

# Utjecaj udjela katalizatora na mehanička svojstva kabelaške izolacije

---

Rajić, Ivona

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:301080>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivona Rajić

**Utjecaj udjela katalizatora na mehanička svojstva  
kabelske izolacije**

**DIPLOMSKI RAD**

**Mentorica rada : Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić**

**Neposredni voditelj : mag.kem.ing. Massimo Ujčić**

**Članovi ispitnog povjerenstva:**

**Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, FKIT**

**Doc. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, FKIT**

**Izv. prof. dr. sc. Nevenka Vrbos, FKIT**

**Zagreb, lipanj 2020.**

## **Zahvaljujem :**

*Mentorici prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić na izboru teme, stručnom vodstvu, savjetima, strpljenju i pomoći prilikom izrade i pisanja ovog rada.*

*Neposrednom voditelju rada mag.kem.ing. Massimo Ujčić, na pruženoj prilici za izradu diplomskog rada, njegovom vodstvu, savjetima te strpljenju tijekom provedbe eksperimentalnog dijela ovog rada.*

*Hvala mojim prijateljicama i prijateljima na pomoći, na svakoj neprospavanoj noći prije ispita, i što su učinili da ove godine studiranja prođu brzo i zanimljivo.*

*Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima, bratu i sestri na njihovoj ljubavi, podršci i u dobrim i lošim trenucima i razumijevanju tijekom studiranja.*

*Ovaj rad izrađen je u sklopu istraživanja "Influence of dosing rate of catalyst masterbatch on the mechanical properties of the final product ", u firmi Silon s.r.o., Češka Republika.*

## **Sažetak**

Umreženi polietilen sve više se upotrebljava u sustavu izolacije kabela prvenstveno zbog svojih dobrih mehaničkih i toplinskih svojstava. Izolacija od umreženog polietilena pokazuje dobru postojanost na vanjske čimbenike, dobar je izolacijski materijal te može podnijeti dosta visoke temperature a da ne dođe do razgradnje same izolacije (do 250°C).

U radu je istražen utjecaj dodatka katalizatora na svojstva izolacijskih smjesa.

Svi uzorci dobiveni su postupkom ekstrudiranja pri različitim uvjetima.

Jedan dio dobivenih uzoraka stavljao se u vodenu kupelj na 70°C u kojoj su stajali 4h kako bi se umrežavanje polietilena provelo do kraja, dok je drugi dio uzoraka ostavljen na zraku, te se pratilo kako polietilen umrežuje pod djelovanjem sunca. Mjerenje za uzorke ostavljene na zraku provodilo se svakih 7 dana tijekom 28 dana.

Svojstva dobivenih uzoraka karakterizirala su se sljedećim tehnikama: Hot set testom pri 200 i 250°C, mehaničkom kidalicom gdje se pratilo maksimalno naprezanje i istežanje te određivanjem sadržaja gela pomoću kojega se određivao udio umreženog polietilena. Iz dobivenih rezultata zaključeno je da je najbolji sustav i omjer osnovnog materijala i katalizatora za izolaciju 95% SXI008 + 5% CM009, dok je za plašt najpogodniji sustav i omjer osnovnog materijala i katalizatora 96,92% SXG011 + 2,08% CM010 + 1% IQAP BLACK.

**Ključne riječi :** umreženi polietilen, izolacija, kabeli, ekstrudiranje

## **Abstract**

Cross-linked polyethylene is increasingly used in cable insulation systems primarily due to its good mechanical and thermal properties. Cross-linked polyethylene insulation shows good resistance to external factors, a good insulation material can withstand a high temperature without degradation of the insulation itself (up to 250 ° C).

In this work the influence of additional catalysts on the insulation was investigate.

All samples are prepared by extrusion at different conditions.

One part of the samples is placed in a water bath at 70 ° C for 4 hours to complete the crosslinking of polyethylene, while the other part of the samples was left on the air, and it was measured degree of crosslinking of polyethylene under the action of the sun. Measurement for samples left in the air was performed every 7 days for 28 days.

The properties of the obtained samples were characterized as following: Hot set test at 200 and 250 ° C, mechanical ripper where the maximum strain are monitored and determination of the gel content by which the content of crosslinked polyethylene is determined. From the obtained results it was concluded that the best system and ratio of base material and catalyst for insulation is 95% SXI008 + 5% CM009, while for the mantle is the best system and ratio of base materials and catalyst is 96.92% SXG011 + 2.08% CM010 + 1 % IQAP BLACK.

**Keywords:** cross-linked polyethylene, insulation, cables, extrusion

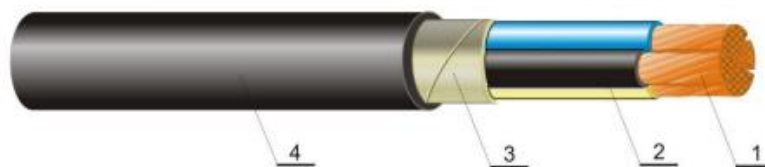
# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. Teorijski dio .....	2
2.1. Električni kabel.....	2
2.1.1. Električni vodič.....	3
2.1.2. Izolacija kabela .....	4
2.1.3. Plašt kabela .....	5
2.2. Vrste izolacijskih materijala .....	6
2.2.1. Polietilen (PE).....	6
2.2.2. Polipropilen (PP).....	6
2.2.3. Polivinilklorid (PVC).....	7
2.2.4. Guma.....	8
2.3. Umreženi polietilen (XLPE).....	8
2.3.1. Svojstva umreženog polietilena .....	8
2.3.2. Postupak umrežavanja polietilena.....	9
2.3.3. Metode umrežavanja polietilena .....	10
2.3.3.1. Metoda radijacije.....	10
2.3.3.2. Metoda umrežavanja peroksidom .....	11
2.3.3.3. Azo metoda .....	11
2.3.3.4. Metoda umrežavanja silanima.....	12
2.3.3.4.1. Sioplas® proces .....	14
2.3.3.4.2. Monosil® proces .....	15
2.4. Ekstrudiranje polimera .....	15
2.4.1. Tipovi ekstrudera .....	16
2.4.1.1. Pužni ekstruderi.....	16
2.4.1.2. Klipni ekstruder.....	17
2.4.2. Parametri postupka ekstrudiranja.....	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
3.1. Materijali .....	19
3.2. Umješavanje uzoraka.....	20
3.3. Karakterizacija dobivenih uzoraka .....	21
3.3.1. Kuhanje uzoraka da bi se postiglo umrežavanje.....	21
3.3.2. Određivanje mehaničkih svojstava .....	21

3.3.3. Određivanje sadržaja gela .....	22
3.3.4. Hot set test.....	25
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	28
5. ZAKLJUČAK .....	39
6. LITERATURA.....	40
7. ŽIVOTOPIS .....	43

# 1. UVOD

Električni kabel je električni vod koji sadrži dva ili više vodiča povezanih zajedno čineći jedan sklop (slika 1). Vodiči su napravljeni od dobro vodljivog materijala te su električki izolirani vanjskim omotačem koji ih štiti o vanjskih utjecaja [1]. Kabeli, odnosno vodiči se najčešće izoliraju izolacijom od umreženog polietilena (XLPE) koja se naširoko primjenjuje u prijenosno – distribucijskim mrežama zbog dobrih svojstava umreženog polietilena od kojih su neka: mala gustoća, jednostavni proizvodni zahtjevi, jednostavna primjena, dobra električna svojstva, dobra toplinska otpornost kao i jednostavno održavanje [2]. Umreženi polietilen koristi se kao izolacija jer omogućuje kabelu da podnese temperature od 90°C pri normalnim uvjetima rada, te ukoliko dođe do kratkog spoja, do 250°C. Postoje razne metode umrežavanja polietilena, no jedna od često korištenih je umrežavanje silanima. Proces umrežavanja silanima je zapravo spor proces, te je potrebno dodati katalizator kako bi se ubrzao sami postupak umrežavanja. Najčešće korišteni katalizator je dibutiltin dilaurat (DBTDL) koji omogućuje dobro i brzo umrežavanje polietilena bez narušavanja ostalih svojstava. [3]. Sam postupak proizvodnje izolacije kabela provodi se postupkom ekstrudiranja, a ispitivanja toplinskih, mehaničkih i strukturnih svojstava provode se različitim tehnikama. Stupanj umreživanja polietilena određuje se mjerenjem sadržaja gela, upotrebljavajući ksilen kao otapalo. Mehanička svojstva ispituju se na mehaničkoj kraljici, vlačnim testom, a također se provodi i hot set test. Toplinska svojstva umreženog polietilena mogu se odrediti pomoću diferencijalnog pretražnog kalorimetra (DSC), struktura takve izolacije može se vidjeti pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa (SEM) i slično [4].



