 3.6. Antiferomagnetizam

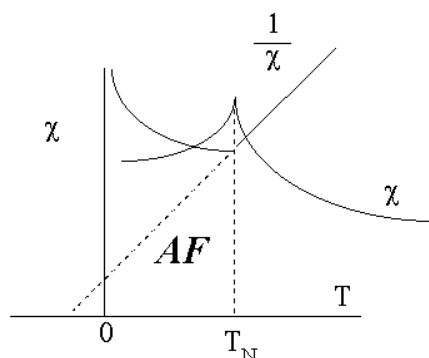
Antiferomagnetizam je vrsta magnetizma u kojem se ioni spontano poravnavaju na niskim temperaturama u suprotne ili antiparalelne rasporede, tako da ne pokazuje vanjski magnetizam. U antiferomagnetskim materijalima, magnetizam atoma poništava se skupom magnetskih atoma koji su u ravni, ali suprotnog smjera. Ako su momenti podrešetke jednaki po iznosu, ali suprotnog smjera, neto moment je nula, a takva vrsta magnetskog uređenja se naziva antiferomagnetizam.



Slika 3.8. Momenti podrešetke u slučaju antiferomagnetizma [4]



Antiparalelno spajanje atomskih magneta prekida se zagrijavanjem i potpuno nestaje iznad određene temperature, koja se naziva Néelova temperatura, karakteristična je za svaki antiferomagnetski materijal (Slika 3.9.).



**Slika 3.9.** Grafički prikaz ovisnosti Néelove temperature i susceptibilnosti [4]

Néelova temperatura je dobila ime po Louisu Néelu, francuskom fizičaru, koji je 1936. dao jedno od prvih objašnjenja antiferomagnetizma. Neki antiferomagnetski materijali imaju Néelove temperature na sobnoj temperaturi ili čak nekoliko stotina stupnjeva iznad, ali obično su te temperature niže. U tablici 3.2. prikazane su neke antiferomagnetske tvari i njihove Néelove temperature iznad koje počinju gubiti antiferomagnetska svojstva.

**Tablica 3.2.** Vrijednosti Néelove temperature za antiferomagnetske tvari [9]

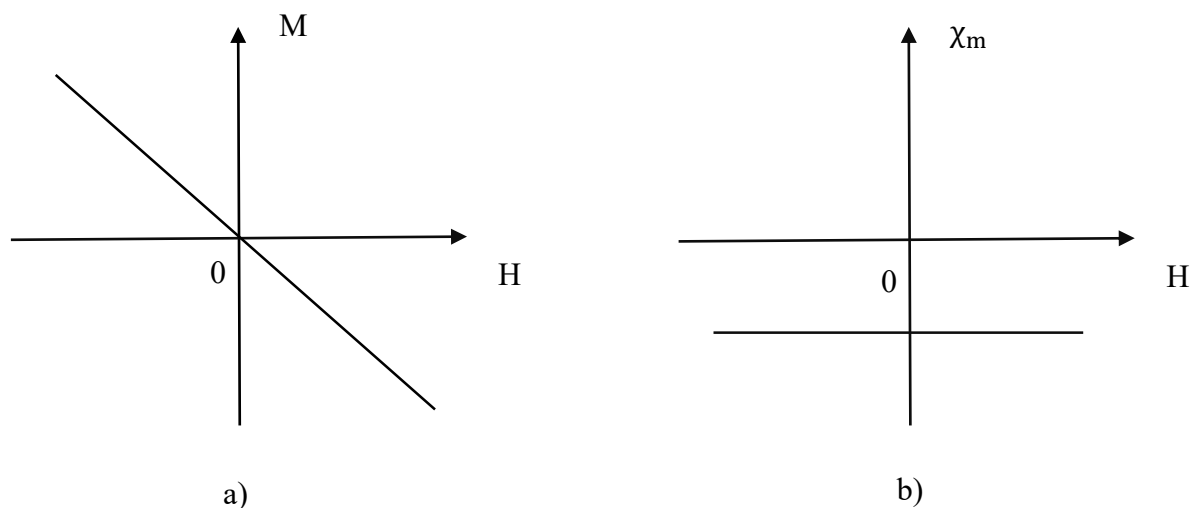
Antiferomagnetske tvari	Néelova temperatura [K]
Cr	311
MnF <sub>2</sub>	72
NiF <sub>2</sub>	73
MnO <sub>2</sub>	84
FeO	198
MnS	165

### 3.7. Vrste magnetskih materijala

Sve vrste materijala i tvari posjeduju neku vrstu magnetskih svojstava. No obično se izraz magnetski materijali koristi samo za feromagnetske materijale međutim, materijali se mogu klasificirati u nekoliko kategorija na temelju magnetskih svojstava koje oni pokazuju.

#### 3.7.1. Dijamagnetski materijali

Magnetski moment atoma i molekula kod dijamagnetskih materijala, bez prisutnosti vanjskog magnetskog polja je jednak nuli. Međutim kada se primjeni vanjsko magnetsko polje u atomima i molekulama dijamagnetskih materijala inducira se magnetski moment i materijal se počinje magnetizirati. Inducirani magnetski moment naziva se dijamagnetski učinak. Dijamagnetski učinak prisutan je kod paramagnetskih materijala, feromagnetskih materijala, itd. kada su pod utjecajem vanjskog magnetskog polja. Kod materijala u kojima su magnetski momenti atoma i molekula jednaki nuli, bez prisutnosti vanjskog magnetskog polja, tada dijamagnetski učinak najviše dolazi do izražaja. Dijamagnetski materijali magnetizirat će se uvijek suprotno vanjskom magnetsko polju i magnetska susceptibilnost je uvijek negativna [9]. Na slici 3.10. grafički je prikazano ovisnost magnetizacije  $M$  o jakosti magnetskog polja  $H$  i ovisnost magnetske susceptibilnosti  $\chi_m$  dijamagnetskih materijala o jakosti magnetskog polja  $H$ .



**Slika 3.10.** *Ovisnost magnetizacije i jakosti magnetskog polja kod dijamagnetskih materijala (a) i ovisnost magnetske susceptibilnosti o jakosti magnetskog polja (b) [9]*

U tablici 3.3. prikazani su dijamagnetski materijali i njihove magnetske susceptibilnosti, eksperimentalno dobivene.

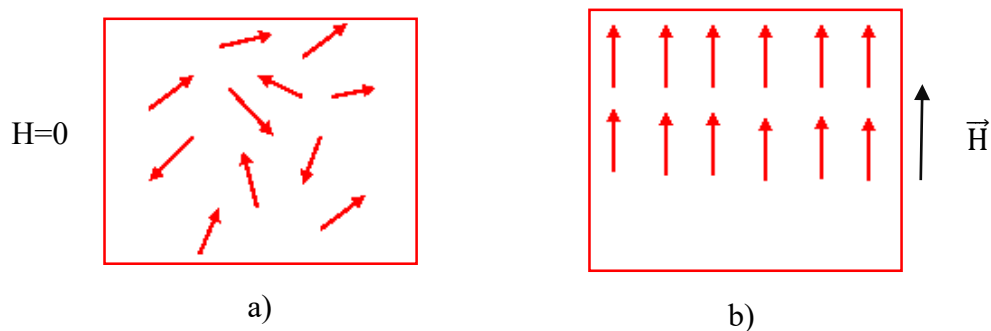
**Tablica 3.3.** *Magnetske susceptibilnosti dijamagnetskih materijala* [9]

Materijal	$\chi_m = \mu_r - 1$
Bi	$17 \cdot 10^{-5}$
Ag	$-2.1 \cdot 10^{-5}$
Cu	$-0.9 \cdot 10^{-5}$
Au	$-3.6 \cdot 10^{-5}$
Ge	$-0.8 \cdot 10^{-5}$
Si	$-0.3 \cdot 10^{-5}$
Se	$-1.7 \cdot 10^{-5}$
Grafit	$-1.2 \cdot 10^{-5}$
Dijamant	$-2.1 \cdot 10^{-5}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$-0.5 \cdot 10^{-5}$

Iz tablice 3.3. možemo vidjeti da je relativna magnetska permeabilnost dijamagnetskih materijala manja od jedan i magnetska susceptibilnost dijamagnetskih materijala ne ovisi o temperaturi.

### 3.7.2. Paramagnetski materijali

Kod paramagnetskih materijala, magnetski momenti atoma i molekula su različiti od nule kada nema vanjskog magnetskog polja. Zbog gibanja atoma i molekula njihovi momenti orijentirani su kao na slici 3.11. pa je vektorski zbroj momenta svakog atoma jednak nuli i materijal je nenamagnetiziran.

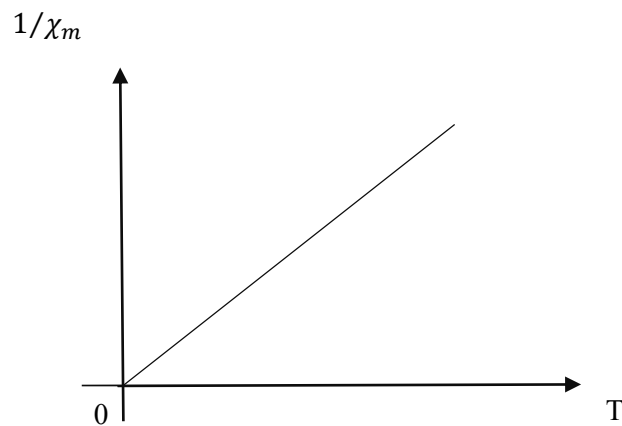


**Slika 3.11.** *Orijentacija magnetskih momenata : a) bez prisutnosti vanjskog magnetskog polja i b) u vanjskom magnetskom polju*

Kada se paramagnetski materijal nalazi u vanjskom magnetskom polju magnetski momenti će biti orijentirani u smjeru polja i materijal će se namagnetizirati. Utjecaj temperature na magnetizirani paramagnetski materijal očituje se smanjenjem susceptibilnosti pri porastu temperature, a magnetska susceptibilnost i temperatura povezane su Curievim zakonom: [9]

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (3-5)$$

gdje je C Curieva konstanta koja ovisi o vrsti paramagnetskog materijala, a T je apsolutna temperatura. Za paramagnetske materijale ovisnost prema (3-5) prikazana je na slici 3.12.

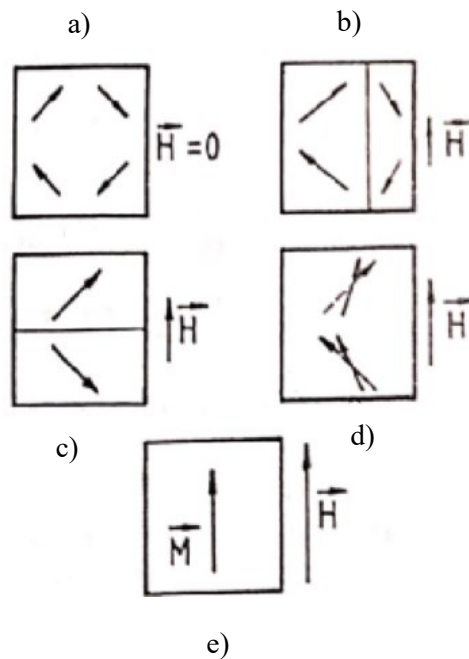


**Slika 3.12.** *Grafički prikaz ovisnosti recipročne vrijednosti magnetske susceptibilnosti paramagnetskih materijala o temperaturi [9]*

### 3.7.3. Feromagnetski materijali

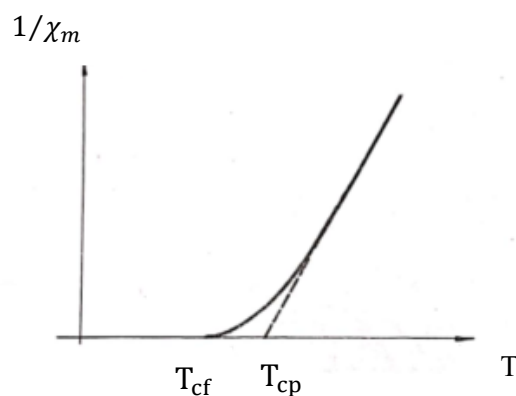
Feromagnetski materijali su: željezo, nikal, kobalt, disprozij, gadolinij, i njihove legure. Najistaknutija feromagnetska svojstva imaju željezo, kobalt i nikal i njih nazivamo osnovni feromagnetski materijali. Feromagnetska svojstva sadrži legura mangana, bakra i aluminiya te legura mangana, srebra, i aluminiya iako te elemente ne ubrajamo u feromagnetske materijale. Svakom feromagnetskom materijalu odgovara karakteristična temperatura, Curieva temperatura  $T_{cf}$ . Iznad i ispod te temperature magnetska svojstva pojedinih feromagnetskih materijala se razlikuju.

