Anorganski dielektrični materijali

Knežević, Mijo Edvard

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:801031

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

ANORGANSKI DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Završni rad

Mijo Edvard Knežević

Osijek, 2020.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju	
Osijek, 08.09.2020.	
Odboru za završne i diplomske ispite	
Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju	
Ime i prezime studenta:	Mijo Edvard Knežević
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4125b, 22.10.2019.
OIB studenta:	60565743479
Mentor:	Doc. dr. sc. Goran Rozing
Sumentor:	Dr. sc. Krešimir Miklošević
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Anorganski dielektrični materijali
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Predložena ocjena završnog rada:	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	08.09.2020.
Datum potvrde ocjene Odbora:	09.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 16.09.2020.

Ime i prezime studenta:	Mijo Edvard Knežević
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4125b, 22.10.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Anorganski dielektrični materijali**

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

i sumentora Dr. sc. Krešimir Miklošević

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:

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

IZJAVA

o odobrenju za pohranu i objavu ocjenskog rada

kojom ja __Mijo Edvard Knežević_____, OIB: __60565743479_____, student/ica Fakulteta elektrotehnike,
računarstva i informacijskih tehnologija Osijek na studiju _Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija _, kao autor/ica ocjenskog rada pod naslovom: _Anorganski dielektrični materijali**,**

dajem odobrenje da se, bez naknade, trajno pohrani moj ocjenski rad u javno dostupnom digitalnom repozitoriju ustanove Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek i Sveučilišta te u javnoj internetskoj bazi radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu, sukladno obvezi iz odredbe članka 83. stavka 11. *Zakona o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju* (NN 123/03, 198/03, 105/04, 174/04, 02/07, 46/07, 45/09, 63/11, 94/13, 139/13, 101/14, 60/15).
Potvrđujem da je za pohranu dostavljena završna verzija obranjenog i dovršenog ocjenskog rada. Ovom izjavom, kao autor/ica ocjenskog rada dajem odobrenje i da se moj ocjenski rad, bez naknade, trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim:

a) široj javnosti
b) studentima/icama i djelatnicima/ama ustanove
c) široj javnosti, ali nakon proteka 6 / 12 / 24 mjeseci (zaokružite odgovarajući broj mjeseci).

**U slučaju potrebe dodatnog ograničavanja pristupa Vašem ocjenskom radu, podnosi se obrazloženi zahtjev nadležnom tijelu Ustanove.*

__Osijek, 16.09.2020._____ _____

(mjesto i datum) (vlastoručni potpis studenta/ice)

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Zadatak završnog rada 2

2. SVOJSTVA DIELEKTRIČNIH MATERIJALA 3

2.1. Dielektrična permitivnost 3

2.2. Električna otpornost 5

2.3. Probojna čvrstoća 6

2.4. Polarizacija 8

2.5. Dielektrični gubitci 9

3. PREGLED ANORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA 11

3.1. Prirodni anorganski dielektrični materijali 12

3.1.1. Anorganski plinoviti dielektrični materijali 12

3.1.2. Anorganski čvrsti dielektrični materijali 15

3.1.3. Anorganski tekući dielektrični materijali 20

3.2. Umjetni anorganski dielektrični materijali 21

3.2.1. Plinski spojevi halogenih elemenata 21

3.2.2. Staklo 23

3.2.3. Keramika 25

3.2.4. Metalni oksidi 28

4. PRIMJENA ANORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA 30

4.1. Keramički kondenzatori 30

4.2. Porculanski izolatori 33

4.3. Keramički materijali u svjećici motora 35

4.4. Azbest u električnim instalacijama 36

4.5. Primjena keramike i njezina budućnost u elektronici 38

5. ZAKLJUČAK 41

LITERATURA 42

SAŽETAK 45
ABSTRACT 46

1. UVOD

Izolacijski materijali prisutni su u razvoju ljudskih civilizacija još od samih početaka. U svojoj težnji ka poboljšanju i razvoju čovjek je uvijek nastojao, između ostalog, birati što bolje materijale u izgradnji svojih projekata. Pored dostupnosti i cijene, najvažniji faktori pri izboru pojedinih materijala bila su svojstva istih. Budući da su prvotne civilizacije nastojale riješiti prvenstveno egzistencijalna pitanja, lako je zaključiti da su im glavna svojstva pri izboru materijala bila mehanička te toplinska. Kroz mnoga tisućljeća razvoja čovjek je sve više proučavao različite materijale te je kroz praksu, ali i znanstvena istraživanja, dolazio do novih saznanja o njihovim svojstvima. Dolazeći do takvih saznanja otvarale su se mogućnosti novih primjena materijala te su se pojedine znanosti proširivale.

Za područje elektrotehničkih znanosti od najvećeg značaja su dakako otkrića vezana uz električna i kemijska svojstva materijala. Iako su električna svojstva pojedinih materijala čovjeku bila poznata još u starom dobu, njihova definicija te primjena je uzela maha tek u novije doba kada dolazi do ubrzanog razvoja. Upravo zahvaljujući tim otkrićima omogućene su nam sve blagodati novog tehnološki razvijenog svijeta kojem pripadamo. Međutim, sav elektrotehnički razvoj bio bi neostvariv bez prisutnosti jedne grupe materijala, a to su dielektrični ili izolacijski materijali. Dielektrični materijali su oni materijali koji ne vode električnu struju odnosno imaju vrlo veliku električnu otpornost. To su materijali koji imaju vrlo mali broj slobodnih elektrona i iona koji bi omogućili veću vodljivost. Osim toga, svojstveno im je gibanje naboja pod utjecajem vanjskog električnog polja, pojava poznatija pod nazivom polarizacija, o čemu će biti više govora u nastavku.

Danas su električni izolatori odnosno dielektrični materijali prisutni u svim elektroenergetskim postrojenjima. Dio su svih elektroenergetskih sustava, počevši od proizvodnje preko prijenosa do distribucije električne energije, a također su neizostavni dio i svake električne instalacije te rasvjete. Osim doprinosa na osnovu svojih električnih svojstava poput slabe električne vodljivosti, doprinose i uporabom na osnovu njihovih mehaničkih svojstava pa tako osim izolacije između pojedinih dijelova sustava služe i za samo učvršćivanje električnih vodiča.

Postoji nekoliko podjela dielektričnih materijala, a jedna od njih je na temelju njihovog kemijskog sastava. Tako se mogu podijeliti na organske i anorganske dielektrične materijale. Anorganski dielektrični materijali su široko zastupljeni u današnjim elektroenergetskim sustavima primjerice kao dijelovi izolacijskih slojeva, kondenzatora instalacijskih osigurača.

Stoga je njihova trenutna primjena od izuzetnog značaja, ali i aspekti budućeg razvoja u aplikaciji kroz buduće tehnologije.

1.1. Zadatak završnog rada

Cilj ovoga rada je prikazati raširenost i značaj anorganskih dielektričnih materijala. Prikazat će se njihova fizikalna svojstva na osnovu kojih je moguća njihova kategorizacija. Pored prvotnog upoznavanja sa svojstvima anorganskih dielektričnih materijala, prezentirat će se najrašireniji materijali današnje uporabe. Za kraj nekoliko primjera konkretnih aplikacija anorganskih dielektričnih materijala naglasit će njihovu važnost u današnjem elektroenergetskom sustavu.

2. SVOJSTVA DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Dielektrik je materijal kroz koji prolazi električno polje, ali sam ne vodi električni naboj. Obzirom da kroz dielektrike ne teče električna struja (ne prolaze naboji), oni spadaju prema električnim svojstvima u izolatore (tal. isolare – odvojiti, odijeliti,osamiti) [1].

Odabir materijala u elektrotehnici, ali i općenito, uglavnom ne ovisi o jednom konkretnom svojstvu, nego je uvjetovan kombinacijom svojstava. Određeni materijal često mora zadovoljiti određene zahtjeve ovisno o faktorima vezanim za rad, opterećenje, norme te želje korisnika. Stoga se kao najvažniji kriterij usred odabira materijala upravo smatraju njegova svojstva. Svojstva zajednička svim dielektricima su specifična električna otpornost veća od 10^6 Ωm i širina zabranjene zone veća od 3.5 eV [2].

Najvažnija svojstva dielektričnih materijala su:

- Dielektrična permitivnost
- Električna otpornost
- Probojna čvrstoća
- Dielektrični gubitci
- Polarizacija

Sva ova električna svojstva proistječu iz njihovih fizičkih svojstava, ali i ostalih neelektričnih svojstava. Neki od važnijih čimbenika koji utječu na električna svojstva materijala jesu elektronska struktura, temperatura, vlaga, frekvencija, mehaničke deformacije, starenje dielektrika itd.

2.1. Dielektrična permitivnost

Važno svojstvo na temelju koje možemo govoriti i o kasnijim veličinama odnosno svojstvima dielektrika jest dielekrična permitivnost. Dielektrična permitivnost ili dielektričnost materijala (ε) je broj koji pokazuje ovisnost gustoće električnog toka o vrsti materijala kroz koji se električni pomak vrši [3]. To je fizikalna veličina koja definira djelovanje pojedinog dielektrika između električnih naboja.

Odnos između gustoće električnog toka, dielektrične permitivnosti materijala i jakosti električnog polja izražen je jednadžbom:

$$D = \varepsilon \cdot E \tag{2-1}$$

gdje je D – gustoća električnog toka (C/m^2), ε – dielektrična permitivnost materijala (C/Vm), E - jakost električnog polja (V/m).

Ulogu dielektrične permitivnosti nekog dielektričnog materijala jasno iščitavamo iz temeljnog zakona elektrostatike, Coulombovog zakona. Dokazano je da dva nabijena tijela međusobno djeluju Coulombovom silom koja je proporcionalna produktu tih naboja, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove međusobne udaljenosti:

$$F \approx \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \tag{2-2}$$

Bitna električna konstanta je dielektrična permitivnost vakuuma, poznata vrijednost koja iznosi:

$$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \text{C/Vm} \tag{2-3}$$

Ukoliko u jednadžbu Coulombovog zakon uvrstimo konstantu proporcionalnosti dobit ćemo:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \tag{2-4}$$

Ukoliko se promatra međudjelovanje dvaju naboja ne kroz vakuum, nego kroz određeni dielektrični materijal govorimo o dielektričnosti tog materijala odnosno sredine. Tada je Coulombova sila između njih jednaka:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \tag{2-5}$$

Iz priloženih formula možemo definirati relativnu dielektričnu permitivnost ili relativnu dielektričnu konstantu. Možemo ju definirati kao omjer Coulombove sile između dva nabijena naboja u vakuumu te Coulombove sile u određenoj dielektričnoj sredini tj. materijalu uz uvjet jednake međuudaljenosti naboja. Jednostavnije ju definiramo kao odnos dielekrične permitivnosti materijala te dielektrične permitivnosti vakuuma :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2-6}$$

Relativna dielektričnost (ε_r) nekog izolatora nam pokazuje koliko puta se povećava gustoća električnog toka ako električno polje umjesto kroz zrak prolazi kroz taj izolator. Svojstvo

relativne dielektrične permitivnosti pojedinih materijala vezanih za elektrotehniku prikazuje tablica 2.1.

Tablica 2.1. Relativna dielektričnost nekih materijala na sobnoj temperaturi i za frekvenciju od 1 kHz [5].

Materijal	**Relativna dielektrična permitivnost ε_r**
Vakuum	1 (ε_0)
Zrak	1,000 589 86 $\pm$ 0,000 000 50
Papir	3,85
Tinjac ili liskun	3-6
Pyrex (staklo)	4,7 (3,7-10)
Voda	88, 80, 1, 55, 3 (za 0, 20, 100, 200 ℃)

Relativna dielektrična permitivnost materijala ovisi o više vanjskih čimbenika među kojima prednjače: temperatura (voda), vlažnost, tlak (plinovi), frekvencija izmjeničnog polja, jakost električnog polja itd.

