

# Piezoelektrični uređaji i njihove primjene

---

**Flegarić, Dorian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:769577>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dorian Flegarić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Dorian Flegarić

Zagreb, 2024.

**ZADATAK**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: <b>602 – 04 / 24 – 06 / 1</b>	
Ur.broj: <b>15 – 24 –</b>	

**ZAVRŠNI ZADATAK**

Student: **Dorian Flegarić**

JMBAG: **0035229808**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Piezoelektrični uređaji i njihove primjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Piezoelectric devices and their applications**

Opis zadatka:

Piezoelektričnost jest fizikalna pojava označena stvaranjem električnog naboja u materijalu a djelovanjem mehaničke sile. Uređaji s piezoelektričnim efektom kao elektromehanički pretvornici omogućuju primjene u kojima pretvaraju električnu energiju u mehaničku i obrnuto.

U radu je potrebno:

1. proučiti i opisati piezoelektrični efekt
2. istražiti i navesti neke od primjena piezoelektričnog efekta odnosno izvedbi uređaja
3. za odabranu primjenu, koncipirati tehničko rješenje.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 11. 7. 2024.  
**3. rok:** 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 15. 7. 2024.  
**3. rok:** 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Zoran Kunica

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici i asistentu mag.ing Denisu Mliviću, na pomoći i korisnim stručnim savjetima tijekom izrade završnog rada.

Želim zahvaliti svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na strpljenju potpori i razumijevanju tijekom izrade završnog rada i studiranja.

U Zagrebu, 19. rujna 2024.

Dorian Flegarić

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisan je piezoelektrični efekt, njegova primjena u raznim uređajima i područjima te moguća buduća primjena. Proveden je pokus kojim su pokazani postupci izrade kristala Rochellove soli i ispitivanja nastalih kristala na piezoelektrično svojstvo te opisano kako upotrijebiti dobiveni kristal za kontaktni mikrofoni.

Ključne riječi: piezoelektričnost, Rochellova sol, kvarc, PZT, kontaktni mikrofoni

## **SUMMARY**

This paper describes the piezoelectric effect, its application in various devices and areas, and possible future application. An experiment was conducted that showed the procedures for making Rochell salt crystals and testing the resulting crystals for piezoelectric properties, and described how to use the obtained crystal as a contact microphone.

Key words: piezoelectricity, Rochelle salt, quartz, PZT, contact microphone

## SADRŽAJ

ZADATAK .....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK .....	III
SUMMARY.....	IV
POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA .....	VII
POPIS SLIKA .....	VIII
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DIELEKTRIČNOST .....</b>	<b>3</b>
<b>3. FEROELEKTRIČNOST [7] .....</b>	<b>4</b>
<b>4. OSNOVE PIEZOELEKTRIČNOG EFEKTA .....</b>	<b>5</b>
<b>4.1. Polarizacija .....</b>	<b>5</b>
<b>4.2. Vrste piezoelektričnog efekta.....</b>	<b>7</b>
4.2.1. Direktan piezoelektrični efekt .....	7
4.2.2. Inverzan piezoelektrični efekt .....	8
<b>5. PIEZOELEKTRIČNI MATERIJALI.....</b>	<b>10</b>
<b>5.1. Prirodni piezoelektrični kristali .....</b>	<b>10</b>
5.1.1. Rochellova sol.....	10
5.1.2. Kvarc.....	11
<b>5.2. Sintetički piezoelektrični materijali.....</b>	<b>13</b>
<b>6. PRIMJENA PIEZOELEKTRIČNIH MATERIJALA .....</b>	<b>16</b>
<b>6.1. Primjena piezoelektričnih materijala kristalnim oscilatorima .....</b>	<b>16</b>
<b>6.2. Primjena piezoelektričnih materijala u medicini.....</b>	<b>18</b>



---

6.3. Piezoelektrični materijali u sensorima i aktuatorima .....	21
6.4. Piezoelektrični materijali u automobilskoj industriji.....	22
6.5. Implementacija piezoelektričnih materijala u energetske sustave.....	24
6.6. Primjena piezoelektričnog efekta kod mikrofona .....	25
7. POKUS.....	26
7.1. Eksperimentalni postav .....	26
7.2. Pokazivanje piezoelektričnih svojstva Rochellove soli .....	29
7.3. Zaključak nakon izvedenog pokusa.....	37
8. ZAKLJUČAK.....	38
9. LITERATURA .....	40

## POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
$\epsilon_r$	F/m	relativna dielektrična konstanta
$\epsilon_0$	F/m	dielektrična konstanta vakuuma
$\chi_e$		električna susceptibilnost
$D$	C/m <sup>2</sup>	vektor dielektričnog pomaka
$E$	V/m, N/C	jakost ukupnog električnog polja
$E_{pol}$	V/m, N/C	jakost električnog polja kojeg stvara polarizacijski naboj
$E_0$	V/m, N/C	jakost vanjskog električnog polja
$P$	C/m <sup>2</sup>	vektor polarizacije
PZT		olovni cirkonat–titanat
$T_c$	°C	Curiejeva temperatura
tj.		to jest

## POPIS SLIKA

Slika 1. Viennov dijagram dielektrika [7] .....	3
Slika 2. Mehanizmi polarizacije [9] .....	7
Slika 3. Direktan piezoelektrični učinak [12].....	8
Slika 4. Inverzan piezoelektrični učinak [12].....	9
Slika 5. Rochellova sol [17] .....	11
Slika 6. Kvarc [19].....	11
Slika 7. Polarne osi $\alpha$ -kvarca [20].....	12
Slika 8. a) Heksagonska prizma kvarca bez opterećenja b) Heksagonska prizma kvarca pod mehaničkim opterećenjem [20] .....	13
Slika 9. a) Kubična struktura BaTiO <sub>3</sub> iznad $T_c$ , b) Tetragonalna struktura BaTiO <sub>3</sub> ispod $T_c$ [24] .....	14
Slika 10. a) Kristalna struktura PZT-a iznad $T_c$ , b) Kristalna struktura PZT-a ispod $T_c$ [27] ..	15
Slika 11. Kristalni oscilator frekvencije 16 MHz [32].....	17
Slika 12. Konstrukcija kristalnog oscilatora [33].....	17
Slika 13. Ultrazvučni pretvarač [36].....	18
Slika 14. Konstrukcija ultrazvučnog pretvarača [37].....	19
Slika 15. Uređaj za piezo rinoplastiku [38].....	20
Slika 16. Piezoelektrični aktuator [41].....	21
Slika 17. Piezoelektrični senzor tlaka [45] .....	22
Slika 18. Niz PZT elemenata na unutrašnjosti gume [48] .....	23
Slika 19. Piezo-pametne ceste [50].....	24
Slika 20. Kristalni mikrofon [52] .....	25
Slika 21. Kalijev hidrogentartrat .....	27
Slika 22. Natrijev hidrogenkarbonat.....	27

---

Slika 23. Demineralizirana voda.....	28
Slika 24. Stakleni mjerni vrč otporan na toplinu.....	28
Slika 25. Filtar za kavu .....	28
Slika 26. Plastična posudica .....	29
Slika 27. Natrijev hidrogenkarbonat.....	30
Slika 28. Otopina kalijevog hidrogentartrata i demineralizirane vode u loncu s vodom.....	31
Slika 29. Dodavanje pet grama natrijevog karbonata u prethodnu otopinu .....	31
Slika 30. Burna reakcija nakon dodavanja natrijevog karbonata.....	31
Slika 31. Zasićena otopina.....	32
Slika 32. Filtriranje otopine .....	32
Slika 33. Stanje otopine jedan sat nakon prebacivanja u plastičnu posudu.....	32
Slika 34. Nastali kristali nakon 24 sata.....	33
Slika 35. Manji kristali Rochellove soli veličine graška .....	33
Slika 36. Kristal Rochellove soli kao sjeme .....	34
Slika 37. Veći kristali Rochellove soli.....	34
Slika 38. Očitanje multimetra nakon udaranja kristala.....	35
Slika 39. Spoj vodiča i mikrofonskog kabla.....	36
Slika 40. Spoj vodiča sa elektrodama u dodiru s kristalom.....	36
Slika 41. Izvedba kontaktnog mikrofona.....	37

## 1. UVOD

Riječ *piezo* dolazi od grčke riječi *piezein* što znači pritiskati [1]. Grci su primijetili da trljanjem jantar privlači druge tvari pa tako električnost dolazi od grčke riječi *elektron* što znači jantar [2]. Piezoelektrični efekt se smatra pojavom električnog naboja na površini kristala koji je elastično deformiran nekom vanjskom silom.

Prvu teoriju o postojanju piezoelektričnog efekta je postavio Coulomb 1815. godine u kojoj je pretpostavio da je moguće proizvesti elektricitet deformacijom krutog tijela. Zatim je 1820. godine Becquerel predložio pokuse u kojima bi se koristili kristali minerala. [3]

Braća Jacques i Pierre Curie su izveli navedene pokuse 1880. godine te se oni smatraju otkrivačima piezoelektričnog efekta. Braća Curie su se posebno zanimali za piroelektrični efekt koji je u to vrijeme poprilično poznat znanstvenicima. Piroelektrični efekt je pojava električne polarizacije nekih dielektričnih kristala pri jednolikoj promjeni temperature. Braću je zanimalo bi li vibracije ili pritisci mogli proizvesti električni naboj na površini kristala. Izgradili su prvi piezoelektrični kvarcni elektrometar, a kasnije su otkrili da postoji obrnuti piezoelektrični efekt koji se očituje kao pojava promjene oblika kristala tijekom primjenjivanja električne sile na kristal. [4]

Godine 1910. njemački fizičar Woldemar Voigt je objavio popis piezoelektričnih materijala i njihovih svojstava te je postavio matematičku teoriju kojom se kvantificirala količina proizvedenog električnog naboja tijekom primjene pritiska. Voigt je pružio potrebne podatke bitne za korištenje piezoelektričnog efekta u korisne svrhe. [4]

Prva tehnička primjena piezoelektričnog efekta je bila tijekom Prvog svjetskog rata. Francuski znanstvenik Paul Langévin je iskoristio kvarcova piezoelektrična svojstva da unaprijedi tehnologiju za podmornice. Proizveo je prvi uređaj koji može locirati podmornice u oceanima te se taj uređaj predstavlja kao prva sonarna tehnologija. [4]

Danas se piezoelektrični efekt koristi u mnogo važnih tehnologija te se piezoelektrični materijali nalaze u raznim potrošačkim uređajima.