Znanstvenik Pierre Weiss je 1907. godine pretpostavio da se pri  $T < T_{cf}$  svaki feromagnetski materijal sastoji od domena, veličine od 10 do 100  $\mu\text{m}$ , a broj atoma u jednoj domeni može iznositi  $10^{15}$ . Ako se pri  $T < T_{cf}$  feromagnetski materijal ne ponaša kao trajni magnet i ako pretpostavimo da je jakost vanjskog magnetskog polja u prostoru u kojem se nalazi feromagnetski materijal jednak nuli. Magnetizacija svake domene u feromagnetskom materijalu je različita od nule, a suma svih magnetskih momenata bit će jednaka nuli, to stanje prikazano je na slici 3.13. pod a) [9].



**Slika 3.13.** Shematski prikaz magnetiziranja feromagnetskog materijala pri  $T < T_{cf}$  [9]

Drugi uvjet je  $T > T_{cf}$ , tada feromagnetski materijali imaju karakteristike paramagnetskih materijala i ovisnost magnetske susceptibilnosti i temperature nije linearna, kao kod  $T < T_{cf}$  uvjeta, nego postaje tek linearna iznad Curieve feromagnetske temperature koja se zove Curieva paramagnetske temperatura (Slika 3.14.).



**Slika 3.14.** Ovisnost recipročne vrijednosti magnetske susceptibilnosti i temperature kod feromagnetskih materijala [9]

Na slici 3.14. možemo vidjeti da je Curieva paramagnetska temperatura uvijek veća od Curieva feromagnetske temperature što se može vidjeti u tablici 3.4. u kojoj su te temperature prikazane.

**Tablica 3.4.** Curieva feromagnetska i paramagnetska temperatura osnovnih feromagnetskih materijala [9]

Materijal	$T_{cf}$ [K]	$T_{cp}$ [K]
Fe	1043	1093
Co	1393	1428
Ni	631	650

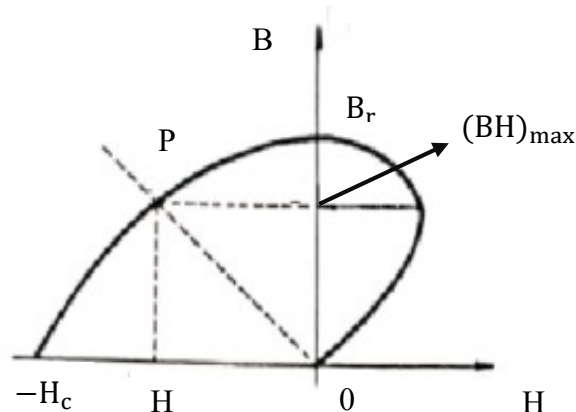
Na osnovu tablice 3.4. može se primijetiti da je Curieva temperatura feromagnetskih materijala visoka, zato se u praksi koriste feromagnetske legure čije su Curieve temperature veće od radnih temperatura naprava, napravljenih od tih legura.

### 3.7.4. Meki feromagnetski materijali

Meki feromagnetski materijali imaju karakteristike kao što su visoka permeabilnost, malo koercitivno polje, lako se magnetiziraju i demagnetiziraju te male gubitke uslijed histereze. Osobine feromagnetskih materijala ovise o kemijskom sastavu, sadržaju nečistoća, mehaničkim i termičkim obradama. U meke feromagnetske materijale ubrajamo: čisto željezo, meki čelik, legure željeza i kobalta, legure željeza kobalta i nikla, legure željeza silicija i aluminijska, itd. Svojstvo lakog magnetiziranja i demagnetiziranja čini ih pogodnim za primjene gdje postoje promjene magnetskog toka, kao što su elektromagneti, motori, generatori, transformatori, telefoni, releji itd.

### 3.7.5. Tvrdi feromagnetski materijali

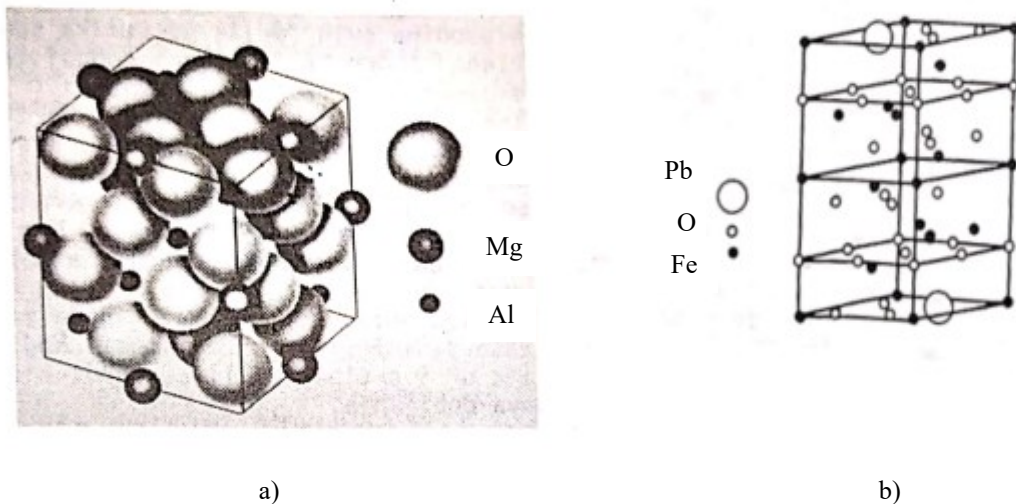
Tvrđi feromagnetski materijali koriste se za izradu trajnih magneta. Važne karakteristike tvrdih feromagnetskih materijala su maksimalni produkt, remanentna indukcija i koercitivno polje. Važnost remanentne indukcije i koercitivnog polja možemo vidjeti u sljedećim tvrdnjama. Ako bi materijal sa velikim  $(BH)_{\max}$  imao malu remanentnu indukciju onda će magnetska indukcija u radnoj točki magneta biti mala, dok će jakost magnetskog polja biti velika (Slika 3.15.) [9]. Mala vrijednost magnetske indukcije i velika jakost magnetskog polja zahtijevaju da magnet bude velikog poprečnog presjeka i male duljine. Ukoliko tvrdi feromagnetski materijal sa velikim  $(BH)_{\max}$  ima malo koercitivno polje onda je u radnoj točki magneta indukcija mala, a polje veliko, pa će magnet biti malog poprečnog presjeka i veće duljine. Kod ova dva primjera magneta sa istim  $(BH)_{\max}$  bolji je onaj koji ima veće koercitivno polje, a manju remanentnu indukciju, zato što su magneti napravljeni od materijala sa velikim koercitivnim poljem stabilniji. U tvrde feromagnetske materijale ubrajamo: legure željeza aluminijska i nikla, legure željeza aluminijska nikla i kobalta, legure bakra nikla i kobalta, legure bakra nikla i željeza, itd.



Slika 3.15. Određivanje radne točke trajnih magnet [9]

### 3.7.6. Feriti

Feriti su slični feromagnetskim materijalima prema obliku petlje histereze i dijele se na meke i tvrde. Najvažniji meki feriti su: mangan-cink feriti, nikal-cink feriti, litij-cink feriti i magnezij feriti, a najvažniji tvrdi feriti su: barij feriti, kobalt feriti, olovo feriti i stroncij feriti. Meki feriti imaju strukturu sličnu spinelu (Slika 3.16. a). Spinel je mineral koji ima sastav  $MgAl_2O_3$  i može se pronaći u prirodi [9]. Tvrđi feriti imaju heksagonalnu kristalnu rešetku sličnu magnetoplumbitu (Slika 3.16. b), mineral na bazi željeza i olova, čija je formula  $PbFe_{10}O_{19}$ . Zajedničko svojstvo svih ferita je veliki specifični električni otpor. Pri sobnoj temperaturi specifični električni otpor ferita je milijun puta veći od specifičnog električnog otpora željeza ili drugih feromagnetskih materijala. Specifični električni otpor pojedinih ferita iznosi oko  $10\text{ M}\Omega\text{m}$ , a nekih čak i  $10^6\text{ M}\Omega\text{m}$ , a pri porastu temperature on se smanjuje.



**Slika 3.16.** a) *Kristalna struktura spinela, b)*  
*Kristalna struktura magnetoplumbita [9]*



### **3.7.7. Meki feriti**

Karakteristike mekih ferita ovise o tehnološkim pripremama izrade. Izrada mekih ferita započinje pripremom feritnog praha. Feritni prah se dobije usitnjavanjem oksida odgovarajućih metala. Feritnom prahu se dodaje plastifikator, od dobivene mase prešanjem se izrađuju željeni oblici. Prešanje se vrši pod pritiskom od 300 MPa, poslije toga slijedi zagrijavanje na temperaturu između 1370 K i 1670 K. Najveći utjecaj na karakteristike ferita ima prisustvo kisika pri hlađenju i brzina hlađenja.

### **3.7.8. Tvrdi feriti**

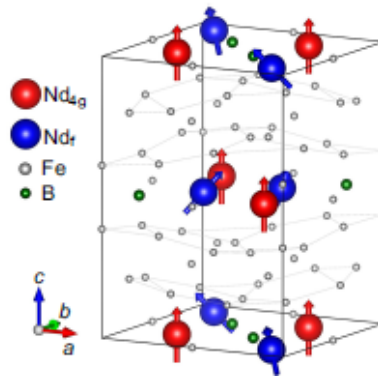
Tvrđi feriti se koriste za izradu trajnih magneta. Od svih navedenih tvrdih ferita, najveću primjenu imaju barij feriti i kobalt feriti. Tehnologija izrade magneta od barij ferita slična je tehnologiji izrade mekih ferita. Razlika je jedino što poslije usitnjavanja u suhom stanju provodi se usitnjavanje u vlažnom stanju, a zatim se ta masa preša u magnetskom polju određene jačine. Glavni nedostaci barij ferita su loše mehaničke karakteristike. Barij feriti su tvrdi i jedino se mogu obrađivati brušenjem. Karakteristike barij ferita najviše ovise o temperaturi. U odnosu na barij ferite kobalt feriti imaju stabilnije temperaturne karakteristike. Izrađuju se isto kao i barij feriti jedina razlika je u toplinskoj obradi, koja se obavlja pod djelovanjem magnetskog polja. Glavni nedostaci kobalt ferita je veća cijena u odnosu na barij ferite, koja je određena složenijom izradom i nedostatkom oksida kobalta kao sirovine.

## 4. SUVREMENI MAGNETSKI MATERIJALI

Zbog svojih dobrih karakteristika suvremeni magnetski materijali pronalaze primjenu u različitim tehnologijama i područjima znanosti. Pod pojmom suvremeni magnetski materijali najvišim dijelom ubrajamo materijale na bazi rijetkih zemnih elemenata poput: magnetski materijali na bazi Nd-Fe-B, Sm-Co, Sm-Fe-N, itd. Razvoj, te razne tehnološke i mehaničke obrade suvremenih magnetskih materijala omogućili su poboljšanje karakteristika.

### 4.1. Magnetski materijali na bazi Nd-Fe-B

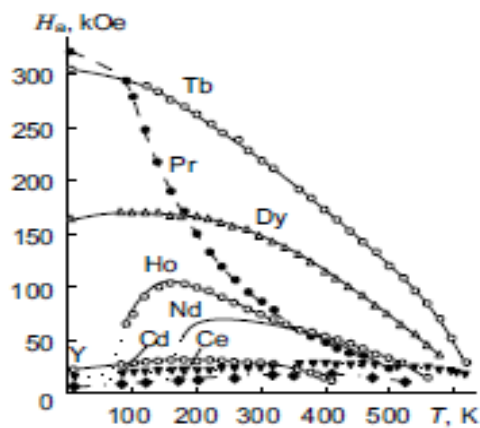
Trajni magneti na bazi materijala Nd-Fe-B imaju najbolja magnetska svojstva od svih ostalih materijala na bazi rijetkih zemnih elemenata. Glavni nedostatak neodimijskih magneta je niska Curieva temperatura, koja iznosi oko  $T_c = 588$  K. Curieva temperatura može se povećati zamjenom drugih elemenata sa neodimijem. U nekim slučajevima ova zamjena može povećati koercitivnost ili magnetizaciju. U magnetima na bazi materijala Nd-Fe-B, Sm-Co i Sm-Fe-N, atomi željeza zauzimaju šest različitih položaja u kristalnoj rešetki i njihovi magnetski momenti su feromagnetski povezani s magnetskim momentom neodimija. Curieva temperatura kod Nd-Fe-B, može se povećati zamjenom atoma željeza sa kobaltom ili drugim elementom.