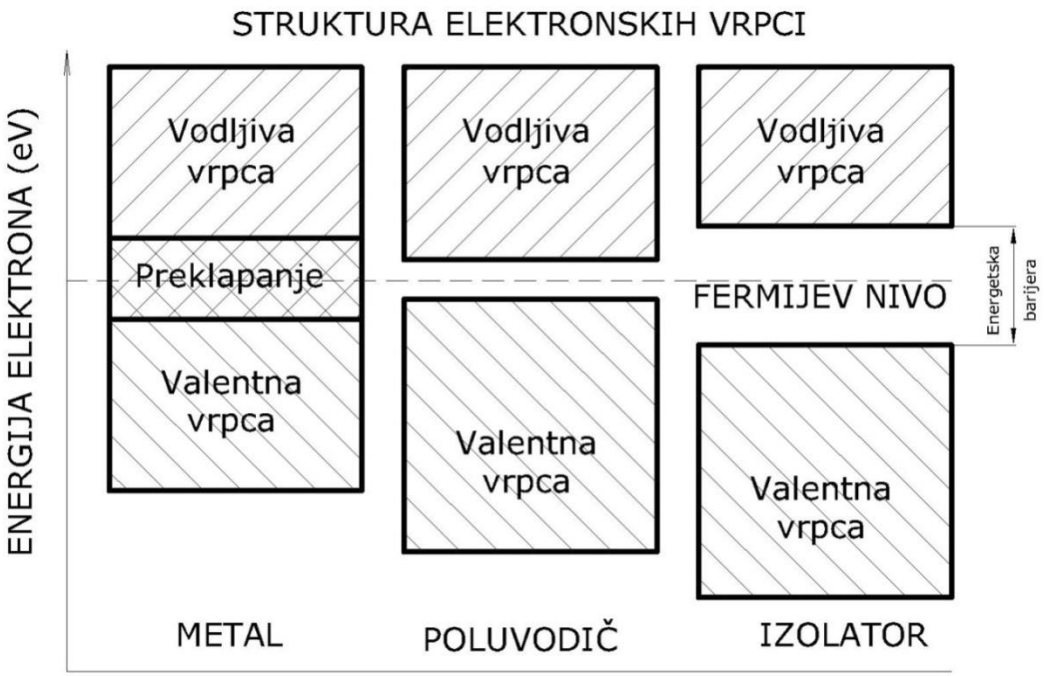
2.2. Električna otpornost

Pored spomenute dielektričnosti materijala iduće ključno električno svojstvo pri odabiru dielektričnog materijala u elektrotehnici jest električna otpornost (ρ). Električna otpornost može se definirati kao omjer umnoška električnog otpora R, duljine vodiča l te površine njegovog poprečnog presjeka S:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad [\Omega\text{m}] \tag{2-7}$$

Električna otpornost dielektrika (izolatora) proizilazi iz njihovih mehaničkih svojstava odnosno atomske građe.

Na slici 2.1. prikazana je razlika između metala odnosno vodiča, poluvodiča te izolatora u pogledu širine zabranjenog pojasa između valentne i vodljive vrpce (pojasa).



Slika 2.1. Struktura elektronskih vrpci [6].

Vidljivo je da se izolatori razlikuju po znatno većem zabranjenom pojasu između valentne i vodljive vrpce, stoga je kretanje elektrona otežano. Iz navedenog proizilazi njihovo suštinsko svojstvo visoke električne otpornosti odnosno neznatne električne provodnosti (σ).

Pored navedene razlike u širini zabranjenog pojasa postoji i praktična razlika između električne otpornosti dielektrika u odnosu na vodiče i poluvodiče. Naime, elektroni mogu strujati unutar samog dielektrika ili po njegovoj graničnoj površini te stoga razlikujemo unutarnju (volumensku) te površinsku otpornost dielektrika. Unutarnja otpornost čvrstih dielektričnih materijala ovisi o temperaturi, kemijskoj strukturi i primjesama, vlažnosti, jakosti električnog polja itd., dok na površinsku otpornost utječu relativna vlažnost okoline, čistoća i hrapavost površine itd. Ako govorimo o tekućim dielektricima na električnu otpornost utječu sadržaj nečistoća, temperatura, jakost električnog polja i dr., [2]. Svi navedeni parametri od velike su važnosti kod odabira materijala za primjenu u elektrotehnici.

2.3. Probojna čvrstoća

Probojna čvrstoća je još jedno u nizu svojstava bitnih u izboru materijala u elektrotehnici. Ovo svojstvo najlakše je opisati govoreći o uvjetima u električnom polju. Između dviju metalnih ploča priključenih na izvor istosmjernog napona dolazi do stvaranja električnog polja.

Ubacivanjem određenog tijela(materijala) unutar električnog polja dolazi do djelovanja sila u električnom polju. Povećanje jakosti električnog polja može se odvijati samo do neke granice. Prekoračenjem te granice dolazi do probijanja sloja izolatora koji se nalazi između metalnih ploča odnosno dolazi do kratkog spoja kroz izolator. Upravo se ta vrijednost pri kojoj dolazi do probijanja sloja izolatora opisuje probojnom čvrstoćom.

Dakle, probojna čvrstoća nekog izolatora je najveća jakost električnog polja koju taj izolator može izdržati a da ne bude probijen. Jedinica kojom se izražava vrijednost probojne čvrstoće dielektrika jest kilovolt po centimetru (1 kV/cm). U tablici 2.2. prikazani su naponi potrebni za proboj sloja debljine 1cm ovisno o vrsti izolatora.

Tablica 2.2. Napon potreban za proboj određenih izolatora [4].

Vrsta izolatora	**Napon proboja, E_{kr}, (kV/cm)**
suhi zrak	32
tinjac	200-2000
porculan	150
papir	180
bakelit	15
staklo	120-1000

Pored vrste izolatora na probojnu čvrstoću utječu i debljina izolatora, način na koji se napon mijenja itd.

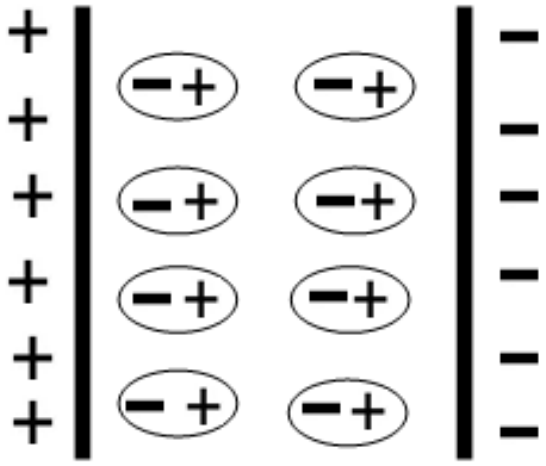
Osim ovakvo opisane probojne čvrstoće kao trenutnog proboja, do proboja dielektrika može doći i određenim vremenskim trajanjem utjecaja vanjskog električnog polja sve dok u njemu ne dođe do pokretanja provodnih mehanizama. Ovakav odgođen proboj dielektrika je moguć kada se on javlja u jednom od dva agregatna stanja i to krutom ili tekućem. Uslijed zagrijavanja materijala kao posljedicom djelovanja električnog polja, dolazi do toplinskog proboja dielektrika u čvrstom agregatnom stanju. S druge strane, ukoliko se dielektrik nalazi u tekućem agregatnom stanju u slučaju proboja riječ je o premošćenju. Osim navedenog, prilikom proboja dielektrika bitno utječe i njegova starost tj. ako na proboj utječe proces starenja onda je riječ o erozijskom proboju dielektrika [20].

2.4. Polarizacija

Osnova karakteristika dielektrika je njihova sklonost polarizaciji uslijed djelovanja električnog polja po čemu se razlikuju od vodiča, kod kojih električno polje uzrokuje prijenos mase i energije. Polarizacijom dolazi do odvajanja (polariziranja) pozitivnih i negativnih električnih naboja čestice od koji se dielektrični materijal sastoji. Dielektrici pod djelovanjem električnog polja polariziraju strukturne elemente te usmjeruju nastale dipolne momente u pravcu vanjskog polja. S aspekta mehanizma polarizacije razlikujemo:

- Elastične polarizacije: elektronska, ionska te polarizacija rešetke
- Orijentacijske polarizacije: bez vanjskog utjecaja ili s vanjskim utjecajem [2]

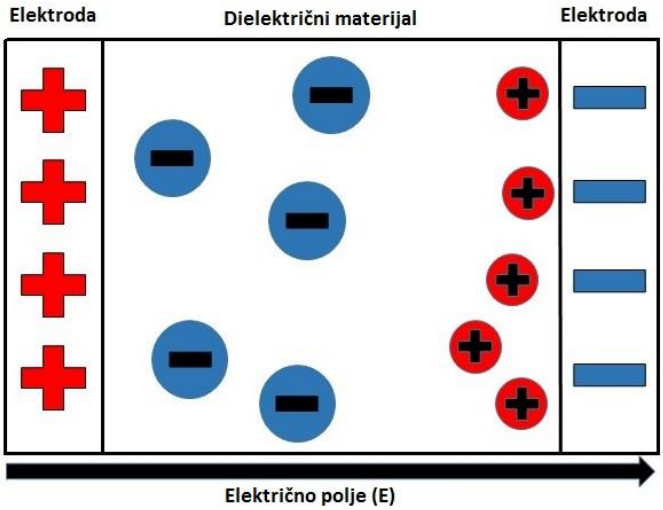
Pojavu polarizacije dielektrika možemo promatrati kroz utjecaj sloja izolatora između ploča kondenzatora spojenih na izvor istosmjernog napona. Budući da su u izolatorima elektroni čvrsto vezani uz atome i molekule te nisu pokretljivi kao u vodičima, oni pod utjecajem električnog polja se ne odvajaju, nego izdužuju svoju putanju u smjeru električnog polja kao što je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2. Izduženje elektronskih staza u dipolu u smjeru pozitivne ploče [17].

Posljedično, središte pozitivnog i središte negativnog naboja atoma nisu više u istoj točki. Budući da atom djeluje kao da je jedna strana pozitivno nabijena, a druga negativno kažemo da se atom polarizirao tj. postao dipol.

S obzirom da se polariziraju svi atomi dielektrika po cijeloj debljini sloja, prema slici 2.3. na jednoj površini se nalaze negativni polovi dok su na drugoj pozitivni.



Slika 2.3. Polarizirane vanjske plohe izolatora [18].

Negativna površina izolatora odbija elektrone sa susjedne pozitivne ploče kondenzatora, a pozitivna površina privlači elektrone na susjednu negativnu. Na taj način omogućit će se kondenzatoru primanje veće količine naboja tj. povećanje kapaciteta kondenzatora.

2.5. Dielektrični gubitci

Pod pojmom dielektričnih gubitaka podrazumijevamo dio električne energije koji se u dielektricima pretvori u neki drugi oblik energije u jedinici vremena. Prije svega se to odnosi na pretvorbu u toplinu. Dielektrične gubitke uzrokuju :

- Jouleovi (omski) gubitci
- Polarizacija
- Ionizacija
- Nehomogenost materijala

Jouleovi gubitci su karakteristični za svaki dielektrični materijal koji ima električnu provodnost veću od nule, a najizraženiji su u čvrstim i tekućim tvarima. Povećanjem temperature, a samim time i električne provodnosti, povećavaju se i gubitci [1].

Svi se dielektrični gubitci javljaju posljedično djelovanjem vanjskog električnog polja što se može promatrati vremenskom promjenom gustoće struje j kroz dielektrik. Na samom početku

djelovanja električnog polja dolazi do polarizacije te porasta gustoće struje te su gubitci za to vrijeme veći sve dok ne dođe do smanjenja vrijednosti struje na stalnu vrijednost (struja zasićenja). Što je utjecaj vanjskog polja duži, to su veći i gubitci .