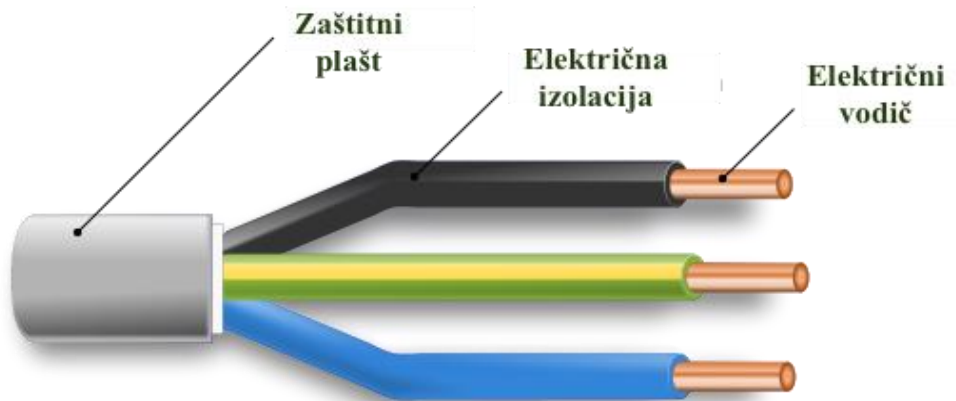
**Slika 1.** Prikaz električnog kabela s XLPE izolacijom i PE plaštem (1 – vodič, 2 – XLPE izolacija vodiča, 3 – ispuna(elastomerna ii plastomerna mješavina) i 4 – PE plašt)(preuzeto iz 1)



## 2. Teorijski dio

### 2.1. Električni kabel

Električni ili energetska kabel je skup vodiča koji su međusobno izolirani. Kabeli moraju biti izolirani da ne bi došli u neposredni kontakt sa zemljom ili nekim drugim konstruktivnim elementima. Kabeli su izolirani vodovi koji se s obzirom na mjesto postavljanja dijele na podzemne kabele i podvodne kabele. Podzemni kabeli se polažu u tlo, a podvodni u more ili jezera. Imaju dvije svrhe te s obzirom na to dijele se na energetske odnosno električne i telekomunikacijske kabele. Energetski odnosno električni kabel služi za prijenos i raspodjelu električne energije koja se prenosi podzemnim ili podvodnim kabelima. Telekomunikacijski kabeli služe za prijenos zvuka, slika, informacija itd. Svi električni kabeli sastoje se od vodiča, izolacije i plašta (slika 2.). Kabeli se izrađuju za niske, srednje i visoke napone. Provodljive žice kabela koji se izrađuju za srednje i visoke napone mogu se pojedinačno izolirati unutar plašta [5, 6].



**Slika 2.** Dijelovi električnog kabela [7]

### 2.1.1. Električni vodič

Provodljiva žica odnosno vodič u kabelu izrađuje se od bakra ili aluminija te služi za provođenje električne energije. Bakar se smatra standardom električnih vodiča. Drugi je od srebra u vodljivosti, ali daleko pristupačniji i ekonomičniji. U odnosu na bakar, aluminij je tri puta lakši materijal, slabiji je vodič, ali bez obzira na to ima bolje karakteristike od bakra po kilogramu u omjeru 2:1. Unatoč tome, više se koristi bakar kao vodič. U prošlosti zbog nedostatka bakra kao vodič u kablovima koristio se aluminij. To je dovelo do mnogih problema jer se nije razmišljalo o posljedicama galvanske reakcije između aluminija i bakra ili legura bakra (npr. mjed) u prisutnosti vlage uslijed čega dolazi do korozije čiji su uzrok razni kvarovi koji mogu dovesti i do požara. Još jedan od nedostataka aluminija je taj što se ne može lako lemiti. Obzirom na navedeno bakar je bolji materijal za korištenje u izradi kabela (slika 3) [8].



**Slika 3.** Prikaz bakrene žice [9]

## 2.1.2. Izolacija kabela

Izolator je materijal koji ne provodi električnu energiju ili toplinu [10]. Izolacija oko vodiča je najčešće od polimernih materijala kao što su polivinilklorid (PVC), polietilen (PE), polipropilen (PP), guma, poliamid itd. (slika 4). Također može biti i od slojevitih materijala kao što je sustav polipropilen/papir. Kada su se počeli koristiti polimerni materijali za proizvodnju izolacije, polivinilklorid i polietilen nisu odgovarali primjeni kod visokih napona, ali su bili odlični za primjenu kod niskih napona. Pojavom umreženog polietilena (XLPE), proširila se upotreba termoplastičnih materijala kod visokih napona. Izolacijski materijali izrađeni su tako da odgovaraju vodiču. Prolaskom struje kroz vodič uslijed nastalog otpora dolazi do zagrijavanja materijala za izolaciju. Zbog toga izolacijski materijali moraju biti otporni na toplinu oslobođenu tijekom prolaska struje kroz vodiči količinu struje. Zbog toga se treba odrediti utjecaj topline na izolacijski materijal. Toplinska otpornost kao i otpornost na gorenje jako su bitna svojstva kod izolacijskih materijala [11].



**Slika 4.** Prikaz izolacije za kabele [12]

### 2.1.3. Plašt kabela

Plašt je vanjski, vidljivi dio kabela (slika 5). Za plašt su važna mehanička svojstva : vlačna čvrstoće i rastezljivost, a ovisno o okolišu u kojem se ugrađuju kabeli određuju se i druga svojstva plašta. Tako npr. plašt treba imati veliku toplinsku otpornost ako se koristi u južnoj Europi i tropskim područjima. Kabeli koji se nalaze u kanalima ili u tlu mogu biti izloženi abraziji ili oštrim predmetima te zbog toga plašt mora imati veliku krutost. Bitno svojstvo je i otpornost na udar kao i kemijska otpornost. Plašt također mora imati i dobra barijerna svojstva kako ne bi došlo do prodiranja vlage ili plinova. Materijali koji se koriste za izradu plašta su slični ili isti kao i materijali korišteni za izradu izolacije, a to su polivinilklorid (PVC), polietilen (PE), guma i slično [13].



**Slika 5.** *Prikaz plašta za kabele [14]*

## 2.2. Vrste izolacijskih materijala

### 2.2.1. Polietilen (PE)

Polietilen (PE) (slika 6) ima dobra električna svojstva. Fleksibilnost ovog materijala ovisi o vrsti polietilena. Primjenom polietilena niske gustoće dobije se fleksibilni izolacijski materijal, u odnosu na polietilen visoke gustoće kojim se dobivaju kruti izolacijski materijali. PE ima izvrsnu otpornost na prodiranje vlage i na ostale vremenske uvjete. Zbog niske cijene i navedenih svojstava PE se koristi za proizvodnju kabela i plašta. Polietilen niske gustoće (LDPE) korišten je u ranim izvedbama kabela, ali je kasnije zamijenjen s umreženim polietilenom (XLPE) zbog poboljšanih svojstava. Umreženi polietilen pokazuje bolju otpornost na prodiranje vlage, atmosferilije te bolju temperaturnu otpornost. Može se koristiti pri višim naponima. Polietilen visoke gustoće (HDPE) također ima dobra svojstva, ali je manje fleksibilan, a samim time i otporniji na abraziju [11,15].



**Slika 6.** *Prikaz granula polietilena [16]*

### 2.2.2. Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP) (slika 7) je relativno jeftin izolacijski materijal. Može se koristiti u atmosferskim uvjetima gdje nisu preniske niti previsoke temperature. Polipropilen je reciklirajući materijal i lako obradiv te se očekuje da bi mogao zamijeniti umreženi polietilen

(XLPE) koji se ne može reciklirati. Međutim, polipropilen ima lošija svojstva od polietilena te se ne može koristiti kao izolacijski materijal prvi visokim naponima [17].



**Slika 7.** Prikaz granula polipropilena [18]

### 2.2.3. Polivinilklorid (PVC)

Polivinilklorid (PVC) (slika 8) često se primjenjuje kod izrade kabela niskog napona. PVC ima dobra mehanička svojstva, dobru kemijsku otpornost i otpornost na koroziju. Nadalje, neplastificirani PVC otporan je na gorenje. Ova svojstva, zajedno s niskim troškovima čine materijale od PVC-a dobrima za kabelsku izolaciju. Međutim, plastifikacija polivinilklorida koja poboljšava fleksibilnost materijala smanjuje otpornost na gorenje i povećava stvaranje toksičnog dima. Zbog toga se polivinilklorid manje koristi kao materijal za izolaciju vodiča [11].



**Slika 8.** Prikaz granula obojenog polivinilklorida [19]

## 2.2.4. Guma

Guma (slika 9) kao izolator široko je primjenjiv materijal u domaćinstvu i industriji. U početku se koristila samo prirodna guma no ona je zamijenjena s različitim sintetskim gumama. Sve gume su duromeri ili su umrežene postupkom vulkanizacije. Kao duromerni materijal, guma izložena toplini ne omekšava niti se tali. Svojstva ovakvih guma mogu se značajno promijeniti dodavanjem različitih aditiva kao što su ubrzivači, antioksidansi, antiozonanti itd. Tipične komponente prisutne u ovakvoj gumenoj izolaciji su prirodna guma, stirenbutadienska guma (SBR), etilenpropilenska guma (EPR), klorosulfonirani polietilen (PCP). Osnovna prednost svih gumenih izolacija u odnosu na druge izolacijske materijale je izvrsna fleksibilnost u velikom temperaturnom području. Mnogi gumeni izolacijski materijali imaju dobru otpornost na abraziju i atmosferilije. Gumene izolacije su otporne na ulje i kemijske utjecaje [20].