**Slika 4.1.** Kristalna struktura  $Nd_2Fe_{14}B$ , strelice označavaju smjerove magnetskih momenata iona [10]

Industrijska proizvodnja magneta na bazi Nd-Fe-B izvodi se sinteriranjem pomoću magnetskih prahova  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , koji sadrže malo više atoma neodimija. Primarna faza procesa je lijevanje tankih traka, čiji je kemijski sastav  $\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{80}\text{B}_6$  [10]. Tako nastale legure se zagrijevaju uz prisustvo vodika, a zatim usitnjavaju. Prah se preša u magnetskom polju, tako da su čestice poredane duž magnetske osi. Nakon toga slijedi nekoliko faza dodatnog zagrijavanja. Proces se izvodi u inertnoj atmosferi ili u vakuum. Industrijski magneti od rijetkih zemnih elemenata kao što su Nd-Fe-B i Sm-Co sastoje se od više domena čestica i magnetskih domena u zrnu. Smatra se da su granice domena glavni mehanizam za određivanje koercitivnosti materijala.

Ako kod neodimijskih magneta neodimij zamijenimo s disprozijem, terbijem, praseodimije ili ako željezo zamijenimo sa kobaltom, niklom, kromom, bakrom ili aluminijem, magnetska svojstva će se znatno promijeniti. Obično je zamjena usmjerena na poboljšanje određene karakteristike, ali to je svakako popraćeno nekim promjenama svojstava materijala kao što su magnetizacija, Curieva temperatura i magnetokristalna anizotropija. Bor se ponekad zamjenjuje ugljikom, ali magnetska svojstva ostaju ista. Trenutno je zamjena neodimija disprozijem najčešća i koristi se za poboljšanje karakteristika  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  magnetskih materijala. Povećanje sadržaja disprozija povećava anizotropsko polje spoja (Slika 4.2.) .

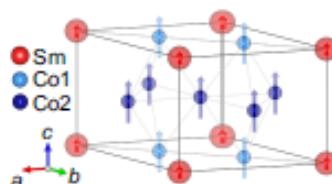


**Slika 4.2.** Ovisnost temperature o polju anizotropije  
Kod magnetskih materijala [10]

Međutim, ključno je povećanje  $H_c$ , tj. koercitivnosti. Budući da je magnetski moment disprozija veći od magnetskog momenta neodimija, disprozij je sklon antiferomagnetskom spajanju sa željezom. Koercitivnost domena  $Nd_2Fe_{14}B$  čestica određuje se prema tome koliko se lako formiraju domene na granicama zrna, a ono se može povećati povećanjem polja anizotropije  $H_a$ . Zamjena neodimija s terbijem, kao i zamjena s disprozijem dovodi do antiferomagnetske interakcije sa željezom, što smanjuje magnetizaciju [10]. U odnosu na neodimij, disprozij je puno skuplji, pa se kao zamjena disprozija koristi ceriji ili itrij koji su jeftiniji. Cerij je najjeftiniji rijetki zemni element i ima drugačija kemijska svojstva u odnosu na neodimij. Nedostatak kod magnetskog materijala  $Ce_2Fe_{14}B$  je oksidacija cerija i magnetizacija naglo opada. Takvi magnetski materijali koriste se za visoke temperature primjene ili kada je niža cijena značajnija od dobrih karakteristika.

## 4.2. Magnetski materijali na bazi Sm-Co

U odnosu na neodimijske magnete, Sm-Co magneti imaju veću otpornost na koroziju i ne zahtijevaju nikakvu površinsku obradu. Osim toga, sinterirani magneti od samarija i kobalta imaju vrlo visoku otpornost na demagnetizaciju. Maksimalne radne temperature za samarij kobalt magnete su između 523 i 823 K, a Curieva temperatura samarij kobalt magneta iznosi oko 1020 K. Magneti na bazi legura Nd-Fe-B imaju izrazito visoke  $(BH)_{max}$  vrijednosti, dok samarij  $SmCo_5$  magneti imaju veliko polje anizotropije,  $H_a$  je 32 MA/m na sobnoj temperaturi. Koercivnost industrijski sinteriranog  $SmCo_5$  magneta na sobnoj temperaturi je u prosjeku oko 1600 kA/m. U nekim slučajevima,  $H_c$  vrijednost može se povećati do 3180 kA/m pa čak i do 6000 kA/m, ali to je izvedivo jedino u laboratorijima [10]. Npr. na 4.2 K koercitivnost magneta  $SmCo_2Cu_3$  mogu doseći 24 MA/m, međutim oni postaju paramagnetski pri sobnoj temperaturi. Za praktične primjene važno je da je Curieva temperatura  $SmCo_5$  viša od  $Nd_2Fe_{14}B$ . Energetski produkt magnetskih materijala  $SmCo_5$  dvostruko je manji od neodimijskih magneta, zbog niske magnetske indukcije i magnetizacije zasićenja.



**Slika 4.3.** Kristalne strukture  $SmCo_5$ ,  
strelice označavaju smjerove magnetskog momenta iona [10]

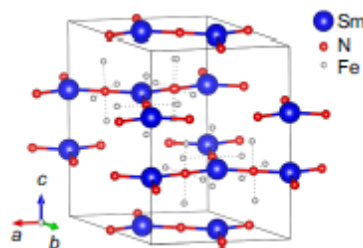
Proces proizvodnje industrijskih magneta na bazi materijala Sm-Co slične su onima koje se koriste za Nd-Fe-B magnete i uključuje sljedeće faze:

- formiranje legure
- priprema praha
- sinteriranje
- hlađenje
- dodatno zagrijavanje.

Važna značajka kod ovih magneta je da se njihovi parametri mijenjaju na visokoj temperaturi, na 573 K, koercitivnost iznosi oko 760 kA/m i  $(BH)_{\max} = 80 \text{ kJ/m}^3$  [10], što je znatno više od vrijednosti za sinterirane magnete.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ,  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_7$ ,  $\text{SmCo}_3$  i  $\text{SmCo}_2$  mogu se dobiti elektrokemijskim metodama, kao što je selektivno otapanje, koje smanjuje magnetizaciju nanočestica. Neophodna faza svih metoda koje se koriste za pripremu nanočestica magnetskih materijala  $\text{SmCo}_5$  je razdioba elemenata s kalcijem ili vodikom, jer se pomoću kalcija na površini čestica stvara oksidni sloj. Nečistoće se uklanjaju pomoću kisele otopine i deionizirane vode, ponekad se koriste i šećeri, ali to često ne rješava problem, već umjesto toga stvara nove nečistoće. Otopina  $\text{NH}_4\text{Cl}$  u metanolu pogodna je za natapanje čestica i tako nastali kalcijev klorid se topi u metanolu. Ista tehnika se može koristiti za povećanje magnetizacije kod  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{13}\text{B}$  i  $\text{SmCo}_5$ .

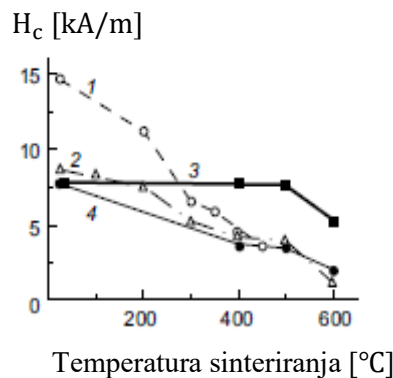
### 4.3. Magnetski materijali na bazi Sm-Fe-N

Spojevi  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  otkriveni su 1990-ih godina, međutim zbog svoje složenosti, još uvijek ne mogu postati zamjena za neodimijske magnete. Neki autori zabilježili su visoki potencijal spojeva  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  kristalne strukture kao na slici 3.5. [10]. Kristalna struktura i svojstva magneta na bazi magnetskih materijala Sm-Fe-N znatno ovise o metodama sinteriranja.



**Slika 4.4.** Kristalna struktura  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ ,  
strelice označavaju smjerove magnetskog momenta iona [10]

Curieva temperatura kod  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  je viša nego kod  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , što omogućava primjenu  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  u električnim generatorima. Prednosti magnetskih materijala na bazi Sm-Fe-N u odnosu na Nd-Fe-B je to što magneti imaju visoku električnu otpornost. Materijali na bazi mekih ferita i  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  imaju specifični otpor do  $4000 \mu\Omega\text{cm}$ , dok je specifični otpor  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$   $400 \mu\Omega\text{cm}$ , a  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  je samo  $100 \mu\Omega\text{cm}$  [10]. To omogućuje korištenje u visokofrekventnim uređajima, koji se koriste u zrakoplovima, tj. u avioindustriji. Korištenje magneta na bazi Nd-Fe-B u ovim uređajima dovodi do velikih gubitak energije zbog vrtložnih struja. Legure  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  ne mogu se dobiti sinteriranjem s dodatnim taljenjem, što je uobičajeno za neodimijske magnete. Ostali postupci kao što je prešanje u magnetskom polju, je otežano jer legura lako oksidira, čak i uz minimalni prisustvo kisika. To se može objasniti kao značajno smanjenje koercitivnosti magnetskih materijala na bazi  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ , a smanjuje se ispod  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (Slika 4.5).

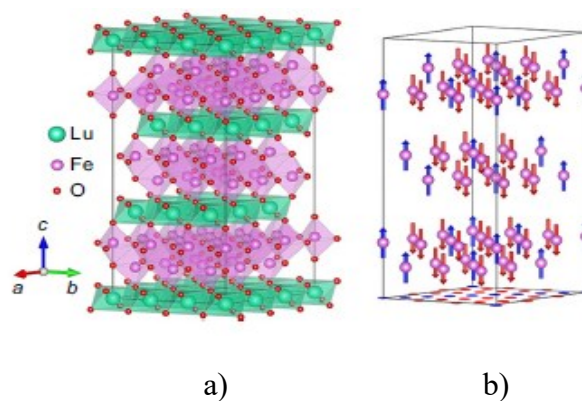


**Slika 4.5.** Utjecaj površinskog oksida na koercitivnost [10]

Razvoj novih tehnika sinteriranja, kao što su prešanje pod visokim temperaturama, prešanje pod opterećenjem, sinteriranje pomoću električne struje, gdje istosmjerna ili izmjenična struja prolazi kroz kompaktni prah, omogućio bi proizvodnju  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  magneta na temperaturama ispod njihove temperature raspadanja. Najveći rizik od stvaranja površinskog oksida nastaje u fazi usitnjavanja. Trenutno je najučinkovitiji cink koji omogućava povećanje koercitivnosti. Usitnjavanje prahova Sm-Fe-N s ugljikom i cinkom niskog tališta može povećati gustoću magneta, što je važno za primjene u industriji, gdje se najviše i koriste.

## 4.4. Lutecij feriti

Ferit  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  pripada vrsti mješovitih oksida i ima heksagonalnu kristalnu strukturu. U strukturi  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ , atomi željeza se nalaze u središtu trigonalne piramide, a ioni lutecija  $\text{Lu}^{3+}$  nalaze se između njih (Slika 3.7. a). U svakom sloju, jedan podsloj je obogaćen ionima željeza  $\text{Fe}^{2+}$ , a drugi s  $\text{Fe}^{3+}$ . Ioni lutecija su dijamagnetski i ne sudjeluju u stvaranju magnetskih svojstava materijala. Kationi željeza su u oksidacijskom stanju, a ispod Néelove temperature, koja iznosi oko 220 K, njihovi magnetski momenti su feromagnetski, usmjereni duž c osi (Slika 4.6. - b) [10]. Prisutnost iona željeza  $\text{Fe}^{2+}$  u strukturi, dovodi do stvaranja visokog magnetskog momenta.

