

# **Curieov motor**

**Autorica: Andrea Belamarić,**

**XV. gimnazija, 2.e**

**Mentor: Domagoj Plušćec, Istraživački Centar Mladih**

**Zagreb, 4.2. 2018.**

**Sadržaj:**

1 Uvod .....	3
2 Teorija .....	4
2.1 Osnovno o magnetizmu .....	4
2.2 Privlačna sila magneta .....	4
2.3. Promjena svojstva feromagnetskog materijala zagrijavanjem .....	5
2.4. <i>Curie Point Engine</i> .....	6
3 Eksperiment .....	7
3.1. Mjerenje magnetskog polja permanentnog magneta .....	7
3.2. Mjerenje privlačne sile magneta na nikel u ovisnosti o udaljenosti .....	9
3.3. Mjerenje privlačne sile magneta na nikel u ovisnosti o temperaturi .....	11
3.4. Konstrukcija motora i demonstracija vrtnje .....	13
3.5. Mjerenje snage korištenog grijača .....	15
3.6. Određivanje trenja diska .....	17
4 Diskusija .....	18
4.1. Konstrukcija Curieovog motora u praksi .....	18
4.2. Moguća iskoristivost Curieovog motora .....	18
5 Zaključak .....	21
6 Literatura .....	22

## 1 Uvod

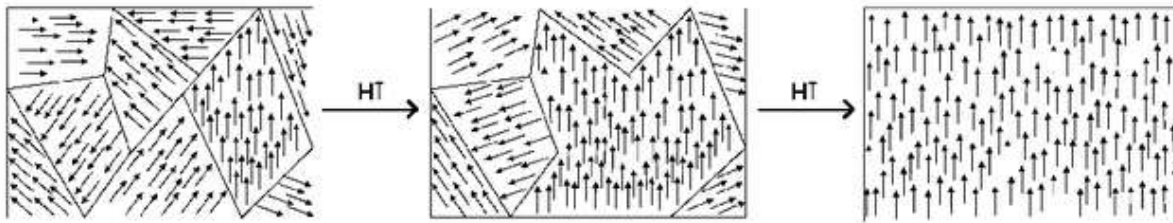
Feromagnet u prisutstvu magnetskog polja postaje magnetiziran te na njega djeluje sila u smjeru porasta magnetskog polja. Ali ako se feromagnet zagrijava, privlačna sila magnetskog polja na njega se postupno smanjuje i na dovoljno visokoj temperaturi (tzv. Curieova temperatura) potpuno nestaje. Kada se feromagnet ponovno ohladi, magnet ga ponovno privuče. Ovaj efekt reverzibilnog smanjenja privlačne sile magneta s porastom temperature može se popularno demonstrirati konstrukcijom tzv. Curieovog motora. Disk od feromagnetičnog materijala koji se može slobodno okretati oko svoje osi postavi se u magnetsko polje i zagrijava jedan njegov dio. Kad se taj dio dovoljno zagrije magnet će jače privlačiti nezagrijavani dio diska što će izazvati moment sile i rotaciju diska od hladnog dijela prema zagrijavanom dijelu.

Predmet ovog rada je proučavanje ove pojave u teoriji i praksi. Osnove magnetizma, privlačna sila magneta i njezina ovisnost o temperaturi bit će ukratko teoretski obrađene u poglavlju 2. Poglavlje 3 obrađuje više eksperimenata koji provjeravaju teoretske spoznaje, a uključuju i samu konstrukciju i demonstraciju Curieovog motora. U radu će biti korišten permanentni magnet zbog jednostavnosti rada s njim, a za feromagnetski materijal bit će korišten nikal, kod kojeg se efekt smanjenja sile zapaža na nižim temperaturama nego kod željeza, pa će time biti jednostavnije izvesti eksperimente. Rad će dodatno razmotriti je li i pod kojim uvjetima Curieov motor pogodan za primjenu u praksi.

## 2 Teorija

### 2.1 Osnovno o magnetizmu

Svaki je atom feromagneta magnetski dipol. Drugim riječima feromagnet je sastavljen od atoma od kojih svaki ima južni i sjeverni pol, što je posljedica neujednačenog broja elektrona u ljuskama. Unutar feromagneta atomi su podijeljeni u domene, tj. skupine atoma okrenutih u istom smjeru, složenih tako da se sile poništavaju. Kada se feromagnetski materijal nađe u magnetskom polju, svi atomi okreću svoj sjeverni pol prema južnom polu magneta, odnosno svoj južni pol prema sjevernom polu magneta. Zato magnet privlači feromagnete.<sup>[1]</sup>



Slika 1: Magnetske domene na nemagnetiziranom i magnetiziranom materijalu<sup>[2]</sup>

### 2.2 Privlačna sila magneta

Kad se feromagnetski materijal (npr. željezo ili nikal) nađe u magnetskom polju, on se magnetizira pod utjecajem tog polja i na njega djeluje sila. No ponašanje sile u magnetskom polju znatno je složenije od ponašanja sile u gravitacijskom ili električnom polju. U gravitacijskom polju sila djeluje na masu koja se nalazi u njemu, proporcionalna je s masom i jačinom polja i djeluje u smjeru polja. Isti je slučaj s djelovanjem sile na naboj u električnom polju. Za razliku od toga, u magnetskom polju sila na feromagnetski materijal djeluje u onom smjeru u kojem se magnetsko polje najviše povećava (magnetske silnice najviše zgušnjavaju) i proporcionalna je s tim povećanjem. Nadalje, sila privlačenja magnetskog polja proporcionalna je i s magnetizacijom feromagneta (što je opet posljedica samog polja). Magnetizacija feromagneta raste s porastom magnetskog polja, ali samo do neke mjere dok ne dođe do zasićenja, a ta se funkcija ne može izraziti matematičkom formulom. I magnetsko polje permanentnog magneta u prostoru poprima oblike koje nije moguće opisati jednostavnim matematičkim formulama (poput opadanja gravitacijskog polja s kvadratom udaljenosti) što ovo proučavanje čini još složenijim.