U ovom radu žele se pokazati široke mogućnosti primjene piezoelektričnih materijala te uređaja koji se zasnivaju na piezoelektričnom efektu, a također i predstaviti vlastiti pokus za odabranu primjenu.

## 2. DIELEKTRIČNOST

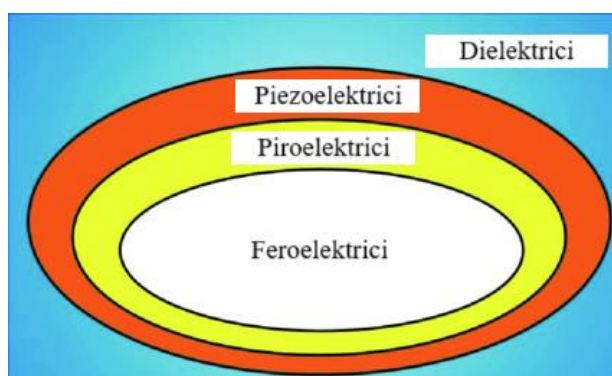
Dielektrici su tvari koje ne vode električnu struju, a mogu se objasniti kao vakuum i tvar koja sadrži zanemariv broj slobodnih elektrona i iona koji se mogu gibati pod utjecajem vanjskog električnog polja [5].

Kod piezoelektričnog efekta je bitno da se piezoelektrični materijal ponaša kao dielektrik (izolator). Piezoelektrični materijal je dielektrik koji može proizvesti razliku potencijala kada je podvrgnut mehaničkom naprezanju ili promijeniti oblik ako je na istog primijenjeni električni napon. [6]

Piezoelektričnost i feroelektričnost se javljaju kod kristala bez centralne simetrije. Postoji 21 kristal bez centralne simetrije u kojih se kod 10 njih javlja feroelektričnost dok se piezoelektričnost javlja u njih 20. [7]

Svi piezoelektrici su dielektrici, svi piroelektrici su također piezoelektrici, a svi feroelektrici su ujedno piroelektrici i piezoelektrici.

Veza između različitih vrsta dielektričnih materijala se može vidjeti na slici 1.



Slika 1. Viennov dijagram dielektrika [7]

### 3. FEROELEKTRIČNOST [7]

Feroelektrični materijali pokazuju feroelektrična svojstva što znači da pokazuju spontanu električnu polarizaciju bez utjecaja vanjskog električnog polja. Spontana polarizacija se pojavljuje kada dolazi do odvajanja središta pozitivnog i negativnog električnog naboja te je jedna strana kristala pozitivna a druga negativna. Smjer polarizacije se može promijeniti tako da se primjeni vanjsko električno polje. Svi feroelektrični materijali pokazuju piezoelektrična svojstva.

Takva svojstva materijala se javljaju samo ispod Curiejeve temperature  $T_c$  tj. ispod temperature faznog prijelaza. Iznad te temperature gubi se spontana polarizacija te takav materijal postaje paraelektričan materijal. Paraelektrični materijali se polariziraju utjecajem vanjskog električnog polja te gube polarizaciju kada se makne električno polje. Valasek je otkrio feroelektričnost 1921. godine na Rochellovoj soli. Nakon otkrića primijenio je pojam Curiejeva temperatura na feroelektrične materijale.



## 4. OSNOVE PIEZOELEKTRIČNOG EFEKTA

### 4.1. Polarizacija

Kada se dielektrični kristal nalazi u električnom polju, redistribuiraju se električni naboji unutar njegovih molekula na mikro razini te to rezultira makroskopskom polarizacijom. Pod polarizacijom dielektrika se smatra razmicanje negativnog i pozitivnog električnog naboja to jest dolazi do usmjeravanja čestica ili povećavanja električnog dipolnog momenta u smjeru vanjskog električnog polja. Jakost ukupnog električnog polja unutar dielektrika,  $E$ , određuje se sljedećim izrazom [8]:

$$E = E_0 + E_{\text{pol}} \quad (1)$$

gdje je  $E_0$  jakost vanjskog električnog polja, a  $E_{\text{pol}}$  označava jakost električnog polja kojeg stvara polarizacijski naboj. Sve te veličine mjere su V/m ili N/C.

Jakost električnog polja kojeg stvara polarizacijski naboj je ovisna o vrsti dielektrika te proporcionalna jakosti ukupnog električnog polja u dielektričnom materijalu:

$$E_{\text{pol}} = -\chi_e \cdot E \quad (2)$$

gdje je  $\chi_e$  električna susceptibilnost bezdimenzijska konstanta koja je značajka dielektričnog materijala, a njome se kvantificira utjecaj vanjskog električnog polja na polarizaciju. Polje polarizacijskog naboja je suprotno usmjereno od vanjskog električnog polja što se vidi po negativnom predznaku u (2).

Dok se vektor polarizacije  $P$  može definirati sljedećom jednačbom:

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot E \quad (3)$$

gdje  $\varepsilon_0$  predstavlja dielektričnost vakuuma,  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Vektor električne indukcije ili pomaka,  $D$ , istoga je smjera kao i vanjsko električno polje te služi za kvantificiranje utjecaja električnog polja na dielektrični materijal:

$$D = \varepsilon_0 \cdot E_0 . \quad (4)$$

Vektori  $D$  i  $P$  se očitavaju u ( $C/m^2$ ). Vektori  $E$ ,  $D$  i  $P$  opisuju stanje dielektrika, a njihova veza se može prikazati na sljedeći način:

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P . \quad (5)$$

Uvrštavanjem (3) u (5) se dobije:

$$D = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi_e) \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (6)$$

gdje  $\varepsilon_r$  označava relativnu dielektričnu konstantu:

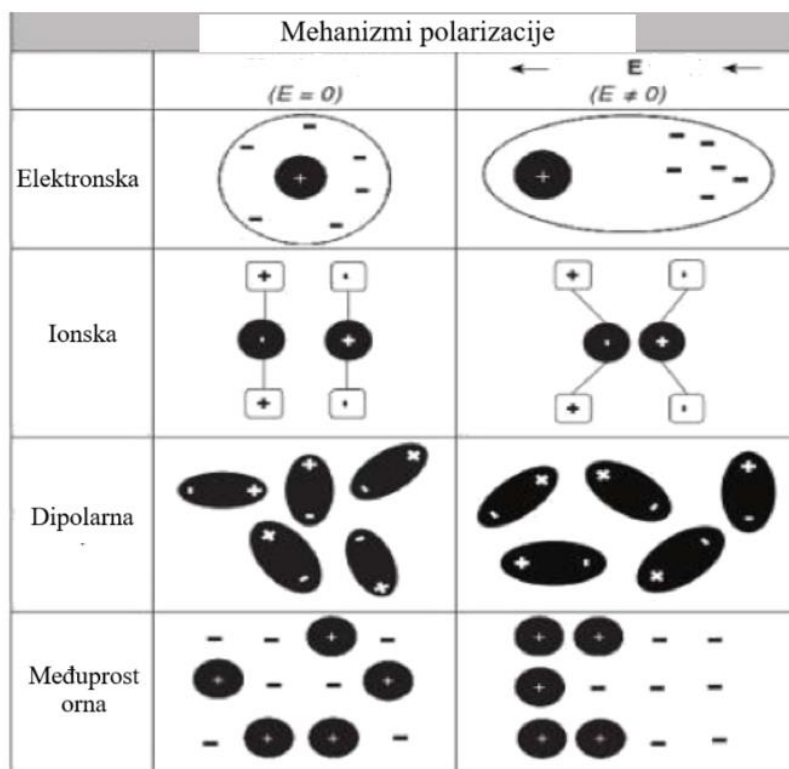
$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e . \quad (7)$$

Ukupna jakost električnog polja u dielektričnom materijalu se može izraziti iz jednadžba (5) i (6) na sljedeće načine:

$$E = \frac{D - P}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} = \frac{D}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} = \frac{E_0}{\varepsilon_r} . \quad (8)$$

Postoje sljedeće vrste polarizacija (Slika 2.):

1. elektronska polarizacija – dolazi do pomaka središta elektrona u odnosu na jezgru
2. ionska polarizacija – dolazi do velikog ionskog pomaka iona jer se kationi i anioni privlače u suprotnom smjeru
3. dipolarna (orijentacijska) polarizacija – dolazi do poravnjanja nasumce poravnatih dipola
4. polarizacija prostornog naboja (međuprostorna polarizacija) – dolazi do pomicanja nekih pozitivnih naboja na granicu zrna što rezultira njihovim skupljanjem.



Slika 2. Mehanizmi polarizacije [9]

## 4.2. Vrste piezoelektričnog efekta

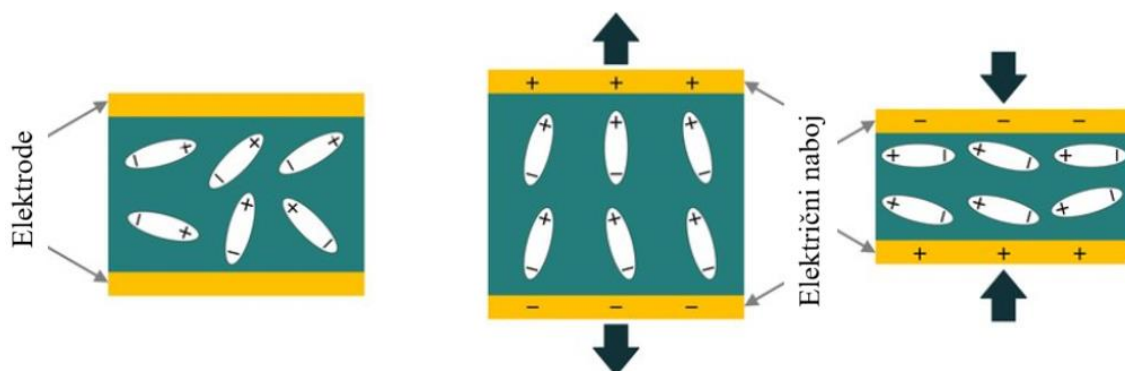
Svaki piezoelektrični materijal je dielektrik. Piezoelektrični efekt se može pojaviti na dva različita načina. Kod direktnog piezoelektričnog efekta dolazi do električnog odaziva tijekom mehaničkog naprežanja na materijal, a kod inverznog piezoelektričnog efekta dolazi do mehaničkog odaziva tijekom električne stimulacije. Da bi došlo do piezoelektričnog efekta kristal ne smije imati centralnu simetriju.