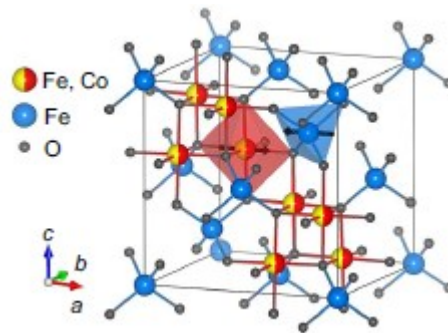


**Slika 4.6.** Kristalna (a) i magnetska (b) struktura ferita  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$ , strelice označavaju smjer magnetskog momenta iona [10]

Polikristalni uzorci se pripremaju sinteriranjem u čvrstoj fazi prahova  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na 1470 K u nekom mediju, npr. u smjesi  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  ili u vakuumu. Kristalni uzorci  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  dobivaju se najčešće, taljenjem. Priprema se sastoji od postupnog taljenja i kristalizacije materijala u atmosferi. Magnetska svojstva lutecij ferita najviše ovise o mediju u kojem se kristal nalazi. Polikristalni materijali  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  dobiveni su korištenjem visokoenergetskog usitnjavanja i toplinske obrade u argonu.  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  dobivaju se mijenjanjem sadržaja kisika ili primjenom visokog tlaka (do 15 GPa) [10]. Uzorak  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  proučavan je raznim tehnikama pomoću elektronskog mikroskopa, kako bi se dobio precizan opis njegovih mikrostruktura na sobnoj temperaturi. Pomoću TEM-a (transmisijski elektronski mikroskop) određuje se kemijski sastav i površina  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  nanočestica. TEM analizom utvrđeno je da su veličine nanočestica  $\text{LuFe}_2\text{O}_4$  ujednačene s prosječnom veličinom čestica od 90 nm, također utvrđeno je da se dielektrična konstanta i dielektrični gubici mijenjaju s promjenom temperature i frekvencije.

## 4.5. Kobalt feriti

Kobalt feriti, kemijskog sastava  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  imaju inverznu strukturu, atomi kobalta su raspoređeni na obje podrešetke. Neelova temperatura kobalt ferita, tj. temperatura iznad koje gube magnetska svojstva iznosi 800 K. Magnetski moment iona željeza u tetraedarskoj podrešetki je antiparalelan s magnetski momenti iona kobalta u oktaedarskim mjestima (Slika 4.7.). Koercitivnost ovog materijala pri sobnoj temperaturi iznosi 720 kA/m [10]. Važna karakteristika ovog materijala je da se koercitivnost njegovih nanočestica znatno povećava pri hlađenju, ali i u temperaturnom području od 2 do 50 K, a to je uzrokovano povećanjem magnetske anizotropije. Veličina čestica kobalt ferita ima određeni utjecaj na njegove magnetske karakteristike, dok magnetska anizotropija ne ovisi o veličini kristala.



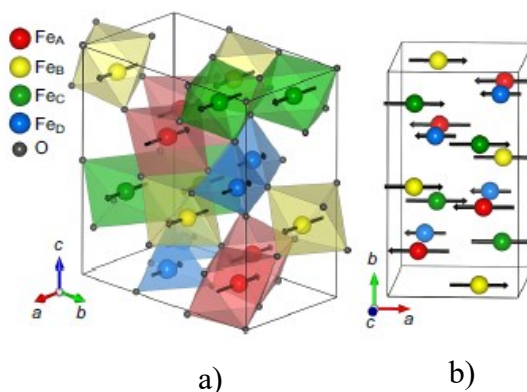
**Slika 4.7.** Kristalna struktura ferita  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [10]

Istraživanja su pokazala da snižavanje temperature sa 300 K na 5 K dovodi do povećanja koercitivnosti i magnetske anizotropije [10]. Na primjer, kada kobalt feritima dodamo aluminij, tada se magnetizacija materijala smanjuje, ali ne dolazi do povećanja koercitivnosti. Kada se galijev kation doda u struktura kobalt ferita, magnetizacija zasićenja raste, a koercitivnost se smanjuje. Prema magnetskim mjerenjima, hlađenje ovog materijala dovodi do porasta koercitivnosti pri temperaturi od 300 K. Parametri čestica se mogu kontrolirati kemijskim čimbenicima (različita kemijska priroda komponenti) i fizički čimbenicima (promjene temperature). Dakle, kobalt feriti su učinkovitiji za stvaranje nanočestica s velikom koercitivnosti pri nižim temperaturama, ispod 10 K.



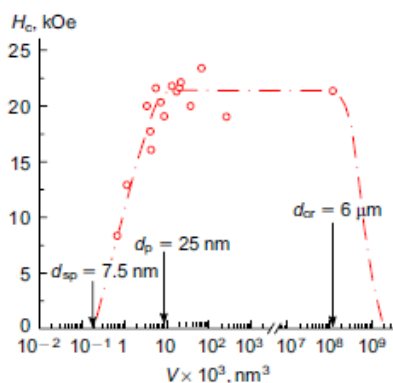
## 4.6. Željezov oksid

Neki znanstvenici smatraju da je  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  antiferomagnetski materijal, međutim najčešće se ovaj materijal tretira kao ferimagnetski. Ioni željeza u  $\text{Fe}_B$  i  $\text{Fe}_C$  podrešetki imaju magnetski moment usmjeren duž a osi, dok u druge dvije podrešetke ( $\text{Fe}_A$ ,  $\text{Fe}_D$ ), magnetski moment usmjeren je suprotno od a osi (Slika 4.8.). Na sobnoj temperaturi magnetski moment željeza u tetraedarskoj podrešetki je niži u odnosu na druge podrešetke, što dovodi do nekompensiranog antiferomagnetizam, odnosno ferimagnetizma.



**Slika 4.8.** Kristalna (a) i magnetska struktura (b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , strelice označavaju smjer magnetskog momenta iona [10]

Pri temperaturama iznad 490 K materijal se mijenja iz ferimagnetskog u paramagnetsko stanje. Međutim, znanstvenim istraživanjima otkriveno je da ovaj oksid ostaje ferimagnetski do 850 K [10]. Iznad navedene temperature,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  postaje paramagnetski. Povećanje volumena čestica povećava se koercivnost (Slika 4.9.).



**Slika 4.9.** Graf prikazuje ovisnost koercitivnosti u odnosu na volumen čestica [10]

Gdje je  $d_{sp}$  kritični promjer,  $d_p$  je veličina čestice pri kojoj  $H_c$  doseže vrijednost nula i  $d_{cr}$  je promjer magnetske domene koji se računa po sljedećoj formuli: [10]

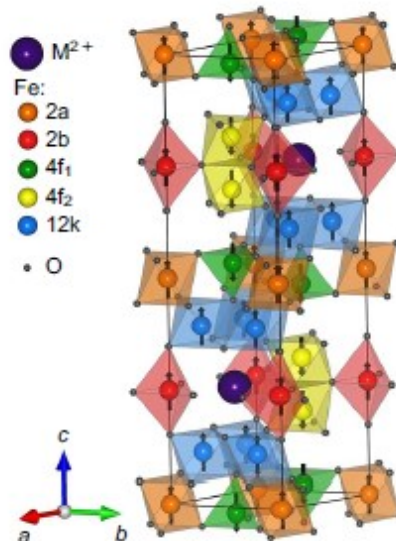
$$d_{cr} = \frac{9}{2\pi} \cdot \frac{\sigma_w}{M_{sv}^2} \quad (4-1)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{2k_B \cdot T_C \cdot |K_1|}{a}} \quad (4-2)$$

gdje je  $\sigma_w$  energija domene po jedinici površine,  $k_B$  je Boltzmannova konstanta, „a“ je prosječna udaljenost između atoma u strukturi,  $M_{sv}$  je volumen magnetizacije zasićenja ( $M_{sv} = \rho \cdot M_s$ ,  $\rho$  je gustoća materijala i  $M_s$  je magnetizacija zasićenja). Tvrdi feritni magneti proizvode se od željezovog oksida, barijevog ili stroncijevog oksida. Sirovine se miješaju zajedno kako bi se stvorila magnetska faza. Prethodno sinterirana smjesa se drobi, dobiveni prah se preša (mokro ili suho) u magnetskom polju (anizotropno) ili bez magnetskog polja (izotropno) i na kraju sinterira. Zbog niske cijene sirovina, tvrdi feritni magneti najjeftinija su vrsta magneta. Tvrdi feritni magneti imaju dobra magnetska svojstva i teško ih je demagnetizirati čak i u jakim vanjskim magnetskim poljima, otporni su na koroziju. Nedostaci su lomljivost i niska vlačna čvrstoća, otpornost na temperaturu je ograničena. Najvažnija svojstva ferita uključuju visoku magnetsku permeabilnost i visok električni otpor. Visoka permeabilnost je poželjna u uređajima kao što su antene. Visok električni otpor poželjan je u jezgrama transformatora kako bi se smanjile vrtložne struje. Feriti koji imaju kvadratne petlje histereze mogu se magnetizirati strujom, u bilo kojem smjeru. Ovo svojstvo je pogodno za primjenu u memorijskim jezgrama, budući da omogućuje pohranjivanje binarnih bitova informacija. Željezov oksid  $Fe_2O_3$  ima četiri polimorfa:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - i  $\varepsilon$ -faze.  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  (hematit) i  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  (magnetit) se mogu pronaći u prirodi, dok su  $\beta$ - $Fe_2O_3$  i  $\varepsilon$ - $Fe_2O_3$  faze vrlo rijetke i mogu se dobiti jedino u laboratoriju. Čista faza  $\varepsilon$ - $Fe_2O_3$ , dobivena je tehnikom sol-gela i pokazuje najveću vrijednost koercitivnosti, među magnetima na bazi metalnih oksida, pri sobnoj temperaturi. Takvi željezni oksidi s visokom koercitivnošću koriste se u industriji, npr. za magnetsko snimanje ili kao apsorberi elektromagnetskih valova.

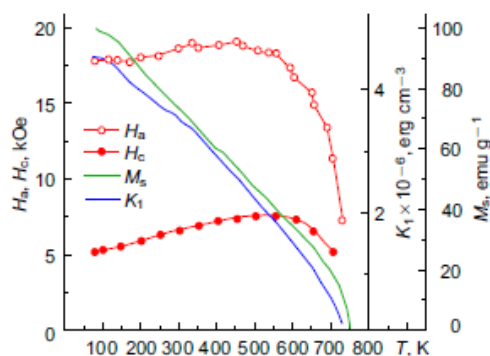
## 4.7. Heksaferiti tipa M

Heksaferiti su ključni materijali za izradu trajnih magneta. Proizvodni procesi ferita su dobro razvijeni i ne sadrže rijetke ili skupe elemente, stoga su magneti na bazi ferita mnogo jeftiniji. Heksaferiti su kemijski i toplinski stabilniji od metalnih legura, te apsorbiraju elektromagnetsko zračenje na frekvencijama do 100 GHz [10], što nije karakteristično metalnim legurama. Zbog njihove niske cijene, heksaferiti čine oko 80% ukupne vrijednosti svjetske proizvodnje trajnih magneta. Kristalna rešetka sastoji se od iona kisika koji tvore heksagonalni oblik, u svakom petom sloju po jedan ion kisika  $O^{2-}$  zamjenjuje se s  $M^{2+}$ . Ioni željeza, koji su znatno manji, zauzimaju praznine između iona kisika (Slika 4.10.). Ioni željeza se u strukturi heksaferita nalaze na pet različitih mjesta: tri oktaedra, jedan tetraedar i jedan heksaedar.



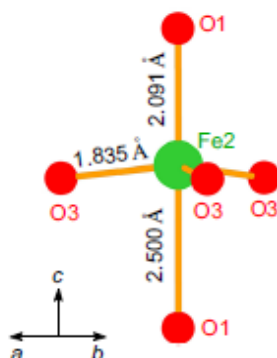
**Slika 4.10.** Kristalna struktura heksaferita tipa M, strelice označavaju smjer magnetskog momenta iona [10]

Magnetski momenti iona željeza na svakom mjestu usmjereni su duž c osi, paralelno sa 2a, 2b i 12k i antiparalelno sa  $4f_1$  i  $4f_2$ . Barij i stroncij heksaferiti imaju pozitivne magnetske konstante. Konstanta  $K_1$  i magnetizacija zasićenja  $M_s$  opadaju s porastom temperature, a  $H_a$  i  $H_c$  vrijednosti dosežu maksimum iznad sobne temperature (Slika 4.11.).