**Slika 9.** Prikaz granula gume [21]

## 2.3. Umreženi polietilen (XLPE)

### 2.3.1. Svojstva umreženog polietilena

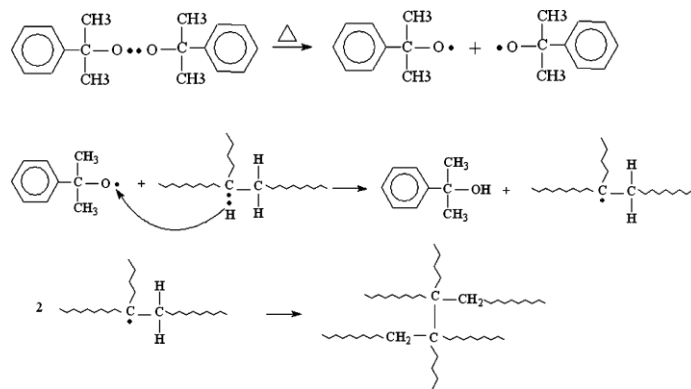
Umreženi polietilen uveliko se primjenjuje kao polimer za izradu izolacije za kabele u prijenosno – distribucijskim mrežama zbog male gustoće, jednostavnih proizvodnih zahtjeva, dobre električne i toplinske otpornosti te jednostavnog održavanja. Umreženi polietilen

(XLPE) dobiva se umrežavanjem polietilena (PE), točnije formiranjem 3D mreže koja ima bolju toplinsku otpornost i otpornost na starenje materijala [22]. Umreženi polietilen sadrži različite polietilenske lance povezane u mrežu što sprječava taljenje i razdvajanja polimernih lanaca pri povišenim temperaturama. Upravo zato umreženi polietilen prigodan je za upotrebu pri višim radnim temperaturama. Uobičajene radne temperature su između 90 i 110 °C, dok je temperaturni limit 250 °C. [23] Materijal od umreženog polietilena sastoji se od polimerne matrice djelomično kristalne strukture. [2]. Zbog izrazito dobrih mehaničkih, kemijskih i električnih svojstava umreženi polietilen kao izolacijski materijal primjenjuje se za gotovo sve instalacije: u zemlji, u kablovskim kanalima, u zatvorenom prostoru, u elektranama, u industrijskim postrojenjima i slično [24]. Stupanj razgradnje umreženog polietilena ovisi o okolini u kojoj se nalaze kao što su intenzitet sunčevog zračenja, temperatura, vlaga, zagađivači, kiša, udio kisika u zraku i slično. Istraživanje starenja takvih materijala od velike je važnosti kako bi se omogućio razvoj otpornijih materijala i aditiva sa dužim vijekom trajanja, posebice za električnu industriju budući da je zamjena kabela zahtjevna i izaziva prekid opskrbe energijom. Osim uvjeta okoliša koji utječu na brzinu razgradnje umreženog polietilena i neki unutarnji čimbenici mogu pridonijeti njegovoj bržoj oksidaciji, poput, prisutnosti metalnih iona i aktivnih kemijskih skupina, kromofora i slično. Dakle, struktura i morfologija umreženog polietilena igraju važnu ulogu u stabilnosti materijala i brzini oksidacije [25].

### **2.3.2. Postupak umrežavanja polietilena**

Kemijske reakcije umrežavanja široko su rasprostranjene kod pripreme umreženog polietilena (XLPE), a temelje se na homolitičkom cijepanju organskih peroksida opće formule  $R' - O - O - R$ , gdje su  $R'$  i  $R$  arilna ili alkilna skupina. Najčešće korišteni je dikumil peroksid (DCP) koji je kristalna kruta tvar kojom za razgradnju energija aktivacije iznosi 37 kcal/mol. Slobodni radikali nastali cijepanjem peroksida reagiraju s vodikovim atomima iz polimera te se stvaraju novi slobodni radikali na mjestu "napada". Različite kombinacije lanaca takvih radikala formiraju mrežu prikazanu na slici 9.





**Slika 10.** *Kemijske reakcije umrežavanja polietilena upotrebom dikumil peroksida kao katalizatora umrežavanja [25].*

Osim peroksida, za inicijaciju umrežavanja, koriste se i neki drugi katalizatori poput silana, te se može koristiti i metoda zračenja. Prednost peroksida kao katalizatora je ta što omogućuju ravnomjernu raspodjelu povezanih lanaca, dok je nedostatak taj što tijekom razgradnje peroksida nastaju nusproizvodi poput acetofenona ili kumil alkohola koji mogu imati štetan utjecaj na električna svojstva umreženog polietilena [25].

### 2.3.3. Metode umrežavanja polietilena

#### 2.3.3.1. Metoda radijacije

Za radijacijsko umrežavanje polietilena koristi se snop elektrona, gama zračenje ili ultraljubičasto zračenje.. U ovoj metodi pobuđeni elektroni udaraju molekule na ili u blizini veze ugljik – vodik te na taj način nastaje slobodni atom vodika, dok matična molekula prelazi u pobuđeno stanje (slobodni radikal). Dvije susjedne pobuđene molekule mogu tvoriti kemijsku vezu, dok dva odgovarajuća vodikova atoma tvore molekulu vodika koja difundira izvan strukture. Zračenje se provodi na već gotovom, oblikovanom proizvodu koji je u krutom stanju, u inertnoj atmosferi kako bi se spriječila oksidativna razgradnja. Gustoća umrežavanja pri određenom intenzitetu zračenja ovisi o amorfnim dijelovima polimera. Prednosti radijacijske metode su da tijekom procesa ekstruzije nema temperaturnih ograničenja te nema zaostalog peroksida ili neželjenih nusprodukata, postotak umreženja je visok, a oprema potrebna za radijacijsku metodu ne zahtjeva veliki prostor. No ova metoda ima i određene nedostatke, u gotovom proizvodu može se dogoditi da umrežavanje nije provedeno jednoliko,

potrebna je velika početna investicija za kupnju uređaja koji se koriste u ovoj metodi, za umreženje su potrebni veliki napori, nužna je dobra zaštita tehničara i slično.

### **2.3.3.2. Metoda umrežavanja peroksidom**

Umrežavanje polietilena peroksidom bila je prva komercijalna metoda, slična vulkanizaciji gume. U ovoj metodi koriste se kemikalije na bazi peroksida (najčešće korišteni je dikumil peroksid) koje stvaraju veze ugljik – ugljik eliminacijom vodikovih atoma te nastaje mreža u polietilenu. Polietilen, koji sadrži peroksidni spoj, brzo se tali pri kontroliranoj temperaturi kako bi se spriječio prerano umrežavanje te se zatim oblikuje u cijev ili kao izolacija za kabele postupkom ekstruzije. Daljnje zagrijavanje pod tlakom omogućava peroksidu da se razgradi te dolazi do umrežavanja polietilena. Kao nusprodukt tijekom ove metode umrežavanja nastaje metan, zbog čega se koristi visoki tlak kako u konačnom proizvodu ne bi imali pore nastale otpuštanjem metana. Ekstruder koji se koristi u ovom postupku trebao bi imati mali L:D omjer sa posebno dizajniranim vijkom. Budući da se peroksid nalazi u polietilenskoj smjesi, temperatura obrade se treba precizno kontrolirati kako ne bi došlo do preranog umrežavanja. Visoke novčane investicije, energetska zahtjevnost prirode procesa, veliki postotak otpada i niska stopa konačnog proizvoda neka su od ograničenja ove metode umrežavanja.

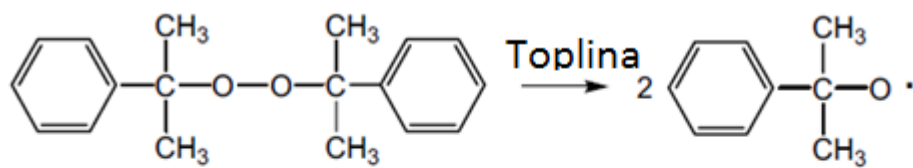
### **2.3.3.3. Azo metoda**

U ovoj dvostupanjskoj metodi koriste se azo spojevi, npr. alifatski azoesteri, kao inicijatori za stvaranje umrežene mreže u polietilenu. Kao i kod metode zračenja, proizvodi se mogu oblikovati uobičajenim postupcima termoplastične obrade. Kako bi se izbjeglo prerano umrežavanje tijekom prerade proizvoda temperaturu prerade treba održavati ispod kritične temperature razgradnje azo spojeva. Nakon toga, umrežavanje se provodi u vulkanizacijskoj cijevi ili slanoj kupelji pri visokim temperaturama (240 – 270 °C). Azo spojevi su posebno prikladni za umrežavanje proizvoda od polietilena velike molekulske mase koji zahtjeva veće temperature obrade. Produkti razgradnje azo spojeva uključuju dušik, metan, ugljikov monoksid, ketone, alkil acetat, i radikale koji eliminiraju vodik iz polietilena te doprinose stvaranju ugnjik – ugljik veza koje formiraju umreženje. Važno je napomenuti da u ovoj

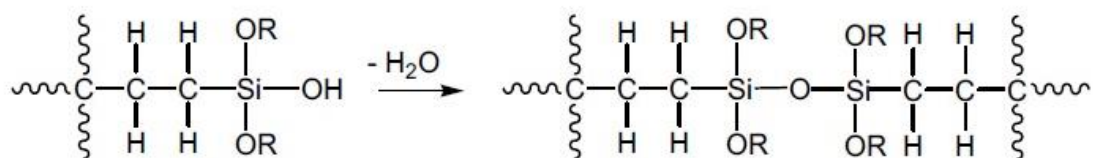
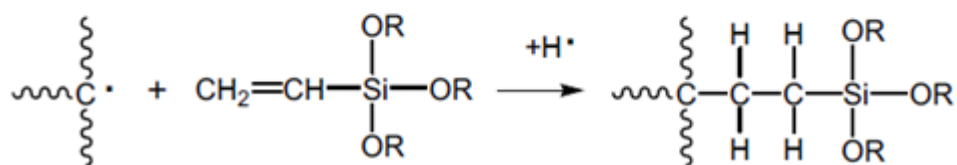
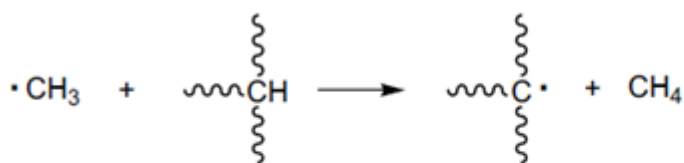
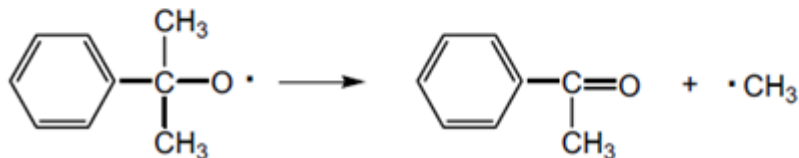
metodi postoji ograničenje u upotrebi antioksidanata jer bi mogli ometati reakciju. Osim toga, uzimajući u obzir stvaranje gore navedenih plinovitih spojeva niske molekulske mase, azo inicijatori mogu se koristiti za proizvodnju ekspanziranih umreženih polietilenskih proizvoda. Nedostatak tipičnog azo spoja je mala aktivnost primarnih radikala nastalih tijekom reakcije prijenosa što vodi niskom stupnju umreženja.