Matematička formula za izračun sile u magnetskom polju na feromagnet poprima općeniti oblik:

$\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$  pri čemu je:

- $\vec{B}$  gustoća magnetskog toka, ali ne jedna vrijednost nego složena vektorska funkcija koja za svaku točku u trodimenzionalnom prostoru daje veličinu i smjer gustoće magnetskog toka
- $\vec{m}$  je „magnetski moment“ koji se dobije prostornim integriranjem ranije spomenute „magnetizacije“  $\vec{M}$  preko cijelog feromagneta za kojeg se određuje sila

- $\nabla$  je tzv. „nabla operator“ – koji iz vektorske funkcije  $\vec{B}$  računa vektor sile  $\vec{F}$  temeljem promjena gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$  u prostoru, kao što je opisano ranije

To sve vrijedi ukoliko se feromagnetski materijal može aproksimirati točkom – veličina mu je dovoljno mala da su svi njegovi dijelovi u jednakom magnetskom polju  $\vec{B}$ . Ukoliko ta pretpostavka ne vrijedi, silu na feromagnetski materijal u magnetskom polju treba dobiti prostranim integriranjem svih njegovih elementarnih dijelova, što će u općem slučaju dati složenu silu – silu privlačenja prema magnetu, ali i moment sile koji tijelo zakreće. Ta se pojava lako može opaziti ako se feromagnetski materijal postavi u blizini magneta pod nekim kutem: magnet će ga privlačiti i ujedno ga zakretati.

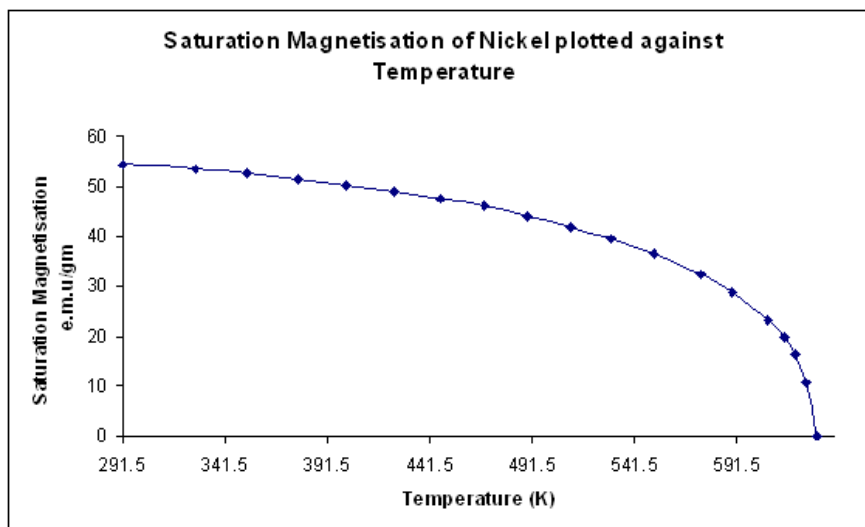
Osim toga, feromagnetski materijal u magnetskom polju sam djeluje na modifikaciju magnetskog polja pa je zbog tog povratnog utjecaja materijala u polju na oblik samog polja takvo proučavanje gotovo nemoguće izvesti analitički te je potrebno koristiti numeričke i empirijske modele.

Zbog ove razine složenosti pojave i kompleksne matematike koja je na razini magisterija tek pojedinih prirodnih i tehničkih fakulteta, u ovom radu će često biti potrebno odreći se jednog dijela egzaktnosti i zadržati na načelima i empirijskim rezultatima.

### 2.3. Promjena svojstva feromagnetskog materijala zagrijavanjem

Ako se feromagnetski materijal zagrijava, atomi se počinju jače gibati pri čemu mogu promijeniti smjer svoje magnetizacije. Atomi u magnetskim domenama (objašnjenima u 2.1) više nisu dosljedno posloženi u istom smjeru i efekt privlačenja od magnetskog polja slabi. Taj efekt se pojačava porastom temperature i na tzv. Curieovoj temperaturi (specifičnoj za svaki materijal) materijal u potpunosti gubi svoja magnetska svojstva.

Sljedeći graf prikazuje ovisnost zasićenja magnetizacije o temperaturi. To znači da magnetizacija  $\vec{M}$  (objašnjena u 2.2) na višim temperaturama prije dolazi u zasićenje.



Graf 1: ovisnost magnetizacije o temperaturi<sup>[3]</sup>

Curieova temperatura, iznad koje nikal više uopće nije moguće magnetizirati, iznosi 631 K (358 °C), ali se efekti slabljenja magnetskih svojstava zamjećuju i na znatno nižim temperaturama.

#### 2.4. Curie Point Engine

Motor koji radi na temelju tog efekta, tzv. „Curie Point Engine“ konstruiran je tako da se zagrijava nikal na jednoj strani magneta. Sila kojom magnet privlači zagrijavanu stranu diska se smanjuje dok sila na stranu koja se ne zagrijava ostaje ista. Zbog razlike sila disk se počinje vrtjeti prema grijanoj strani. Time novi dio hladnog diska dolazi pod plamenik i njegovim se zagrijavanjem efekt nastavlja. Disk se vrti relativno sporo tako da se grijani nikal stigne ohladiti dok ponovo dođe do magneta.



Slika 2: Model Curieovog motora<sup>[4]</sup>

Da bi efekt smanjenja sile zagrijavanjem došao do izražaja i omogućio vrtnju Curieovog motora, potrebno je da magnetsko polje bude dovoljno jako i/ili temperatura grijanog nikla dovoljno visoka. Važno je da je magnetizacija nikla na niskoj temperaturi viša od zasićenja magnetizacije na visokoj temperaturi.

## 3 Eksperiment

### Planiranje eksperimenta

U proučavanju ove pojave pojavljuje se čitav niz zanimljivih eksperimenata kojima bismo mogli provjeriti teoretske postavke. Svakako je najzanimljivije demonstrirati sâm motor, ali je za njegovo razumijevanje i računanje parametara potrebno napraviti još nekoliko jednostavnijih i pomoćnih pokusa. Pregled svih planiranih eksperimenata nalazi se u Tablici 1.

Br.	Eksperiment	Svrha
1	Mjerenje magnetskog polja permanentnog magneta	Utvrđivanje parametra magneta za provjeru ostalih koraka
2	Mjerenje ovisnosti privlačne sile magneta na nikl ovisno o udaljenosti od magneta	Provjera privlačenja nikla od magneta $\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$
3	Mjerenje ovisnosti privlačne sile magneta na nikl ovisno o temperaturi nikla	Provjera efekta smanjenja privlačne sile ovisno o temperaturi
4	Konstrukcija motora i demonstracija vrtnje	Demonstracija vrtnje
5	Mjerenje snage korištenog grijača	Račun iskoristivosti motora
6	Mjerenje trenja korištenog diska na konstrukciji	Račun iskoristivosti motora