**Slika 4.11.** Graf prikazuje ovisnost  $H_a$ ,  $H_c$ ,  $M_s$  i  $K_1$  o temperaturi, za stroncij heksaferite [10]

Zamjena iona željeza u heksaferitima omogućuje promjenu magnetskih svojstava, posebno na promjenu polja anizotropije  $H_a$ . Ioni koji mogu izazvati povećanje polja anizotropije i koercitivnost su ioni: aluminijski  $Al^{3+}$ , galij  $Ga^{3+}$ , krom  $Cr^{3+}$  i rutenij  $Ru^{3+}$ . Paramagnetski ion rutenija  $Ru^{3+}$  ima orbitalu različitu od nule, to znači da se mehanizam njegovog djelovanja na magnetska svojstva heksaferita razlikuje od utjecaja drugih iona. Zato je zamjena željeza aluminijem najbolji način kako povećati koercitivnost kod heksaferita. Međutim, zamjena aluminijem kod heksaferita zahtijeva visoke temperature. Najveća koercitivnost postignuta je nakon zagrijavanja na 1373 K i iznosila je 740 kA/m [10]. Zagrijavanje na tako visoku temperaturu je važno kako bi dodavanje aluminijskih u heksaferite bilo učinkovito. Osim toga pokazalo se da zamjena stroncija sa kalcijem dovodi do povećanja koercitivnosti. Također znanstvenim istraživanjima utvrđeno je da zamjena stroncija sa kalcijem dovodi do zbijanja kisika koji je okružen željezom (Slika 4.12.).



**Slika 4.12.** Slika prikazuje okruženje kisika nad ionom  $Fe^{3+}$  u podrešetki heksaferita tipa M [10]

## 5. PRIMJENA SUVREMENIH MAGNETSKIH MATERIJALA

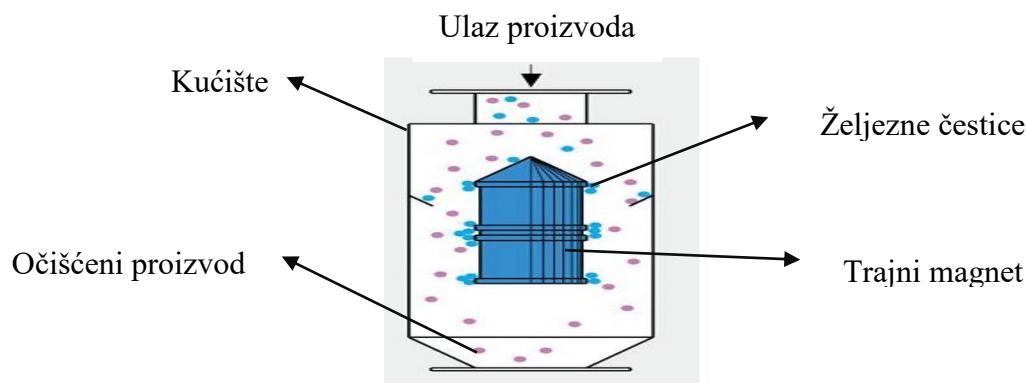
Magnetski materijali su sveprisutni u različitim primjenama, koriste se u raznim industrijama, u robotici, generatorima, aktuatorima, u sensorima za obradu informacija, u uređajima za magnetsko odvajanje, itd. Sve navedene primjene oslanjaju se na svojstva magnetskih materijala kao što su magnetski moment atoma, međudjelovanje između atoma, kristalna struktura, itd. U nastavku su prikazane različite primjene suvremenih magnetskih materijala.

### 5.1. Magnetski separatori

Magnetski separatori su uređaji koji odvajaju feromagnetske komponente mješavine različitih materijala pomoću trajnih magneta, najčešće su to neodimijski magneti, koji privlače magnetskih materijala. Osnovna namjena ovih uređaja je odvajanje magnetskih materijala od onih koji su nemagnetski. Magnetski separatori koriste se u rudarstvu, drvenoj, kemijskoj i prehrambenoj industriji. Magnetski separatori mogu ukloniti čestice željeza veličine i do 30 mikrona, kao i sitne paramagnetske čestice od nehrđajućeg čelika [12]. U nastavku su prikazani nekoliko različitih izvedbi magnetskih separatora.

#### 5.1.1. Magnetski bullet separator

Magnetski bullet separator (eng. *Bullet*) konstruiran je tako što se u središtu kućišta, od nehrđajućeg čelika, nalazi magnet u obliku metka koji služi za uklanjanje željeznih čestica, kao što su matice, vijci, podloške, spojnice i slično, iz pneumatskih sustava i cjevovoda. Koriste se i u procesu proizvodnje brašna, u mlinovima, u transportu žitarica itd. Konusni oblik magneta osigurava lakši protok smjese ili materijala kojeg je potrebno odvojiti.



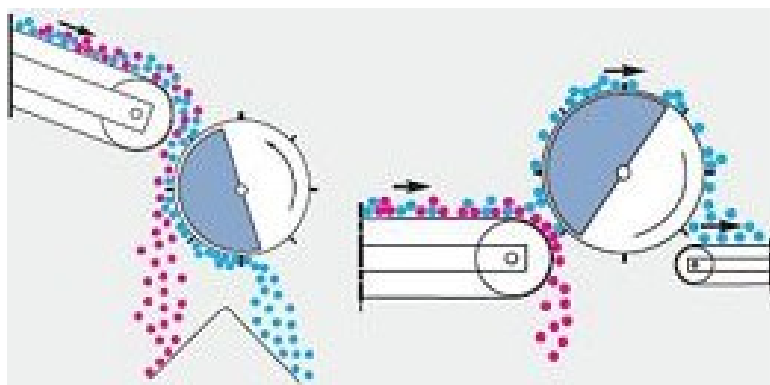
Slika 5.1. Princip rada magnetskog bullet separatora [11]



**Slika 5.2.** Magnetski bullet separatori u postrojenjima [11]

### 5.1.2. Magnetski valjkasti separator

Magnetski valjkasti separator unutar valjka ima magnetski dio koji je nepomičan, a drugi prostor je nemagnetiziran. Kada materijal padne na površinu valjka, metalni otpad je privučen magnetskim dijelom dok ostali materijal prolazi kroz valjak. Kako se valjka rotira, otpad će se rotirati do nemagnetiziranog dijela, a zatim isprazniti (Slika 5.3.).



**Slika 5.3.** Prikaz rada valjkastog magnetskog separatora [11]

Postoje dvije izvedbe magnetskog valjkastog separatora. Prva izvedba je slobodni pad (na slici 5.3. lijevo) gdje najveći dio otpadnog materijala na pokretnu traku pada izravno na rotirajući valjak. Ovdje se otpadni željezni materijal privlači na površinu valjka, zatim se transportiraju unatrag i ispuštaju prihvaćeni materijali, a ostali filtrirani materijal pada dolje.

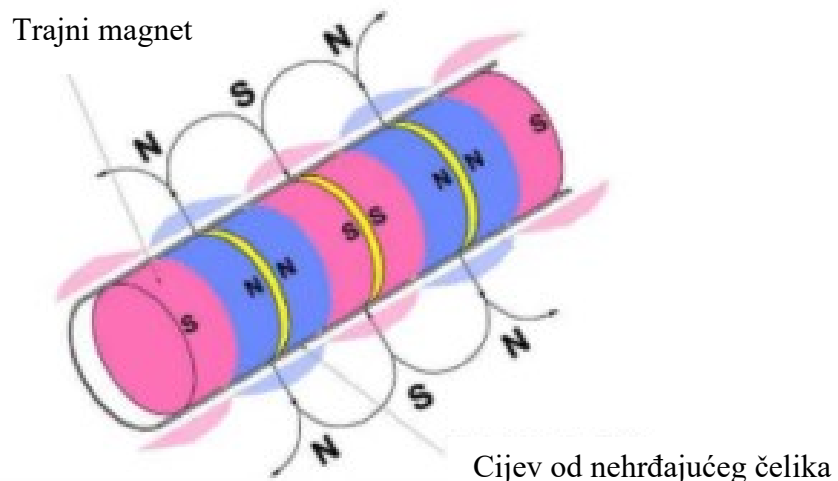
Druga izvedba (na slici 5.3. desno) je da se valjak postavi dijagonalno iznad pokretne trake, blizu točke pražnjenja, a separator privlači feromagnetske materijale i zatim ih otpušta na suprotnoj strani (Slika 5.4.). Korištenje magnetskih valjaka preporuča se kada je potrebna odvajanje željeznog otpada iz prerađivanog medija u tehnološkom procesu, kako bi se sačuvali drugi strojevi unutar postrojenja.



**Slika 5.4.** Valjkasti magnetski separator u postrojenju [13]

### 5.1.3. Magnetske cijevi

Magnetske cijevi sadrže neodimijske ili samarij kobalt magnetne, magneti se nalaze u cijevi od nehrđajućeg čelika. Magnetske cijevi su najučinkovitiji uređaji s trajnim magnetima, za uklanjanje željeznih čestica iz raznih materijala u različitim područjima proizvodnje. Kada tvar koja sadrži željezo prolazi kroz cijev, privlači ju sila i ostaje čvrsto pričvršćena na stijenci magnetske cijevi.



**Slika 5.5.** Shematski prikaz magnetske cijevi [11]



**Slika 5.6.** *Magnetska cijev* [11]

#### **5.1.4. Magnetski rešetkasti separatori**

Magnetski rešetkasti separatori idealni su za uklanjanje željeznih i paramagnetskih čestica iz niza proizvoda i zato je prikladan za filtriranje proizvoda unutar prehrambene, kemijske, farmaceutske, industrije, industrije stočne hrane, recikliranje, te plinske i naftne industrije. Zbog magnetskih šipki unutar kojih se nalaze neodimijski magneti, mogu se filtrirati željezne čestice veličine 30 mikrona kao i male paramagnetske čestice poput strugotina od nehrđajućeg čelika [12]. Čestice željeza i nehrđajućeg čelika manje su nego što se mogu detektirati detektorom metala.



**Slika 5.7.** *Magnetski rešetkasti separator* [12]



Magnetski rešetkasti separatori uglavnom se koristi za uklanjanje nečistoća željeza u lijevku, u koritima za hranjenje i podnim prostorima.



**Slika 5.8.** *Primjena rešetkastih separatora u lijevku [11]*

## **5.2. Neodimijski magneti u generatorima vjetroelektrana**

U posljednjih nekoliko godina, neke vjetroturbine su unaprijeđene generatorima s trajnim magnetom (PMG, eng. *Permanent Magnet Generator*). Generatori s trajnim magnetima koriste se jer su isplativiji, pouzdaniji i zahtijevaju malo održavanja. Umjesto električne energija, koja je potrebna za proizvodnju magnetskog polja, koriste se neodimijski magneti za proizvodnju istog. Neodimijski magneti koriste se u generatorima vjetroturbina, za male i velike vjetroturbine od 25 kW do 2,3 MW [11]. Trajni magneti koji se koriste u vjetroturbinama omogućuju smanjene veličine i mase generatora, bez smanjenja učinkovitosti samog generatora. Smanjenjem mase generatora smanjuju se veličina i mase ostalih komponenti vjetroturbine, a samim time i ukupni troškovi proizvodnje.

Postoji još jedna izvedba generatora koji se koristi u vjetroelektranama, a to je istosmjerni generator s trajnim magnetom ili PMDC generator. Sastoje se od statora koji ima trajne magnete rijetkih zemnih elemenata, kao što su neodimij ili samarij kobalt. Trajni magneti služe za proizvodnju jakog magnetskog polja statora umjesto namotanih žica i komutatora spojenog četkicama na armaturu.

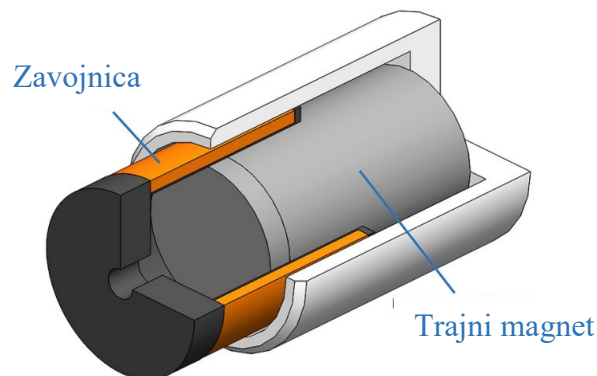
Glavna prednost u odnosu na druge vrste istosmjernih generatora je u tome što istosmjerni generator s trajnim magnetom vrlo brzo reagira na promjene brzine vjetra. PMDC generatori lakši su od generatora koji imaju namote i imaju veću učinkovitost jer nema namota, a samim time i gubitaka.



**Slika 5.9.** PMDC generator [14]

### 5.3. Motor s pokretnom zavojnicom

Motor s pokretnom zavojnicom, tj. VCM (eng. *Voice Coil Motor*) poseban je oblik motora s izravnim pogonom. Njegov princip rada zasniva se na trajnom magnetu i zavojnici, gdje magneti imaju ključnu ulogu.