### 4.2.1. Direktni piezoelektrični efekt

Kristali su krute tvari koje imaju uređenu strukturu atoma i molekula i sastoje se od jednakih jediničnih ćelija. Većina kristala ima simetričnu jediničnu ćeliju no piezoelektrični kristali nemaju. Kod kristala s centralnom simetrijom piezoelektrični efekt nije moguć. Piezoelektrični

kristali u normalnom su stanju električno neutralni. Električni naboji su raspoređeni tako da pozitivan naboj na jednoj poziciji poništi negativan naboj u svojoj blizini. Ako bi se kristal naprezao vlačno ili tlačno došlo bi do deformacije strukture te bi se pozitivna i negativna središta atoma približila ili udaljila jedna od drugih. To uzrokuje poremećaj u ravnoteži pozitivnih i negativnih naboja tako da su pozitivni i negativni naboji na suprotnim vanjskim stranama kristala te dolazi do stvaranja električnog naboja na površini. Tada je materijal polariziran te se stvara električno polje. Na ovaj način dolazi do pretvorbe mehaničke energije u električnu. [10]

Piezoelektrični materijal se stavi između dvije metalne ploče koje djeluju kao elektrode. Elektrode su spojene na galvanometar. Kada se pritišće piezoelektrični kristal dolazi do stvaranja električnih naboja koji se pomiču prema krajevima gdje je naboj na kristalu suprotnog predznaka a u dodiru s elektrodama, koje zatim sakupljaju naboje što rezultira stvaranjem napona koji se može očitati na galvanometru. Kod direktnog piezoelektričnog efekta (Slika 3.) može se reći da se efekt ponaša kao malena baterija. [11]



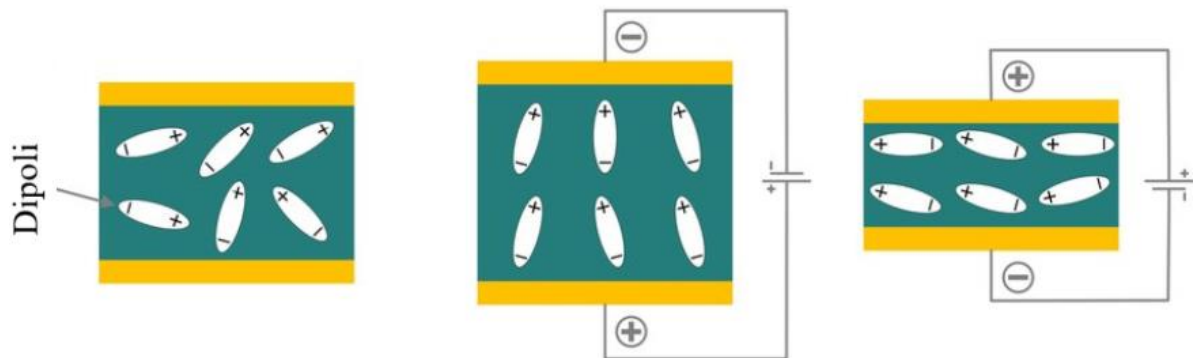
Slika 3. Direktan piezoelektrični učinak [12]

Gabriel Lippmann je 1881. godine je teorijski predložio obrnuti piezoelektrični efekt na temelju termodinamičkih principa. Braća Curie su eksperimentima potvrdili postojanje obrnutog piezoelektričnog efekta. [13]

#### 4.2.2. Inverzan piezoelektrični efekt

Suprotno direktnom piezoelektričnom efektu, kada bi atomi unutar kristala bili podvrgnuti električnoj stimulaciji, tijekom primjene električnog polja na piezoelektrični kristal oni bi se

pomicali da se uravnoteže što dovodi do pojave deformacije piezoelektričnog kristala. [11]  
Takva pojava se naziva inverzan piezoelektrični učinak (Slika 4.).



Slika 4. Inverzan piezoelektrični učinak [12]

## 5. PIEZOELEKTRIČNI MATERIJALI

Piezoelektrični materijal je dielektrični materijal koji omogućuje pretvorbe između mehaničke i električne energije. Postoje prirodni i sintetički piezoelektrični kristali.

### 5.1. Prirodni piezoelektrični kristali

Prirodni piezoelektrični materijali uglavnom imaju slaba piezoelektrična svojstva i danas nisu toliko često u uporabi. Neki od piezoelektričnih materijala koji se pronalaze u prirodi su kost, Rochellova sol, topaz, turmalin, berlinit, šećerna trska te kvarcni kristal. Kvarc je prvi piezoelektrični materijal korišten u elektroničkom uređaju. [14]

#### 5.1.1. Rochellova sol

Rochellova sol (kalijev natrijev tartrat tetrahidrat) (Slika 5.) pojavljuje se kao bijeli kristalni prah ili transparentni kristal. Rochellova sol pokazuje iznimna feroelektrična svojstva između gornje i donje Curiejeve točke (temperature). Gornja Curiejeva temperatura je na 24°C dok je donja Curiejeva temperatura na -18°C. Rochellova sol između tih temperatura pokazuje spontanu polarizaciju. [15]

Neke od primjena Rochellove soli su u [16]:

- elektroplatanju
- uklanjanju i čišćenju korozije s metalnih predmeta
- prehrambenoj industriji

- posrebnju ogledala
- piezoelektričnim uređajima kao piezoelektrični materijal.



Slika 5. Rochellova sol [17]

### 5.1.2. Kvarc

Kvarc ili silicijev dioksid (Slika 6.) jedan je od najrasprostranjenijih minerala u prirodi. Kemijska formula kvarca je  $\text{SiO}_2$ . On je proziran te se na Mohsovoj ljestvici tvrdoće nalazi na visokom mjestu pod brojem 7. Kristalna struktura sastoji se od uzorka atoma kisika i silicija koji se ponavljaju. [18]



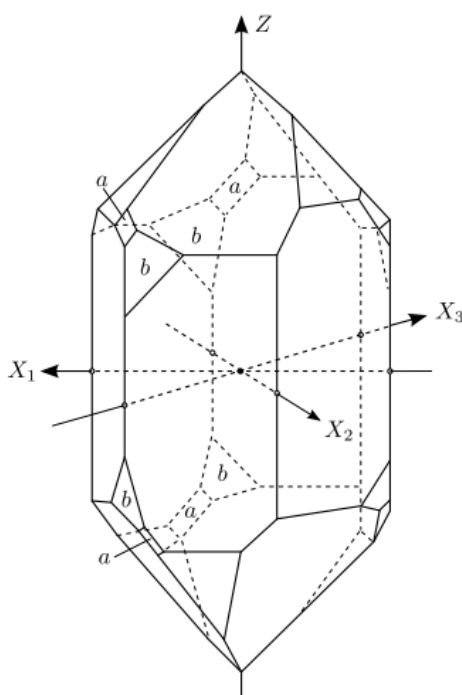
Slika 6. Kvarc [19]

Neka od svojstava koja dobiva s tom jedinstvenom strukturom jesu:

- otpornost na grebanje i trošenje zbog dobre tvrdoće
- visoka razina kemijske stabilnosti
- neporoznost
- dobra piezoelektrična svojstva.

Niskotemperaturna modifikacija kvarca se zove  $\alpha$ -kvarc i pojavljuje se u tom obliku do  $573^{\circ}\text{C}$ . Na  $573^{\circ}\text{C}$  se događa fazni prijelaz u  $\beta$ -kvarc ili visokotemperaturnu modifikaciju kvarca. Visokotemperaturna modifikacija kvarca je stabilna na temperaturama od  $573$  do  $870^{\circ}\text{C}$  te kristalizira u heksagonskom sustavu.

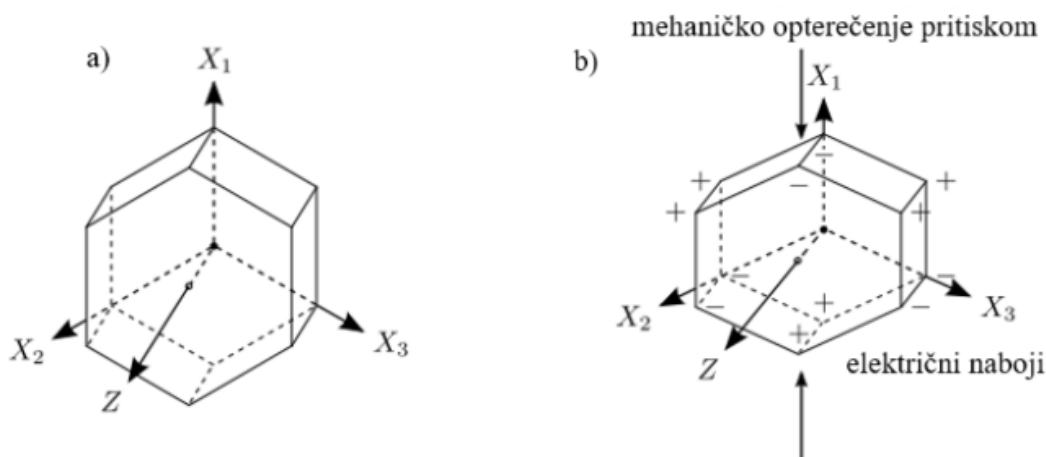
Za piezoelektrični efekt se koristi  $\alpha$ -kvarc koji pripada trigonskom kristalnom sustavu. Sastoji se od tri polarne osi (Slika 7.).



**Slika 7. Polarne osi  $\alpha$ -kvarca [20]**

Na slici 8. je prikazana heksagonska prizma koja je izrezana iz kvarcnog kristala i paralelna ravnini polarnih osi. Ako bi se vršio mehanički tlak na prizmu duž njezine osi  $X_1$ , električni naboji jednakih veličina, ali suprotnih predznaka, pojavili bi se na krajevima određenih polarnih osiju. Pojavio bi se piezoelektrični efekt. Heksagonska prizma kvarca bez mehaničkog opterećenja te sa mehaničkim opterećenjem prikazana je na slici 8. [20]





Slika 8. a) Heksagonska prizma kvarca bez opterećenja b) Heksagonska prizma kvarca pod mehaničkim opterećenjem [20]

## 5.2. Sintetički piezoelektrični materijali

Sintetički piezoelektrični materijali su danas češće korišteni zbog boljih piezoelektričnih svojstava te zato što se mogu optimirati za različite uporabe.