Tablica 1: Planiranje eksperimenta

### 3.1. Mjerenje magnetskog polja permanentnog magneta

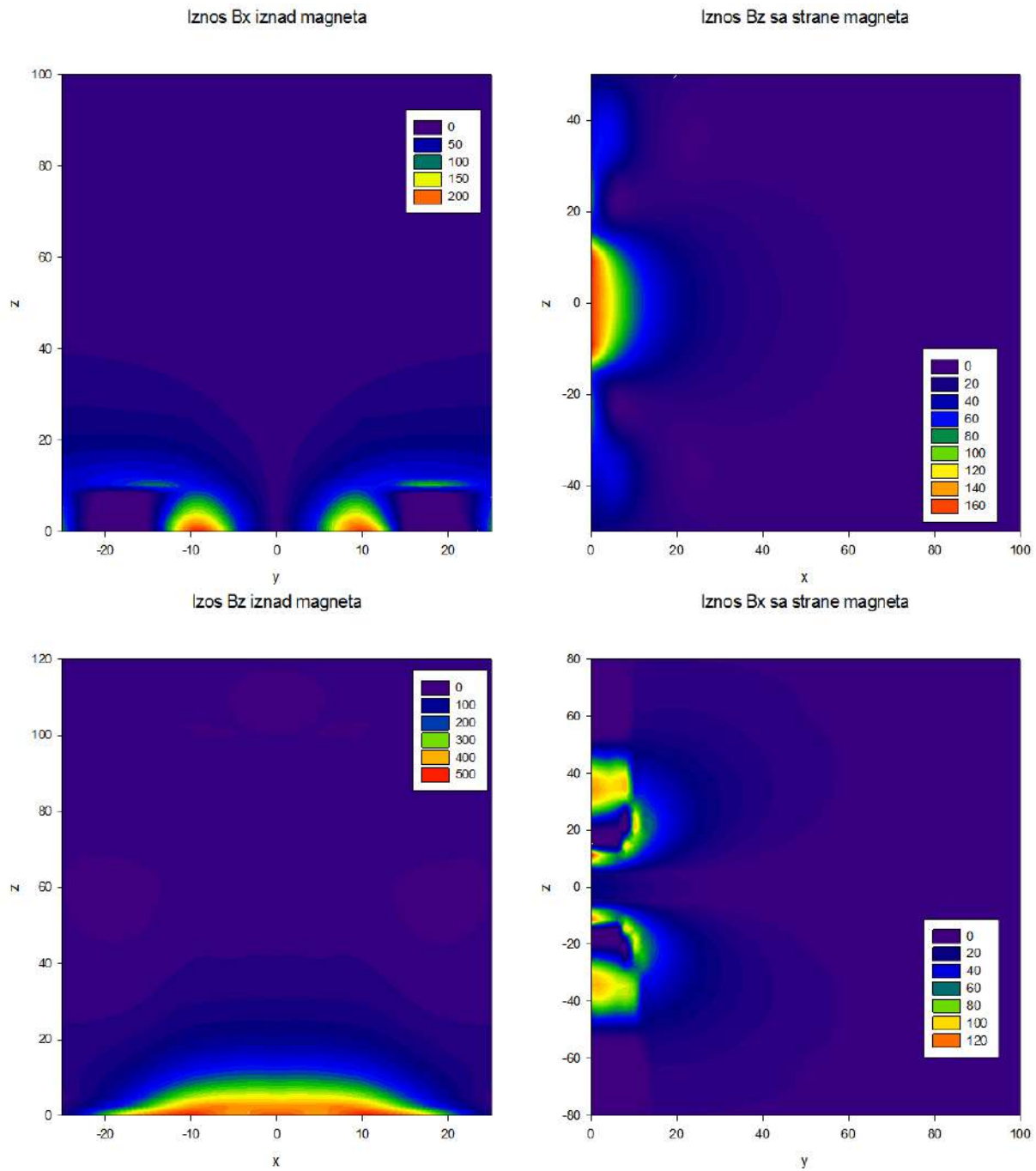
Za eksperiment je korišten što jači magnet kako bi efekt zasićenja magnetizacije došao do izražaja. Korišten je magnet je valjkastog oblika, visine 3 cm i baze promjera 3 cm. Jakost magnetskog polja u centru baze magneta je oko 0.5 T.

Jakost magnetskog polja izmjerena je Teslametrom F.W. Bell 5060 (Slika 3). Sonda mjerača je pričvršćena za uređaj koji čiji se pomaci kontroliraju pomoću računala. Polje je mjereno pomicanjem sonde po tri glavne osi magneta i jakost magnetskog polja izmjerena je u velikom broju točaka (gušće u blizini magneta). Postavljanjem sonde u različite smjerove izmjerena je jakost polja u smjeru okomitom na magnet te u smjeru usporednom s magnetom.



Slika 3: Teslametar

Tablice s izmjerenim rezultatima obrađene su pomoću programa SigmaPlot koji daje grafičke prikaze jakosti magnetskog polja.



Slika 4: Jakost magnetskog polja izmjerena pomoću sonde

Shodno objašnjenom potrebom za što jačim magnetskim poljem, za Curieov stroj najbolje je okrenuti magnet tako da je njegova os usmjerena prema disku a udaljenost što manja od diska.



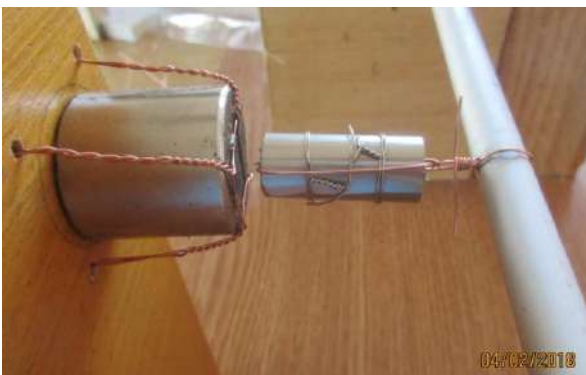
### 3.2. Mjerenje privlačne sile magneta na nikel u ovisnosti o udaljenosti

Silu u fizici se uobičajeno mjeri dinamometrom, ali taj instrument nije pogodan za mjerenje privlačne sile magneta. Sila privlačenja magneta raste sa smanjenjem udaljenosti od njega znatno brže nego što linearno raste sila opruge dinamometra koji se razvlači. U praksi je gotovo nemoguće precizno podesiti točku u kojoj su sila privlačenja dinamometra i magneta jednake. Ako je sila dinamometra samo malo veća, on će povući nikel do kraja prema sebi. Ako je malo manja, nikel će doći skroz do magneta. Osim toga, dinamometri uglavnom imaju čelične (feromagnetične!) opruge što bi utjecalo na mjerenje.