**Slika 5.10.** Primjer VC motora [15]

Prednosti VCM-a su velika brzina, veliko ubrzanje, jednostavna struktura i male dimenzije, zbog toga se koriste u tvrdim diskovima. U tvrdom disku nalazi se vretenasti motor i uređaj za pozicioniranje magnetske glave.

Vretenasti motor ima dvije funkcije, jedna je da pokreće disk, a druga funkcija je rotiranje sektora, da se mogu čitati i pisati informacije snimljene na površini diska. Osim što se koriste u tvrdim diskovima, ostale primjene su pogon uređaja za autofokus u kamerama, u skenerima, za lasersko rezanje, itd. Magneti koji se koriste u motoru s pokretnom zavojnicom su Nd-Fe-B magneti. Motor s pokretnom zavojnicom koriste se za preciznu kontrolu sile zbog linearne karakteristike sile u odnosu na struju. Princip rada motora s pokretnom zavojnicom zasniva se na sljedećoj jednadžbi: [16]

$$F = B \cdot I \quad (5-1)$$

gdje je  $F$  sila [N],  $B$  magnetska indukcija [T] i  $I$  struja [A].

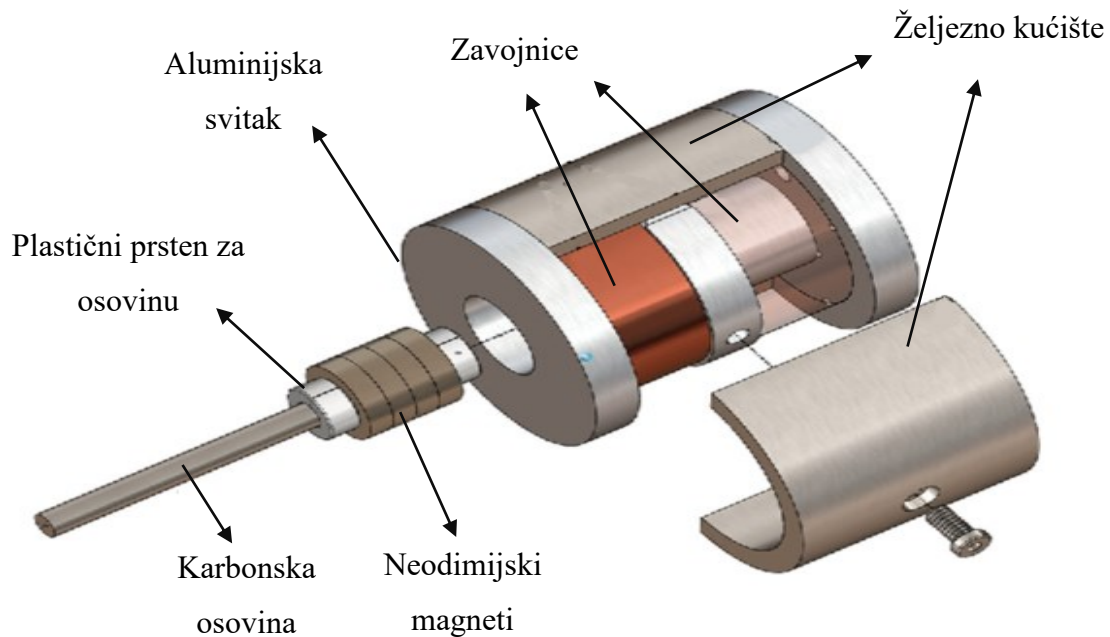
Na vodič kroz koji prolazi struja, postavljen u magnetsko polje djelovat će sila. Ta sila je proporcionalna smjeru i veličini struje i gustoći magnetskog toka. Budući da je gustoća magnetskog toka trajnog magneta konstantna, smjer linearnog pomaka ovisi o polaritetu struje. Količina sile koja se proizvodi proporcionalna je struji. Motor s pokretnom zavojnicom većeg su promjera i manje duljine, a povećanjem promjera mogu se postići veće sile.



**Slika 5.11.** Prikaz motora s pokretnom zavojnicom [17]

## 5.4. Linearni aktuator s pomičnim magnetom

Linearni aktuatori s pomičnim magnetom omogućuju precizno pozicioniranje. Ovim aktuatorom može se kontrolirati brzina i željena izlazna sila. Održavanjem niske mase magneta, omogućava precizniju kontrolu brzine i položaja. Pokretni magnetski aktuatori pogodni su za primjene koje zahtijevaju umjerenu brzinu i kontrolirane točke zaustavljanja. Koriste se u prekidačima strujnog kruga s daljinskim upravljanjem, u medicinskim alatima, itd.



**Slika 5.12.** *Dijelovi linearnog aktuatora s pokretnim magnetom [17]*

Za razliku od standardnih aktuatora ili motora s pokretnom zavojnicom, gdje je magnetski sklop nepomičan, ovi aktuatori koriste nepomične zavojnice, što omogućava jednostavniji dizajn električnih priključaka.

## 5.5. Magneti u automobilskoj industriji

Automobilska industrija je jedna od najvećih industrija u svijetu. Razvoj tehnologije omogućio je veliki napredak u automobilskoj industriji, kao što su električni automobili koji su postali popularni u današnje vrijeme jer značajno smanjuju zagađenje okoliša. Osim toga elektromotori omogućili su postizanje veće snage u električnim automobilima, a samim time i maksimalnu brzinu koju mogu postići. Kao posljedica toga, došlo je do značajnog povećanja složenosti električnih automobila, što je povećalo potražnju magneta sa dobrim magnetskim svojstvima. Suvremeni magnetski materijali koji se koriste u automobilskoj industriji jesu materijali na bazi rijetkih zemnih elementima, kao što su samarij kobalt (Sm-Co) i neodimijski (Nd-Fe-B) magneti.

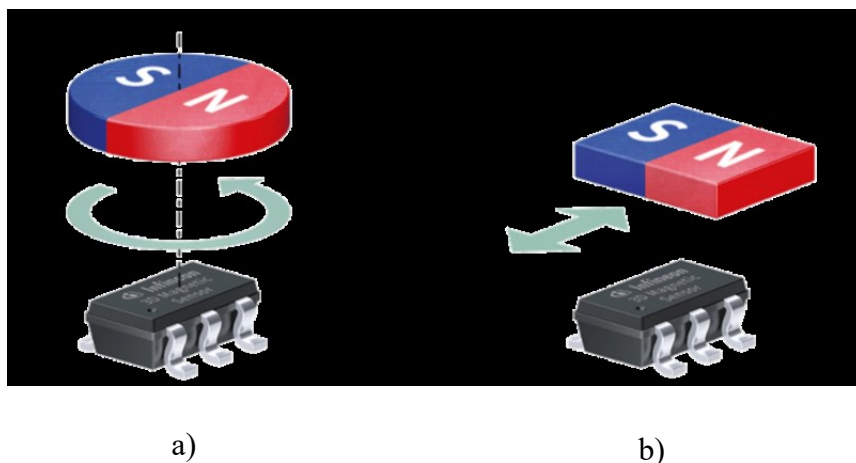
Automobilska industrija jedno je od područja gdje se Nd-Fe-B magneti najviše koriste. U svakom automobilu, magneti se koriste u više od 30 dijelova automobila. Broj malih motora koji se koriste u luksuznim automobilima iznosi 70, koji imaju različite primjene u automobilima. Tvrtka Honda razvila je novi neodimijski magnet s visokim magnetskim svojstvima i otpornosti na visoke temperature, koji će se koristiti u novim hibridnim vozilima [18]. Ovaj novi razvoj učinit će pogonske motore u električnim vozilima jeftinijima za izradu jer novi neodimijski magneti ne sadrže mali postotak rijetkih zemnih elemenata, koji su skupi za nabavu. Neodimijski magneti koriste se u pogonskim motorima električnih i hibridnih vozila zbog svoje visoke toplinske otpornosti i velike magnetske sile. Kako se automobilska industrija razvija prema proizvodnji električnih automobila, potražnja za neodimijskim magnetima je porasla.

Kad je tvrtka Tesla proizvela svoja prva dva modela automobila u punoj veličini, koristili su asinkrone motore za pogon vozila. Asinkroni motori stvaraju vlastiti magnetizam pomoću struje, tj. rade bez trajnih magneta. Razlog zašto je Tesla prestao koristiti ove motore je taj što su potrebni motori manjih dimenzija koji bi i dalje bio jednake snage i tada su počeli koristiti motore s trajnim magnetima, tj. s neodimijskim magnetima [18]. Ovi magneti stvaraju jače magnetsko polje na manjem području, što omogućuje izradu manjih električnih motora koji imaju jednaku snagu kao i veći motori koje su zamijenili. Elektromotori izrađeni s Nd-Fe-B trajnim magnetima mogu biti i do 50% manji i lakši od motora bez trajnih magneta, to pruža puno više prostora za druge komponente u automobilima.

## 5.6. Magnetski senzori

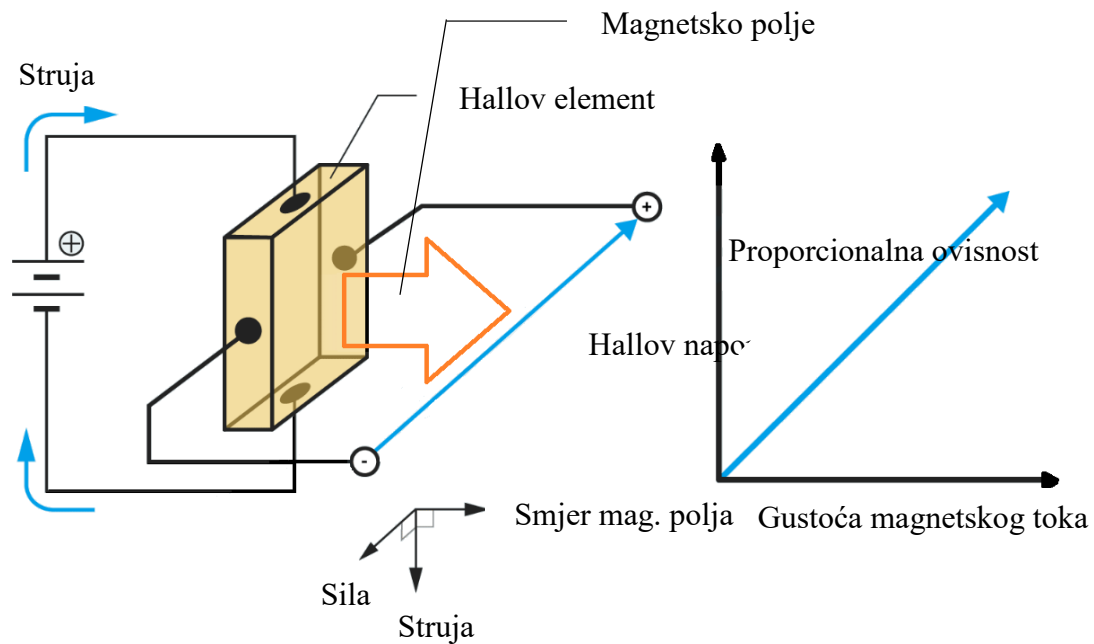
Magnetski senzori ili senzori koji se aktiviraju pomoću magnetskog polja su uređaji koji se koriste za mjerenje i izračunavanje veličina kao što su: brzina, položaj, smjer, kut rotacije, itd. Njihova primarna funkcija je komunikacija s magnetskim poljem i pretvaranje mehaničkog gibanja u električni signal. Unutar senzora nalazi se trajni magnet čija je uloga osigurati magnetsko polje u zračnom rasporu. Magnetsko polje može biti konstantno ili promjenljivo po veličini i smjeru. Najčešći tipovi trajnih magneta koji se koriste u sensorima su samarij kobalt magneti i neodimijski magneti. Odabir trajnog magneta, za određeni dizajn senzora, ovisi o sljedećim faktorima: [19]

- Maksimalni energetska produkt
- Krivulja demagnetizacije
- Otpornost na demagnetizaciju
- Otpornost na koroziju
- Električni otpor
- Promjena magnetizacije s temperaturom
- Cijena
- Dostupnost sirovina



**Slika 5.13.** Magnetski senzori: a) kutnog položaja, b) linearnog položaja [20]

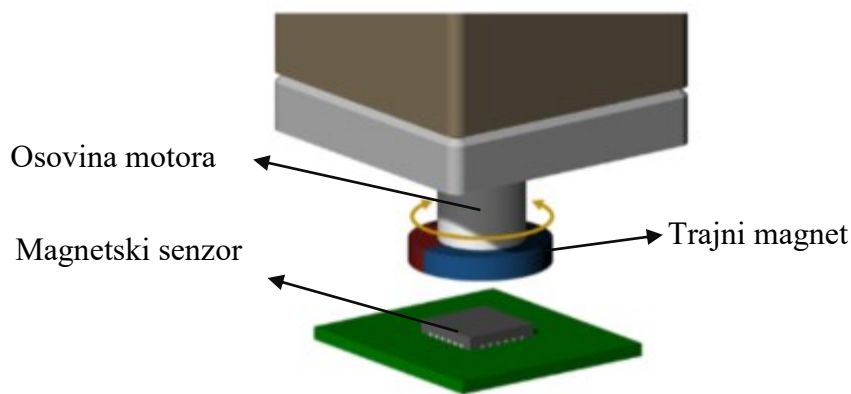
Primarna namjena magnetskih senzora je mjerenje položaja. Većina magnetskih senzora za mjerenje položaja koristi Hallov element. Hallov efekt otkrio je Edwin Herbert Hall, 1879. godine, kada je dokazao da Lorentzova sila stvara napon pod pravim kutom u odnosu na smjer struje i smjer magnetskog polja. Taj napon se zove Hallov napon, prema pravilu lijeve ruke smjer napona mijenja se sa smjerom magnetskog toka. Pomoću napona, odnosno njegove veličine i smjera možemo odrediti veličinu i smjer magnetskog polja.



