

# Primjena polimernih materijala u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina

---

**Herbst, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:511091>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**PRIMJENA POLIMERNIH MATERIJALA U SUSTAVU  
SABIRANJA I TRANSPORTA NAFTE I PLINA**

Završni rad

Tin Herbst

N4222

Zagreb, 2020.

PRIMJENA POLIMERNIH MATERIJALA U SUSTAVU  
SABIRANJA I TRANSPORTA NAFTE I PLINA  
TIN HERBST

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-Geološko-Naftni Fakultet

Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

SAŽETAK

Polimerni materijali imaju široku primjenu u suvremenom svijetu, te se koriste u gotovo svim industrijama. U naftnoj industriji imaju vrlo veliku primjenu, primjenjuju se u procesima izrade kanala bušotine, proizvodnje ugljikovodika, kao i u sustavu sabiranja i transporta pridobivenih fluida. U sustavu sabiranja i transporta, njihova je primjena omogućila produljenje radnog vijeka cjevovoda i povećanje učinkovitosti transportnog sustava. Nezaobilazna je primjena polimernih materijala u sustavu zaštite cjevovoda od korozije, gdje najširu primjenu imaju materijali poput polietilena i polipropilena. U nekim slučajevima, cijevi od polimernih materijala, poput PE cijevi i termoplastičnih cijevi, pokazali su se kao ekonomski i tehnološki prihvatljivija rješenja u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina. U radu je opisana primjena polimernih materijala u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina.

Ključne riječi: Polimeri, PE cijevi, Termoplastične kompozitne cijevi, PA-PERT cijevi, antikorozivna zaštita cjevovoda

Završni rad sadrži: 41 stranicu, 6 tablica, 29 slika i 32 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb.

Mentor: Dr.sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGN fakulteta

Ocjenjivači: Dr.sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGN fakulteta

Dr.sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGN fakulteta

Dr.sc. Vladislav Brkić, docent RGN fakulteta

Datum obrane: 11. rujna 2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS SKRAĆENICA .....	III
POPIS OZNAKA I JEDINICA.....	III
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. POLIETILENSKE (PE) CIJEVI .....</b>	<b>2</b>
2.1. Proizvodnja PE cijevi .....	2
2.2. Polimerni materijali za izradu PE cijevi .....	5
2.3. Svojstva, dizajn i klasifikacija PE cijevi .....	7
2.4. Ekonomska analiza primjene PE cijevi .....	11
2.5. Primjeri primjene PE cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina.....	13
2.5.1. <i>Sustav sabiranja i transporta pri proizvodnji plina .....</i>	<i>13</i>
2.5.2. <i>Sustav distribucije prirodnog plina .....</i>	<i>14</i>
<b>3. TERMOPLASTIČNE KOMPOZITNE CIJEVI (TCP) .....</b>	<b>16</b>
3.1. Primjeri primjene termoplastičnih kompozitnih cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina .....	21
3.1.1. <i>Naftno polje Zubair, Irak .....</i>	<i>21</i>
3.1.2. <i>Bitumenski pijesci u Sjevernoj Alberti, Kanada.....</i>	<i>22</i>
3.1.3. <i>Naftno polje Aquila, Italija .....</i>	<i>23</i>
3.2. PA-PERT cijevi.....	24
3.2.1. <i>Primjena PA-PERT cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte .....</i>	<i>26</i>
<b>4. PRIMJENA POLIMERNIH MATERIJALA U ZAŠTITI OD KOROZIJE.....</b>	<b>27</b>
4.1. Vanjska zaštita od korozije.....	27
4.1.1. <i>Epoksidne prevlake .....</i>	<i>27</i>
4.1.2. <i>Polietilenske prevlake .....</i>	<i>28</i>
4.1.3. <i>Polipropilenske prevlake .....</i>	<i>30</i>
4.1.4. <i>Vulkanizirani kloro-sulfo-polietilen .....</i>	<i>32</i>

<b>4.2.</b>	<b>Unutarnja zaštita od korozije</b> .....	33
<b>4.2.1.</b>	<i>Fluorouglični polimeri</i> .....	33
<b>4.2.2.</b>	<i>Grafen-HDPE nanokompozitni materijal</i> .....	33
<b>4.3.</b>	<b>Primjena novih tehnologija u sustavu zaštite od korozije</b> .....	36
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	37
<b>6.</b>	<b>LITERATURA</b> .....	38