3. PREGLED ANORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Poznavanje karakteristika dielektričnih materijala olakšava rad svakoga inženjera. To se prvenstveno očituje pri izboru dielektričnih materijala pri projektiranju elektroenergetskih sustava koji podrazumijevaju prijenos snage kod visokih napona. Dielektrične materijale možemo podijeliti prema mnogim osnovama: agregatnom stanju, podrijetlu, svojstvima dielektrika, tipu polarizacije, reverzibilnosti dielektričnih svojstava poslije proboja, ovisnosti vektora dielektričnog pomaka o vektoru električnog polja i prema namjeni [19].

U tablici 3.1. prikazana je podjela dielektričnih materijala s obzirom na njihova najvažnija svojstva. Prema tome razlikuju se slabi, dobri i odlični izolatori te izolatori s ekstremnim vrijednostima.

Tablica 3.1. Dielektrični parametri slabih, dobrih i odličnih izolatora [2].

Parametri	**Slabi izolatori**	**Dobri izolatori**	**Odlični izolatori**	**Ekstremne vrijednosti**
Električna otpornost ρ, (Ωm)	$10^8 - 10^{12}$	$10^{12} - 10^{16}$	$> 10^{16}$	10^{20}
Koeficijent dielektričnih gubitaka, $tg\delta, x10^{-4}$	>100	<100	>10	<1 (čvrsti i tečni) <10^{-4}(plinoviti)
Relativna dielektrična permitivnost, ε_r	>10	<10	<3	15000
Probojna čvrstoća, E_{kr}, $(\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{mm}})$	<25	25-30	≥50	160 (folija) 800(film)

Dielektrici se prema podrijetlu svrstavaju u anorganske ili organske materijale. Anorganski dielektrični materijali mogu se javljati u sva tri agregatna stanja te mogu biti prirodni ili pak umjetni (sintetički). U tablici 3.2. prikazani su neki anorganski dielektrični materijali.

Tablica 3.2. Pregled anorganskih dielektrika [2].

Anorganski dielektrični materijali									
Plinovi	Zrak	N_2	CO_2	H_2	He	Ne	Ar	Kr	Xe
Plinovite halogene veze	Sumpor heksafluorid (SF_6)					Bromovodik			
Prirodno kamenje	Mramor, škriljac, kvarc, azbest, liskun, muskovit, staklo								
Keramički materijali	Aluminijski silikati (tvrdi porculan), magnezijski silikati (steatiti)								

Prema tablici 3.2. anorganski dielektrični materijali podijeljeni su na plinove, plinovite halogene veze, prirodno kamenje te keramičke materijale. U nastavku teksta prikazana je detaljnija podjela anorganskih dielektričnih materijala prema podrijetlu i agregatnom stanju.

3.1. Prirodni anorganski dielektrični materijali

U skupinu prirodnih anorganskih dielektričnih materijala spadaju oni materijali koji nisu prošli kemijsku sintezu i obradu. Oni su eksploatirani iz prirode u svojemu osnovnom obliku uz mogućnost mehaničke ili toplinske obrade [20]. Prirodne anorganske dielektrične materijale dijelimo na one u čvrstom, tekućem ili plinovitom agregatnom stanju.

3.1.1. Anorganski plinoviti dielektrični materijali

Anorganski dielektrični materijali mogu biti i plinovi koji čine posebnu skupinu među dielektricima. Svi električni uređaji, aparati, strojevi te instalacije graniče odnosno okruženi su zrakom koji se sastoji iz približno 78 % dušika, 21 % kisika [7]. Sama ta činjenica ukazuje na potrebu proučavanja svojstava i ponašanja zraka kao izolatora, ali i ostalih plinova, u okruženju elektrotehnike.

Među najčešće plinovite materijale koje primjenjujemo u elektrotehničkim područjima ubrajaju se: zrak, ugljični dioksid, dušik, vodik te plemeniti plinovi.

Zrak je plinovita smjesa sastavljena od već spomenutih dušika i kisika te pored njih od plemenitih plinova (0,94 %), te malog postotka vodene pare, ugljikovog dioksida, amonijaka te ozona [1]. S obzirom na visok udio dušika, fizičke karakteristike zraka bliske su značajkama dušika. Neka dielektrična svojstva zraka su navedena u tablici 3.3. Pored navedenih za

elektrotehniku je bitna i njegova gustoća (1,293 g/dm^3). Svojstva mogu oscilirati u ovisnosti o temperaturi, tlaku i vlažnosti te o primjesama. U velikim industrijskim postrojenjima te u okolini istih u zraku postoji značajna prisutnost primjesa. Stoga je pri projektiranju zračne izolacije potrebno uzeti u obzir najgore moguće dielektrične uvjete određenog lokaliteta. Zrak se kao izolator koristi u otvorenim sustavima dok se u zatvorenim sustavima preferiraju dušik, ugljikov dioksid te drugi plinovi. Razlog tome jest njegova sklonost ionizaciji pod utjecajem jakog električnog polja prilikom čega nastaju štetni pa čak i otrovni spojevi [7].

Prednost u odnosu na zrak ima **dušik** zbog svoje malo veće probojne čvrstoće kao i kemijske inertnosti kao i zbog cijene te slabe toplinske vodljivosti. Za razliku od zraka primjenjuje se u zatvorenim sustavima gdje nema pojave električnog luka i to kao toplinski izolator i dielektrik (kondenzatori, visokonaponski kablovi). Također, koristi se u transformatorima zbog zaštite ulja od oksidacije te za punjenje žarulja u kombinaciji s argonom. Očekuje se veća primjena tekućeg dušika u budućnosti i to za hlađenje supravodiča od visokotemperaturne supravodljive keramike [19].

Ugljikov dioksid ima sličnu probojnu čvrstoća kao i dušik, a pored toga ima nisku cijenu te se jednostavno dobiva. Kako bi se tehnološki primijenio nužno je da bude čist i suh. Bitna primjena mu je punjenje plinskih kondenzatora i Van der Grafovih akcelatora [2]. Za dobivanje povoljnijih dielektričnih svojstava kombinira se s sumpornim heksafluoridom kao i dušik.

Na elektrotehničku primjenu **vodika** najviše utječe njegova visoka toplinska vodljivost. Stoga se koristi u ulozi izolatora te rashlađivača kod električnih strojeva s velikom snagom kao što su sinkroni generatori termoelektrana. Osim toga rabi se u električnim strojevima jer suzbija oksidaciju konstrukcijskih materijala te izgaranje namota pri kratkom spoju. U budućnosti bi se mogao koristiti kao izolator supravodljivih kabela [2].

Kada usporedimo opća svojstva plinovitih dielektrika u usporedbi s onim u čvrstom i tekućem agregatnom stanju odlike plinovitih su:

- mala relativna dielektrična permitivnost
- velika električna otpornost
- naglašeno malen tangens kuta dielektričnih gubitaka
- mala dielektrična čvrstoća

Navedena svojstva za pojedine anorganske plinovite dielektrične materijale vidljiva su iz tablice 3.3.

Tablica 3.3. Neka dielektrična svojstva prirodnih anorganskih dielektrika [19].

Plin	**Probojna čvrstoća, E_{kr} (kV/cm)**	**Relativna dielektrična, permitivnost ε_r**	**Koeficijent toplinske vodljivosti, λ, (mW/Km)**
Zrak	32	1,000590	25,6
Dušik	33	1,000540	25,5
Kisik	29	1,000510	26,0
CO_2	29	1,000920	16,0
Vodik	19	1,000252	179
Helij	10	1,000065	149
Neon	2,9	1,000123	48,3
Argon	6,5	1,000514	17,5
Kripton	8	1,000770	9,35
Ksenon	-	1,001240	5,45
SF_6	89	1,002049	18,83

Iz dane tablice 3.3. može se vidjeti mala probojna čvrstoća plemenitih plinova kao i velika toplinska vodljivost. Sintetički sumporni heksafluorid i njegova svojstva prikazana su za usporedbu. Glavna karakteristika im je popunjenost vanjskog atomskog pojasa, stoga su kemijski neutralni. Plemeniti plinovi su prisutni u žaruljama, kao izolatori kod plinskih prenaponskih odvoda, za koordinaciju izolacije na niskonaponskom nivou, a treba navesti i primjenu helija u supravodljivim sustavima kao izolatora i hladitelja [19].

Pri izboru plinovitih anorganskih dielektrika bitno utječu i svojstva kao što su: kemijska inertnost, stabilnost pod utjecajem električnog polja, dobro vođenje topline, nezapaljivost, neotrovnost, niska cijena itd., [1].

3.1.2. Anorganski čvrsti dielektrični materijali

Broj čvrstih anorganskih dielektričnih materijala je malen kada govorimo o onim prirodnim. Tu spadaju prirodni kamen, kvarc (kremen), azbest i tinjac (liskun) [2]. Za razliku od prošlih vremena, značaj prirodnih anorganskih čvrstih dielektrika se smanjio. To se prije svega odnosi na primjenu prirodnog kamenja u elektrotehnici. No, i danas vrijedi spomenuti ulogu primjerice mramora i škriljca osobito u njihovim posebnim primjenama.

Tablicom 3.4. prikazana su svojstva najčešćih čvrstih prirodnih anorganskih dielektričnih materijala.

Tablica 3.4. Neka fizikalna svojstva čvrstih prirodnih anorganskih dielektrika [19].

Svojstvo	**Mramor**	**Škriljac**	**Kvarcni kristal**	**Kvarcno staklo**	**Azbest**	**Liskun-muskovit**	**Liskun-flogopit**
Probojna čvrstoća, E_{kr} (kV/mm)	3-5	0,3	30	40	5	200	150
Relativna dielektrična permitivnost, ε_r	8	6-10	4,5-4,6	3,7	3	5-8	5-6

Kada govorimo o prirodnom kamenju prije svega treba spomenuti **mramor**. Riječ je o metamorfnoj stijeni naširoko korištenoj kroz prošlost, prije svega u graditeljstvu. Nalazimo ga u različitim bojama i vrstama. Kemijski je stabilan, ali podliježe utjecajima visokih temperatura kao i utjecaju vode odnosno vlage (visoko higroskopan). Zbog svojih loših dielektričnih svojstava njegova primjena u elektrotehnici je ograničena isključivo na dekorativne uloge kao što je vidljivo na slici 3.1. [20]. Osim toga, razvojem sintetičkih materijala došlo je i do zamjene prirodnog kamenja, pa tako i mramora, sintetičkim materijalima.

Slika 3.1. Kombinacija dekorativnog mramora te električnih instalacija [8].

Kvarc (kremen) je kristalni oblik silicijevog dioksida SiO_2 te je jedan među najraširenijim materijalima na planeti. Na kvarc se nailazi u prirodi gdje se pojavljuje u obliku kristala te u obliku pijeska odnosno javlja se u raznim polimorfnim i amorfnim formama, a primjer kvarcnog kristala vidljiv je iz slike 3.2.

Slika 3.2. Kvarcni kristal [22].

Među glavnim svojstvima kvarca su velika tvrdoća, staklena sjajnost, različita obojanost ili prozirnost te piezoelektričnost. Kvarcno staklo (amorfni kvarc) dobivamo obradom kvarcnog pijeska i to taljenjem na 1700 ℃. Važno svojstvo mu je propusnost ultraljubičastih zraka, izotropnost te prozirnost čime je određena njegova primjena.