Sintetički piezoelektrični materijali se dijele na [21]:

- piezoelektrične keramike
- piezoelektrični polimeri
- piezoelektrični materijali na bazi kompozita

Najrasprostranjeniji piezoelektrični materijali su keramike.

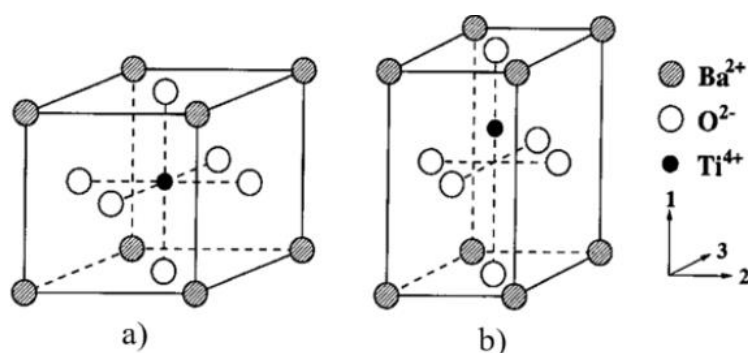
Istraživanja piezoelektričnih materijala su se uvelike ubrzala nakon Drugog svjetskog rata. Tijekom Drugog svjetskog rata je otkrivena prva piezoelektrična keramika naziva Barijev titanat, kemijske formule  $BaTiO_3$ . [22]

Barijev titanat je kao prah bijele boje, a kao kristal je proziran. Posjeduje feroelektrična, piroelektrična te piezoelektrična svojstva. Svoju primjenu nalazi u kondenzatorima, nelinearnoj optici te elektromehaničkim pretvaračima. [23]

Otkriće  $BaTiO_3$  ima bitnu ulogu u razvoju piezoelektričnih materijala te u njihovoj primjeni.

Godine 1947. Bernard Roberts je primijenio velik mehanički tlak za polarizaciju  $\text{BaTiO}_3$ , što je dovelo do stvaranja napona. Na osnovi toga u Japanu se istražuju primjene  $\text{BaTiO}_3$  u stvaranju ultrazvučnih pretvarača, visokofrekvencijskih pretvarača, senzora tlaka, filtra, rezonatora te mnogih drugih uređaja. [22]

Barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) ovisno o temperaturi može imati kubičnu, tetragonalnu, ortorombsku i romboedarsku kristalnu strukturu. Sve osim kubične strukture pokazuju feroelektrični učinak. Iznad Curiejeve temperature koja je  $120^\circ\text{C}$ ,  $\text{BaTiO}_3$  ima kubičnu strukturu u kojoj je titanov kation u središtu strukture te ne pokazuje spontanu polarizaciju zbog simetričnosti titanovog kationa u odnosu na atome kisika. Kada je temperatura ispod Curiejeve temperature, kristal prelazi u tetragonalnu strukturu u kojoj se titanov kation pomiče iz svojeg centralnog položaja što dovodi do nesimetrije koja omogućava spontanu polarizaciju (Slika 9.). Nastala polarizacija može promijeniti smjer primjenom vanjskog električnog polja. [24]



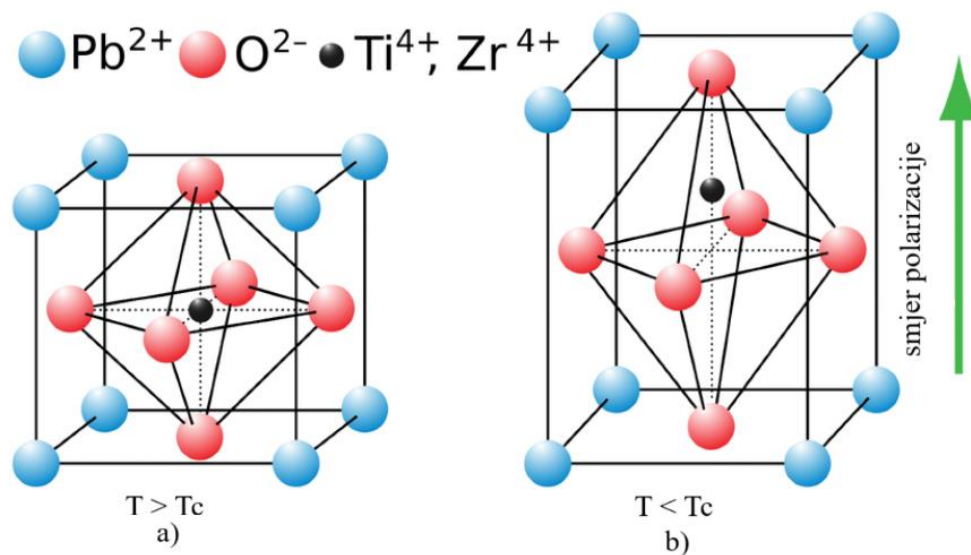
Slika 9. a) Kubična struktura  $\text{BaTiO}_3$  iznad  $T_c$ , b) Tetragonalna struktura  $\text{BaTiO}_3$  ispod  $T_c$  [24]

Barijev titanat je ubrzo zamijenio olovni cirkonat–titanat (PZT) zbog svoje veće osjetljivosti te više kritične temperature. PZT je danas najčešće korišten sintetički piezoelektrični materijal zbog svojih dobrih piezoelektričnih i feroelektričnih svojstava. Kako bi se proizveo PZT, prvo se izvažu prahovi olovnog oksida, titanijevog dioksida i cirkonijevog dioksida, zatim se prahovi miješaju, a nakon toga kalciniraju pa nastali prah miješa s organskim vezivom da se dobije željeni oblik PZT-a (disk, pločica). [25]

Da bi se aktivirala piezoelektrična svojstva primjenjiva u uređajima, PZT je kao i druge keramike, potrebno zagrijati ispod Curiejeve temperature i na njega djelovati vanjskim električnim poljem da bi se usmjerila polarizacija. Nakon prestanka djelovanja vanjskog električnog polja ostaje nastali smjer polarizacije. Ispod Curiejeve temperature PZT ima tetragonalnu strukturu što omogućuje spontanu polarizaciju, dok iznad Curiejeve temperature

nestaje spontana polarizacija (Slika 10.). Kao i kod Barijevogtitanata, smjer nastale polarizacije se može promijeniti utjecajem vanjskog električnog polja. [26]

Kada bi se polarizirani PZT doveo pod napon došlo bi do pomicanja iona što bi uzorkovalo promjenu dimenzija u obliku skupljanja ili širenja PZT-a.



Slika 10. a) Kristalna struktura PZT-a iznad  $T_c$ , b) Kristalna struktura PZT-a ispod  $T_c$  [27]

## 6. PRIMJENA PIEZOELEKTRIČNIH MATERIJALA

Piezoelektrični materijali se koriste u mnogo uređaja u raznovrsnim granama industrije te u raznim tehnologijama zbog jedinstvenih svojstava, poput toga da mogu pretvoriti mehaničku energiju u električnu i obrnuto.

Neke od glavnih primjena piezoelektričnih uređaja su u [28]:

- kristalnim oscilatorima
- medicini
- senzorima i aktuatorima
- automobilskoj industriji
- energetske sustavima
- raznoj potrošačkoj elektronici.

### 6.1. Primjena piezoelektričnih materijala kristalnim oscilatorima

Najčešće primjene piezoelektričnih materijala u elektroničkim uređajima su u kristalnim oscilatorima.

Oscilatori se nalaze u većini uređaja koji se danas koriste. Oscilator je sklop koji daje izmjenični napon na izlazu bez ulaznog signala. Glavni zadatak oscilatora je dati periodični izmjenični napon ili struju određene frekvencije. [29]

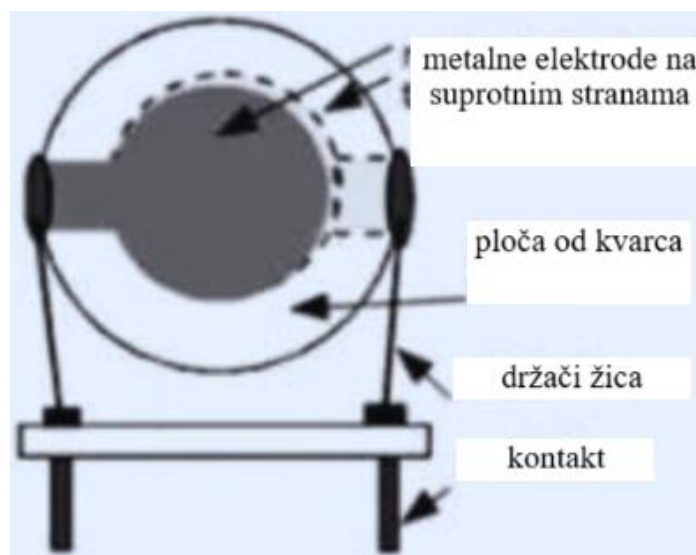
Izvedbe oscilatora se razlikuju prema grani povratne veze te mogu biti RC oscilatori, LC oscilatori te oscilatori s kristalom kvarca. [30]

Kristalni ili kvarcni oscilator (Slika 11.) je elektronički sklop koji koristi mehaničku rezonanciju vibracije kvarca da bi stvorio električni signal određene, precizne i stabilne frekvencije. [31]



**Slika 11. Kristalni oscilator frekvencije 16 MHz [32]**

Posebno izrezan kristal kvarca se nalazi između dviju ploča kondenzatora kao dodatan elektronički element koji radi na osnovi piezoelektričnog efekta (Slika 12.). [29]



**Slika 12. Konstrukcija kristalnog oscilatora [33]**

U uvjetima vanjskog električnog polja dolazi do mehaničke deformacije kristala te ukoliko se električno polje periodički mijenja dolazi do titranja kristala zbog njegovih piezoelektričnih svojstava. [29]

## 6.2. Primjena piezoelektričnih materijala u medicini

Danas je pojava uređaja koji koriste piezoelektrični efekt sve češća u medicini. Piezoelektrični materijali u medicini se koriste za ultrazvuk, za regulaciju dostave lijekova, u kirurgiji te za razne dijagnostičke senzore. [34]