#### **2.3.3.4. Metoda umrežavanja silanima**

Silanska sredstva za umrežavanje su organske kemikalije na bazi silicija koje sadrže dvije vrste supstituenata u istoj molekuli. Opća formula silana je  $(X)_3Si - Y$ , gdje X može biti etoksi ili metoksi skupina, Y je funkcionalna organska skupina (amino, metoksi, acetoksi, epoksi) koja reagira s vodom te nastaje silanol ( $Si - OH$ ). Silanske skupine su polarne, te zbog toga daju kompatibilnost u polietilenskim smjesama gdje je polietilen po prirodi nepolaran. Najčešći silan koji se koristi u reakcijama umrežavanja polietilena silanom je vinil – 3 - metoksi silan. Cijepljenje silana metodom umrežavanja vodom provodi se u najmanje dvije faze koje bi se trebale odvijati uzastopno. U prvoj fazi, silan je cijepljen preko svojih vinilnih skupina kroz reakciju slobodnih radikala pokrenutu peroksidom. Tijekom ove reakcije cijepljenja nastaju novi polietilenski radikali pa je potrebna količina peroksida relativno mala. U drugoj fazi nastali kopolimer umrežava izlaganjem vrućoj vodi ili pari uz pomoć katalizatora. Vlaga dovodi do hidrolize alkoksi skupina silana, nakon čega nastale hidroksilne skupine kondenziraju te nastanu stabilne siloksanke veze (umrežene veze). Na slici 10 prikazan je reakcijski mehanizam takvih reakcija. Jednostavna obrada, niski troškovi ulaganja i dobra svojstva dobivenih materijala prednosti su metode umrežavanja polietilena silanima. Osim umrežavanja polietilena, silanska metoda također se koristi za neke druge polimere poput poli(vinil klorida), polipropilena, poliamida itd. Umrežavanje polietilena putem silanskog cijepljenja ima i neke nedostatke: veća cijena materijala zbog skupih organosilanskih spojeva, duga, geometrijski ovisna reakcija zbog difuzijskog mehanizma umrežavanja te značajna razlika u stupnju umreženja.



Dikumil peroksid

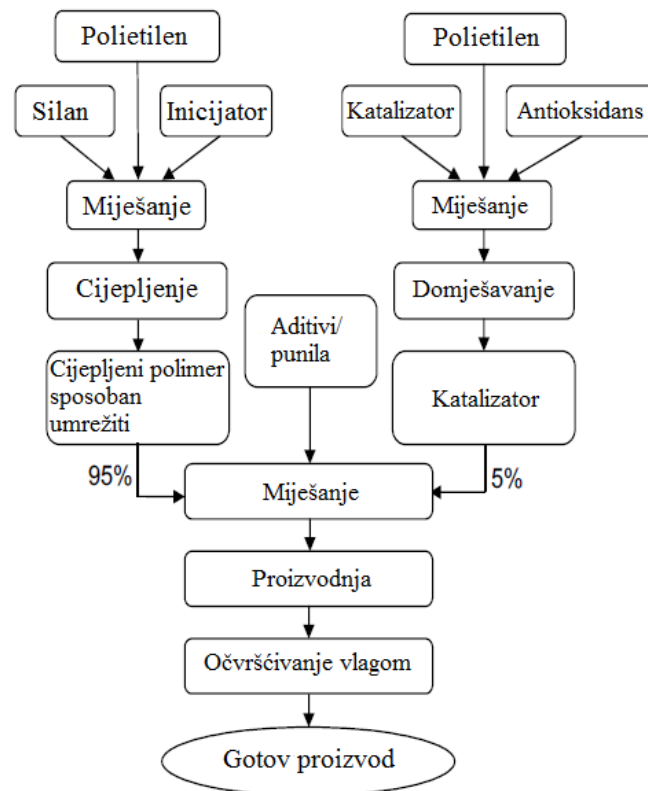


Slika 11. Prikaz glavnih reakcija tijekom umrežavanja polietilena silanima [26].

Umrežavanje polietilena silanima provodi se u dvije faze, koje se odvijaju zajedno ili odvojeno, te na temelju toga postoje dvije vrste ovakvih procesa: Sioplas® i Monosil®.

### 2.3.3.4.1. Sioplas® proces

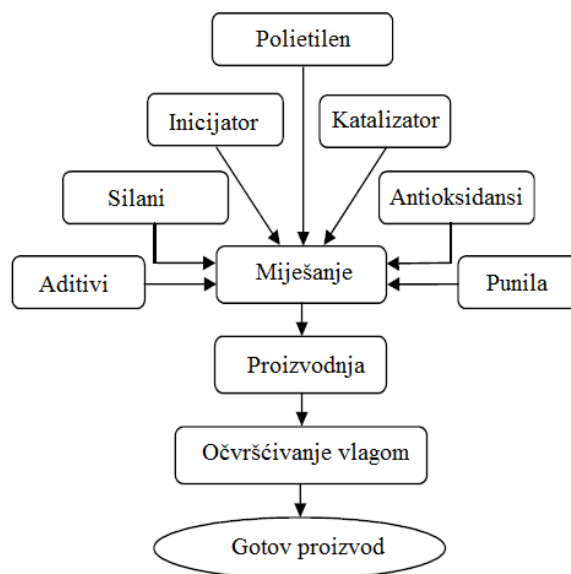
Kod Sioplas® procesa (slika 12) mješavina silana i peroksida dodaje se rastaljenom polietilenu, što dovodi do reakcije cijepljenja silana, što je zapravo klasična lančana reakcija slobodnih radikala koja zahtjeva katalizator. Ovakva reakcija cijepljenja silana obično se izvodi sa rastaljenim polietilenom procesom ekstruzije gdje se ekstruder koristi kao reaktor sa kontinuiranim protokom. Reakcija cijepljenja u ekstruderu (140 - 240°C) vrlo je brza što omogućava izbor ekstrudera za industrijsku proizvodnju. Doziranje materijala se može obavljati prekidnim ili kontinuiranim tokom a miješanje sastojaka može se vršiti u spremniku ekstrudera ili se u rastaljeni polimer izravno ubrizgava mješavina silana i peroksida. Nakon toga, cijepljeni polimer se granulira te je postojan za suho skladištenje, gdje se obično čuva u hermetički zatvorenim vrećama (ali ne više od 6 do 9 mjeseci, jer bi moglo doći do preuranjenog umrežavanja). Nakon ovoga procesa umrežavanje se provodi izlaganjem gotovog proizvoda vodi ili pari koje su pri temperaturi od 70 do 90°C. Visoka izlazna stopa, mala količina otpada te mogućnost upotrebe konvencionalne opreme prednosti su ove metode. Doziranje, temperaturni profil, konfiguracija pužnog vijka i dizajn ekstrudera kao i postupci rezanja i vrijeme boravka materijala u ekstruderu važni su parametri obrade materijala.



Slika 12. Prikaz postupaka Sioplas® procesa [26].

### 2.3.3.4.2. Monosil® proces

Monosil® proces (slika 13) provodi se u jednom koraku, pri čemu se koristi posebno dizajniran ekstruder s velikim omjerom L:D. Proces se vrši tako da se silan cijepi na polietilen nakon čega proizvod umrežuje u prisustvu vlage. U ovome procesu svi sastojci se dodaju izravno u ekstruder, no problem je što postoji rizik od preuranjenog i umrežavanja. Vrste polietilena niske gustoće koje su pogodne za Monosil® postupak imaju gustoću između 0,918 i 0,930 g / cm<sup>3</sup> i indeks protoka taline od oko 0,3 g / 10 min [23].



**Slika 13.** Prikaz postupka Monosil® procesa [26].

## 2.4. Ekstrudiranje polimera

Ekstrudiranje je jedan od važnijih postupaka u proizvodnji polimernih proizvoda. Ekstrudirati neki materijal znači rastaliti materijal u ekstruderu i istisnuti rastaljeni materijal kroz mlaznicu pri čemu poprima oblik otvora mlaznice. Materijal koji izlazi iz mlaznice ekstrudera naziva se ekstrudat. Ekstrudiranjem se ne mijenjaju značajno kemijska svojstva polimera, pa se ekstrudat koji nije zadovoljavajućih svojstava može ponovo reciklirati te ponovo ekstrudirati. Prije samog ekstrudiranja, polimerni materijal može se pomiješati sa

različitim dodatcima (UV stabilizatori, stabilizatori topline, pigmenti, koncentracije boje i sl.) kako bi se dobila željena svojstva i izgled ekstrudata. Polimer pomiješan s dodatcima dodaje se u ekstruder, gdje se miješa i tali te se dostavlja do mlaznice gdje se istiskuje i poprima oblik i geometriju mlaznice. Ekstrudat se izvlači konstantnom brzinom kako bi se oč dalje



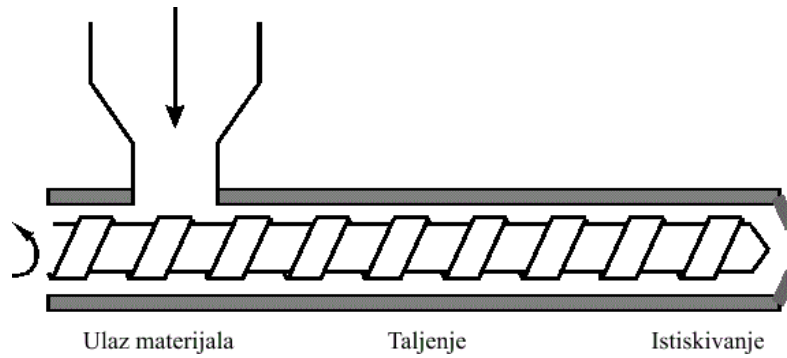
**Slika 14.** Prikaz ekstrudera [27].