Za potrebe ovog mjerenja konstruiran je uređaj (Slika 5) koji će privlačnu silu magneta prenositi na elektronsku kuhinjsku vagu. Sila se prenosi preko preko aluminijske poluge jednakih krakova koja je u sredini učvršćena na kuglični ležaj kako bi trenje bilo zanemarivo. Elektronska kuhinjska vaga pokazuje masu, ali u zapravo mjeri silu koja se može lako izračunati iz „mase“ koju pokazuje vaga. Ta vaga ima minimalno pomicanje ovisno o sili, tako da je na taj način lako moguće osigurati da nikel stabilno stoji na onoj udaljenosti na kojoj se mjeri sila. Vaga ima četiri „noge“ na kojima stoji i svaka od njih vezana je na samostalnu kapacitivnu težinsku ćeliju („load cell“) čije težine se zbrajaju. Zato je dovoljno privlačnu silu magneta preko poluge prenijeti na jednu od četiri „noge“ (slika 6).



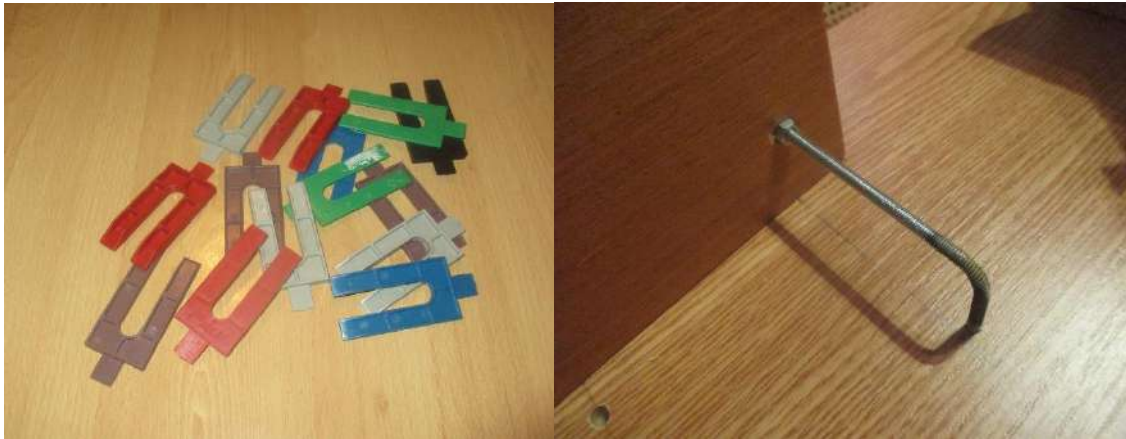
Slika 5: Uređaj za mjerenje privlačne sile



Slika 6: Magnet i nikel

Magnet i mjereni komadi nikla pričvršćeni su za mjerni uređaj pomoću tanke bakrene žice. Mjerenje udaljenosti između magneta i nikla napravljeno je pomoću kombinacije više stolarskih podmetača debljine 1-6 mm (Slika 7) koji su gurani u prostor između magneta i nikla tako da taman ne zapnu (debljina bakrene žice je uzeta u obzir dodavanjem na izmjeren razmak).

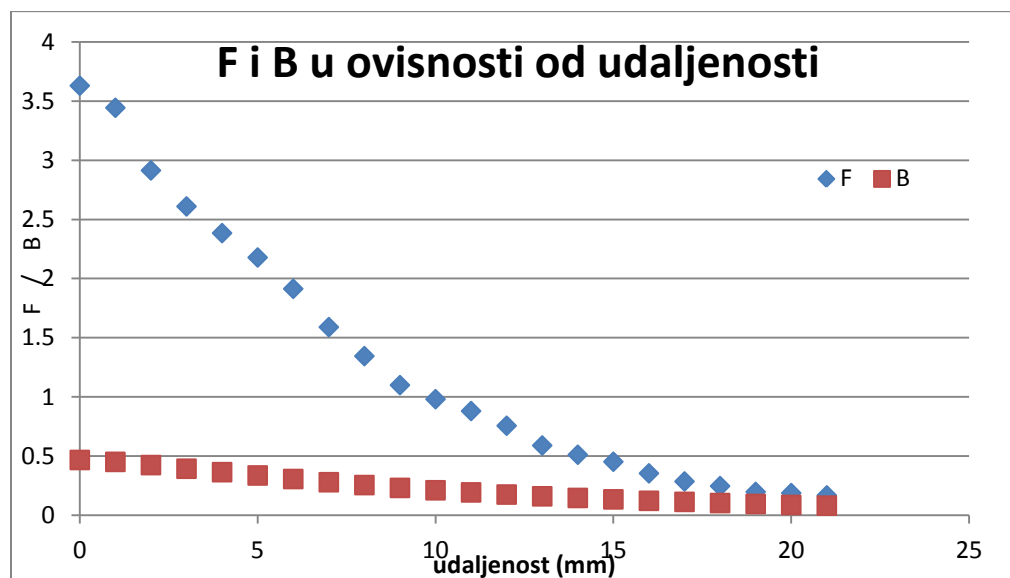
Udaljenost magneta precizno je podešavana vijkom s maticom koji ograničava hod daske na kojoj je pričvršćen magnet. (Slika 8)



Slika 7: Stolarski podmetači

Slika 8: Podešavanje razmaka

Izmjerena je sila na komad nikla od 2 g na različitim udaljenostima od magneta. Graf prikazuje silu  $\vec{F}$  i na istom dijagramu gustoću magnetskog toka  $\vec{B}$  izmjerenu u eksperimentu 3.1.



Graf 2: Ovisnost privlačne sile i gustoće magnetskog toka u ovisnosti o udaljenosti

Gruba provjera formule za silu privlačenja iz poglavlja 2.2:  $\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$

Prema vrijednostima za nikal (Graf 1 u 2.3), magnetizacija za nikal u zasićenju je 55 emu/g što po SI sustavu odgovara  $55 \text{ Am}^2/\text{kg}$ .<sup>[5]</sup>

Korišten komad nikla od 2 g imao bi (pod pretpostavkom zasićenja i konstantne magnetizacije) magnetni moment od  $m = 0,11 \text{ Am}^2$ .

Vrijednosti izmjerenog magnetskog polja B, temeljem kojih su nacrtane slike u poglavlju 2.1. daju na mjestu najveće gustoće magnetskog toka – u osi valjka u neposrednoj blizini magneta – promjenu B od oko 0,03 T po jednom milimetru ili 30 T/m.

Uvrštavanje u gornju formulu, uz aproksimaciju da su vrijednosti konstantne, daje rezultat za silu od oko 3,3 N što odgovara izmjerenim vrijednostima za najveću privlačnu silu u blizini magneta.