Koristi se pri izradi panela solarnih ćelija, posuda za izradu monokristala u poluvodičkoj tehnici te u halogenim žaruljama [2]. Kristalni kvarc primjenjujemo na izradi piezoelektričnih pretvarača jer je šira primjena neisplativa. Bitno je spomenuti i ulogu kvarcnog pijeska u rastalnim osiguračima gdje utječu na potencijalnu pojavu električnog luka pri izgaranju rastalne niti prolaskom velike struje [2]. Osim toga kremeni se pijesak koristi u industrijama stakla i abraziva kao i u keramičkoj industriji, pri proizvodnji vatrostalnih proizvoda, te u metalurškoj, kemijskoj i građevinskoj industriji. U Hrvatskoj postoje dostatne količine kremenog pijeska za domaću industriju, a neka od nalazišta su i u Slavoniji. Treba spomenuti i sintetički kvarc korišten kao dielektrični dio pri izradi silicijevih integriranih krugova. Ipak, najveći dio kvarcnih kristala koristi se u dekorativne svrhe.

Azbest je prirodni, vlaknasti materijal koji je zbog svojih svojstava sve manje korišten. Nalazimo ga u prirodi kao posljedicu djelovanja vode i ugljikovodične kiseline u obliku blokova azbestnih vlakana debljine do 100 mm i to u rijetkim podzemnim ili površinskim nalazištima.

Svojstva mu variraju u ovisnosti o čistoći, a za područje elektrotehnike korišten je azbest visoke čistoće između 90 i 95 %. Iako nema povoljne izolacijske karakteristike, svoju primjenu osigurao temeljem male električne i toplinske vodljivosti kao i otpornosti na visoke temperature. Talište mu je na 1150 ℃ [19].

Glavni nedostatci azbesta su velika higroskopnost te štetnost po ljudsko zdravlje što je ograničilo njegovu upotrebu. Dokazano uzrokuje azbestozu koju dijelimo ovisno o uzroku na profesionalnu ili okolišnu. Posljedice azbestoze mogu dovesti do ozbiljnih bolesti dišnog sustava pa čak i do raka pluća pa se azbest smatra kancerogenim. Stoga je u mnogim zemljama i zabranjen pa tako i u Hrvatskoj iako je u nekim sferama elektrotehnike njegovo korištenje prisutno i to kao:

- azbestno brašno za kitove i punjenje rastalnih uložaka osigurača
- azbestno predivo, konac, trake i ploče za izoliranje
- azbestni cement za ploče, cijevi i drugo
- izolacija od vatre [1]

Primjer azbestnih vlakana na komadu muskovita prikazan je slikom 3.3.

Slika 3.3. Vlaknasti tremolitni azbest na muskovitu [23].

Tinjac (liskun) je mineral sastavljen od kalijevog, magnezijevog i aluminijevog silikata. Prepoznatljiv je prema slojevitosti te lisnatosti te se pronalazi u prirodi u formi silikata koji se lako dijeli na tanje listiće kao što je prikazano slikom 3.4.

Slika 3.4. Tinjac u prirodnom obliku [24].

Njegova visoka cijena proizilazi iz ručne obrade. Zbog slabije kvalitete liskuna u europskim nalazištima, uvozi se iz ostalih dijelova svijeta, a kao bitna nalazišta izdvajaju se indijska, afrička te američka.

U ovisnosti o kemijskom sastavu postoji više vrsta liskuna, ali područje elektrotehnike koristi samo dvije vrste i to:

- muskovit
- flogopit [1]

Muskovit je kalijski alumosilikat. Odlikuju ga niski dielektrični gubitci kao i povoljna toplinska vodljivost. Osim toga slabo je higroskopan te ga karakteriziraju visoka mehanička i probojna čvrstoća. Međutim, pri temperaturama između 600 i 800 ℃ omekšava te posljedično postiže slabija mehanička i električna svojstva.

Flogopit je kalij-magnezijev alumosilikat. Uobičajeno se javlja u smeđoj, zelenkastoj ili crvenkastoj boji [7]. Mehanička i električna svojstva u odnosu na muskovit su mu nešto lošija, no izdržava veće temperature (900-1000 ℃).

Obrada tinjca zasniva se na njegovom svojstvu da kristalizira u pločama. Ono omogućava da se od tinjca naprave tanke ploče pa čak i vrlo tanki listići tinjca debljine i do 0,005 mm. Muskovit kao i flogopit su u prirodi onečišćeni primjesama o čijem udjelu ovisi njihova kvaliteta jer utječu na njegova električna svojstva. Pored sadržaja primjesa, na kvalitetu odnosno čistoću tinjca utječe i boja ploča. Čisti visokokvalitetni muskovit proziran je i bezbojan iako se može javiti i u bijeloj, svijetlozelenoj te srebrnoj boji [7]. Temeljem njegove kvalitete određena je daljnja upotreba, a kvaliteta je određena IEC standardom prema veličini površine listića. Sortiranje tinjaca u osam razreda prikazano je tablicom 3.5.

Tablica 3.5. Razredi kakvoće tinjaca [7].

Razred kakvoće		**ekstra specijalna**	**specijalna**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Površina listića, cm^2	od	315	235	156	97	65	39	19	10
	do	413	314	234	155	96	64	38	18

Primjena tinjaca kao neovisnih, čistih, izolacijskih materijala je ograničena zbog teške obrade i visoke cijene. Primjer su tinjčevi kondenzatori korišteni u visokofrekvencijskoj i mjernoj tehnici gdje tinjac mora biti vrlo čist te u vakuumskoj električnoj tehnici za držače elektroda (slika 3.5.), za izradu zaštitnih pločica, izolacijskih uložaka, rendgenskih cijevi itd., [7].

Slika 3.5. Osmerokutna pločica izrađena od tinjca [8].

Najveće količine tinjaca rabe se kao resurs u proizvodnji izolacijskih proizvoda sa širom mogućnosti primjene. Tu spadaju proizvodi kao što su tinjčev papir i listići tinjca koji se kombiniraju s vezivima kako bi bili korišteni u izradi izolacija u električnim strojevima i uređajima. Ti se proizvodi nazivaju još i mikaproizvodi među kojima se ističu mikanit, mikafolij (mikanitni papir), tinjčeve vrpce, samikafolij, itd., [7].

3.1.3. Anorganski tekući dielektrični materijali

Prirodni anorganski materijali uglavnom podrazumijevaju one u čvrstom ili plinovitom stanju. Međutim, postoje rasprave o tome da postoje i tekući prirodni dielektrici koje predstavlja **voda**. U prilog tome ide joj i njezina uloga reverzibilnog dielektrika u visokoenergetskoj impulsnoj tehnici iznimno visokih snaga [20]. To joj omogućuje njezina velika relativna dielektrična permitivnost (ε_r = 83).

Općenito, svi materijali koji mijenjaju agregatna stanja zanimljivi su za elektrotehniku pa tako i voda. Razlog tomu je činjenica da njezina dielektrična konstanta pri sleđivanju postaje vrlo ovisna o frekvenciji električnog polja što dalje za sebe veže promjene u polarizaciji istog dielektrika [1]. Osim toga svojstva vode, kao što je vodljivost, mijenjaju se promjenom temperature te u ovisnosti o udjelu iona.

3.2. Umjetni anorganski dielektrični materijali

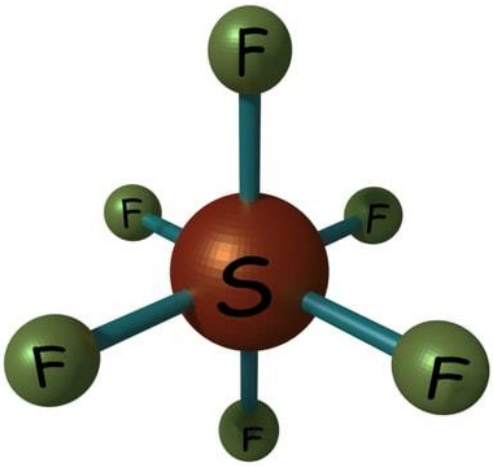
Umjetni ili sintetički anorganski dielektrični materijali obuhvaćaju plinske spojeve halogenih elemenata, staklo, keramiku i metalne okside. Za plinske spojeve halogenih elemenata važna su upravo svojstva halogenih elemenata s kojim su plinovi došli u reakciju. Halogeni elementi među koje spadaju i fluor, klor brom i jod, nalaze se unutar 17. skupine u periodnom sustavu elemenata. Elementi 17. skupine u vanjskoj atomskoj ljusci imaju sedam elektrona tako da im je svojstven afininet prema primanju još jednog elektrona kako bi postigli idealnu strukturu poput plemenitih plinova. Stoga su oni negativno nabijeni pa su negativni ioni halogenih elemenata vrlo stabilni. Ta stabilnost se očituje i u spojevima s ostalim elementima [2]. Među plinskim spojevima halogenih elemenata oni koji zanimaju područje elektrotehnike, te su primijenjeni u njoj, jesu sumporni heksafluorid (SF_6) te bromovodik (HBr).

3.2.1. Plinski spojevi halogenih elemenata

$\boldsymbol{SF_6}$ili **sumporov heksafluorid** jest molekula plina koja se sastoji od jednog atoma sumpora te šest atoma fluora. Ovaj plin je prvi puta sintetiziran 1900. godine, ali je njegov potencijal za primjenu u elektrotehnici kao izolacijski materijal prepoznat nešto kasnije. Nakon Drugog svjetskog rata popularnost mu raste te se počinje komercijalno proizvoditi. Tako se 60-ih godina počeo koristiti u visokonaponskim rasklopnim uređajima. S vremenom i sve većom proizvodnjom nije se više koristio samo u izolacijske svrhe. Tako se proučavanjem njegovih svojstava uvidjelo da je sumporni heksafluorid pogodan za gašenje električnog luka u električnim prekidačima [9].

Danas je ovaj plin pored zraka najprimjenjivaniji dielektrični plin. Dobiva se ili proizvodi kemijskom reakcijom plinskog fluora s otopljenim sumporom pri $300\,℃$. Prilikom procesa proizvodnje dobivaju se i drugi nusproizvodi u malim postotcima te se kao i nečistoće, zrak, vlaga i CO_2 filtriraju u različitim fazama pročišćavanja kako bi se dobio konačni proizvod.

Svojstva sumporovog heksafluorida zasnivaju se na njegovoj strukturi koja je prikazana na slici 3.6. Molekula sumporovog heksafluorida sastoji se od jednog atoma sumpora te šest atoma fluora koji su sa atomom sumpora povezani kovalentnim vezama.



Slika 3.6. Struktura molekule sumporovog heksafluorida [9].

Pored zraka je najviše korišten izolacijski plin ponajviše zbog svoje gustoće. SF_6 ima gustoću od 6,139 kg/m^3 što je oko pet puta više od zraka pri jednakim uvjetima. Bezbojan je i bez mirisa. U tekuće agregatno stanje prelazi pri relativno malim nadtlakovima te je vrlo elektronegativan [9]. Zbog izražene elektronegativnosti on prihvaća slobodne elektrone nastale između kontakata prekidača. Apsorpcijom slobodnih elektrona i zbog male pokretljivosti SF_6 ima povoljna dielektrična svojstva pa tako SF_6 ima najveću vrijednost probojnog napona u odnosu na ostale plinove. U odnosu na zrak ima 2,5 puta veću dielektričnu čvrstoću. Može biti stabilan u svojoj strukturi do temperature od 500 ℃ dok se pri temperaturama oko 2000 ℃ u potpunosti razlaže. Poprilično je nezapaljiv. Gasi i do sto puta veće iznose struja koje se mogu ugasiti u zraku tako da je izvrstan gasitelj električnog luka.

Široka mu je primjena kao izolacijskog plina u visokonaponskoj te srednjenaponskoj tehnici. Podobniji je za izolaciju prekidačkih postrojenja odnosno MOP (metalom oklopljena postrojenja) postrojenja u odnosu na zračnu izolaciju. Također je pogodan za izolaciju visokonaponskih kabela, transformatora, kondenzatora, te generatora [19]. Pri planiranju izolacije važno je imati na umu da u određenim uvjetima rada ne dođe do kondenzacije.