Kod ultrazvuka piezoelektrični materijal u ultrazvučnim sondama pretvaraju električne signale u visokofrekventne zvučne valove koji kada prolaze kroz tijelo se reflektiraju od tkiva i organa te stvaraju sliku na ekranu. Piezoelektrični materijal na temelju inverznog piezoelektričnog efekta vibrira tako da stvara ultrazvučne valove te u isto vrijeme zabilježava mehaničku energiju zvuka i pretvaraju u električnu energiju. Uređaji koji pretvaraju jednu vrstu energije u drugu pomoću oba piezoelektrična efekta zovu se piezoelektrični pretvarači. [35]

Na trbuh pacijenta se primijeni gel koji poboljšava dodir između tkiva i glave sonde. Nakon toga piezoelektrični pretvarač stvara ultrazvučne valove koji se reflektiraju kada dođu u kontakt s tkivom, organima ili kostima, zatim pretvarač osjeti reflektirane valove te ih pretvara u električni signal koji zatim služi za stvaranje slike na ekranu. [35]

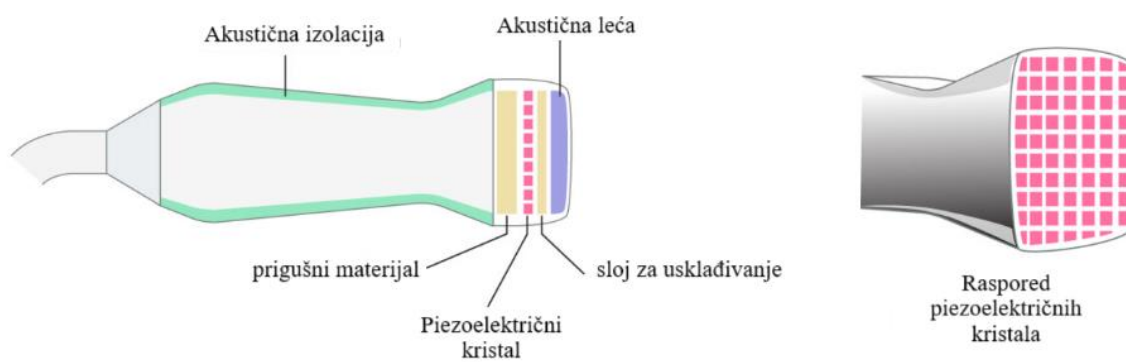


Slika 13. Ultrazvučni pretvarač [36]

Dijelovi ultrazvučnog pretvarača su (Slika 14.) [37]:

- akustična izolacija – sprječava nepoželjan utjecaj drugih zvučnih valova na pretvarač

- akustična leća – omogućuje bolje fokusiranje ultrazvučnih valova da bi se dobila bolja slika i rezolucija
- prigušni materijal – nalazi se iza kristala te potiskuje nepotrebne vibracije tako da ultrazvučni valovi imaju bolji prolazak što rezultira čistom slikom
- piezoelektrični kristal – služi za stvaranje slike temeljem piezoelektričnog efekta
- sloj za usklađivanje – osigurava učinkovitiji prijenos zvučnih valova u tijelo.



**Slika 14. Konstrukcija ultrazvučnog pretvarača [37]**

Piezoelektrični materijali se također koriste prilikom estetske kirurgije nosa. Postupak se zove piezo rinoplastika i to je novi oblik rinoplastike, koji za razliku od klasičnog upotrebljavanja čekića i sjekača za oblikovanje nosnih kostiju upotrebljava novu tehnologiju koristeći piezoelektrični efekt.

Piezo rinoplastika je drugi naziv za ultrazvučnu rinoplastiku, zato što se koriste piezoelektrični uređaji koji ultrazvučno vibriraju na visokim frekvencijama.

Piezoelektrični uređaji za rinoplastiku (Slika 15.) rade na frekvencijama od 25 do 29 kHz koje su optimalne za rezanje mineraliziranih tkiva (kosti) bez rizika da se oštete okolna meka tkiva kao što su koža, žile, živci te sluznica. Do oštećenja mekih tkiva dolazi na frekvencijama iznad 50 kHz. [38]



**Slika 15. Uređaj za piezo rinoplastiku [38]**

Tehnologija se temelji na inverznom piezoelektričnom efektu, zato što piezoelektrični materijal koji može biti kvarc ili keramika unutar uređaja stvara ultrazvučne vibracije kada je na njega primijenjena električna struja. Nastale ultrazvučne vibracije se prenose preko metalnog vrha na kost te dolazi do preciznog rezanja kostiju, dok okolna mekana tkiva vibriraju na istoj frekvenciji kao što vibrira vrh alata bez da dolazi do njihovog rezanja ili oštećenja. [39]

Piezo rinoplastika je sve popularnija opcija za estetsku operaciju nosa zbog brojnih prednosti u odnosu na klasičnu proceduru.

Neke od prednosti piezo rinoplastike jesu:

- precizno rezanje kostiju
- selektivno rezanje kostiju
- smanjeno oštećenje mekih tkiva
- umanjena bol nakon operacije
- otekline i krvarenja su značajno smanjena
- brži oporavak.

Potencijalni su nedostaci: moguće neželjeno zagrijavanje vrha alata koje zahtijeva hlađenje tijekom operacije, operacija je skupa zbog visoke cijene uređaja te potrebe zaiskusnim kirurškim timom. [40]

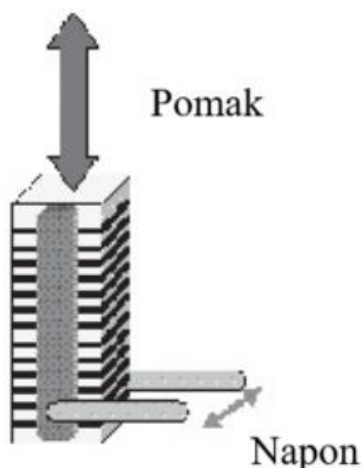


### 6.3. Piezoelektrični materijali u sensorima i aktuatorima

Aktuator je pretvornik koji pojačava ulaznu veličinu i pretvara je u mehanički rad. [41]

Piezoelektrični aktuator (Slika 16. je bitan dio u mnogim elektromehaničkim sustavima. Takav aktuator je pretvarač koji pretvara dobivenu električnu energiju u precizno kontrolirani fizički pomak pomoću inverznog piezoelektričnog efekta. Najčešće se koristi kada je potrebna fina izmjena alata pri obradi materijala, kod izmjena leća na satelitima i teleskopima. Također se koriste za kontrolu hidrauličnih ventila. [42]

Kada se napon primijeni na piezoelektrični aktuator, on generira malen kontroliran pomak.



Slika 16. Piezoelektrični aktuator [41]

Prednost piezoelektričnog aktuatora u odnosu na elektromagnetski aktuator se očituje u točnosti pomaka, nastaloj sili te brzini odaziva, a usto je energetski učinkovitiji. [42]

Senzori su pretvornici koji u dodiru s željenom mjernom veličinom daju izlazni signal koji je ovisan o njezinom iznosu.

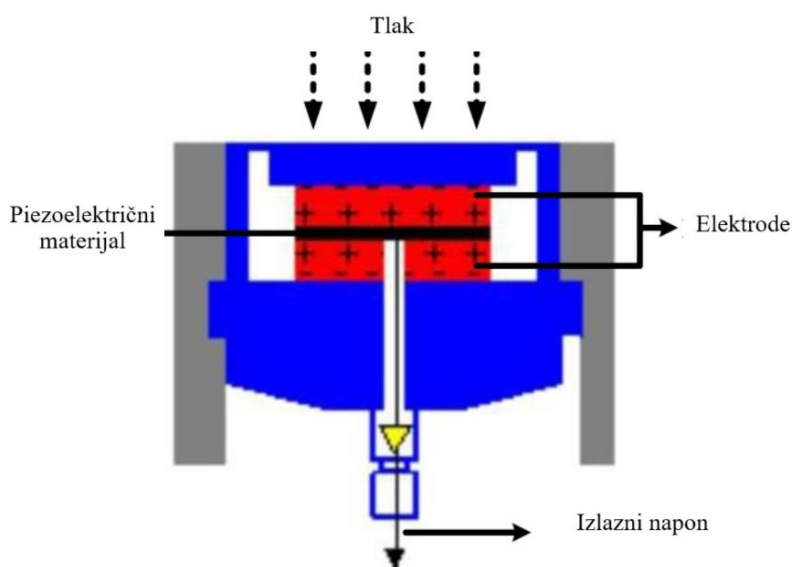
Piezoelektrični senzori su bitna stavka u svakodnevnim uređajima kao što su pametni telefoni, glazbeni instrumenti i mnogi drugi.

Piezoelektrični senzor je uređaj koji koristi piezoelektrični efekt tako da pretvara tlak, vibracije i temperaturu u električni naboj koji se zatim mjeri. Takvi senzori ne zahtijevaju puno energije te su pristupačni po cijeni. [43]

Neke od značajki zbog kojih su takvi senzori poželjni jesu:

- niska potrošnja energije
- male dimenzije
- otpornost na udarce
- izlaz visokog napona
- širok raspon frekvencija
- ne trebaju vanjski napon ili izvor struje.

Piezoelektrični senzor tlaka radi tako da kada membrana dođe u dodir s vanjskim silama ona prenosi mehaničku energiju na piezoelektrični materijal što uzrokuje deformaciju materijala te stvara izlazni električni naboj koji je proporcionalan vanjskoj sili (Slika 17.). Najčešći piezoelektrični materijali koji se koriste u senzorima i aktuatorima su PZT i kvarc. [44]



Slika 17. Piezoelektrični senzor tlaka [45]

#### 6.4. Piezoelektrični materijali u automobilske industriji

U automobilske industriji piezoelektrični materijali imaju široku primjenu u visokopreciznim senzorima, aktuatorima i sustavima za upravljanje motorom. Ti senzori se

primjenjuju u kontroli tekućina, kao pomoć pri parkiranju, služe za kontrolu tlaka u gumama te imaju još mnogo primjena. [46]

Koriste se kao senzori udarca u zračnim jastucima tako da piezoelektrični materijal vrlo brzo osjeti i reagira na naglu promjenu u ubrzanju i nagli udarac tijekom sudara, što rezultira brzim otvaranjem zračnog jastuka. [47]

Jedna od zanimljivijih primjena piezoelektričnog materijala u automobilskoj industriji je proizvodnja energije u gumama. Svaka baterija tako i one u autu imaju ograničenu trajnost. Uporaba piezoelektričnih materijala u gumama se pojavila s ciljem da bi se iskoristili obnovljivi izvori energije te smanjio štetan učinak na okoliš. [48]

Kao piezoelektrični materijal koristi se savitljivi PZT koji se pričvrsti na što veću površinu unutrašnjosti gume (Slika 18.).