**Slika 5.14.** Princip rada Hallovog elementa [21]

## 5.7. Magnetski enkoder

Magnetski enkoder daje informacije o rotacijskom položaju. Najjednostavniji magnetski enkoder sastoji se od trajnog magneta i magnetskog senzora (Slika 5.15.). Trajni magnet je pričvršćen na vrh rotirajućeg tijela, npr. na osovinu motora, a magnetski senzor nalazi se na tiskanoj ploči, na mjestu gdje detektira magnetsko polje koje stvara trajni magnet. Kada se trajni magnet pričvršćen na osovinu motora okreće, smjer magnetskog polja koje detektira magnetski senzor se mijenja, kao rezultat toga enkoder detektira rotacijski položaj i brzinu osovine motora.



Slika 5.15. Magnetski enkoder [22]

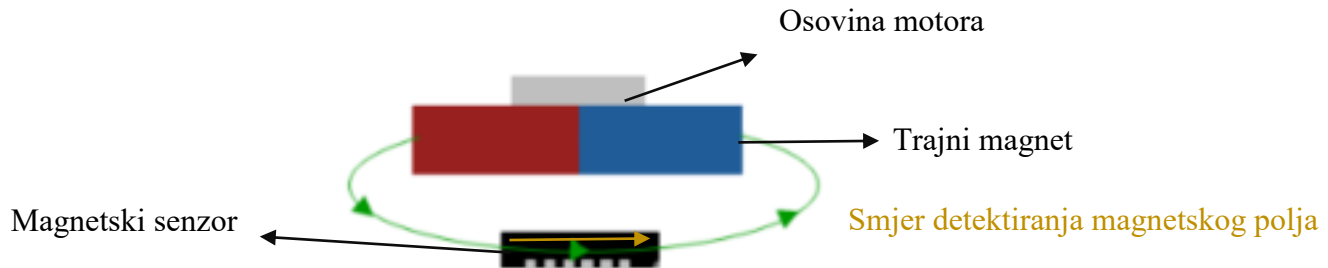
Halovi elementi koji se koriste u magnetskim enkoderima napravljeni su od poluvodičkih materijala. Poluvodički materijali koji se koriste u Hallovim elementima su galijev arsenid (GaAs) i indijev arsenid (InAs) sa stabilnim temperaturnim karakteristikama [22]. Osim toga postoje dvije vrste Hallovih elemenata, oni koji mogu detektirati jakost magnetskog polja u okomitom smjeru i u horizontalnom smjeru. Magnetski enkoderi općenito koriste cilindrične trajne magnete. Postoje dvije vrste smjerova magnetiziranja za trajne magnete radijalni smjer i aksijalni smjer. Općenito se koriste samarija i kobalta magneti koji imaju dobre temperaturne karakteristike, neodimijski magneti koji su manjih dimenzija, te jeftini magneti na bazi ferita.



Slika 5.16. Radijalno magnetiziran magnet [22]

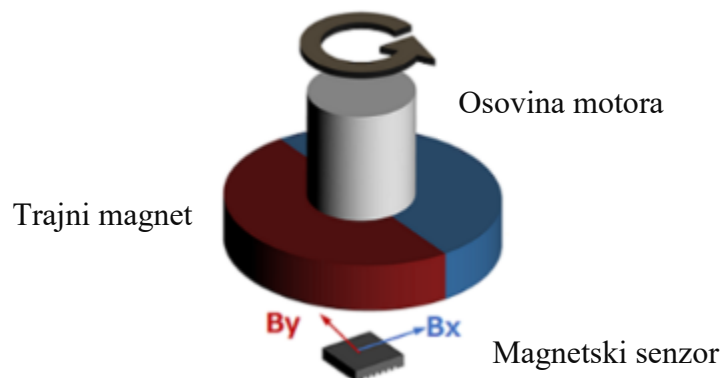


Idealan položaj magnetskog enkodera je da su središte osovine, permanentni magnet i Hallov element u istoj liniji. Ako Hallov element nije u istoj liniji s ostalim elementima, mijenja se snaga magnetskog polja koje detektira Hallov element, što rezultira pogreškom detekcije kuta.



**Slika 5.17.** Prikaz radijalno magnetiziranog magneta i Hallovog elementa koji detektira magnetsko polje [22]

Kada se osovina motora okreće, magnetsko polje koje stvara trajni magnet također se okreće. Magnetsko polje, konstantne jakosti, rotira se blizu središta osi rotacije. Hallov element detektira ovu promjenu magnetskog polja i pretvara je u električni signal. Hallov element je magnetski senzor koji može detektirati snagu magnetskog polja samo u jednom smjeru. Stoga, da bi se detektirao rotacijski položaj ravnine XY rotacije, potreban je Hallov element za detekciju jakosti komponente X osi ( $B_x$ ) i Hallov element za detekciju jakosti komponente Y osi ( $B_y$ ) (Slika 5.18.) [22].

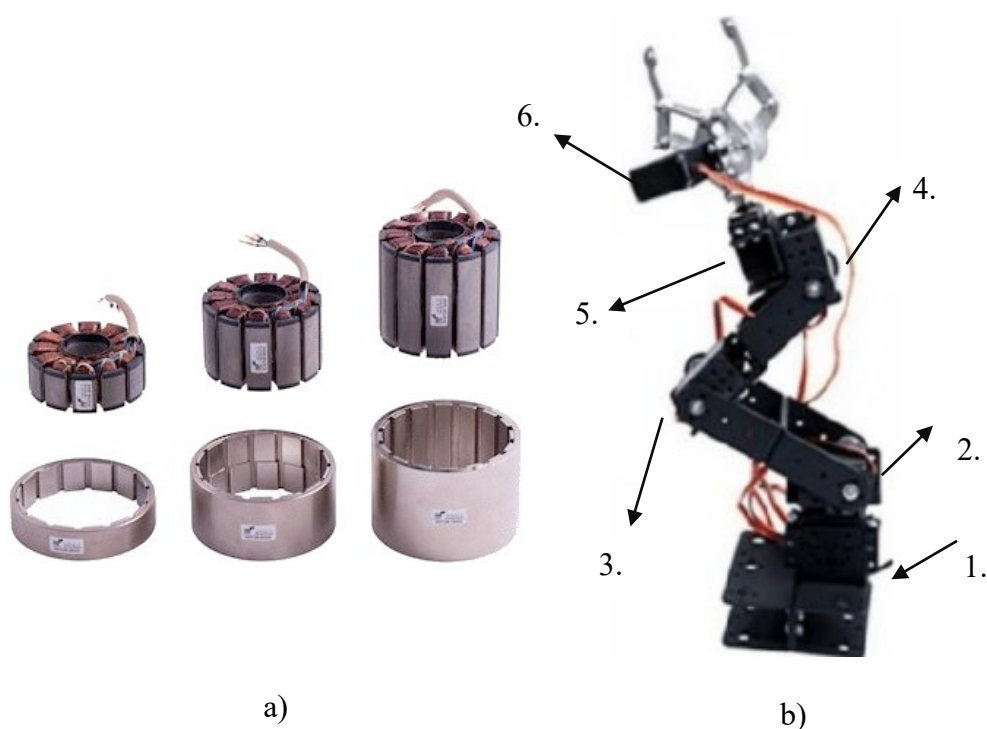


**Slika 5.18.** Magnetski enkoder sa dva Hallova elementa [22]

Budući da magnetski enkoder detektira promjene magnetskog polja, njegova prednost je, što je prikladan za korištenje u okruženjima s puno prašine i vode. Na primjer, magnetski enkoderi koriste se u industrijskim šivaćim strojevima i u alatnim strojevima za rezanje, koji koriste ulje ili vodu za hlađenje.

## 5.8. Suvremeni magnetski materijali u robotici

Primjene neodimijskih magneta u području robotike uglavnom su u servo-motorima i step-motorima s trajnim magnetima koji zahtijevaju visoku točnost upravljanja, male dimenzije i male mase. Radna temperatura motora s trajnim magnetom i step-motora koji se koriste u robotima općenito je ispod 100°C, zato su neodimijski magneti pogodni za takve primjene. Broj neodimijskih magneta koji se koriste u robotima ovisi o broju servo-motora, a samim time i o veličini robota, na slici 5.19. b) prikazan je robotska ruka sa šest servo-motora.



**Slika 5.19.** Motri sa neodimijskim magnetima a),  
b) robotska ruka sa 6 servo-motora [23]

Suvremeni magnetski materijali se koriste u magnetskim hvataljkama robota za prijenos tereta. Magnetske hvataljke služe prijenos i postavljanje čeličnih predmeta u industrijskoj automatizaciji. Posebno dizajnirana kontaktna površina, sastoji se od dvije okrugle udubine na površini magneta, koje služe za prihvat tereta. Ova magnetna hvataljka prilagodljiva je automatskom okretanju robotske ruke (Slika 5.20.).

Hvataljka koristi magnetiziranu površinu za hvatanje metalnih predmeta. Magnetske hvataljke uobičajene su u industrijama u kojima se limovi ili automobilski dijelovi pomiču duž pokretne trake u automatizaciji. Na primjer u automobilskoj industriji roboti sa magnetskim hvataljkama ubacuju komad čelika u presu i kad presa otisne, drugi robot pomoću magnetskih hvataljki uzima i prenosi dalje.



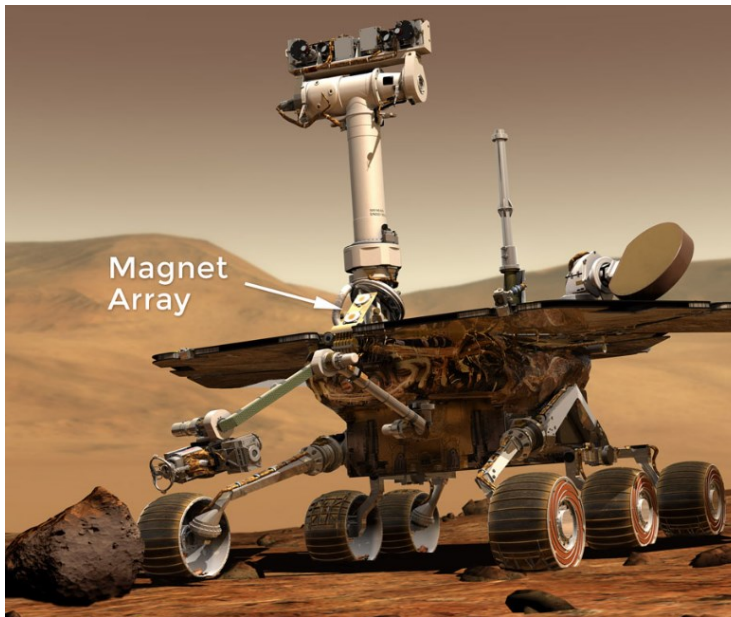
*Slika 5.20. Magnetska hvataljka na robot [23]*

## **5.9. Magnetski ionizatori**

Magnetski ionizatori su uređaji koji smanjuju utjecaj emisije štetnih plinova dizelskih motora. Sastoji se od nosača pričvršćenih oko cijevi za gorivo i dva trajna magneti. Najčešće su to neodimijski magneti ili samarij kobalt magneti, koji su pričvršćenih za nosače. Nakon što su magneti rijetkih zemnih elemenata pričvršćeni na nosače, nosači i magneti se presvuku plastikom, metalnim prahom ili bilo kojim drugim zaštitnim slojem. Emisije štetnih plinova se ispuštaju u okoliš u obliku dima i drugih otrovnih tvari. Osim toga, bez potpunog izgaranja, emisije dizel motora mogu dovesti do kvara motora. Stoga je potreban sustav za smanjenje emisija štetnih plinova. Magnetski ionizatori smanjuju emisije štetnih plinova koji su uzrokovani nepotpunim izgaranjem, a kada se koristi u dizelskim motorima osiguravaju bolje izgaranje. Testiranja ovog uređaja pokazala su da je neprozirnost dima kod dizelskih motora smanjena za 60% [24]. Magnetski ionizator postavlja se oko vanjske strane cijevi za gorivo, prije točke u kojoj gorivo ulazi u komoru za izgaranje. Ovaj uređaj smanjuje emisije štetnih plinova tako što poboljšava sagorijevanja goriva magnetskom rezonancijom i smanjuje površinsku napetost goriva.