Još jedan bitni plin za područje elektrotehnike jest **bromovodik** (**HBr**). To je kemijski spoj sa strukturom molekule od dva atoma povezanih kovalentnom vezom. Pri sobnoj temperaturi bezbojni je plin kiselog mirisa. Teži je od zraka. Uglavnom je stabilan no blago potamni pri izlaganju svjetlosti ili zraku. Prelazi u tekuće stanje na -67 ℃ pri atmosferskom tlaku. Svrstan je među nagrizajuće i nadražavajuće spojeve zbog opasnosti prilikom kontakta s kožom kao i u

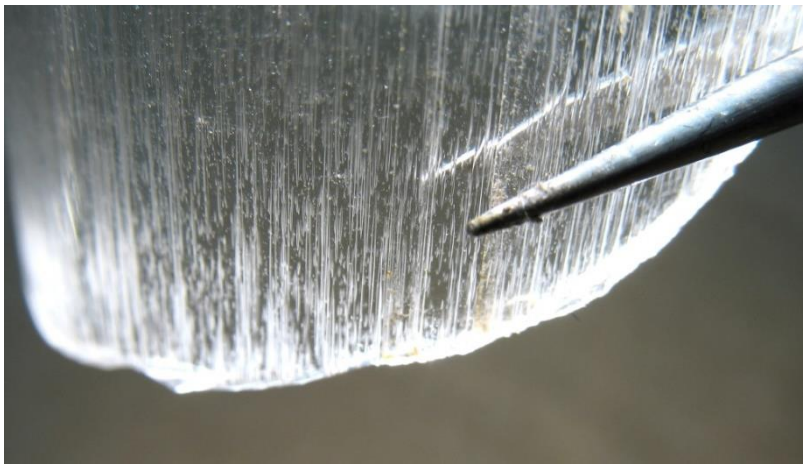
slučaju udisanja. Nužno je odgovarajuće skladištenje ovoga plina. Najpoznatija elektrotehnička primjena mu je u punjenju halogenih žarulja kao zamjena skupljih plinova kriptona i ksenona.

3.2.2. Staklo

Staklo je materijal poznat čovjeku još od davnih vremena. Prvotno je bilo poznato u obliku staklaste glazure. Prvi stakleni proizvodi datiraju iz vremena drevnog Egipta do 4500 godina unazad. Kroz povijest razvoj stakla omogućavao je i razvoj novih tehnologija kao primjerice mikroskopa i teleskopa nakon početka proizvodnje potpuno prozirnog stakla, a time i leća. Od njegovog početka korištenja u području elektrotehnike iskorištavaju se njegova dielektrična svojstva. Početkom 20. stoljeća proizvodnja stakla počinje biti automatizirana da bi danas proces proizvodnje postao visokoautomatiziran [10].

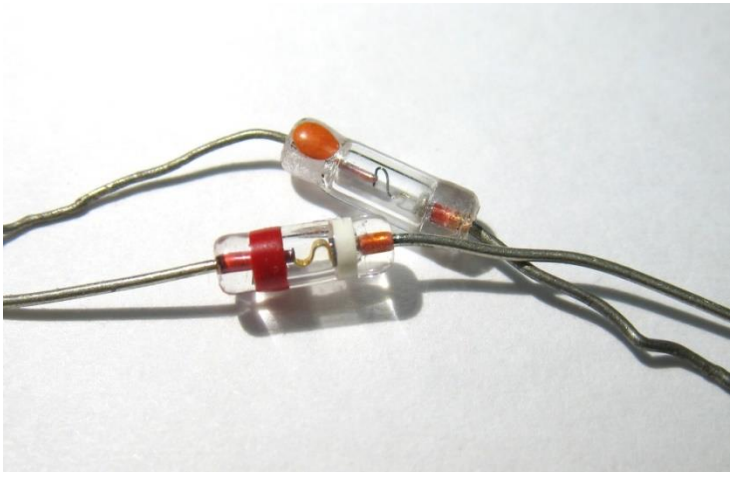
Ustaljena definicija stakla kao amorfne, pothlađene i prozirne taline ne definira staklo na pravi način u suvremenoj industriji. Razvojem tehnologija proizveden je niz materijala sličnih staklu koji se skupno nazivaju vitroidima. Vitroidi su staklu slični materijali, amorfni te prozirni koji su kruti na sobnim temperaturama dok na višim temperaturama poprimaju svojstva plastičnosti te prelaze u tekuće stanje (primjer je pleksiglas) [7]. Međutim, mnoga svojstva su im različita od pravog stakla. Prema tome staklo je kruti materijal sastavljen od anorganskih spojeva, različitih boja, bezbojan ili zamućen s temeljnom masom u vitroidnom obliku.

Proces dobivanja stakla obuhvaća taljenje sirovina (uglavnom oksida ili karbonata), oblikovanje te hlađenje produkta. Dielektrična svojstva stakla pri normalnim temperaturama su povoljna, no promjenom temperature dolazi do promjene. Tako električna otpornost opada porastom temperature čime dolazi do ionske vodljivosti u sve većem opsegu. Stoga stakla pri 200 i 300 ℃ gube dielektrična svojstva. Električna otpornost smanjuje se i pojavom korozije kao posljedice vlage. Osim porasta površinske vodljivosti dolazi i do povećanja dielektričnih gubitaka zbog alkalijskih iona kao nosioca vodljivosti. Porastom udjela njihovih spojeva u staklu dolazi i do narušavanja toplinskih te mehaničkih svojstava [7]. Za razliku od stakla, čisto kvarcno staklo pokazuje puno bolja svojstva kao što su toplinski koeficijent rastezanja, čvrstoća te izolacijska svojstva (dielektrični gubitci te električna otpornost). Stoga se ono koristi za posebne namjene. Primjer komadića tehničkog kvarcnog stakla prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7. Komad tehničkog kvarcnog stakla. [8]

U izolaciji se najviše koriste bezalkalna ili E-stakla koja ima udio alkalija manji od 1 %. Alkalijska stakla koja su modificirana radi postizanja boljih svojstava koriste se u izradi žarulja te sijalica, neonskih i radio-cijevi, izolatora, živinih prekidača, katodnih i rendgenskih cijevi, kućišta elektronskih elemenata itd. [7].



Slika 3.8. Kućište poluvodičkih dioda načinjeno od stakla [8].

Važan produkt stakla su staklena vlakna. Od višeslojne staklene tkanine prave se dijelovi rotora električnih strojeva, dijelovi velikih transformatora te izolacija vodiča [2]. Primjena im je temeljena na njihovim dobrim mehaničkim, toplinskim te dielektričnim svojstvima, ali ipak glavni nedostatak im je krhkost.

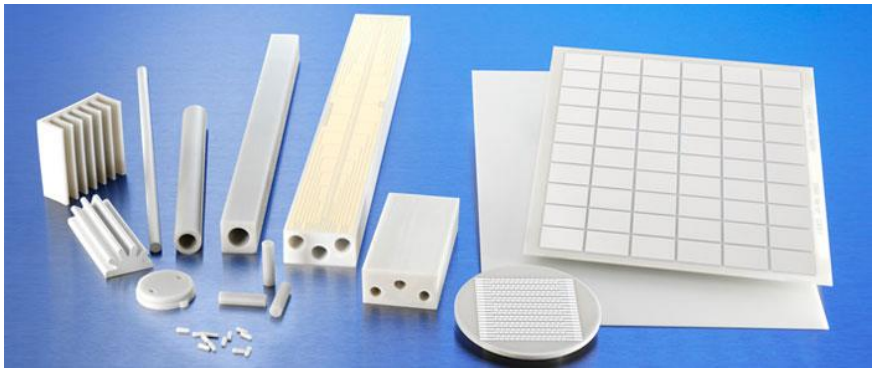
3.2.3. Keramika

Uz staklo keramika je jedan od sintetičkih materijala čija proizvodnja datira još iz davnih vremena. Keramički proizvodi se dobivaju pečenjem i to nakon prvotnog oblikovanja temeljne mase čime se gube plastična svojstva same mase [21]. Ovisno o predviđenoj namjeni površine keramičkih tvari mogu se dorađivati kako bi se poboljšala određena svojstva. Neke od tih dorada predstavljaju navlačenje glazure, metaliziranje te poliranje. Tako primjerice navlačenjem sloja glazure može se povećati površinska električna otpornost te zaštititi sam proizvod od prljavštine te vlage.

Keramika je slična staklu prema mehaničkim svojstvima kao što je tvrdoća te dugotrajnost odnosno otpornost na trošenje. Ima umjerenu čvrstoću, malu žilavost te veliku otpornost na koroziju. Nepropusna je za vodu te pokazuje otpornost prema visokim temperaturama kroz duže razdoblje, utjecaju sunčeve svjetlosti kao i prema utjecaju električnog luka. Također je kemijski stabilna (ne reagira s drugim elementima), ima malu gustoću te veliku električnu otpornost. Međutim, nedostatci se očituju u visokoj cijeni te osjetljivosti na mehaničke prenapone i udare. Ipak, krhkost se poboljšava modificiranjem materijala. Ključno svojstvo keramike je njezina općenita otpornost što joj omogućava nošenje sa različitim vanjskim utjecajima.

Za tehničku primjenu upotrebljava se tehnička keramika. Koristi se u proizvodnji senzora u industriji, za aktuatore, dijelove računala, visokotemperaturne otpornike itd. Primjer je upotreba proizvoda aluminijevog nitrida prikazanog na slici 3.9. u elektronici i mikroelektronici. Dijeli se prema sastavu na dvije vrste:

- oksidne (npr. Al_2O_3, ZrO_2, Al_2TiO_5, MgO, $BaTiO_3$, ThO_2, $ZrO_2xY_2O_3$, $Al_2O_3xZrO_2$)
- neoksidne (npr. SiC, Si_3N_4, B_4C, $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$, BN, WC, TiN, TiC, AlN, umjetni dijamant) [1]



Slika 3.9. Proizvodi od neoksidne keramike-AlN [25].

Keramički se materijali dobivaju postupkom sinteriranja (prešanje te zagrijavanje) od smjese minerala ili metalnih oksida [1]. Oni predstavljaju bitnu kategoriju anorganskih dielektrika te se dijele na više podgrupa:

- porculani
- steatiti
- rutili
- keramike s malim koeficijentom linearnog širenja
- porozne keramike
- oksidne keramike
- vatrostalne keramike [1]

Porculani su sastavljeni od kaolina, kvarca i glinenca (feldspata) [1]. Svojstva su mu otpornost prema klimatskim utjecajima, nezapaljivost te površinski sloj glazure koji mu poboljšava svojstva. S obzirom na udio kaolina (gline) i glinenaca u kombinaciji smjesa od kojih se izrađuju porculani, dijele se na: tvrde i meke. Korišten je kao prvi keramički proizvod u izolacijske svrhe te su mu svojstva prilično unaprijeđena. Takve novonastale vrste porculana zovu se elektroporculani. Svojstva elektroporculana elektrotehnički važna prikazana su u tablici 3.6.

Tablica 3.6. Neka svojstva elektroporculana [7].

Gustoća (kg/dm^3)	**Probojna čvrstoća (kV/mm)**	**Relativna dielektrična permitivnost**	**Električna otpornost (Ωm)**	**Toplinska vodljivost (Wm/°C)**	**Koeficijent toplinskog rastezanja ($°C^{-1}$)**
2,3-2,5	35	5-6,5	10^{12}	0,2	$4 \cdot 10^{-6}$

Mnoga svojstva variraju u ovisnosti o temperaturi. Zbog široke primjene porculana kao konstrukcijskog materijala izolatora, najvažnija su mu mehanička svojstva i to tvrdoća (na Mohsovoj skali je između 7 i 8) i čvrstoća (na vlak, tlak i savijanje koje iznose 500, 5000 i 1000 kp/cm^2) [7]. Prilikom pečenja porculana uvelike se mijenja njegov obujam što se kasnije po potrebi obrađuje odnosno brusi. Bitna primjena elektroporculana je u proizvodnji visokonaponskih te niskonaponskih izolatora, odvodnika prenapona, kućišta prekidača itd. U tehnici slabije struje zamjenjuje ga ultraporculan zbog velikih dielektričnih gubitaka pri visokim frekvencijama. Još jedan nedostatak mu je brzi rast vodljivosti porastom temperature što onemogućava primjenu u elektrotermičkim izolacijama.