**Slika 18. Niz PZT elemenata na unutrašnjosti gume [48]**

Tako prilikom kretanja vozila i dodira guma s cestom dolazi do deformacije gume a time i PZT-a unutar gume, što dovodi do kontinuiranog izvora energije zbog piezoelektričnih svojstava PZT-a. Energija dobivena na takav način se zatim koristi za napajanje raznih senzora bez potrebe za vanjskim izvorom napajanja. [48]

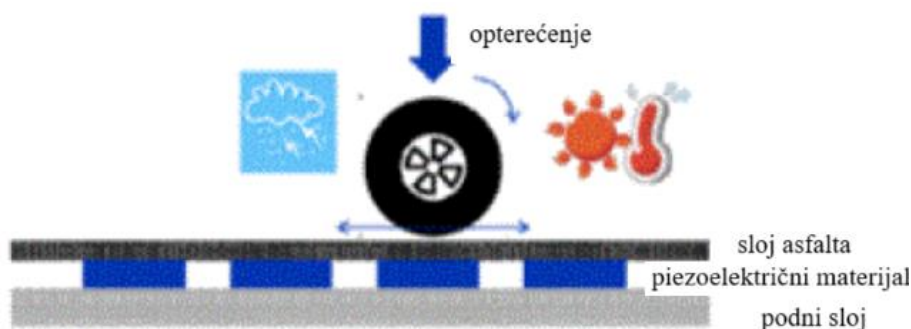
## 6.5. Implementacija piezoelektričnih materijala u energetske sustave

Pohranjivanje energije piezoelektričnim materijalima je nova i kompleksna tehnologija koja se konstantno razvija i unapređuje, a odnosi se na sustav sakupljanja mehaničke energije iz okoliša u obliku raznih vibracija i pritisaka te njenu pretvorbu u iskoristivu električnu energiju. Takvo sakupljanje energije je moguće zbog svojstva piezoelektričnih materijala da pretvore mehaničku energiju u električnu.

Neki od načina pohranjivanja energije su pomoću energije vjetra, hidraulike, solarne energije te termalne energije. [49]

Jedna od primjena piezoelektričnog materijala za pohranjivanje energije su pametne ceste.

Piezo-pametne ceste koriste svojstvo piezoelektričnog materijala da proizvedu električnu energiju tijekom kretanja vozila cestom (Slika 19.). Piezoelektrični kristali su ugrađeni u asfalt te kada vozilo prijeđe preko ceste stvara se pritisak koji deformira piezoelektrični materijal i nastaje električna energija koja se može prikupiti i koristiti u razne svrhe. [50]



Slika 19. Piezo-pametne ceste [50]

Neke su od primjena tako prikupljene energije [51]:

- napajanje javne rasvjete i znakova na cesti
- napajanje kamera i semafora
- moguće punjenje električnih vozila u budućnosti.

Piezoelektrični senzori se mogu ugraditi u ceste tako da mogu otkriti promjene koje se događaju u strukturi ceste kao što su razne pukotine te poslati signal sustavu za održavanje,

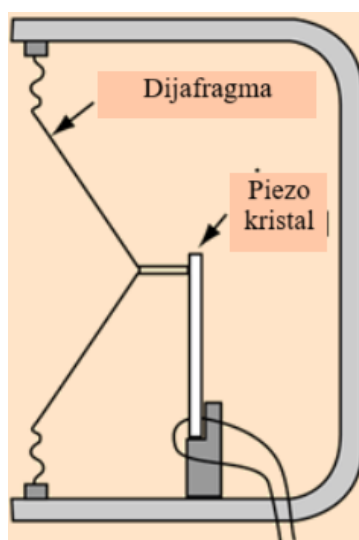
također mogu sakupljati informacije o količini vozila, težini vozila i brzinama vozila koja prolaze tom cestom. [51]

## 6.6. Primjena piezoelektričnog efekta kod mikrofona

Mikrofoni koji koriste piezoelektrični efekt se zovu kristalni mikrofoni.

Kristalni mikrofoni (Slika 20.) se sastoje od tankog izrezanog sloja piezoelektričnog kristala koji je povezan sa dijafragmom. Kada zvučni valovi dođu do dijafragme ona se zbog svoje fleksibilnosti deformira te vibrira i tako deformira kristal. Električni napon koji se stvara u kristalu je proporcionalan deformaciji.

U počecima se kao piezoelektrični kristal u mikrofoni koristila Rochellova sol zbog svoje izlazne snage, no zbog nedostataka kao što su krhkost i osjetljivost na vlagu, Rochellova sol zamijenjena je materijalima kao što su  $\text{BaTiO}_3$  i PZT. Takvi mikrofoni su čvrsti i jeftini, no prestali su se koristiti zbog svojih ograničenja, poput ograničenog frekvencijskog odziva, osjetljivosti na vlagu i zvuka loše kvalitete. Također, pojavili su se napredniji mikrofoni kao što su dinamički mikrofoni i kondenzatorski mikrofoni. [52]



Slika 20. Kristalni mikrofoni [52]

## 7. POKUS

U svrhu pokazivanja piezoelektričnog efekta na primjeru Rochellove soli proveden je pokus.

### 7.1. Eksperimentalni postav

Cilj ovog pokusa je dobivanje Rochellove soli iz kalijevog hidrogentartrata (eng. *cream of tartar*) i natrijevog karbonata, pokazivanje piezoelektričnih svojstva nastale Rochellove soli te pokazivanje tehničke izvedbe u smislu kontaktnog mikrofona.

Za pokus će se koristiti sljedeće:

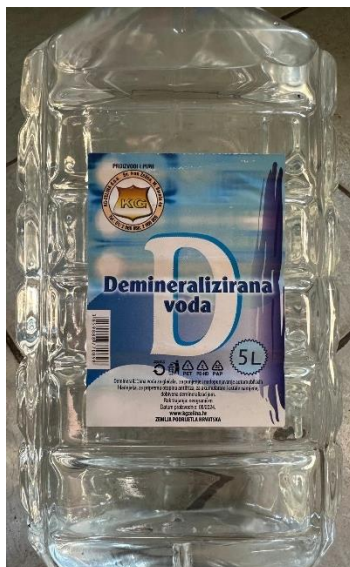
- Kemikalije:
  - 200 g kalijevog hidrogentartrata (Slika 21.)
  - 500 g natrijevog hidrogenkarbonata (soda bikarbona) (Slika 22.)
  - 240 ml destilirane vode (Slika 23.)
- Pribor:
  - stakleni mjerni vrč otporan na toplinu (Slika 24.)
  - filter za kavu (Slika 25.)
  - plastična posuda za odlaganje (Slika 26.)
  - pribor za miješanje (metalne žlice)
  - plinski štednjak
  - metalni lonci.



Slika 21. Kalijev hidrogentartrat



Slika 22. Natrijev hidrogenkarbonat



Slika 23. Demineralizirana voda



Slika 24. Stakleni mjerni vrč otporan na toplinu



Slika 25. Filtar za kavu





**Slika 26. Plastična posudica**

## **7.2. Pokazivanje piezoelektričnih svojstva Rochellove soli**

Za nastanak Rochellove soli potreban je natrijev karbonat. Natrijev karbonat se dobiva iz natrijevog hidrogenkarbonata.

Koraci za nastanak natrijevog karbonata iz natrijevog hidrogenkarbonata su sljedeći:

1. U metalni lonac je stavljeno 500 g natrijevog hidrogenkarbonata (Slika 27.).
2. Metalni lonac s natrijevim hidrogenkarbonatom zagrije se na srednje visokoj temperaturi te se povremeno miješa.
3. Promatra se oslobađanje ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i vodene pare ( $\text{H}_2\text{O}$ ) u obliku mjehurića.
4. Nakon što prestane oslobađanje plinova dobiven je natrijev karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

Dobiveni natrijev karbonat se odloži sa strane.



**Slika 27. Natrijev hidrogenkarbonat**

Koraci za stvaranje Rochellove soli su sljedeći:

1. U staklenom mjernom vrču se otopi 200 g kalijevog hidrogentartrata u 240 ml demineralizirane vode uz miješanje.
2. Stakleni vrč se stavlja u metalni lonac te se dodaje voda u lonac tako da prekrije 1/3 staklenog vrča (Slika 28.).
3. Na srednjoj vatri se zagrijava voda u metalnom loncu do 75°C.
4. Postepeno se dodaje oko pet grama natrijevog karbonata u otopinu, uz stalno miješanje (Slika 29.).
5. Promatranje nastale burne reakcije u obliku mjehurića (Slika 30.).
6. Nakon što reakcija prestane opet se dodaje pet grama natrijevog karbonata, uz miješanje, i tako se ponavlja sve dok se dodavanjem natrijevog karbonata ne prestane pojavljivati reakcija (Slika 31.).
7. Nastala zasićena otopina se filtrira filtrom za kavu u staklenu posudu te ostavi da se ohladi (Slika 32.).
8. Nakon što se ohladila, otopina se iz staklene posude prebacuje u plastičnu posudu (Slika 33.).
9. Plastična posuda s otopinom stavlja se na mjesto sa sobnom temperaturom i čeka se pojava kristala Rochellove soli (Slika 34.).