### **2.4.1. Tipovi ekstrudera**

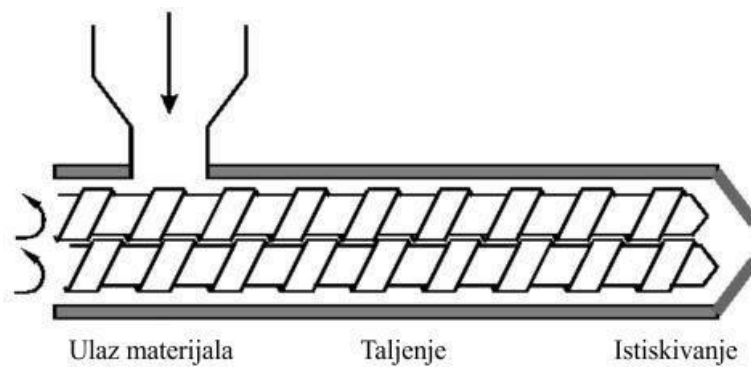
Ekstruderi u industriji prerade polimera dolaze u različitim izvedbama ovisno o njihovoj primjeni i potrebama. Postoji više načina kako klasificirati postupke ekstrudiranja. Osnovna podjela ekstrudera je po principu rada gdje se dijele na : jednopužne, dvopužne i višepužne te na klipne ekstrudere.

#### **2.4.1.1. Pužni ekstruderi**

Pužni ekstruderi dijele se na jednopužne i višepužne ekstrudere (slika 16). Najvažnija vrsta ekstrudera koja se primjenjuje u preradi polimera su jednopužni ekstruderi (slika 15). Niska cijena, robusnost, pouzdanost te jednostavna konstrukcija jednopužnog ekstrudera prednosti su njegova korištenja. Dvopužni ili višepužni ekstruderi imaju dva ili više pužna vijka, a mogu još biti istosmjerni ili protusmjerni.



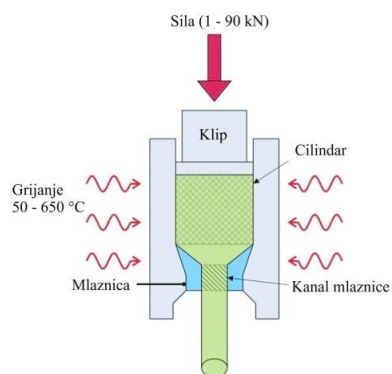
**Slika 15.** Prikaz jednopusnog ekstrudera [27].



**Slika 16.** Prikaz dvopusnog ekstrudera [27]

#### 2.4.1.2. Klipni ekstruder

Klipni ekstruder (slika 17) ima jednostavan princip rada i jednostavnije je konstrukcije od pužnih ekstrudera. Klip prenosi tlak na materijal te ga istiskuje kroz otvor alata uz zagrijavanje cilindra koji zagrijava i tali materijal.



**Slika 17.** Prikaz klipnog ekstrudera [27].



## **2.4.2. Parametri postupka ekstrudiranja**

Najvažniji parametri kod ekstrudiranja su temperatura taljenja i tlak prerade te su dobar pokazatelj kvalitete i ispravnosti ekstrudera kao i pravilnog vođenja postupka. Ostali bitni parametri postupka ekstrudiranja su :

- Brzina vrtnje vijka
- Temperatura spremnika materijala
- Temperatura alata
- Snaga grijачa
- Brzina hlađenja pojedinih elemenata [27].

## 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Materijali

Materijali koji su korišteni u radu su: TABOCAB SXI 008, TABOCAB SXG 011, TABOCAB CM 008, TABOCAB CM 009 te TABOCAB CM 010. Ovi navedeni materijali su od proizvođača SILON, Češka Republika. Korišten je također IQAP PE BLACK MASTERBATCH naziva CROMOFIX NEGRO/BLACK 39009, proizvođača IQAP Masterbatch Group S.L.

TABOCAB SXI 008 je visoko fleksibilna izolacijska smjesa koja se umrežava, proizvedena je SIOPLAS tehnologijom te se može koristiti za vanjske primjene i kod radnih temperatura do 90°C i napona istosmjerne struje do 2 kV. Za navedenu smjesu preporučeno je koristiti katalizator TABOCAB CM 009.

Uobičajena primjena: TABOCAB SXI 008 je dizajniran tako da se primjenjuje kao izolacijski materijal kod solarnih kabela zajedno s materijalom TABOCAB SXG 011, koji se koristi kao plašt.

TABOCAB SXG 011 je smjesa na bazi poliolefina koja može umrežiti i sadrži usporivače gorenja, a ne sadrži halogene (HFFR – Halogen Free Flame Retardant), i proizvedena je SIOPLAS tehnologijom. Materijal je namijenjen za vanjske primjene kod radnih temperatura do 90°C i napona istosmjerne struje do 2 kV. ZA navedenu smjesu preporučeno je koristiti katalizator TABOCAB CM 010. Uobičajena primjena: primjenjuje se kao izolacija i plašt za fotonaponske kabele.

TABOCAB CM 008 je katalizator koji se primjenjuje kod SIOPLAS sustava. Sadrži paket antioksidansa i katalizator umrežavanja te zajedno sa osnovnim materijalom tvori SIOPLAS sustav pogodan za XLPE SIOPLAS smjese. Izgledom je bijeli materijal.

TABOCAB CM 009 sadrži katalizator umrežavanja koji zajedno sa osnovnim materijalom tvori SIOPLAS sustav. Također sadrži tvari koje utječu na dugoročnu stabilnost sustava, djeluju kao deaktivatori metala, te sredstva koja poboljšavaju preradu, koje osiguravaju željena svojstva konačnog proizvoda. Katalizator je preporučeno koristiti za proizvodnju XLPE izolacijskog sustava za solarne kabele sa smjesama TABOCAB SXI 008 ili TABOCAB SXI 009. Izgledom je bijeli, prozirni materijal.

TABOCAB CM 010 sadrži katalizator umrežavanja koji zajedno sa osnovnim materijalom tvori SIOPLAS sustav. Sadrži i tvari koje utječu na dugoročnu stabilnost sustava, djeluju kao deaktivatori metala, te sredstva za poboljšanje prerade, koje osiguravaju željena svojstva konačnog proizvoda. Katalizator je preporučeno koristiti za izradu XLPE plašta za solarne kabele sa smjesom TABOCAB SXG 011.

IQAP PE BLACK MASTERBATCH je materijal kod kojeg su bojila ili pigmenti dispergirani unutar poliolefinske smjese. Preporučeno je da se koristi za LDPE, HDPE ili PP pri temperaturama do maksimalno 300°C te u udjelima 1 – 2 %. Izgledom je crne boje.

### 3.2. Umješavanje uzoraka

Za pripremu uzoraka različitih mješavina osnovnog materijala i katalizatora korišten je dvopužni ekstruder Haake Record 90 (slika 18).

Procesni uvjeti ( brzina rotacije pužnog vijka i temperatura) kao i udjeli osnovnog materijala i katalizatora za svaki pojedini sustav dani su u tablicama 1 do 4. Za prvi sustav za izolaciju korišten je materijal SXI008 i katalizator CM009, dok je za drugi sustav korišten također materijal SXI008 a kao katalizator koristio se CM008 koji ima univerzalnu namjenu te je trebalo provjeriti njegovu djelotvornost za ovakvu vrstu materijala. Za prvi sustav za izradu plašta koristio se materijal SXG011 i katalizator CM010, a za drugi sustav korišten je također materijal SXG011 te se kao katalizator dodao CM008, također da se provjeri njegova djelotvornost u ovakvom sustavu. Udio katalizatora određen je tako da se koristio isti udio aktivne tvari katalizatora.



**Slika 18.** Dvopužni ekstruder Haake Record 90

### 3.3. Karakterizacija dobivenih uzoraka

#### 3.3.1. Kuhanje uzoraka da bi se postiglo umrežavanje

Svi uzorci koji su dobiveni ekstrudiranjemstavljeni su u vodenu kupelj na kuhanje pri temperaturi od 70°C tijekom 4h da bi se ubrzao proces (slika 19). Nakon kuhanja, za umrežene uzorke mjereno je naprezanje, istežanje, sadržaj gela te Hot set test (određivanje stupnja umreženja) pri temperaturama od 200 °C i 250 °C. Manji dio svakog uzorka ostavljen je na zraku 4 tjedna, te je svaki tjedan mjereno naprezanje, istežanje, sadržaj gela te Hot set test pri temperaturama od 200 °C i 250 °C, da bi se vidio tijek i brzina umrežavanja.