Steatite karakterizira značajan udio magnezijeva silikata. U odnosu na porculan ima bolja električna, toplinska i mehanička svojstva što mu omogućava njegova kristalna struktura. Osim toga, ima jednostavniju proizvodnju te kontrolu proizvoda. Koristi se za izradu visokonaponskih i niskonaponskih izolatora, potpornih izolatora, antenskih izolatora, dijelova utičnica, prekidača, sklopki, osigurača, elektrotermičkih uređaja (štednjaci, grijači i sl.), tijela niskofrekvencijskih zavojnica te kondenzatorskih elemenata [1]. Glavni nedostatak mu je loša postojanost kao posljedica velikog koeficijenta toplinskog rastezanja u odnosu na porculan.

Rutil pripada u grupu keramike kao kristalni oblik titan-dioksida TiO_2. Glavno svojstvo mu je velika dielektričnost zbog čega je bitan materijal za izradu kondenzatora. Kao materijal za kondenzatore nedostatak mu je velika ovisnost dielektrične permitivnosti o temperaturi što se poboljšava kombinacijom s drugim spojevima.

Keramika s malim koeficijentom linearnog širenja upotrebljavaju se u elektrotermičkim uređajima. Koeficijent linearnog širenja im je oko 4 puta manji od porculana te 6 do 9 puta manji od steatita [1]. Porozne keramike zbog velike električne otpornosti i pri većoj temperaturi koristi se u elektrotermičkim uređajima kao i kod elektronskih cijevi.

Oksidna keramika se dobiva lijevanjem te prešanjem. Obuhvaća proizvode dobivene iz oksida i drugih kisikovih spojeva procesima sličnim keramičkim. Oksidnoj keramici svojstvena su dobra vatrostalna svojstva, veća toplinska vodljivost te povoljnija mehanička i električna svojstva u odnosu na porculan. U elektrotehnici zanimljiv je barijum-titanat kao izraziti feroelektrik do temperature od 120 ℃ [7].

Općenito keramiku možemo još podijeliti prema njezinoj primjeni:

- visokotemperaturni supravodiči
- vodiči
- poluvodiči
- izolatori
- piezoelektrici
- piroelektrici
- elektrooptičke komponente
- magnetske komponente [1]

3.2.4. Metalni oksidi

U skupinu sintetičkih anorganskih materijala spada i dio monokristalnih te polikristalnih oksida nekeramičkog tipa. Među njima najbitniji za istaknuti su safir (aluminijev oksid) te tantal pentoksid [2]. Nastaju kemijskom reakcijom aniona kisika te kationa jednog ili više metala.

Safir je anorganski dielektrični materijal koji je zapravo monokristalni oblik aluminijskog oksida. Zapravo je safir skup dragog kamenja zbog čega ima visoku cijenu što je i glavni nedostatak njegove elektrotehničke primjene. Izražena mehanička svojstva su mu čvrstoća te tvrdoća (9 na Mohsovoj skali) te je temperaturno stabilan. Dielektrična svojstva su također povoljna. Odlikuje ga visoka relativna dielektrična permitivnost te nizak koeficijent dielektričnih gubitaka. U ovisnosti o obradi, površinska otpornost mu je visoka.

Safir, odnosno monokristalni alumijev oksid, se izolacijski koristi kao uvodnik mikrovalnih cijevi te u proizvodnji integriranih prekidača. Polikristalni aluminijev oksid primjenjuje se kao anodni sloj elektrolitskih kondenzatora te kao izolacijski sloj na aluminiju i dielektrik volframskih grijača [19]. Primjer moderne primjene safira je u ksenonskoj svjetiljci od keramičkog tijela odnosno ksenonskoj lučnoj svjetiljci prikazanoj na slici 3.10.

Slika 3.10. Ksenonska lučna svjetiljka sa sintetičkim izlaznim prozorom od safira [26].

Tantal pentoksid Ta_2O_5 se pojavljuje u visokotemperaturnoj α-fazi te niskotemperaturnoj β-fazi. U odnosu na aluminijski oksid ima malo lošija mehanička svojstva, no bolja toplinska. Slabije reagira s drugim spojevima, ima veću dielektričnu konstantu te veći faktor dielektričnih gubitaka. Pored toga, cijena mu je povoljnija u odnosu na safir. Primjenjuje se u polikristalnom obliku [19]. Zbog svojih dobrih dielektričnih svojstava, prije svega visoke relativne dielektrične

permitivnosti, ima razne primjene u elektronici kao primjerice tantalni kondenzator. Koristan je i u proizvodima automobilske elektronike, mobitelima te u mnogim sofisticiranim područjima elektronike.

4. PRIMJENA ANORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Anorganski dielektrični materijali zbog svojih svojstava, prije svega velike električne otpornosti, dio su svih elektroenergetskih sustava kao i dijelova električnih alata i uređaja. Kada govorimo o izolacijskim materijalima odnosno izolatorima namjena im je održavanje električne struje unutar granica vodiča te svođenje gubitaka električne energije iz istih. Pojam izolacije valja razlikovati od pojma izolatora jer se ona odnosi na sam proces izoliranja ili stanje izoliranosti dok pojam izolatora označava konstrukcijski element. Pojmove izolator te dielektrik izjednačavamo iako se konkretan pojam dielektrika češće koristi pri djelovanju izolatora kod održavanja električne energije kao što je slučaj kod kondenzatora [20].

Široka je primjena anorganskih dielektričnih materijala u elektrotehnici. Koriste se u proizvodnji kondenzatora, izolatora, otpornika, žarulja, osigurača, a također se primjenjuju za izradu dijelova, kućišta ili ploča raznih uređaja itd.

4.1. Keramički kondenzatori

Kondenzator je električna komponenta za koju je karakteristično svojstvo kapaciteta. Uloga kondenzatora u električnom krugu jest očuvanje električne energije te blokiranje protoka istosmjerne struje, dok s druge strane dopuštaju prolaz izmjenične električne struje. Sastavljen je od dvije ploče odnosno elektrode te dielektričnog materijala između elektroda. Između dviju ploča postoji djelovanje električnog polja čija je jakost proporcionalna naponu, a obrnuto proporcionalna razmaku između ploča. Kroz dielektrični materijal struja ne teče, osim u slučaju proboja kondenzatora nakon čega je neupotrebljiv. Različiti tipovi kondenzatora prikazani su na slici 4.1.

Slika 4.1. Različiti kondenzatori [11].

S obzirom na vrstu dielektričnog materijala možemo ih podijeliti na zračne, papirne, keramičke, staklene, teflonske, polistirenske, mika kondenzatore, tantal kondenzatore, elektrolitske itd.

Ovisno o vrsti dielektrika kondenzatori mogu imati različita svojstva odnosno parametre od kojih su najbitniji kapacitet te probojni napon. Osim navedenih bitni parametri su i maksimalna snaga, temperaturni koeficijent električnog otpora te otpor izolacije.

S obzirom na primjenu, kondenzatore možemo podijeliti na:

- kondenzatore s malim gubitcima te velikom stabilnosti kapaciteta
- kondenzatore sa srednjim gubitcima te srednjom stabilnosti kapaciteta [1]

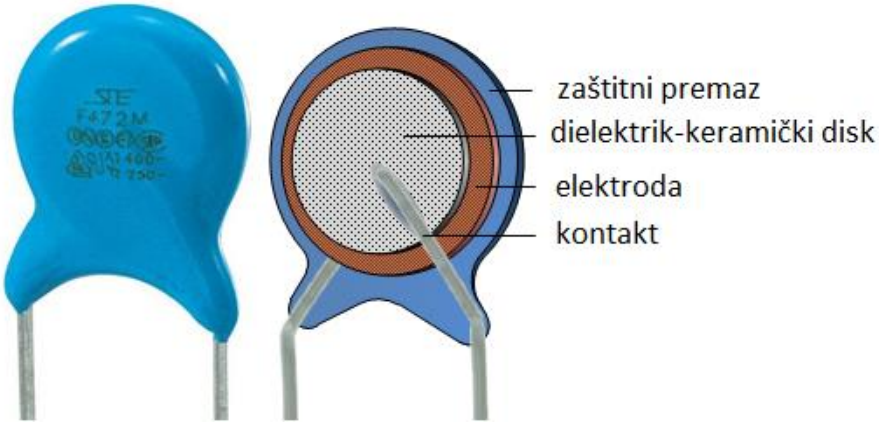
Anorganski dielektrični materijali povezani su i s prvom grupom kondenzatora kao i s drugom. Tu spadaju kondenzatori izrađeni od mike, stakla i keramike s malom dielektričnom permitivnosti. Drugoj grupi kondenzatora, između ostalih, pripadaju oni načinjeni od keramika sa srednjom i velikom dielektričnom permitivnosti. Imaju široku primjenu u istosmjernim te izmjeničnim sustavima.

Jedan od vrlo raširenih materijala koji se koristi kao dielektrik kondenzatora je keramika. Koristila se kao jedan od prvih materijala za tu namjenu. Keramički kondenzator korišten je u različitim geometrijskim oblicima, ali danas se najviše proizvodi kao višeslojni kondenzator (MLCC – Multilayer ceramic capacitor, engl., višeslojni keramički kondenzator) te kao kondenzator od keramičkog diska. Izrađuju se s malim vrijednostima kapaciteta (1 nF do 11 µF) iako ih ima i s većim vrijednostima i to do 100 µF [29]. Stoga imaju široku primjenu u elektrotehnici i elektronici. Na slici 4.2. prikazani su keramički kondenzatori nazivnog napona 12 kV.

Slika 4.2. Keramički kondenzatori [14].

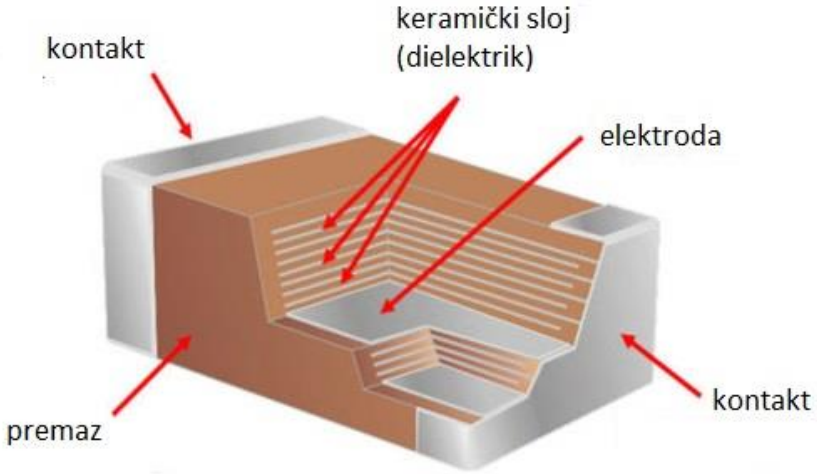
Osim keramičkih kondenzatora malih dimenzija, prave se i oni većih dimenzija za visoke napone i snage. To su posebno izvedeni kondenzatori sa specijalnim terminalima za siguran priključak visokonaponskog dovoda. Mogu izdržati napone u rasponu od 2 kV do 100 kV sa snagama većim od 200 VA. Primjeri njihove namjene su laserska napajanja visokog napona, prekidači struje, indukcijske peći itd., [14].