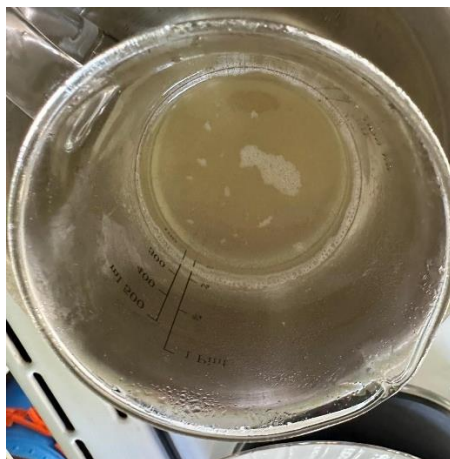
**Slika 28. Otopina kalijevog hidrogenkarbonata i demineralizirane vode u loncu s vodom**



**Slika 29. Dodavanje pet grama natrijevog karbonata u prethodnu otopinu**



**Slika 30. Burna reakcija nakon dodavanja natrijevog karbonata**



**Slika 31. Zasićena otopina**



**Slika 32. Filtriranje otopine**



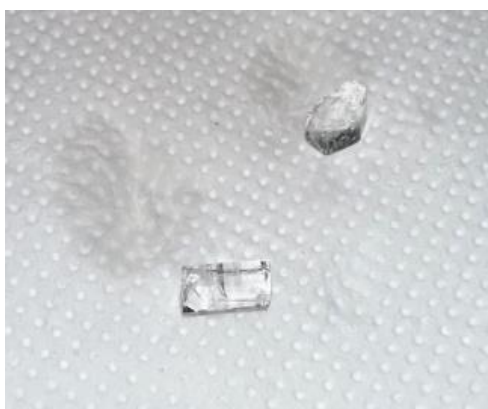
**Slika 33. Stanje otopine jedan sat nakon prebacivanja u plastičnu posudu**



**Slika 34. Nastali kristali nakon 24 sata**

Prilikom izvođenja eksperimenta potrebno je koristiti zaštitne naočale, rukavice te eksperiment provoditi u prozračenom prostoru.

Kristali koji su dobiveni nakon 24 sata nisu pogodni za pokazivanje piezoelektričnih svojstava zbog svoje male veličine. Razlog nastanku velikog broja malih kristala može biti da je kristalizacija nastupila prebrzo, zbog prebrzog hlađenja, ili zato što je otopina prezasićena pa brzo nastaju mali kristali Rochellove soli. Izdvojena su dva veća kristala da posluže kao sjeme te odložena sa strane (Slika 35.). Otopina s kristalima je zagrijana u mikrovalnoj pećnici kako bi se svi kristali otopili. Zatim se otopina stavlja u dvije čaše te se u svaku stavi po jedan odvojeni kristal (Slika 36.). Nakon 24 sata dobiveni su veći kristali koji su pogodni za ispitivanje (Slika 37.).



**Slika 35. Manji kristali Rochellove soli veličine graška**





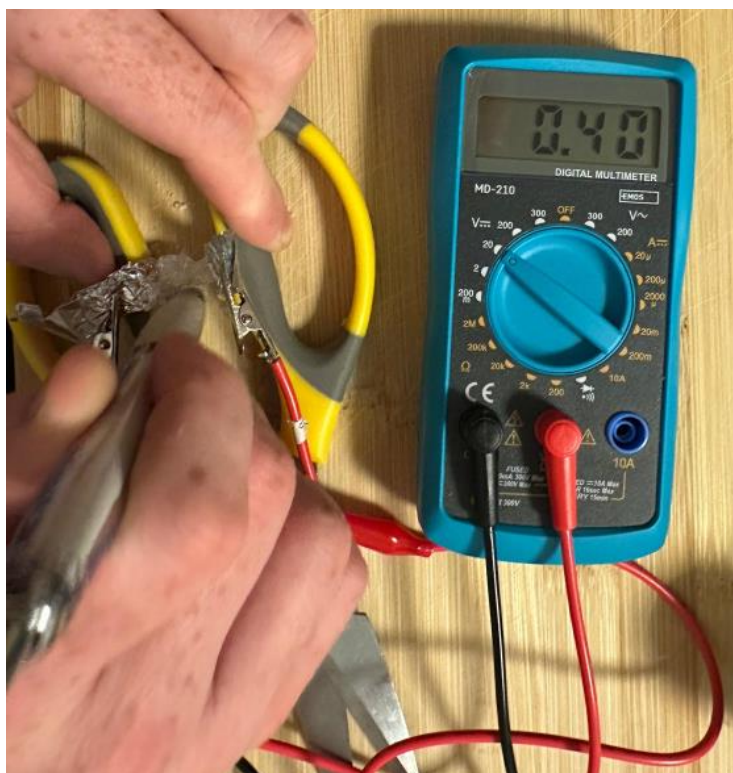
**Slika 36. Kristal Rochellove soli kao sjeme**



**Slika 37. Veći kristali Rochellove soli**

Kako bi se provjerila piezoelektrična svojstva nastalih kristala Rochellove soli, potrebno je spojiti kristale na multimeter.

Kristal se postavlja u stegu, tako da je s obje strane dodira (kontakta) stavljena aluminijska folija koja djeluje kao elektroda. Na jednu elektrodu je spojena crvena žica multimetra dok je na drugu elektrodu spojena crna žica multimetra. Nakon što je kristal spojen, mehaničkim pritiskom ili udaranjem kristala, pojavljuje se očitavanje na multimetru u iznosu od 0,4 V (Slika 38.). Svi dobiveni kristali daju sličan rezultat za svojstvo piezoelektričnosti. Time je pokazano piezoelektrično svojstvo Rochellove soli.



**Slika 38. Očitanje multimetra nakon udaranja kristala**

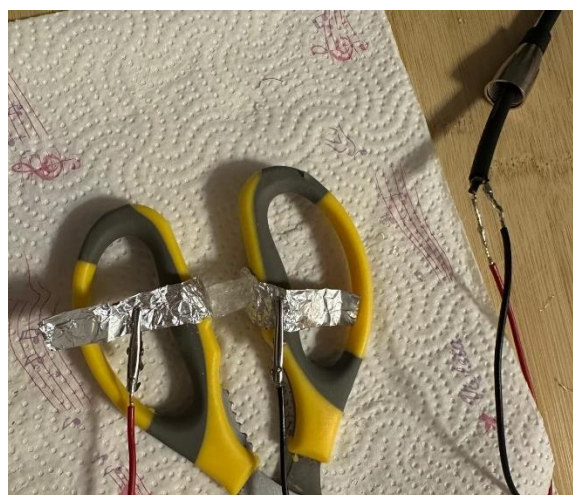
Dakle, iz prethodnog je vidljivo da nastali kristali Rochellove soli posjeduju piezoelektrična svojstva.

Proizvedeni kristali se mogu koristiti kao jednostavan kontakt mikrofona tako da se spoje na pojačalo.

Kristal se postavlja u stegu te se s obje strane umeću komadi aluminijske folije koji služe kao elektrode. S mikrofonskog kabela se s jedne strane skida izolacije te se na središnju signalnu žicu zalemi bakreni vodič s izolacijom crvene boje, a na drugu žicu koja je uzemljena, zalemi se bakreni vodič s izolacijom crne boje (Slika 39.). Vodiči su spojeni na elektrode koje su u kontaktu s kristalom (Slika 40.).



**Slika 39. Spoj vodiča i mikrofonskog kabla**



**Slika 40. Spoj vodiča sa elektrodama u dodiru s kristalom**

Takva izvedba (Slika 41.) omogućuje korištenje kristala kao kontaktnog mikrofona koji djeluje tako da kristal osjeti vibracije s površine koju dodiruje te dolazi do stvaranja električnog signala koji se pojačava pomoću pojačala. Takav uređaj se može staviti izravno na neki instrument, pa bi se vibracije proizvedene sviranjem pretvarale u električni signal.





**Slika 41. Izvedba kontaktnog mikrofona**

### **7.3. Zaključak nakon izvedenog pokusa**

Provedenim pokusom na jednostavan način proizvedena je Rochellova sol koristeći lako dostupne materijale kod kuće.

Ispitivanje piezoelektričnih svojstava nastalih kristala Rochellove soli je pokazalo da oni generiraju slab električni signal kada se na njih primijeni mehanički pritisak. Dobiveni slabi signal se može pojačati korištenjem elektroničkog pojačala. Za dobivanje još boljeg i jasnijeg signala moguće je koristiti pojačalo u kombinaciji s pretpojačalom.

Rochellova sol se zbog svojih piezoelektričnih svojstava može koristiti za različite primjene, a jedna od njih bi bila kao pojačalo domaće izrade za glazbene instrumente.

## 8. ZAKLJUČAK

Prve teorije i eksperimenti u vezi piezoelektričnog efekta su predstavljeni početkom 19. stoljeća, a otkrivačima piezoelektričnog efekta se smatraju Jacques i Pierre Curie. Tijekom Prvog svjetskog rata došlo je do prve tehničke primjene piezoelektričnog efekta u novonastaloj sonarnoj tehnologiji što je pokrenulo razvoj i širu primjenu piezoelektričnih materijala.

Piezoelektrični materijali su dio veće grupe materijala, naziva dielektrični materijali. Imaju kristalnu strukturu bez centralne simetrije što omogućava piezoelektrični efekt. Piezoelektrični efekt dijeli se na direktan i inverzan piezoelektrični efekt. Kod direktnog piezoelektričnog efekta dolazi do pretvorbe mehaničke energije u električnu, dok kod inverznog piezoelektričnog efekta dolazi do pretvorbe električne energije u mehaničku.

Piezoelektrični materijali dijele se na prirodne i sintetičke materijale. Glavni predstavnik prirodnih piezoelektričnih materijala je kvarc, a od sintetičkih materijala je to PZT koji je danas ujedno i najčešće korišten piezoelektrični materijal zbog svoje visoke osjetljivosti te visoke radne temperature.

Široka primjena piezoelektričnih materijala je razlog tomu da se oni danas koriste u mnogo svakodnevnih tehnologija kao što su satovi, telefoni i mikrofoni. Takvi materijali se također koriste u medicini za ultrazvuk ili u kirurgiji, veoma su popularni u polju senzora i aktuatora zbog svoje velike osjetljivosti, male veličine te svoje prirodne frekvencije. Široki spektar mogućnosti je dovelo do primjene piezoelektričnih materijala u novoj i zahtjevnoj tehnologiji prikupljanja energije. Ta tehnologija se zasniva na pretvorbi svakodnevne mehaničke energije kao što su okolne vibracije, mehanička naprezanja cesta i guma u iskoristivu električnu energiju. Tehnologija prikupljanja energije još je u ranoj fazi razvoja te zahtjeva još mnogo ispitivanja i razvijanja piezoelektričnih materijala zbog visoke cijene i male učinkovitosti u tom polju. No, u bliskoj budućnosti piezoelektrični materijali bi se mogli koristiti svakodnevno u

smislu prikupljanja energije. Takva tehnologija je ima svoje prednosti u smislu uštede energije i resursa potrebnih za električnu energiju.