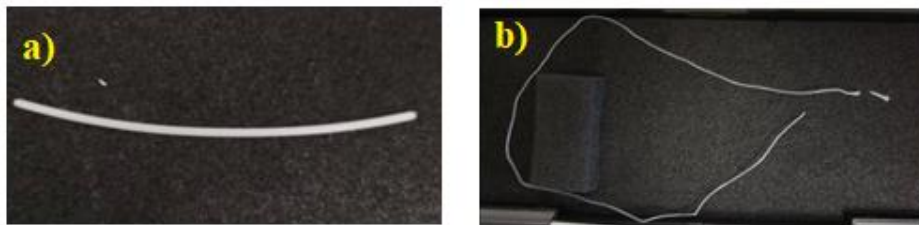
**Slika 19.** Vodena kupelj

#### 3.3.2. Određivanje mehaničkih svojstava

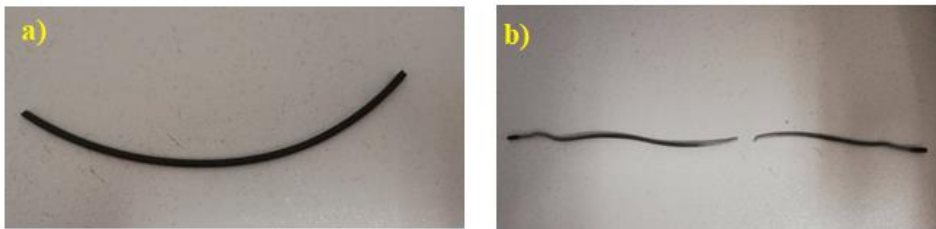
Mehanička svojstva dobivenih uzoraka za izolaciju kabela, maksimalno naprezanje, maksimalno istežanje kao i Youngov modul za sve sustave određivana su na mehaničkoj kitalici Zwick Z005 (slika 20) pri temperaturi od 23°C. Za svaki sustav provedeno je 5 mjerenja. Uzorci su izrezivani na 5 približno jednakih dijelova (slika 21 i 22), brzina istežanja bila je 50 mm/min, a razmak između čeljusti bio je 50 mm.



**Slika 20.** Mehanička kidalica ZwickZ005



**Slika 21.** Uzorci materijala za izolaciju kabela a) prije i b) nakon ispitivanja na mehaničkoj kidalici



**Slika 22.** Uzorci materijala za plaškabela a) prije i b) nakon ispitivanja na mehaničkoj kidalici

### 3.3.3. Određivanje sadržaja gela

Metoda određivanja stupnja umreženja temelji se na određivanju sadržaja gela ekstrakcijom otapalima. Testni uzorci potope se u kipuće otapalo na određeni period te se mjeri masa uzorka prije i poslije testa. Prilikom izrade uzoraka na ekstruderu posebno su pripremljeni uzorci za određivanje gela, definiranog oblika (slika 23).

a)

b)



**Slika 23.** *Primjer uzoraka za određivanje sadržaja gela pripremljenih tijekom rada na ekstruderu za a) izolaciju i b) plašt*

Iz tih uzoraka se pripravila tanka traka koja se zatim rezala na manje komade, koji su trebali težiti najmanje 0,2 g (slika 24).

a)

b)



**Slika 24.** *Trake pripravljene za određivanje sadržaja gela za a) izolaciju i b) plašt*

Tako dobiveni uzorci najprije su kuhani u vodi da bi se postiglo umreženje (slika 25). Uzorci su stavljeni u platnene vrećice koje su se zatvarale pomoću žice te su bili opterećeni određenom težinom kako ne bi plutali u vodi, već da budu potpuno uronjeni. Tako pripremljeni uzorci stavljaju se u vodenu kupelj gdje se kuhaju 2 sata. Nakon 2 sata uzorci se izvade te se stave na staklo i suše u sušilici oko 30 minuta na otprilike 100°C. Zatim slijedi ekstrakcija otapalom gdje su uzorci trebali težiti s točnošću 1 mg ( $m_1$ ). Uzorci su zatim stavljeni u tikvicu s otapalom kojeg treba biti dovoljno da cijeli uzorak bude potopljen (otprilike 80 mL ksilena). Vrećice s uzorkom su potopljene pomoću staklene šipke koja

prolazi kroz kondenzator. Otapalo nastavlja brzo kuhati tijekom 8 sati  $\pm$  30 minuta. Nakon navedenog vremena uzorci se pažljivo uklanjaju iz otapala. Nakon ekstrakcije, vrećica sa ostatkom ispitnog uzorka se suši 3 sata u vakuum sušioniku na  $140^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Osušeni uzorci se zatim važu ( $m_2$ ).



**Slika 25.** Aparatura za određivanje sadržaja gela

Stupanj umreženja svakog uzorka računa se kao postotak mase neotopljenog materijala, prema sljedećim formulama:

$$\% \text{ sadržaj gela} = \frac{m_2}{m_1} * 100 \quad (1)$$

gdje je:  $m_1$  – masa uzorka prije ekstrakcije i  $m_2$  – masa uzorka nakon ekstrakcije

$$\% \text{ sadržaj gela} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \quad (2)$$

gdjeje:  $m_1$  – masa vrećice,  $m_2$  – masa uzorka s vrećicom prije ekstrakcije te  $m_3$  – masa uzorka s vrećicom nakon ekstrakcije

Dobiveni rezultati se zaokruže na najbliži cijeli broj. Ukoliko materijali sadrže punilo mora se uzeti u obzir i sadržaj punila.

### 3.3.4. Hot set test

Hot set test je test koji se primjenjuje kod umrežene plastike. Hot set test provodio se pri temperaturi od 200°C i 250°C. Uzorci dobiveni ekstruzijom izrežu na manje komade kojima se markerom označe početna i krajnja linija te se izmjeri udaljenost između njih. Takav uzorak se stavlja u pećnicu, a sa donje strane postavi se uteg određene mase kako bi se dobila odgovarajuća sila potrebna za naprezanje materijala (slika 26). Uzorak se ostavi s utegom u pećnici 15 minuta. Nakon 15 minuta ponovno se mjeri udaljenost između linija označenih na početku da bi se vidjelo koliko je produljenje materijala. Zatim se uteg ukloni i uzorak se ostavi još 5 minuta u pećnici te se nakon toga ponovno mjeri udaljenost između linija kako bi se vidjelo koliko se materijala vratilo u početni položaj.



**Slika 26.** *Laboratorijska pećnica TCN 50 PLUS*



## PROCESNI UVJETI

**Tablica 1.** Procesni uvjeti i udjeli osnovnog materijala i katalizatora za izradu izolacije kabela, 1. sustav : SXI008 + CM009

Uzorak	1	2	3
m(SXI008) / %	95	94	93
m(CM008) / %	5	6	7
TP / °C	135 – 145 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170		
Brzina / okr. min <sup>-1</sup>	40		

**Tablica 2.** Procesni uvjeti i udjeli osnovnog materijala i katalizatora za izradu izolacije kabela, 2. sustav : SXI008 + CM008

Uzorak	1	2	3
m(SXI008) / %	95,83	95	94,17
m(CM008) / %	4,17	5	5,83
TP / °C	135 – 145 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170		
Brzina / okr. min <sup>-1</sup>	40		

**Tablica 3.** Procesni uvjeti i udjeli osnovnog materijala i katalizatora za izradu plašta za kabele, 3. sustav : SXG011 + CM010 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH

Uzorak	1	2	3
w(SXG011) / %	96,92	96,50	96,08
w(CM010) / %	2,08	2,50	2,92
w(IQAP PE BLACK MASTERBATCH) / %	1,00	1,00	1,00
TP / °C	125 – 135 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170		
Brzina / okr. min <sup>-1</sup>	30		

**Tablica 4.** Procesni uvjeti i udjeli osnovnog materijala i katalizatora za izradu plašta za kabele, 4. sustav : SXG011 + CM008 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH

Uzorak	1	2	3
w(SXG011) / %	94,83	94,00	93,17
w(CM008) / %	4,17	5,00	5,83
w(IQAP PE BLACK MASTERBATCH) / %	1,00	1,00	1,00
Tp / °C	125 – 135 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170		
Brzina / okr. min <sup>-1</sup>	30		

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Iz dobivenih rezultata prikazanih u tablici 5a, za kuhane uzorke, vidljivo je da vrijednosti naprezanja i istezanja opadaju povećanjem udjela katalizatora. Rezultati dobiveni hot set testom pri 200 i 250 °C također opadaju povećanjem udjela katalizatora kao i sadržaj gela. Obzirom na dobivene rezultate može se zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 1 za izolaciju bio 95 %SXI 008 + 5 % CM 009.

Iz dobivenih rezultata prikazanih u tablicama 5b, za uzorke ostavljene da umrežuju na zraku može se vidjeti da vrijednosti naprezanja i istezanja nemaju odgovarajući trend rasta ili pada, također i hot set test i sadržaj gela, no prema konačnim rezultatima, tj. rezultatima koji su dobiveni zadnji 28. dan vidljivo je da su uzorci umrežili na zraku, te pokazuju bolja svojstva od uzoraka umreženih u vodenoj kupelji. Iz uzoraka umreženih na zraku također se može zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 1 za izolaciju bio 95% SXI 008 + 5% CM009.