## 5.10. Suvremeni magnetski materijali i svemirska istraživanja

Znanstveni instrumenti su najsvremeniji alati za prikupljanje informacija o geologiji, atmosferi i okoliša na Marsu. Neki od tih instrumenata koriste suvremene magnetske materijale, kao što je set neodimijskih magneta (eng. *Magnet array*). Magnet Array prikuplja prašinu za analizu, kako bi se otkrio sastav čestica prašine (Slika 5.21.).



a)



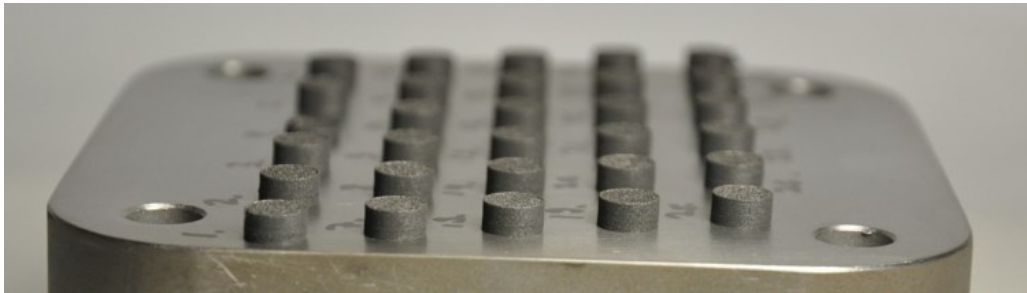
b)

**Slika 5.21.** a) Prikaz magneta na robotu,  
b) uvećana slika magneta koji se koristi za prikupljanje prašine [25]

Na Marsu se nalazi puno prašine i dio te prašine je jako magnetičan. Ispitivanje tih čestica i njihovih nakupljanja na magnetima, može otkriti geološku povijest planeta. Svaki robot ima tri seta magneta koja skupljaju prašinu u zraku. Jedan set magneta nosi RAT (eng. *Rock Abrasion Tool*), koji služi za usitnjavanje kamenja. Dok se to kamenje usitnjava, znanstvenici mogu proučavati svojstva prašine s vanjskih površina magneta. Drugi set magneta postavljen je na prednji dio robota, a treći magnet postavljen je na vrh robota, koji je usmjeren prema panoramskoj kameri i svrha ovog magneta je da prikupi prašinu koju vjetar nanese.

### 5.11. Pravci razvoja Nd-Fe-B magneta

Razvoj Nd-Fe-B magneta usmjeren je prema stvaranju praha koji je prilagođen za 3D ispis. Prah Nd-Fe-B može se koristiti za proizvodnju učinkovitih trajnih magneta, koji se koriste u motorima električnih i hibridnih vozila, električnim biciklima kao i u generatorima vjetroelektrana. Ovaj projekt ubrzat će proces dizajniranja električnih vozila i sigurno će utjecati na uštedi rijetkih zemnih elemenata.



**Slika 5.22.** *Primjer 3D ispisanih trajnih magneta [26]*

Finski istraživački centar razvio je novi materijal pogodan za 3D printanje trajnih magneta, koji se mogu koristiti u električnim i hibridnim motorima vozila. Dugoročno gledano, cilj je razviti električni motor koji se može potpuno 3D ispisati, koji bi bio otprilike 30% lakši od današnjih motora. Novi trajni magnetski materijal koji se razvija u tu svrhu promovirat će čišći promet i pomoći u smanjenju utjecaja prometa na okoliš.

## 6. ZAKLJUČAK

Suvremeni magnetski materijali predstavljaju budućnost u današnjem svijetu. Među takvima najzastupljeniji su materijali na bazi rijetkih zemnih elemenata koji imaju dobra magnetska svojstva i mogu izdržati visoke temperature. S obzirom na to pokazala se velika potreba za istraživanjem suvremenih magnetskih materijala i njihove primjene. Nedostaci suvremenih magnetskih materijala rješavaju se metodama sinteriranja ili zamjenom elemenata. Tako se kod neodimijskih magneta, zamjenom neodimija s cerijem, dobije materijal koji ima bolje temperaturne karakteristike. U odnosu na neodimijske magnete, samarij kobalt magneti imaju veću otpornost na koroziju i veću Curievu temperaturu, ali se zbog visoke cijene slabije primjenjuju. Suvremeni magnetski materijali najviše se primjenjuju u industriji, automobilima, vjetroelektranama, robotici, u raznim motorima, generatorima, magnetskim senzorima i slično. Neodimijski magneti koriste se u magnetskim separatorima, za magnetsko odvajanje feromagnetski čestica u prehrambenoj industriji. U vjetroelektranama, izvedbe generatora s neodimijskim magnetima omogućuju smanjenje veličine i mase generatora, a samim time i smanjenje veličine i mase ostalih komponenti vjetroelektrana, što na kraju rezultira manjim troškovima proizvodnje. Zbog velike primjene i potražnje, cijene neodimijskih magneta su se znatno povećale posljednjih godina. Novi pravci razvoja neodimijskih magneta, usmjereni prema razvoju praha za 3D ispis trajnih magneta koristit će se za primjenu u motorima električnih i hibridnih automobila. Svrha toga je razviti elektromotor koji bi bio manjih dimenzija i lakši u odnosu na standardne elektromotore. Trenutno neodimijski magneti su optimalan izbor u svim granama industrije sukladno svojoj cijeni i magnetskim svojstvima koje pružaju.

## LITERATURA

- [1] Povijest magnetizma, [http://fizika.unios.hr/~dstanic/Osnove\\_fizike\\_2/07-Magnetostatika.pdf](http://fizika.unios.hr/~dstanic/Osnove_fizike_2/07-Magnetostatika.pdf)  
(17. lipnja, 2022.)
- [2] Ž. Štih i B. Trkulja, Elektromagnetska polja – Magnetostatika, Zagreb 2010.  
(20. lipnja 2022.)
- [3] Grafičko određivanje  $(BH)_{\max}$ , <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-B978008098353000004X-f04-29-9780080983530.jpg> (21. lipnja 2022.)
- [4] Vrste magnetskih materijala, <https://cse.umn.edu/irm/2-classes-magnetic-materials>  
(26. lipnja 2022.)
- [5] Meissnerov efekt, <https://www.artas.hr/magneti/magnetizam.htm> (18. lipnja 2022.)
- [6] Paramagnetizam, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/paramagnetism>  
(19. lipnja 2022.)
- [7] Feromagnetizam, <https://www.britannica.com/science/ferromagnetism> (19. lipnja 2022.)
- [8] Curieva temperatura feromagnetskih materijala,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Curie\\_temperature](https://en.wikipedia.org/wiki/Curie_temperature) (19. lipnja 2022.)
- [9] Živojin A. Spasojević i Zoran V. Popović, Elektrotehnički i elektronski materijali, Beograd 1979.
- [10] E. A. Gorbachev, E. S. Kozlyakova, L. A. Trusov, A. E. Sleptsova, M. A. Zykin i P. E. Kazin, Design of modern magnetic materials.pdf, 2021.
- [11] Magnetski separatori, <https://www.greatmagtech.com/magnetic-separators/> (8. rujna, 2022.)
- [12] Magnetski rešetkasti separatori, <http://rowlandmagnetics.co.uk/products/> (8. rujna, 2022.)
- [13] Valjkasti magnetski separator, <https://www.malamanctc.com/ferrous-metal-separation/>  
(8. rujna, 2022.)

- [14] Istosmjerni generators s trajnim magnetom, <https://www.hsmagnets.com/blog/category/permanent-magnet-generators/> (10. rujna, 2022.)
- [15] Motori s pokretnom zavojnicom, <https://www.stanfordmagnets.com/magnets-in-the-voice-coil-motor-vcm.html> (10. rujna, 2022.)
- [16] Aktuatori s pokretnom zavojnicom, <https://www.h2wtech.com/category/voice-coil-actuators> (9. rujna, 2022.)
- [17] Motori s pokretnom zavojnicom i linearni aktuator s pomičnim magnetom, <https://www.hsmagnets.com/blog/category/permanent-magnet-motor/voice-coil-motor/> (9. rujna, 2022.)
- [18] Magneti rijetkih zemnih elemenata u električnim automobilima, <https://www.hsmagnets.com/blog/rare-earth-magnets-in-hybrid-and-electric-vehicles> (9. rujna, 2022.)
- [19] Magnetski senzori, <https://bunting-dubois.com/magnetic-sensors/> (10. rujna, 2022.)
- [20] Vrste magnetskih senzora, <https://www.rutronik.com/suppliers/infineon/3d-magnetic-sensors-family/> (10. rujna, 2022.)
- [21] Princip rada Hallovog elementa, <https://www.ablic.com/en/semicon/products/sensor/magnetism-sensor-ic/intro3/> (10. rujna, 2022.)
- [22] Magnetski enkoder, <https://www.akm.com/global/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/magnetic-encoder/> (10. rujna, 2022.)
- [23] Primjena magneta u robotici, <https://www.hsmagnets.com/blog/category/magnet-application/robot/> (11. rujna, 2022.)



[24] Magnetski ionizatori,

<https://patentimages.storage.googleapis.com/0d/b0/47/ae2c9600848b0d/US9273644.pdf>

(11. rujna, 2022.)

[25] NASA, magneti na robotima za istraživanje tla Marsa

<https://mars.nasa.gov/mer/mission/instruments/magnet-array/> (11. rujna, 2022.)

[26] 3D ispisani trajni magneti, <https://eitrawmaterials.eu/3d-printed-magnets-help-create-more-efficient-electric-motors/> (11. rujna, 2022.)

## SAŽETAK

U ovom završnom radu opisani su trenutno najzastupljenijih suvremenih magnetskih materijali. Magnetski materijali su jedni od važnijih faktora u industriji, ali i u svakodnevnom životu. Pronalazimo ih u uređaja za magnetsko odvajanje, u aktuatorima, motorima, automobilima, pa sve do najsuvremenijih uređaja koji se koriste u svemirskim istraživanjima. Završni rad sadrži prikaz povijesti magnetizma, podjelu magnetizma, vrstu magnetskih materijal, te strukturu i razvoj suvremenih magnetskih materijala. Na kraju završnog rada su prikazani su primjeri gdje se sve koriste suvremeni magnetski materijali.

**Ključne riječi:** atom, feriti, feromagnetizam, ion, koercitivnost, kristalna struktura, magneti, magnetizam, magnetsko polje, neodimij, paramagnetizam, permeabilnost, samarij kobalt, temperatura, željezo

## ABSTRACT

In this undergraduate thesis, some of the most common contemporary magnetic materials are described. Magnetic materials are one of the most important factors in industry, but also in everyday life. We find them in devices for magnetic separation, in actuators, motors, cars, to the most modern technologies used in space research. The final paper contains a description of the history of magnetism, the division of magnetism, the type of magnetic material, and the structure and development of modern magnetic materials. At the end, some examples are given where modern magnetic materials are used.

**Keywords:** atom, ferrites, ferromagnetism, ion, coercivity, crystal structure, magnets, magnetism, magnetic field, neodymium, paramagnetism, permeability, samarium cobalt, temperature, iron