### 3.3. Mjerenje privlačne sile magneta na nikel u ovisnosti o temperaturi

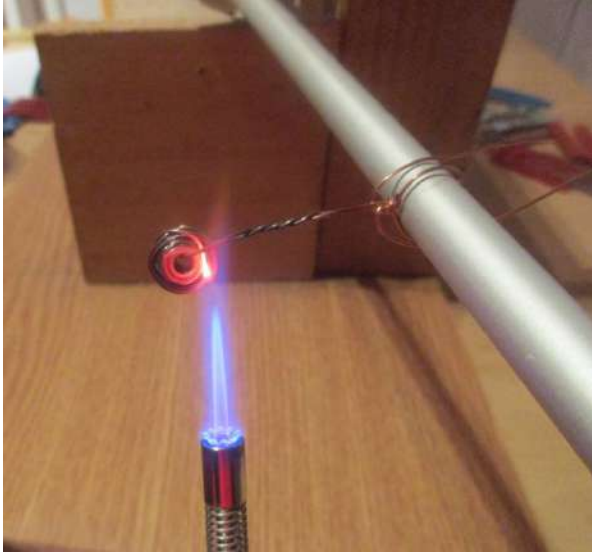
Nikal na kojem se vrši mjerenje treba biti što kompaktniji kako bi magnetsko polje B koje djeluje na nikal bilo što ujednačenije na cijelom komadu. Za potrebe ovog eksperimenta napravljen je kompaktan komad nikla mase 2 g od gusto motane niklene žice.

Ovisnost sile o temperaturi izmjerena je na maloj udaljenosti, na kojoj je magnetska privlačna sila velika, kako bi efekt promjene sile s temperaturom bio što uočljiviji. Pokazalo se da je prikladna udaljenost oko 2-3 mm od magneta do ruba nikla, što na sobnoj temperaturi daje silu od oko 3N.

Neodimijski magneti prestaju biti magnetični na temperaturi između 583 K i 673 K ovisno o kvaliteti materijala tako da je važno obratiti pažnju da magnet ne bude izložen plameniku.

Sila je mjerena pomoću iste opreme kao u eksperimentu 3.2. Taj uređaj omogućava i grijanje komada nikla plamenikom u zraku na sigurnoj udaljenosti od svega (Slika 9).

Temperatura je mjerena digitalnim termometrom sa sondom LH 666 190. (Slika 10).



Slika 9: Zagrijavanje nikla na plameniku



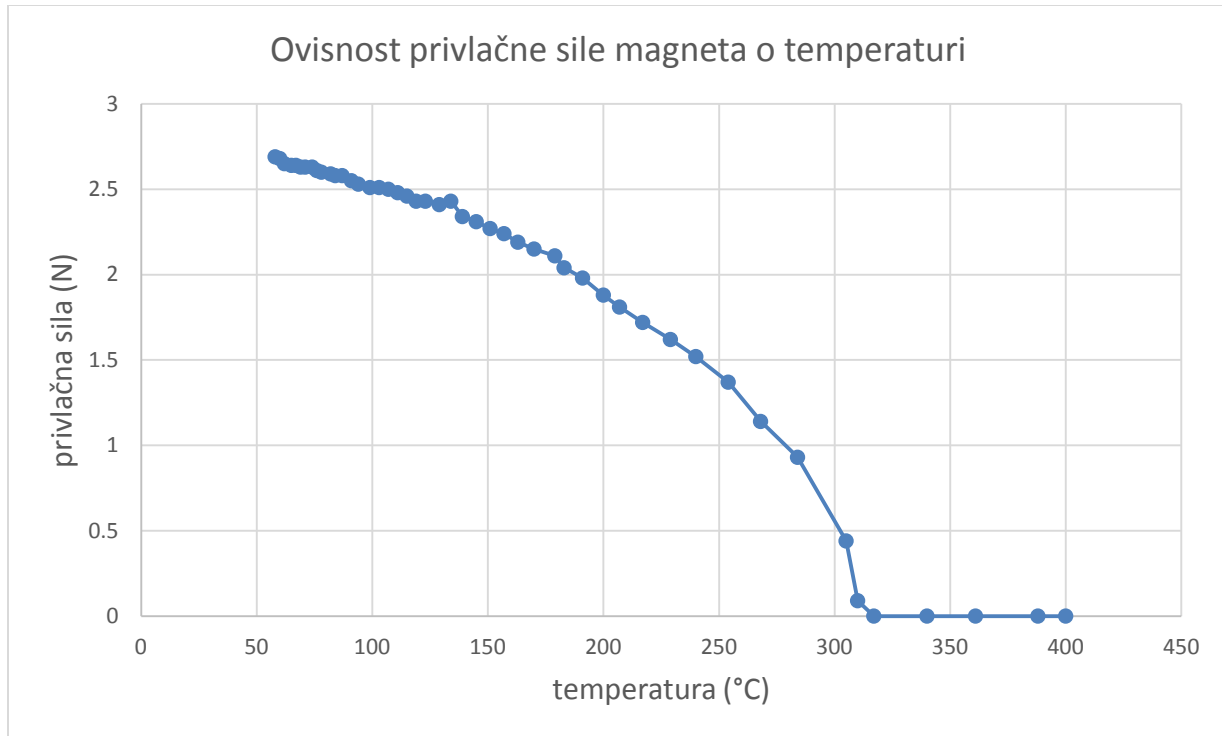
Slika 10: Uređaj za mjerenje temperature

Mjerenje temperature nikla pomoću sonde utječe na silu kojom nikal preko poluge djeluje na vagu, tako da nije moguće istovremeno precizno mjeriti silu i temperaturu. Taj problem je riješen tako što su napravljena dva istovjetna mjerenja: u prvom je mjerena promjena temperature u vremenu, držeći sondu na niklu (ne mjerivši silu). U drugom mjerenju je praćena promjena sile u vremenu bez doticanja nikla sondom. Oba mjerna uređaja su za vrijeme mjerenja snimana kamerom i na taj način su temperatura i sila povezane uzorkovanjem svakih 5 sekundi. Važno je bilo da se oba mjerenja obave na istom mjestu kako bi se materijal hladio jednakom brzinom, te na to da mjerenje počne od iste temperature – u ovom slučaju 400 °C.

Obzirom na moguće razlike temperature u sredini nikla i na površini napravljena su dva mjerenja. Mjerenja su pokazala malu razliku, a za interpretaciju rezultata je dalje korišten prosjek.

Rezultati mjerenja prikazani su na Grafu 3 koji ima vrlo sličan oblik kao i Graf 1 iz poglavlja 2.3 tako da je ovaj eksperiment vjerno reproducirao proučavanu pojavu.