Kondenzatori načinjeni od keramičkog diska izrađuju se premazivanjem keramičkog diska sa srebrnim kontaktima s obje strane. Kako bi imali veće kapacitete, po potrebi se izrađuju iz više slojeva. Keramički disk kondenzatori imaju vrijednost kapaciteta od 10 pF do 100 µF s različitim rasponima napona (od 16 V do 15 kV i više), a struktura jednog prikazana je slikom 4.3.



Slika 4.3. Keramički disk kondenzator [14].

Disk kondenzatori su komponente koje lako zagubimo zbog oblika te su stoga višeslojni kondenzatori (MLCC) u prednosti ukoliko imaju odgovarajuću vrijednost kapaciteta, a struktura jednog višeslojnog kondenzatora prikazana je na slici 4.4.



Slika 4.4. Višeslojni keramički kondenzator [27].

MLCC se dobivaju kombinacijom paraelektričnih i feroelektričnih materijala te slojevitim nanošenjem smjese s metalnim kontaktima. Nakon izlaganja visokoj temperaturi dobiva se keramički materijal željenih karakteristika. Dobiveni kondenzator se zapravo sastoji od mnogo malih kondenzatora povezanih u paralelu čime se povećava kapacitet. MLCC može sadržavati 500 i više slojeva s minimalnom debljinom sloja od 0,5 μm [14]. Razvojem tehnologije, debljina sloja se smanjuje te se dobiva veći kapacitet kondenzatora jednake veličine.

4.2. Porculanski izolatori

Kao što je već ranije spomenuto, izolator je komponenta ili konstrukcijski element električnog kruga ili elektroenergetskog sustava koji nosi i učvršćuje električne vodiče te ih izolira od ostatka mreže. Ovisno o potrebama postrojenja i vodova, izolator mora zadovoljiti određene zahtjeve svojim karakteristikama kao što su mehanička čvrstoća, toplinska otpornost, probojna čvrstoća te otpornost na djelovanje okoline [13]. Jedan od najčešćih materijala koji se koristi za izradu izolatora je porculan, a primjeri porculanskih izolatora prikazani su slikom 4.5.

Slika 4.5. Porculanski izolatori [14].

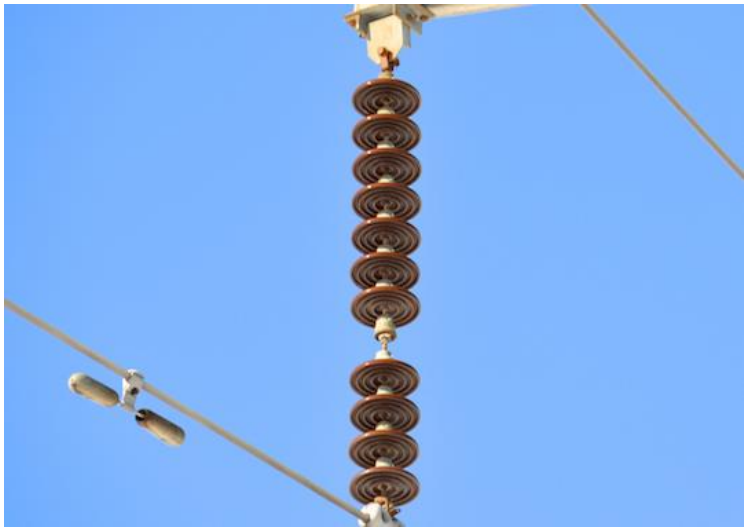
Široka je primjena porculana kao izolacijskog materijala. Neki od primjera su porculanski visokonaponski izolatori za visokonaponske vodove, čašice od porculana za vezivanje žica na električnim stupovima, visokotemperaturni izolatori itd.

Osim hidrofilnih svojstava, porculanski izolatori su široko korišteni jer imaju važna svojstva kao što su:

- visoka čvrstoća
- fleksibilno održavanje
- niska cijena

Imaju široku primjenu jer zadovoljavaju mehaničke i električne zahtjeve elektroenergetske mreže. Izrađeni su od gline, kvarca ili aluminijevih oksida i od feldspata te su premazani glazurom koja ih štiti od vode. Porculanski izolatori s visokim sadržajem aluminijevih oksida koriste se tamo gdje je potrebna velika mehanička čvrstoća. Također pružaju povoljne karakteristike u ovisnosti o starenju materijala. Utjecaj starenja materijala ovisi i o sadržaju iz kojeg je sam materijal napravljen, ali i u ovom segmentu može se reći da porculan pruža odlične rezultate kroz desetljeća primjene [28].

U konstrukciji prijenosnog dijela elektroenergetske mreže, odnosno u konstrukciji nadzemnih vodova, praksa je koristiti ovjesne električne izolatore često načinjene od elektroporculana kao što je prikazano slikom 4.6. Ovjesni izolatori koriste se uglavnom za napone veće od 33 kV. Sastoje se od niza izolatorskih diskova od elektroporculana, a postavljaju se između stupa i vodiča. Broj diskova ovisi o naponu.



Slika 4.6. Ovjesni električni izolator [28].

Osim primjene u visokonaponskoj tehnici, porculan kao izolator se koristi i u dijelovima prekidača i utičnica. U prošlosti je predstavljao glavni materijal u izradi kućišta prekidača i utičnica što je kasnije zamijenila plastika. Međutim, zbog svoje čvrstoće, estetičkih kvaliteta kao i tehničkih, još uvijek nailazimo na ovakav tip primjene.

Slika 4.7. Utičnica i držači lamela utičnice izrađeni od porculana [8].

Danas se pojavljuju zamjene porculanu koje su načinjene od kompozitnih materijala. Razlog tomu je njihova dobra izvedba koja nudi bolju zaštitu od zagađenja, bolje hidrofobne karakteristike, manju težinu, smanjene troškove instalacije te održavanja. Posebno su korisni u zagađenim područjima, ali još uvijek ne omogućuju dugogodišnju sigurnu zaštitu kao porculan ili staklo.

4.3. Keramički materijali u svjećici motora

Svjećica je naprava koja ima važnu ulogu u radu benzinskog motora. Omogućava paljenje smjese goriva i zraka u cilindru i to električnom iskrom. Jedan od glavnih dijelova svjećice, pored dviju elektroda te metalnog plašta s navojem, je izolator. Upravo se unutar izolatora nalazi središnja elektroda svjećice te kroz njega strši prema drugoj elektrodi tako da između njih preskače iskra.

Izolator svjećice mora zadovoljavati neke važne zahtjeve kako bi omogućio što pouzdaniji te dugotrajniji rad svjećice. Neki od tih zahtjeva su:

- dobra toplinska vodljivost
- pouzdana izolacijska svojstva pri visokim naponima
- otpornost na nečistoće nastale izgaranjem
- visoka mehanička čvrstoća
- kemijska inertnost

Izolator mora biti prikladan za rad pri visokim temperaturama, obično u rasponu od 500-1000 °C. Pored visokih temperatura, visoki naponi također postavljaju kriterije pri izboru materijala izolatora. Paljenje smjese uzrokuje električno pražnjenje s naponom ponekad i do 60 kV koji se pojavljuje između elektroda. Materijali koji su zadovoljavali ovakve zahtjeve vezani su uz keramičke materijale. Tu se ubrajaju porculan (slika 4.8.), steatiti, a najrašireniji su keramički materijali na bazi aluminija odnosno sinterirana glinica (Al_2O_3) zbog svoje tvrdoće te velike probojne čvrstoće. Osim toga, sinterirana glinica je dobar toplinski vodič, pruža mehaničku potporu te je pouzdana i na visokim temperaturama [32]. Ovisno o dimenzijama izolatora, odnosno dužini, postižu se veće temperature pri kojima se postiže samostalno čišćenje zbog izgaranja nečistoća. Stoga su keramički materijali, koji su pouzdani pri radu na visokim temperaturama, u prednosti.

Slika 4.8. Središnja elektroda svjećice izolirana porculanom [8].

Dio izolatora smješten uz središnju elektrodu najviše određuje njezinu kvalitetu. Površina izolatora trebala bi ostati što čistija kako bi se spriječilo površinsko istjecanje napona zbog sloja ugljika. Ipak, ako je riječ o benzinskim motorima automobila, zbog nakupljanja nečistoća na površini izolatora nakon određenog broja prijeđenih kilometara potrebna je zamjena svjećice.

4.4. Azbest u električnim instalacijama

U prošlosti se azbest koristio u svim područjima graditeljstva pa tako i u električnim instalacijama, odnosno izolaciji električnih vodova. S vremenom se uočila opasnost od azbesta i njegovih posljedica te se ograničava njegova primjena.

Azbest je prirodni izolator, odnosno loš je provodnik električne energije i topline, stoga se dugo vremena koristio u mnogim izolacijskim materijalima koji se primjenjuju oko vodiča, peći, grijača, pumpi te vodovodnih elemenata [16].

Unatoč štetnosti, azbest i njegovi proizvodi i dalje se uvelike proizvode jer su mu zamjene često preskupe ili nemaju potrebna zamjenska svojstva. Jako je dobar materijal u izradi eksperimentalnih uređaja koji koriste grijače ili vruće dijelove. Komad azbestnog kartona, prikazanog na slici 4.9., može podnijeti temperature i do 1000 °C, a da mu se oblik ne promijeni.

Slika 4.9. Komad azbestne ploče i starog azbestnog užeta [8].

Od tridesetih pa sve do osamdesetih godina prošlog stoljeća azbest se uvelike koristio kao dio električnih razvodnih kutija i ormara. Primjeri gdje možemo naići na azbest su:

- pregradni zidovi
- prskani azbest na konstrukcijske grede i nosače
- zaostali azbest na cjevovodima, bojlerima, kaloriferima i sl.
- azbestne izolacijske ploče
- proizvodi od azbestnog cementa
- kutije s osiguračima
- električne cijevi
- azbestom izolirani vodiči
- razvodne kutije i ormari

Korišten je u instalacijama zgrada kao prevencija požarima, ali je doveo ljude u opasnost zbog kancerogenosti. Oštećenjem žične izolacije lako se mogu otkinuti opasna azbestna vlakna kao što je to prikazao slikom 4.10.

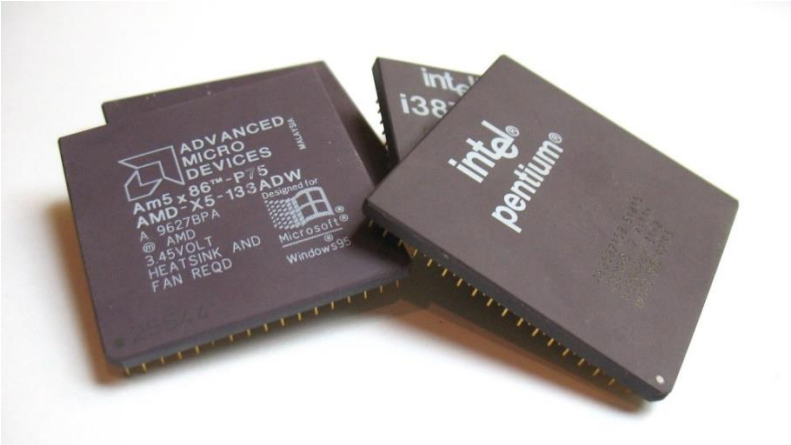
Slika 4.10. Azbestna izolacija [31].

Danas najveću opasnost od štetnosti azbesta preuzimaju tehničari poput električara. U opasnosti su pri radu na starim građevinama, na nepoznatim, neprovjerenim lokacijama koje potencijalno sadrže azbestom kontaminirane materijale te u neprilagođenim uvjetima rada. Za sigurnost električara potrebno je napraviti procjenu rizika te ih prikladno obučiti.