**Tablica 5.** Rezultati mehaničkog ispitivanja, hot set testa i određivanja sadržaja gela, sustav 1, izolacija: SXI008 + CM009,  $T_p = 135 - 145 - 155 - 165 - 165 - 170 - 170^\circ\text{C}$ , 40 o/min,

### a) Kuhani uzorci, 4h, 70°C

Uzorak	95 %SXI 008 + 5 % CM 009	94 %SXI 008 + 6 % CM 009	93 %SXI 008 + 7 % CM 009
Naprezanje/MPa	20,12	19,92	19,57
Istezanje/%	764,60	708,10	703,70
HST/ST 200°C	21/-7	18/-10	12/-11
HST/ST 250°C	20,3/-2,5	16,5/-5,4	15/-12,5
Sadržaj gela/%	75,3	74,3	73,4

**b) Uzorci ostavljeni na zraku, nekuhani****1. 95% SXI008 + 5% CM009**

Dan	0	7	14	21	28
Naprežanje/MPa	20,18	19,70	19,82	20,28	23,23
Istežanje/%	820,90	740,80	723,50	887,90	789,30
HST/ST 200°C	30,9/-11,9	25,38/-10,4	24,8/-7,15	21,18/-10,18	21,6/-7,7
HST/ST 250°C	-	47,5/8,33	28/1,2	24,6/-0,03	27,8/ 5,6 a - 0,3
Sadržaj gela/%	81,61/87,25	56,74- /77,16(67)	-	79,5	73,7

**2. 94% SXI008 + 6% CM009**

Dan	0	7	14	21	28
Naprežanje/MPa	21,56	21,04	20,00	19,7	24,25
Istežanje/%	750,60	750,10	693,20	811,20	727,50
HST/ST 200°C	18,05/-15	10,73/-16	7,8/-16,83	8,3/-12,73	21/-3 a -11
HST/ST 250°C	-	17,68/-4,8	17,3/-6,18	13,5/-2,15	19/ -2 a -8
Sadržaj gela/%	83	71,93/79,73(75,8)	-	70,28/81,83	85/54,47

### 3. 93% SXI008 + 7% CM009

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	21,13	19,38	19,02	19,59	21,28
Istezanje/%	659,40	649,60	627,40	723,00	667,30
HST/ST 200°C	22,85/-9,1	10,88/-14,08	10,10/-11,68	10,6/-12,4	17,5/ -6,5 a -12,1
HST/ST 250°C		8,85/-9,55	11,25/-7,65	13,45/-5,43	16,7/ -15 a - 5,4
Sadržaj gela/%	84,6	77,2	-	75,15/61,61	83,83

Iz dobivenih rezultata za sustav prikazanih u tablici 6a, za kuhane uzorke, vidljivo je da vrijednosti naprezanja opadaju povećanjem udjela katalizatora. Dobiveni rezultati istezanja pokazuju da uzorak u koji je dodano 5% katalizatora pokazuje odstupanje u odnosu na ostala dva udjela katalizatora, taj uzorak ima najveću vrijednost istezanja. Rezultati dobiveni hot set testom pri 200°C opadaju, dok rezultati dobiveni hot set testom pri 250°C rastu povećanjem udjela katalizatora. Sadržaj gela se povećava povećanjem udjela katalizatora u svim uzorcima. Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 2 za izolaciju bio 95 %SXI 008 + 5 % CM 008.

Prema rezultatima prikazanim u tablicama 6b, za uzorke ostavljene na zraku vidljivo je da vrijednosti naprezanja, istezanja, hot set testa pri 200°C te sadržaja gela ne pokazuju određeni trend rasta ili pada, dok su pri hot set testu na 250°C uzorci puknuli, što pokazuje da pri toj temperaturi nemaju zadovoljavajuća svojstva. Prateći rezultate svakih 7 dana zaključuje se da uzorci prikazani u tablicama 6.b)1 i 6.b)3 pokazuju lošija svojstva 28. dan nego 1. dan što nam govori da nije došlo do umrežavanja, ili da umrežavanje nije provedeno do kraja. Uzorak čiji su rezultati prikazani u tablici 2b dao je dobre rezultate 28. dan te se može zaključiti da je uzorak umrežio na zraku. Uporedbom rezultata uzoraka kuhanih u vodenoj kupelji i uzoraka ostavljenih na zraku za ovaj sustav zaključuje se da uzorci kuhani u vodenoj kupelji daju dosta bolje rezultate te pokazuju veći stupanj umreženosti. Iz uzoraka umreženih na zraku također se može zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 2

za izolaciju bio 95% SXI 008 + 5% CM 008, uz izuzetak rezultata dobivenih za hot set test pri 250°C.

Usporedbom rezultata dobivenih sa katalizatorom CM 009 i katalizatorom CM 008 može se zaključiti da bi za izradu izolacije kabela pogodnije bilo koristiti katalizator CM 009.

**Tablica 6.** Rezultati mehaničkog ispitivanja, hot set testa i određivanja sadržaja gela, sustav 2, izolacija: SXI008 + CM009,  $T_p = 135 - 145 - 155 - 165 - 165 - 170 - 170^\circ\text{C}$ , 40 o/min

**a) Kuhani uzorci, 4h, 70°C**

Uzorak	95,83 %SXI 008 + 4,17 % CM 008	95 %SXI 008 + 5 % CM 008	94,17 %SXI 008 + 5,83 % CM 008
Naprezanje/MPa	24,89	21,44	21,23
Istezanje/%	748,30	787,00	705,20
HST/ST 200°C	30,8/-5,9	23,33/-7,7	18,9/-8,33
HST/ST 250°C	22,5/-7,5	25/-7,5	27,5/-5
Sadržaj gela/%	73,1	93,3	96,7

**b) Uzorci ostavljeni na zraku, nekuhani****1. 95,83 %SXI 008 + 4,17 % CM 008**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	22,42	21,73	20,82	21,5	22,06
Istezanje/%	787,90	682,40	809,70	862,00	677,70
HST/ST 200°C	32,65/-13,73	28/-13,8	18,73/-13,05	19,01/- 13,48	22/-14,8 a - 6,8
HST/ST 250°C	-	pukao	pukao	pukao	pukao
Sadržaj gela/%	83,17/74,52	59,5	-	79,5	53,3

**2. 95 %SXI 008 + 5 % CM 008**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	22,42	21,85	21,50	23,96	22,72
Istezanje/%	792,40	729,20	808,30	1044,90	791,30
HST/ST 200°C	40,35/-15,4	30/-12,5	24,25/-13,95	27,05/-8,78	24/-12,5
HST/ST 250°C	-	pukao	pukao	pukao	42/ 11,5
Sadržaj gela/%	52,72	82,5	-	81,05/66,47	77,1

### 3. 94,17 %SXI 008 + 5,83 % CM 008

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	23,84	20,81	20,69	21,34	22,12
Istezanje/%	804,30	751,20	777,40	786,70	773,50
HST/ST 200°C	27,9/-16,23	27,5/-12,5	14,78/-12,45	20,35/-10,45	23/-5,3
HST/ST 250°C	-	pukao	pukao	pukao	38/ 9 a 2
Sadržaj gela/%	75,88/51,21	84,4	-	78,3	70,98/59,21

Iz dobivenih rezultata prikazanih u tablici 7a, za kuhane uzorke, vidljivo je da vrijednosti naprezanja rastu dok vrijednosti istezanja opadaju povećanjem udjela katalizatora. Rezultati dobiveni hot set testom pri 200°C i 250°C pokazuju da porastom udjela katalizatora dolazi do pucanja uzoraka. Najveći sadržaj gela ima uzorak u koji je dodano 2,5% katalizatora. Na osnovi svih dobivenih rezultata može se zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 3 za plašt bio 96,92%SXG011 + 2,08%CM010 + 1%IQAP BLACK, uz izuzetak rezultata dobivenih za hot set test pri 250°C.

Prema rezultatima prikazanim u tablicama 7b, za uzorke ostavljene na zraku, može se zaključiti da vrijednosti naprezanja, istezanja i sadržaja gela ne pokazuju određeni trend rasta ili pada, dok su svi uzorci kod izvedbe hot set testa pri 200 i 250°C puknuli, odnosno uzorci ne pokazuju dobra svojstva pri povišenim temperaturama. Prateći rezultate svakih 7 dana može se vidjeti da uzorak prikazan u tablici 7.b)1 ima lošija svojstva 28. dan nego 1. dan što govori da umreženje nije provedeno do kraja. Rezultati ostala dva uzorka pokazuju bolja svojstva 28. dan te se zaključuje da oni umrežavaju stajanjem na zraku, isključujući rezultate za hot set testove. Upoređujući rezultate uzoraka kuhanih u vodenoj kupelji i uzoraka ostavljenih na zraku za ovaj sustav može se zaključiti da uzorci ostavljeni na zraku pokazuju bolje rezultate te veći stupanj umreženosti. Za uzorke umrežene na zraku također se može zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 3 za plašt bio 96,92%SXG011 +



2,08%CM010 + 1%IQAP BLACK, uz izuzetak rezultata dobivenih za hot set test pri 200 i 250°C.

**Tablica 7.** Rezultati mehaničkog ispitivanja, hot set testa i određivanja sadržaja gela, sustav 3, plašt: SXG011 + CM010 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH,

Tp = 125 – 135 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170°C , 30 o/min

**a) Kuhani uzorci, 4h, 70°C**

Uzorak	96,92%SXG011 + 2,08%CM010 + 1%IQAP BLACK	96,5%SXG011 + 2,5%CM010 + 1%IQAP BLACK	96,08%SXG011 + 2,92%CM010 + 1%IQAP BLACK
Naprezanje/MPa	12,60	12,68	14,09
Istezanje/%	446,30	365,20	366,60
HST/ST 200°C	24/-25	puknuo	puknuo
HST/ST 250°C	puknuo	puknuo	puknuo
Sadržaj gela/%	76,2	76,6	75,4

**b) Uzorci ostavljeni na zraku, nekuhani****1. 96,92%SXG011 + 2,08%CM010 + 1%IQAP BLACK**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	14,19	12,64	14,13	12,66	13,68
Istezanje/%	356,20	298,00	358,10	421,30	519,60
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
HST/ST 250°C		puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
Sadržaj gela/%	69,04/57,93	66,84/60,09 (63,5)	-	69,6/62,47	74,96/57,8

**2. 96,5%SXG011 + 2,5%CM010 + 1%IQAP BLACK**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	13,68	13,50	13,76	13,11	13,57
Istezanje/%	324,30	302,30	359,90	320,50	479,60
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
HST/ST 250°C	-	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
Sadržaj gela/%	67,7	74,24/70,66(72,4)	-	70,1	77,5

### 3. 96,08%SXG011 + 2,92%CM010 + 1%IQAP BLACK

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	13,34	12,81	13,54	12,37	13,57
Istezanje/%	253,60	439,70	507,70	496,30	434,30
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
HST/ST 250°C	-	puknuo	puknuo	puknuo	puknuo
Sadržaj gela/%	57,67/67,35	67	-	70,6	85,59/60,32

Dobiveni rezultati za uzorak SXG011 + CM008 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH za izolaciju prikazani su u tablici 8.a) za kuhane uzorke, vidljivo je da vrijednosti naprezanja rastu povećanjem udjela katalizatora. Vrijednosti istezanja opadaju povećanjem udjela katalizatora, uzorak u koji je dodano 5% katalizatora pokazuje najveću vrijednost istezanja. Prilikom provedbe hot set testa pri 200 i 250°C svi uzorci su puknuli. Uzorak u koji je dodano 5% katalizatora ima najveći sadržaj gela. Iz dobivenih rezultata za hot set test pri 200 i 250°C može se zaključiti da nijedan uzorak ne bi bio pogodan za primjenu.