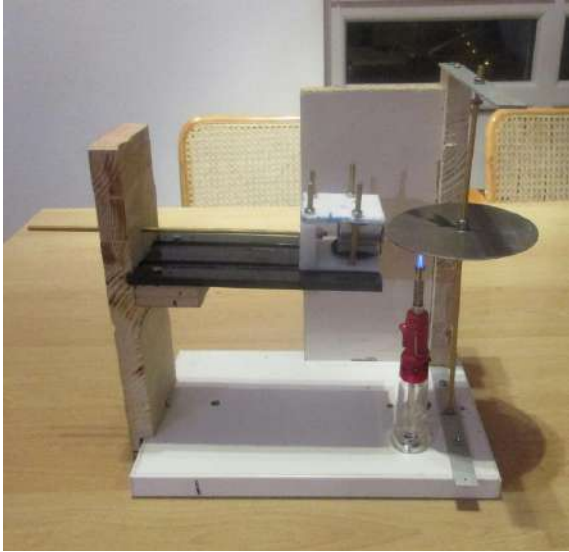
Rezultati ukazuju na nešto manju Curieovu temperaturu od teoretski očekivane. Sonda se također grije i hladi, temperatura nije ista na svim djelovima nikla te je sila koja djeluje na pojedine dijelove nikla različita. To je uzrok nepreciznosti ovog mjerenja, no ovakve su pogreške neizbježne.



Graf 3: Ovisnot privlačne sile magneta o temperaturi

### 3.4. Konstrukcija motora i demonstracija vrtnje

Curieov motor (Slika 11) konstruiran je od niklenog diska debelog 1 mm promjera 10 cm, plamenika i magneta. Disk je postavljen na kuglični ležaj, kroz koji je provučena navojna šipka. Potporna konstrukcija načinjena je od nemagnetičnih materijala: aluminijska, pleksiglasa, mesinga i drveta, a korištene su i matice od nehrđajućeg čelika koje nisu magnetične. Držać magneta napravljen je tako da se lako može podešavati udaljenost magneta od diska na optimalnu udaljenost: kako bi magnet bio što bliže disku zbog jačeg polja, a ne bi bio u doticaju s plamenom i izgubio magnetska svojstva. Magnet je fiksiran u držaču tako da se ne može pomicati, a trenje između njega i držača povećano je stavljanjem gume.



Slika 11: Curieov motor

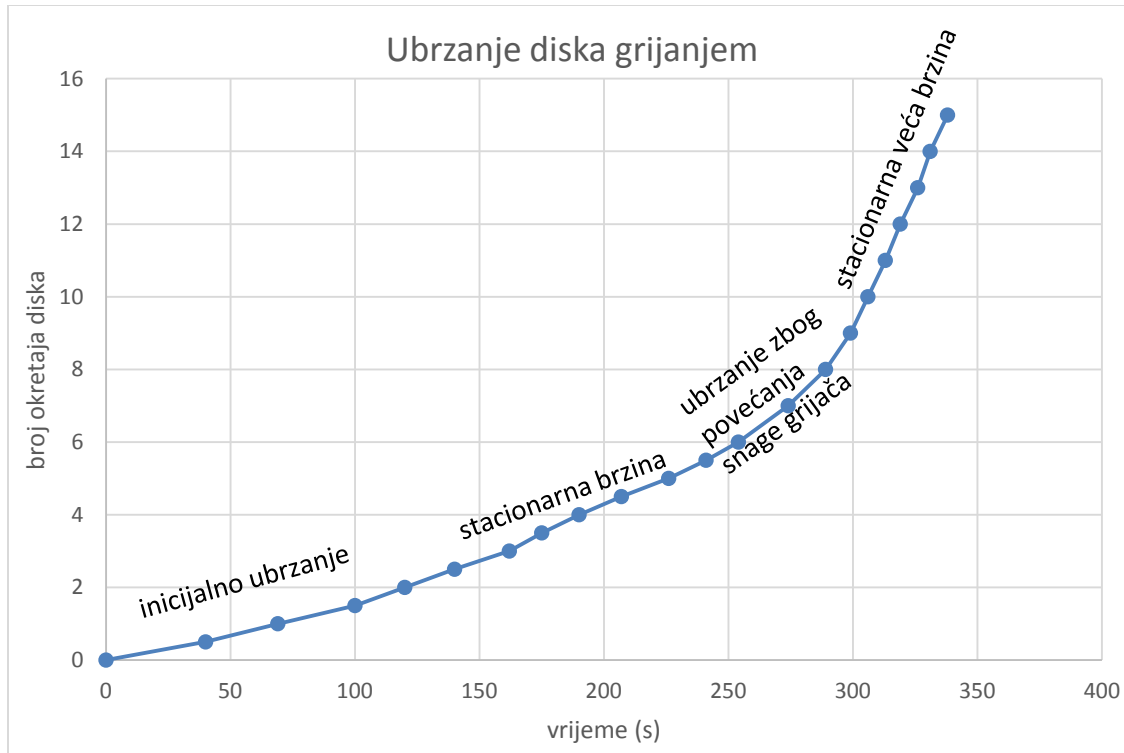
### Vrtnja diska

Disk se na početku vrti u „skokovima“. Neko vrijeme miruje pa se onda pokrene i ponovo zaustavi. Onda se nakon nekog vremena ponovo pokrene pa zaustavi i tako dalje. To se može jednostavno objasniti time što se disk vrti bez opterećenja. Kad se jedan dio dovoljno zagrije da se osjeti razlika u privlačnoj sili magneta disk se pokrene. Kad se ugrijani dio udalji od magneta sile su izjednačene, ali se disk i dalje neko vrijeme vrti zbog inercije dok ga ne zaustavi trenje. Nakon toga se postupak ponavlja.

Nakon što se disk zagrije vrti se brže i kontinuiranije. To objašnjava krivulja zasićenja (poglavlje 2.3): u području viših temperatura jednaka razlika temperature će davati veću razliku u zasićenju magnetizacije pa time i sile, dakle za jednaku razliku sile – onu koja je dovoljna da se suprostavi trenju diska – potrebna je manja razlika temperature.

Povećanjem snage grijača motor se vrti brže. To je zato što se komadi diska brže zagriju na temperaturu koja je dovoljna da se osjeti efekt razlike sila.

Na Grafu 4 prikazan je primjer vrtnje diska. Počinje se vrtjeti sa sobne temperature, a zatim se vidi kako efekt zagrijavanja utječe na povećanje brzine. Nakon što se brzina stabilizira, povećamo snagu grijača, nakon čega disk ponovno ubrzava i dostiže višu stacionarnu brzinu.



Graf 4: Ubrzanje diska sa zagrijavanjem

### 3.5. Mjerenje snage korištenog grijača

Za određivanje snage grijača korištene su dvije metode.