4.5. Primjena keramike i njezina budućnost u elektronici

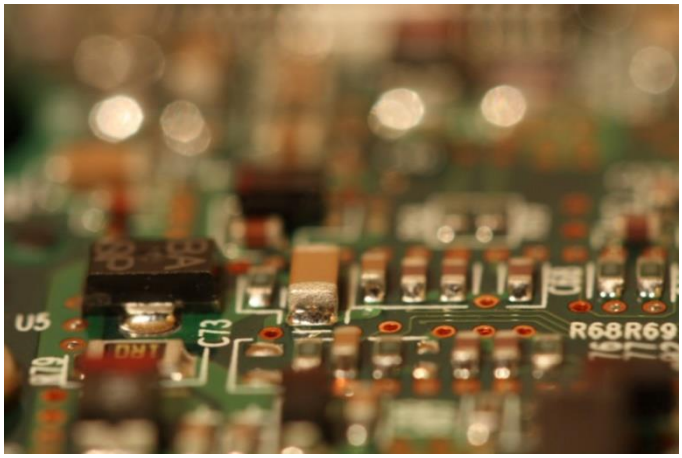
Današnja velika elektronička industrija bila bi nezamisliva bez keramike. Keramički dijelovi su neophodni u proizvodima kao što su pametni telefoni, televizori, automobilska elektronika te medicinski uređaji. Nakon Drugog svjetskog rata razvoj elektronike doveo je i do razvijanja novih keramičkih formulacija koje su pokazivala povoljna poluvodička, supravodljiva, piezoelektrična te magnetska svojstva [15].

Jedan od primjera primjene keramike u elektronici, osim navedenih kondenzatora, je u kućištima čipova odnosno procesora. Tako najpoznatiji Intel ili AMD procesori koriste keramiku prilikom izrade kućišta (slika 4.11.). Zbog zagrijavanja procesora često se keramika zamjenjuje drugim, suvremenijim materijalima.



Slika 4.11. Keramička kućišta procesora [8] .

Značajnu ulogu u elektronici imaju već spomenuti višeslojni keramički kondenzatori (MLCC). Dio su gotovo svakog elektroničkog uređaja. To su jednostavni i jeftini dijelovi koji omogućuju funkcioniranje modernih digitalnih uređaja. Uređaji poput mobitela sadrže i do 1000 ovakvih komponenti dok ih moderni električni auti imaju na desetke tisuća. Zbog sve većeg zahtjeva tržišta, proizvodnja danas mora osigurati dovoljne količine ovih komponenti.



Slika 4.12. Višeslojni keramički kondenzatori u elektroničkom uređaju [30].

Porastom broja prijenosnih elektroničkih uređaja raste i tržište keramičkih elektroničkih komponenti. Proizvođači teže ka minijaturizaciji uređaja što postižu smanjenjem komponenti što ima tehnički limit. Zato je fokus industrijskih istraživača u otkrivanju i unaprjeđivanju materijala što obuhvaća i tehnologiju proizvodnje keramike. Sadašnjim tehnološkim postupcima proizvodnje keramike napredak je ograničen, a rješenja nude discipline odvojene od tradicionalne keramičke proizvodnje. Tu spada prije svega napredna kemija te nanotehnologija.

Mnoge keramičke komponente se zasnivaju na metalima koji imaju potencijalno loš utjecaj na okoliš te ograničene resurse. Sve veća industrijska i znanstvena aktivnost usmjerena je prema čistim tehnologijama i materijalima tako da se teži dobivanju zelenijih, odnosno čistijih materijala. Oni bi imali podrijetlo manje rijetkih elemenata te osigurali mogućnost recikliranja keramičkih komponenti [29]. Općenito, energetsko tržište je u potrazi za materijalima operativnim pri visokim temperaturama, energetski učinkovitijim te poboljšane pouzdanosti. Keramički materijali u tom segmentu nude nove mogućnosti .

5. ZAKLJUČAK

Svijet 21.stoljeća u kojemu živimo bio bi nezamislivo drugačiji bez jedne skupine materijala. To su anorganski dielektrični materijali koji igraju veliku ulogu u sastavu dijelova elektroenergetskih sustava, električnih uređaja, alata te instalacija. Od samih početaka razvoja elektroenergetskog sustava imali su bitnu ulogu, kako u konstrukcijskom, tako i u električnom smislu.

Ovu vrstu materijala možemo podijeliti na prirodne ili umjetne koji se mogu javljati u sva tri agregatna stanja. Među najvažnije prirodne anorganske dielektrike, odnosno one koji nisu prošli kemijsku sintezu i obradu, ubrajaju se plemeniti plinovi, zrak, kvarc, azbest i liskun. Najvažniji umjetni anorganski dielektrici su keramika, staklo, metalni oksidi te plinski spojevi halogenih elemenata. Uvidom u njihova svojstva otvarala su se vrata njihove sve šire te specifičnije primjene. Od tih svojstava najvažnija je električna otpornost, odnosno slaba vodljivost, koja je omogućila njihovu primjenu kao izolatora u svim spektrima elektrotehničkog svijeta. No važna svojstva su i probojna čvrstoća, sklonost polarizaciji, dielektričnost, kemijska postojanost kao i mehanička svojstva. Treba naglasiti kako se mnogi materijali modificiraju kako bi se dobila povoljnija svojstva. S vremenom razvijao se sve veći broj proizvoda koji su dobiveni od anorganskih dielektričnih materijala. Stoga danas na njih nailazimo u jednostavnim električnim krugovima, ali i u suvremenim sofisticiranim područjima. Primjerice na elektroporculan nailazimo u ulozi električnog izolatora kod električnog željezničkog prometa, dok moderne modifikacije keramičkih komponenti nalazimo u najnovijim elektroničkim uređajima.

Navedeni, ali i mnogi drugi materijali te komponente, nisu samo istraživani u prošlosti, nego ih se istražuje te razvija i u današnjem tehnološkom svijetu, a dobar primjer za to su višeslojni keramički kondenzatori. Novi tehnološki, industrijski, ali i ekološki zahtjevi sve više će usmjeravati proizvodnju anorganskih dielektričnih materijala kao i njihovu elektrotehničku primjenu.

LITERATURA:

[1] I. Vujović, Svojstva i primjena dielektričnih materijala, dostupno na: http://brod.pfst.hr/~ivujovic/stare_stranice/pdf_zip_word/pred_dielek_mat.pdf [26.6.2020.]

[2] P. Krčum, Materijali u elektrotehnici, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, Split, 2007.

[3] E. Stanić, Osnove elektrotehnike, Školska knjiga Zagreb, 1994.

[4] Google, dielectric strength, dostupno na: https://www.sanctuaryvf.org/ [27.6.2020.]

[5] Google, relativna dielektrična permitivnost, dostupno na : https://hr.wikipedia.org/wiki/Relativna_dielektri%C4%8Dna_permitivnost [27.6.2020.]

[6] Google, struktura izolatora, dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Struktura_elektronskih_vrpca.jpg [27.6.2020.]

[7] P. Čatoš, V. Firinger, Z. Godec, R. Podhorsky; Elektrotehnički materijali, dostupno na: https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki_materijali.pdf

[8] P. Serkov, Anorganski dielektrični materijali; dostupno na: https://eti.su/articles/over/over_1639.html [29.6.2020.]

[9] Electrical 4U, SF6 Gas or Sulfur Hexafluoride Gas Properties, dostupno na: https://www.electrical4u.com/sulfur-hexafluoride-sf6-gas-properties/ [1.7.2020.]

[10] Google, staklo, dostupno na: https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=57714 [1.7.2020.]

[11] Capacitor, Wikipedia, dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor[2.7.2020.]

[12] Ceramic Capacitor, Capacitor Guide, dostupno na: http://www.capacitorguide.com/ceramic-capacitor/ [3.7.2020.]

[13] Električni izolator, Wikipedia, dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_izolator [3.7.2020.]

[14] HT Porcelain Insulator,dostupno na: http://www.kflexcable.com/ht-porcelain-insulators-4338377.html [4.7.2020.]

[15] Ceramics and Glass in Electrical and Electronic Applications, dostupno na: https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/ceramics-and-glass-in-electrical-and-electronic [4.7.2020.]

[16] Asbestos in Electrical Wiring, dostupno na: https://mesothelioma.net/asbestos-electrical-wiring/ [5.7.2020.]

[17] Electrical 4U, Dielectric Material as an Electric Field Medium, dostupno na: https://www.electrical4u.com/dielectric-material-as-an-electric-field-medium/ [5.8.2020.]

[18] LibreTexts, Dielectric Polarization, dostupno na: https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Optical_Properties/Dielectric_Polarization [5.8.2020.]

[19] P. Osmokrović, Elektrotehnički materijali, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2003.

[20] G. Gudelj, K. Buha, Elektrotehnički materijali i komponente, Tehnička škola Ruđera Boškovića Zagreb, 1994.

[21] R. Buchanan, Ceramic materials for electronics, Mercel Dekker, New York, 1986.

[22] Wikipedia, Kvarc u elektrotehnici, dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Kvarc [9.8.2020.]

[23] Wikipedia, Asbestos, dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Asbestos [9.8.2020.]

[24] Wikipedia, Mica, dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Mica [9.8.2020.]

[25] Medium.com,Non-oxide Ceramics Market Research Report 2019–2025, dostupno na: https://medium.com/@anshulpa1994/non-oxide-ceramics-market-research-report-2019-2025-d93e345f9277 [10.8.2020.]

[26] Wikipedia, Sapphire, dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Sapphire [10.8.2020.]

[27] epci.eu, Introduction to Ceramic Capacitors, dostupno na: https://epci.eu/capacitors-introduction-to-ceramic-capacitors/ [11.8.2020.]

[28] INMR, Testing Ageing of Porcelain Insulators, dostupno na: https://epci.eu/capacitors-introduction-to-ceramic-capacitors/ [11.8.2020.]

[29] The American Ceramic Society, Ceramics for Electronics and Energy: Issues and Opportunities, dostupno na: https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijac.12148 [11.8.2020.]

[30] The American Ceramic Society, dostupno na: https://ceramics.org/ceramic-tech-today/electronics/shorting-out-multilayer-ceramic-capacitor-shortage-limits-consumer-electronic-availability [11.8.2020.]

[31] Asbestos.com, Asbestos Electrical Panels and Wire Insulation, dostupno na: https://www.asbestos.com/products/electrical-panel-partition/ [11.8.2020.]

[32] Schwaller, Anthony. Motor Automotive Mechanics. Delmar Publishers, 1988.

SAŽETAK

Svijet 21.stoljeća je visokorazvijeni svijet koji ne bi bio ostvariv u svojem tehnološkom okviru bez proizvodnje i primjene anorganskih dielektričnih materijala. U ovom radu daje se uvid u svojstva anorganskih dielektričnih materijala koja su temelj njihove primjene u elektrotehnici. Prikazana je podjela prema podrijetlu te agregatnim stanjima s naglaskom na njihove prednosti i nedostatke na osnovu kojih se primjenjuju. Na nekoliko primjera prikazana je primjena najčešćih materijala kao električnih i elektroničkih komponenti. Ovaj rad omogućava detaljnije upoznavanje s različitim vrstama anorganskih dielektričnih materijala te usmjerava čitatelja na područja njihove primjene.

Ključne riječi: anorganski dielektrični materijali, elektrotehnika,primjena, svojstva

ABSTRACT

The world of the 21st century is a highly developed world that would not be achievable in its technological framework without the production and application of inorganic dielectric materials. This paper provides an insight into the properties of inorganic dielectric materials that are the basis of their application in electrical engineering. The division according to origin and aggregate states is presented, with an emphasis on their advantages and disadvantages on the basis of which they are applied. The application of the most common materials as electrical and electronic components is shown in several examples. This paper provides a more detailed introduction to different types of inorganic dielectric materials and directs the reader to the areas of their application.

Keywords: inorganic dielectric materials, electrical engineering, application,properties