Prema dobivenim rezultatima prikazanim u tablicama 8 b), za uzorke ostavljene na zraku, već za prva 2 mjerenja, odnosno 1. i 7. dan vidljivo je da uzorci daju loše rezultate, tj. pokazali su loša svojstva te nije bilo potrebe za daljnjim ispitivanjima. Zaključeno je kao i u slučaju sa kuhanim uzorcima da nijedan uzorak ovoga sustava za plašt nije pogodan za primjenu te je potrebno ispitati što utječe na svojstva ovoga sustava.

**Tablica 8.** Rezultati mehaničkog ispitivanja, hot set testa i određivanja sadržaja gela, sustav 4, plašt: SXG011 + CM008 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH,

Tp = 125 – 135 – 155 – 165 – 165 – 170 – 170°C , 30 o/min

**a) Kuhani uzorci, 4h, 70°C**

Uzorak	94,83%SXG011 + 4,17%CM008 + 1%IQAP BLACK	94%SXG011 + 5%CM008 + 1%IQAP BLACK	93,17%SXG011 + 5,83%CM008 + 1%IQAP BLACK
Naprezanje/MPa	12,75	13,11	13,18
Istezanje/%	317,60	398,40	353,90
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	puknuo
HST/ST 250°C	puknuo	puknuo	puknuo
Sadržaj gela/%	72,7	73	72

**b) Uzorci ostavljeni na zraku, nekuhani**

**1. 94,83%SXG011 + 4,17%CM008 + 1%IQAP BLACK**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	13,45	11,81	-	-	-
Istezanje/%	369,60	357,70	-	-	-
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	-	-	-
HST/ST 250°C	-	puknuo	-	-	-
Sadržaj gela/%	56,6	83,1	-	-	-

**2. 94%SXG011 + 5%CM008 + 1%IQAP BLACK**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	11,77	12,21	-	-	-
Istezanje/%	410,80	417,90	-	-	-
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	-	-	-
HST/ST 250°C	-	puknuo	-	-	-
Sadržaj gela/%	57,3	59,6	-	-	-

**3. 93,17%SXG011 + 5,83%CM008 + 1%IQAP BLACK**

Dan	0	7	14	21	28
Naprezanje/MPa	12,86	12,62	-	-	-
Istezanje/%	428,30	317,40	-	-	-
HST/ST 200°C	puknuo	puknuo	-	-	-
HST/ST 250°C	-	puknuo	-	-	-
Sadržaj gela/%	58,8	59	-	-	-

## 5. ZAKLJUČAK

Iz svih prikazanih rezultata dobivenih provođenjem mjerenja tijekom izrade ovoga diplomskog rada može se zaključiti da bi najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 1 za izolaciju bio 95% SXI008 + 5% CM009.

Najbolji omjer osnovnog materijala i katalizatora za sustav 2 za izolaciju bio bi 95% SXI008 + 5% CM008.

Iz rezultata dobivenih za sustav za izolaciju može se zaključiti da katalizator CM 009 daje bolje rezultate mehaničkog ispitivanja, hot set testa te određivanja sadržaja gela u odnosu na ostale korištene katalizatore. Isti rezultati dobiveni su na uzorcima kuhanim u vodenoj kupelji kao i na onima ostavljenim na zraku.

Na osnovi rezultata dobivenih za plašt kabela može se zaključiti da su najbolja mehanička svojstva dobivena uz katalizator CM010, i to u omjeru 96,92% SXG011 + 2,08% CM010 + 1% IQAP BLACK, što je vidljivo i na uzorcima kuhanim u vodenoj kupelji i na uzorcima ostavljenim na zraku, uz izuzetak rezultata hot set testa pri 200 i 250°C.

Dobivena lošija mehanička svojstva uzoraka koji se koriste za plašt kabela, odnosno kod sustava 4. SXG011 + CM008 + IQAP PE BLACK MASTERBATCH mogu se pripisati lošem umješavanju boje, te nastajanju nehomogenog uzorka kao i slabih mjesta u strukturi te bi u daljnjem ispitivanju bilo pogodno ispitati utjecaj dodatka različitih bojila. Isti rezultati dobiveni su i na uzorcima kuhanim u vodenoj kupelji i na uzorcima ostavljenim na zraku.

Iz rezultata ovog diplomskog rada također se može zaključiti da polietilen, iako ne za sve uzorke u istoj mjeri, umrežuje i stajanjem na zraku pod utjecajem topline i svjetlosti pri čemu je potrebno dulje vrijeme kako bi došlo do umreženja.

## 6. LITERATURA

1. Matija Barišin, (2016.), Niskonaponski električni kabeli, Diplomski rad, Osijek : Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2
2. Dongxin Hea , Jiefeng Gub , Wei Wanga , Shiyuan Liua , Shu Songa and Denghui Yia, Research on mechanical and dielectric properties of XLPE cable under accelerated electrical-thermal aging, 2016., 1021
3. Sophie LEVIGOUREUX, Pedro GARCIA, Marjorie FICQUENET, Isabelle DENIZET, GENERAL CABLE, France, Catalyst alternatives to replace DBTDL and crosslink speed improvement of a low voltage cable insulation, 2015, 1
4. Chonung Kim, Pingkai Jiang, Fei Liu, Songchol Hyon, Myong-guang Ri, Yongmyong Yu, Myongsong Ho, Investigation on dielectric breakdown behavior of thermally aged cross-linked polyethylene cable insulation, 2019, 5
5. <https://sciencing.com/types-electrical-cable-6495444.html> (27.4.2020.)
6. V. Kosar, Z. Kraljević, M. Radović, Modeliranje procesa umreženja izolacije izoliranih vodiča energijskih kabela, Kem. Ind. **66** (11 – 12) (2017), 591 – 599
7. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kabel> (27.4.2020.)
8. PIC Wire & Cable, Cable Materials, Conductors and Insulators, Technical Article #3
9. <http://www.neco-hobbyart.hr/hobby-program/%C5%BEice-i-sajle/bakrena-%C5%BEica-0,8mm-6metara-detail> (27.4.2020.)
10. <https://www.electricaltechnology.org/2015/03/insulation-resistance-of-a-cable.html#insulation-resistance-of-a-cable> (27.4.2020.)
11. J. L. Mead, Z. Tao, H. S. Liu, Insulation Materials for Wire and Cable Applications, Rubber Chemistry and Technology, **75** (4) (2002), 701 – 712
12. [https://www.alibaba.com/product-detail/high-voltage-electrical-wire-insulation-sleeve\\_1282365189.html](https://www.alibaba.com/product-detail/high-voltage-electrical-wire-insulation-sleeve_1282365189.html) (2.5.2020.)
13. S. Sutton, T. Geussens, Cable oversheath materials: the first line of defence for improved cable reliability, IET Conference Publications, 2009

14. <https://www.multicominc.com/training/technical-resources/cable-jacket-materials-whats-right-for-you/> (2.5.2020.)
15. [http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Cable\\_Insulation\\_Materials](http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Cable_Insulation_Materials) (27.04.2020.)
16. <https://www.ataplastic.com/polyethylene/> (2.5.2020.)
17. 9. X. Cao, T. Andritsch, Modification of Polypropylene-based Cable Insulation Material, 3rd Asia-Pacific Electronics and Electrical Engineering Conference, 2018
18. <https://www.indiamart.com/proddetail/polypropylene-granules-7402159588.html> (2.5.2020.)
19. <https://www.exportersindia.com/a1-bricks-industry/colored-pvc-pellets-4188953.htm> (2.5.2020.)
20. <https://www.elandcables.com/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-rubber-insulated-cables> (27.4.2020.)
21. <https://www.indiamart.com/proddetail/epdm-rubber-granules-19742476362.html> (2.5.2020.)
22. Ilona Pleșa, Petru V. Noțingher 2, Cristina Stancu, Frank Wiesbrock, Sandra Schlögl, Polyethylene Nanocomposites for Power Cable Insulations, *Polymers* 2019, 11, 24, 2
23. [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electronic\\_engineering/Cable\\_Insulation\\_Materials.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Cable_Insulation_Materials.pdf) (2.5.2020.)
24. <http://www.fks.co.rs/fkse/maticna/energet/upet/index.htm> (2.5.2020.)
25. J.V. Gulmine, L. Akcelrud, Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE, *European Polymer Journal* 42 (2006) 553–555
26. Jalil Morshedian\* and Pegah Mohammad Hoseinpour, Polyethylene Cross-linking by Two-step Silane Method: A Review, *Iranian Polymer Journal* 18 (2), 2009, 105-109



27. Nino Krznar, (2016), Rekonstrukcija 3D pisača za dobavu materijala u obliku granulata kod postupka taložnog očvršćivanja, Diplomski rad, Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2 – 5