#### Prva metoda:

Prva metoda je određivanje snage grijača pomoću mjerenja povećanja temperature zagrijavane vode. Instrument za mjerenje temperature AXIO MET AX7510 (Slika 12) može vrlo precizno određivati i temperaturu vode. Voda sobne temperature zagrijana je za oko 4 °C. Početna temperatura bila je približno jednaka sobnoj kako bi sustav bio u ravnoteži s okolinom, tj. da se ne gubi energija na okolinu. Plamen je relativno malen u odnosu na površinu posude. Posuda je željezna.

Potrebno je paziti da grijač bude podešen na jednaku jačinu plamena kao što se koristi i u pokusu s vrtnjom diska.



Slika 12: Zagrijavanje vode, uređaj za mjerenje temperature

Srednje vrijednosti mjerenja:

Vrijeme zagrijavanja: 229 s

Početna temperatura: 22.5 °C

Konačna temperatura: 26.1 °C

Specifični toplinski kapacitet vode: 4186 J/kgK

masa vode: 0.80 kg

Specifični toplinski kapacitet posude 450 J/kgK

masa posude: 0.35 kg

Snaga grijača:

$$P = \frac{(m_{\text{vode}} \cdot c_{\text{vode}} + m_{\text{posude}} \cdot c_{\text{željeza}}) \cdot (T_2 - T_1)}{t}$$

$$P = 550W$$

Druqa metoda:

Druga metoda je određivanje snage grijača pomoću količine i energetske vrijednosti potrošenog plina.

Masa potrošenog plina       $m = 3 \text{ g}$

Energetska vrijednost       $H = 47697600 \text{ J/kg}$



$$P = \frac{E}{t} = H \cdot \frac{m}{t}$$

$$P = 624 \text{ W}$$

Snaga izračunata preko energetske vrijednosti plina je nešto veća nago ona dobivena zagrijavanjem vode. To je stoga što dolazi do gubitaka topline, ne prevelikih, no utječu na mjerenja. Prvu izmjerenu snagu je prikladno uzeti kao snagu koju nikal dobije od grijača, obzirom da plamenik na sličan način (sa sličnim gubicima) zagrijava i posudu s vodom i nikal. Za račun iskoristivosti korektno je uzeti svu utrošenu snagu od izgaranja plina.

### 3.6. Određivanje trenja diska

Za početak valja istaknuti da, obzirom da se radi o motoru, sve pojave treba razmatrati, mjeriti i računati u „svijetu“ kružnog gibanja. Dakle umjesto sile trenja tu je moment sile trenja, umjesto akceleracije kutna akceleracija itd.

Moment trenja određen je pomoću kutne akceleracije usporavanja diska. Disk je sniman kamerom i pregledan usporeno okvir po okvir. Na taj način su položajima crte na disku (oko položaja punog kruga) pridruženi prijedeni kutni put  $\theta$  u ovisnosti o vremenu  $t$ . Snimanje je rađeno na malim brzinama, obzirom da se i motor vrti sporo i pretpostavljen je konstantan moment trenja i jednoliko usporeno kružno gibanje po formuli:

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{\alpha}{2} \cdot t^2$$

Programu Wolfram Mathematica pomoću naredbe „FindFit“ potvrđuje kvadratnu funkciju i nalazi kutno ubrzanje  $\alpha$ .

$$\alpha = 3.56 \text{ rad/s}^2$$

Moment inercije temeljem dimenzija i gustoće niklenog diska iznosi:

$$I = \frac{m \cdot r^2}{2}$$

$$I = 8.74 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

Minijaturni ležaj u sredini ima zanemariv moment inercije, odnosno sličan nedostajućem dijelu nikla. Rezultat za moment sile trenja:

$$M = I \cdot \alpha$$

$$M = 3.11 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}$$

## 4 Diskusija

### 4.1. Konstrukcija Curieovog motora u praksi

Motor konstruiran za potrebe ovog rada demonstrira proučavani efekt, konstruiran je prema uputama iz zadatka i napravljen krajnje jednostavno. Ako bi cilj bio napraviti što bolji Curieov motor trebalo bi razmotriti nekoliko tehnoloških poboljšanja i uzeti u obzir ograničenja:

- Curieov motor nije pogodan za mala opterećenja jer se u tom slučaju vrti nejednolikom brzinom
- Zbog potrebe zagrijavanja Curieov motor može raditi jedino na malim brzinama
- Bilo bi bolje konstruirati Curieov motor kao obroč nego kao disk: na taj način bi se bolje iskoristavalo grijanje – toplina se ne bi rasipala na dijelove diska koji su udaljeniji od magneta pa stoga daju slabiju silu, a bliže su centru rotacije pa daju i slabiji moment
- Bilo bi bolje da motor radi u području viših temperatura – što bliže Curieovoj točki: na taj način se za istu razliku temperatura (uloženu toplinsku energiju) može dobiti veća razlika sila pa time i veći moment
- Potrebno je magnet što više približiti disku, ali paziti da se ne uništi zagrijavanjem
- Ovakav motor ima znatne gubitke zato što je nikal dobar vodič topline i nije moguće grijati samo jedan dio. Tu bi pomogla konstrukcija diska (obruča) od više segmenata koji bi bili međusobno odvojeni toplinskom izolacijom
- Ako bi motor radio na višim temperaturama trebalo bi razmotriti i hlađenje diska (to bi dalo veći moment, ali manju iskoristivost)
- Kao i kod svih toplinskih strojeva trebalo bi razmotriti mogućnost da se izgubljena toplinska energija dalje koristi

### 4.2. Moguća iskoristivost Curieovog motora

Iskoristivost motora koji je konstruiran u ovom radu je neznatna. Plamenik predaje disku snagu od oko 550W (poglavlje 2.3).

Korisna snaga se može izračunati kao  $P = M \cdot \omega$  što uz izmjerene parametre:

Moment trenja u praznom hodu (vidi 3.6)	$M = 3,11 \cdot 10^{-4}$
10 s za jedan krug	$\omega = 0,628 \text{ rad/s}$

daje tek neznatnih	$P = 0,195 \text{ mW}$
--------------------	------------------------

Bilo bi zanimljivo razmotriti kolika bi bila teoretska maksimalna iskoristivost Curieovog motora kada bi se maksimalno iskoristile sve mogućnosti i savršeno svladali svi tehnološki izazovi.

Analiza sila i rotacije diska je vrlo složena, obzirom da su pojedini komadići diska različito udaljeni od magneta i različite temperature. Zato je ovo razmatranje napravljeno na pojednostavljenom modelu stroja, koji će i dalje dati valjan odgovor na pitanje teoretski maksimalne korisnosti stroja u idealnim uvjetima izvedbe.