U ovom radu izveden je pokus kojim je pokazano kako proizvesti Rochellovu sol na jednostavan način. Ispitana su i potvrđena piezoelektrična svojstva nastalih kristala Rochellove soli pomoću multimetra. U pokusu je također pokazano kako se proizvedeni kristali Rochellove soli koriste za kontaktni mikروفon koji bi mogao poslužiti kao pojačalo za glazbene instrumente.

Piezoelektrični materijali se konstantno razvijaju i njihova inovativna i potencijalna uporaba prisutna je u mnogim područjima. Jedna od zanimljivijih primjena piezoelektričnih uređaja je u kirurgiji gdje omogućuju istodobno selektivno rezanje koštanog i mekog tkiva. U području energetskih sustava, primjena piezoelektričnih materijala za sakupljanje energije tek je u ranoj fazi razvoja, te zahtjeva još mnogo istraživanja.

## 9. LITERATURA

- [1] <https://www.etymonline.com/word/piezo->, Pristupljeno: 2024-12-08
- [2] <https://www.etymonline.com/word/electricity>, Pristupljeno: 2024-12-08
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrični\\_efekt](https://hr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrični_efekt), Pristupljeno: 2024-12-08
- [4] <https://www.americanpiezo.com/blog/a-brief-history-of-piezoelectricity/>, Pristupljeno: 2024-12-08
- [5] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dielektrik>, Pristupljeno: 2024-13-08
- [6] Chang-Hyo H., Hwang-Pill K., Byung-Yul C., Hyoung-Su H., Jae Sung S., Chang Won A., Wook J., Lead-free piezoceramics – Where to move on?, Journal of Materiomics, 2016, Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/piezoelectric-material>, Pristupljeno: 2024-15-08
- [7] Ranjan Sahu D., Multifunctional Ferroelectric Materials. IntechOpen, 2021, Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92527>, Pristupljeno: 2024-15-08
- [8] Berberović. S., Dadić. M., Elektromagnetska polja – Elektrostatika, 2010, Dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/1\\_materijali\\_elektrostatika.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/1_materijali_elektrostatika.pdf), Pristupljeno: 2024-17-08
- [9] <https://blog.knowlescapacitors.com/blog/capacitor-fundamentals-part-4-dielectric-polarization>, Pristupljeno:2024-17-08
- [10] <https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-piezoelectric-effect>, Pristupljeno: 2024-18-08
- [11] <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21801833/what-is-the-piezoelectric-effect>, Pristupljeno: 2024-18-08

- [12] Kargar, S.M., Hao, G., An Atlas of Piezoelectric Energy Harvesters in Oceanic Applications. *Sensors*, 2022, Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/s22051949>, Pristupljeno: 2024-18-08
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>, Pristupljeno: 2024-19-08
- [14] Behera, A., Piezoelectric Materials, 2022, Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/356440415\\_Piezoelectric\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/356440415_Piezoelectric_Materials), Pristupljeno: 2024-20-08
- [15] Andrusyk, A., Piezoelectric Effect in Rochelle Salt, 2011, Dostupno na: [https://icmp.lviv.ua/meco36/andrusyk\\_poster.pdf](https://icmp.lviv.ua/meco36/andrusyk_poster.pdf), Pristupljeno: 2024-21-08
- [16] <https://www.gcchemicals.com/rochelle-salt.html>, Pristupljeno: 2024-21-08
- [17] <https://www.mineralauctions.com/items/rochelle-salt-lab-grown-ex-bill-and-anne-cook-collection-97570>, Pristupljeno: 2024-21-08
- [18] <https://miamiminingco.com/hr/2023/01/08/the-crystal-structure-of-quartz>, Pristupljeno: 2024-23-08
- [19] <https://geologyscience.com/minerals/quartz/>, Pristupljeno: 2024-23-08
- [20] Rüdiger, G., Ballas, J., Phys.: Conf. Ser. 1775 012012, 2021, Dostupno na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1775/1/012012/pdf>, Pristupljeno: 2024-23-08
- [21] Satyaranjan, B., Shahid-ul-Islam, Mohammad, S., Daniel, M., Mulvihill, Wazed, A., Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review, 2023, Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285523002513>, Pristupljeno: 2024-25-08
- [22] <https://www.preciseceramic.com/blog/what-is-a-piezoelectric-ceramic.html>, Pristupljeno: 2024-26-08
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Barium\\_titanate](https://en.wikipedia.org/wiki/Barium_titanate), Pristupljeno: 2024-26-08
- [24] Shu, Yi-Chung, Bhattacharyay, K., Domain patterns and macroscopic behaviour of ferroelectric materials. *Philosophical Magazine Part B*, 2001, Dostupno na:

- [https://www.researchgate.net/publication/239855771\\_Domain\\_patterns\\_and\\_macroscopic\\_behaviour\\_of\\_ferroelectric\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/239855771_Domain_patterns_and_macroscopic_behaviour_of_ferroelectric_materials), Pristupljeno: 2024-26-08
- [25] <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/pzt/>, Pristupljeno: 2024-27-08
- [26] <https://www.americanpiezo.com/blog/ceramic-manufacturing-series-poling-pzt-ceramics/>, Pristupljeno: 2024-27-08
- [27] E.L, P., Udhayakumar, S., Mg, V., Kalavathi, G., A review on piezoelectric energy harvesting. *Microsystem Technologies*, 2022, Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/361498035\\_A\\_review\\_on\\_piezoelectric\\_ene rgy\\_harvesting](https://www.researchgate.net/publication/361498035_A_review_on_piezoelectric_energy_harvesting), Pristupljeno: 2024-27-08
- [28] <https://www.elprocus.com/what-is-the-piezoelectric-effect-working-and-its-applications/>, Pristupljeno: 2024-28-08
- [29] <https://www.pmf.unizg.hr/images/50016619/6.pdf>, Pristupljeno: 2024-30-08
- [30] [https://personal.oss.unist.hr/~tkovacev/sklopovi/9\\_Oscilatori.pdf](https://personal.oss.unist.hr/~tkovacev/sklopovi/9_Oscilatori.pdf), Pristupljeno: 2024-30-08
- [31] [https://sh.wikipedia.org/wiki/Kristalni\\_oscilator](https://sh.wikipedia.org/wiki/Kristalni_oscilator), Pristupljeno: 2024-30-08
- [32] <https://ielectroney.com/en/product/مذبذبة-كريستالية-عدد-1-hc-49s--16mkz/>, Pristupljeno: 2024-30-08
- [33] <https://www.diodes.com/design/support/technical-articles/crystal-oscillators-for-digital-electronics/>, Pristupljeno: 2024-30-08
- [34] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=23618>, Pristupljeno: 2024-30-08
- [35] <https://www.ferropermpiezoceramics.com/articles/how-is-the-piezoelectric-effect-used-to-generate-ultrasound/>, Pristupljeno: 2024-01-09
- [36] <https://www.mindray.com/na/news-and-events/blog/getting-to-know-ultrasound-transducers/>, Pristupljeno: 2024-01-09
- [37] <https://ecgwaves.com/topic/the-ultrasound-transmitter-probe/>, Pristupljeno: 2024-01-09
- [38] <https://drkadirkilimcioglu.com/en/ultrasonic-rhinoplasty/>, Pristupljeno: 2024-02-09

- [39] Hennes, P., Piezoelectric Bone Surgery: A Review of the Literature and Potential Applications in Veterinary Oromaxillofacial Surgery, 2015, Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4672167/>, Pristupljeno: 2024-02-09
- [40] <https://www.seckinulusoy.com/en/ultrasonic-piezo-rhinoplasty/>, Pristupljeno: 2024-02-09
- [41] Mamiya, Y., Applications of Piezoelectric Actuator, Engineering, Materials Science, Physics, Nec Technical Journal, 2006, Dostupno na: <https://www.nec.com/en/global/techrep/journal/g06/n05/pdf/t060519.pdf?nid=gihoEN022>, Pristupljeno: 2024-04-09
- [42] <https://www.elprocus.com/piezoelectric-actuator/>, Pristupljeno: 2024-04-09
- [43] <https://www.americanpiezo.com/blog/how-piezoelectric-sensors-work/>, Pristupljeno: 2024-05-09
- [44] <https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric/>, Pristupljeno: 2024-05-09
- [45] Razak, A., Zayegh, A., Begg, R., Wahab, Y., Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. Sensors, Basel, Švicarska, 2012, Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/231212298\\_Foot\\_Plantar\\_Pressure\\_Measurement\\_System\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/231212298_Foot_Plantar_Pressure_Measurement_System_A_Review), Pristupljeno: 2024-05-09
- [46] <https://www.ceramtec-industrial.com/en/products-applications/piezo-technology/products-applications/piezoceramics-in-the-automotive-industry>, Pristupljeno: 2024-06-09
- [47] <https://piezodirect.com/how-a-piezo-sensor-is-used-and-how-it-works/>, Pristupljeno: 2024-06-09
- [48] Makki, N., Pop-Iliev, R., Piezoelectric power generation in tires. SPIE Newsroom, 2011, Dostupno na: [https://www.spie.org/news/3702-piezoelectric-power-generation-in-tires#\\_](https://www.spie.org/news/3702-piezoelectric-power-generation-in-tires#_), Pristupljeno: 2024-07-09
- [49] Li, T., Lee, P.S., Piezoelectric Energy Harvesting Technology: From Materials, Structures, to Applications, 2022, Dostupno na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ssstr.202100128>, Pristupljeno: 2024-07-09

- [50] Kour, R., Charif, A., Piezoelectric Roads: Energy Harvesting Method Using Piezoelectric Technology, 2016, Dostupno na: <https://www.omicsonline.org/open-access/piezoelectric-roads-energy-harvesting-method-using-piezoelectric-technology-ier-1000132.php?aid=73891>, Pristupljeno: 2024-07-09
- [51] Kumar, P., Piezo-Smart Roads, 2013, Dostupno na: [https://www.erpublications.com/uploaded\\_files/download/download\\_08\\_07\\_2013\\_08\\_37\\_20.pdf](https://www.erpublications.com/uploaded_files/download/download_08_07_2013_08_37_20.pdf), Pristupljeno: 2024-07-09
- [52] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Audio/mic3.html>, Pristupljeno: 2024-08-09
- [53] Đurđević, V., Piezoelektrični efekt, [završni rad]. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, 2023.