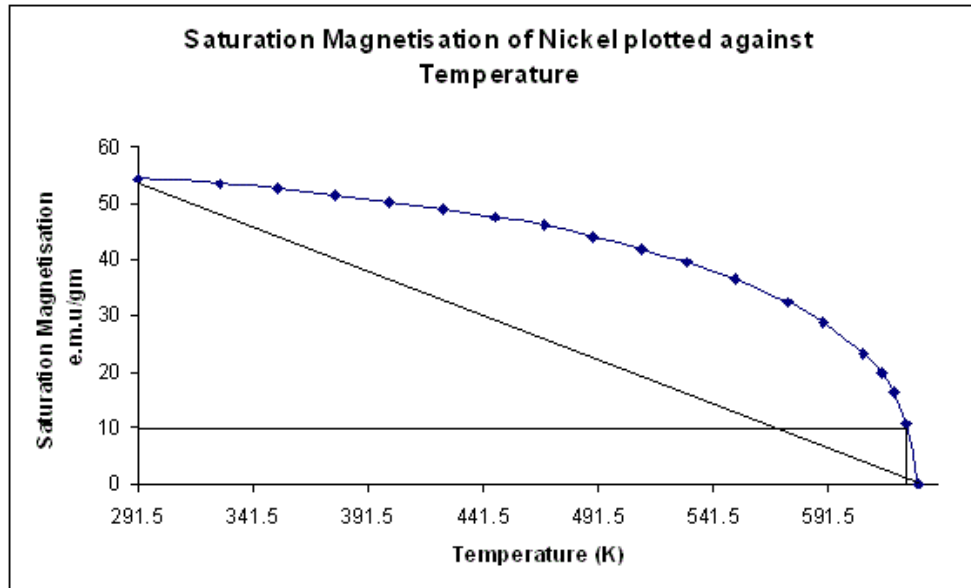
U ovom modelu nema diska koji rotira nego komad nikla kojeg permanentni magnet privlači i pritom daje mehaničku energiju. Kad se nikal zagrije može se vratiti u početni položaj ulažući manju energiju nego što je dobivena od magneta na nižim temperaturama nikla. Ako se nikal zagrije do Curieove temperature, može se udaljiti od magneta teoretski bez uloženog rada (samo svladavajući silu trenja).

Analogno s Carnotovim ciklusima toplinskog stroja s idealnim plinom, i u ovom Curieovom stroju je moguće definirati nekoliko faza u ciklusu koji se ponavlja (zbog jednostavnosti za početak je pretpostavljeno grijanje do Curieove temperature).

Faza	Opis	Uložena energija	Dobivena energija
1	Nikl je na temperaturi od 290 K, na početku ciklusa udaljen od magneta d. Magnet privlači nikl i pritom daje mehaničku energiju.	0	Integral sile $F = \nabla mB$ na putu pomicanja nikla (d) (m=magnetski moment)
2	Nikl se zagrijava do Curieove temperature od 627 K	$E = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$ (m=masa nikla)	0
3	Nikl se na temperaturi od 627 K (magnetska sila je 0) vraća u početni položaj iz faze 1	Teoretski 0	0
4	Nikl se hladi na temperaturu od 290K	0	0 (zanemarena mogućnost da se ta toplinska energija iskoristi drugdje)

Uz pretpostavku iz eksperimenta 3.2 uloženi rad bi bio  $0,002 \cdot 445 \cdot (627 - 290) = 300J$

Dobiveni rad bi bio integral sile po prijednom putu ili površina ispod krivulje  $F d$  iz eksperimenta 3.2 približno 0,03 J što je neznatna iskoristivost od 0,0001.



Graf 5: Ovisnost magnetizacije o temperaturi

Iskoristivost može biti znatno veća ako motor radi u području od nekoliko stupnjeva ispod Curieove točke, gdje je odnos između razlike temperatura i razlike zasićenja magnetizacije znatno povoljniji. Umjesto grijanja za  $627-290=337\text{K}$  da se dobije razlika od  $55\text{ Am}^2/\text{kg}$  povoljnije je grijati od oko 620 do 627K uz dobitak od  $10\text{ Am}^2/\text{kg}$ . Time se u odnosu na inicijalno razmatranje ulaže  $7/337$  energije a dobiva  $10/55$ , odnosno ukupna iskoristivost raste oko 9 puta, što je i dalje na skromnih 0,1%.

Iskoristivost bi se mogla dalje povećavati korištenjem jačeg magnetskog polja, ali to povećanje ne ide u nedogled, pogotovo ne u svijetu permanentnih magneta koji ne troše energiju.

Čini se da Curieov motor po iskoristivosti niti teoretski ne može konkurirati drugim vrstama motora.

## 5 Zaključak

Ovaj rad obradio je nekoliko zakonitosti magnetizma i pokazao praktične rezultate koji su u skladu s teorijom.

Magnetizam je zanimljiv, ali vrlo složen. Složenost dolazi od pojava čije tumačenje zadire u fiziku atoma i činjenice da dobar dio funkcija u magnetizmu nije moguće izraziti matematičkim formulama i analitički obrađivati.

Magnetizam, pogotovo elektromagnetizam je važno područje fizike i elektrotehnike s ogromnom primjenom u svakodnevnom životu kojeg ne možemo zamisliti bez elektromotora ili transformatora koji omogućavaju distribuciju električne energije.

Istraživanje Curieovog motora i svega što je potrebno da bi ga se razumjelo izuzetno je zanimljivo i odlična je nadopuna školskom gradivu koje te fenomene ne obrađuje.

Curieov motor nažalost po svojim karakteristikama (brzina vrtnje, snaga, iskoristivost, jednostavnost) ne može konkurirati ostalim motorima i strojevima, ali je jako lijep školski primjer na kojem se može puno naučiti i osjetiti uzbuđenje eksperimentalnog rada.

## 6 Literatura

[1-2] objašnjenje i slika: Carey R., Isaac E.D., *Magnetic domains and techniques for their observation*, The English University Press Ltd, London, (1966).

[3] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/curie-weiss.php?printable=1>

[4] [www.youtube.com](http://www.youtube.com)

[5] [http://www.ieeemagnetics.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118&Itemid=107](http://www.ieeemagnetics.org/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=107)

<https://www.quora.com/Why-does-a-magnet-only-attract-objects-made-of-iron-nickel-and-cobalt>

[http://www.ieeemagnetics.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118&Itemid=107](http://www.ieeemagnetics.org/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=107)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Force\\_between\\_magnets](https://en.wikipedia.org/wiki/Force_between_magnets)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation\\_\(magnetic\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic))

<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2163571>

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ogrjevna\\_vrijednost](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ogrjevna_vrijednost)