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Polietilenske cijevi .....	2
<b>Slika 2-2.</b> Ekstruder-stroj za izradu PE cijevi.....	3
<b>Slika 2-3.</b> Ekstrudirajući vijak .....	3
<b>Slika 2-4.</b> Ovisnost naprezanja bimodalnog HDPE materijala o vremenu za različite radne temperature.....	6
<b>Slika 2-5.</b> Ovisnost maksimalnog radnog tlaka o temperaturi za bimodalnu i unimodalnu HDPE cijev.....	6
<b>Slika 2-6.</b> Koraci koji se primjenjuju kod dizajniranja PE cijevi .....	8
<b>Slika 2-7.</b> Cijena koštanja i ugradnje različitih dimenzija PE100 cijevi u usporedbi s cijenama koštanja i ugradnje čeličnih cijevi .....	12
<b>Slika 2-8.</b> Ukupni troškovi izgradnje cjevovoda od PE100 cijevi u usporedbi s ukupnim troškovima izgradnje čeličnog cjevovoda .....	13
<b>Slika 2-9.</b> Sustav cjevovoda izrađenih od PE cijevi za sabiranje i transport plina i proizvedene slojne vode.....	14
<b>Slika 3-1.</b> Struktura TCP.....	17
<b>Slika 3-2.</b> Trake koje se postavljaju na trup cijevi za neutralizaciju vlačnih i tlačnih naprezanja.....	17
<b>Slika 3-3.</b> Ugradnja termoplastičnih kompozitnih cijevi na kopnu .....	18
<b>Slika 3-4.</b> Spoj TCP izveden pomoću prirubnice i vrata za zavarivanje .....	19
<b>Slika 3-5.</b> Odobalna ugradnja TCP pomoću barži .....	19
<b>Slika 3-6.</b> Konfiguracija TCP za odobalnu ugradnju .....	20
<b>Slika 3-7.</b> Ugradnja termoplastičnih kompozitnih cijevi na naftnom polju Zubair .....	22
<b>Slika 3-8.</b> Polaganje ojačanih termoplastičnih cijevi u rovove, Sjeverna Alberta.....	23
<b>Slika 3-9.</b> Shema proizvodnog procesa na naftnom polju Aquila u Jadranskom moru, Italija	24
<b>Slika 3-10.</b> Neojačana PA-PERT cijev .....	25
<b>Slika 3-11.</b> Postavljanje ojačanih PA-PERT i čepovi parafina u čeličnoj cijevi .....	27
<b>Slika 4-1.</b> Temperatura stakla određena pomoću diferencijalne kalorimetrije skeniranja za fuzijski spojen epoksidni sloj i za materijal s visokom „temperaturom stakla“ .....	28
<b>Slika 4-2.</b> Sustav za zaštitu od korozije izrađen od polietilena .....	29

<b>Slika 4-3.</b> Usporedba sile koju je potrebno primijeniti za skidanje antikorozivnih presvlaka prije i poslije izvođenja testa za uzorke polimernih traka različitih proizvođača .....	30
<b>Slika 4-4.</b> Sustavi polipropilenske zaštite od polipropilena.....	31
<b>Slika 4-5.</b> Utjecaj temperature na jačinu adhezivne sile materijala od polipropilena.....	32
<b>Slika 4-6.</b> Prikaz kuglastog ventila s gumom kao materijalom za zaštitu od korozije i kuglastog ventila čija je unutrašnjost presvučena s PVDF .....	33
<b>Slika 4-7.</b> Transmisije vodene pare kroz HDPE oblog za različite debljine listića grafena ....	34
<b>Slika 4-8.</b> Transmisije vodene pare kroz HDPE oblog za različite težinske udjele grafena ...	35
<b>Slika 4-9.</b> Prikaz vrijednosti temperatura koji uzrokuju termalno raspadanje materijala.....	35

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1.</b> Klasifikacija PE cijevi obzirom na svojstva materijala prema ASTM standardu	11
<b>Tablica 2-2.</b> Svojstva PE cijevi klasificiranih prema ASTM standardu.....	11
<b>Tablica 2-3.</b> Klasifikacija PE cijevi obzirom na svojstva materijala prema ISO standardu ...	11
<b>Tablica 2-4.</b> Primjena PE cijevi u sustavu distribucije plina u 2017. godini u državama EU	15
<b>Tablica 3-1.</b> Međunarodni standardi prema kojima su klasificirane plastične i termoplastične cijevi .....	18
<b>Tablica 3-2.</b> Procjena troškova i vremena ugradnje termoplastičnih i čeličnih cijevi .....	21

## POPIS SKRAĆENICA

**PE** - polietilen

**LDPE** – polietilen niske gustoće

**MDPE** – polietilen srednje gustoće

**HDPE** - polietilen visoke gustoće

**SCG** (*engl.* Slow Crack Growth) – spori rast pukotina

**RCP** (*engl.* Rapid Crack Propagation) – brzo širenje pukotina

**TCP** (*engl.* Thermoplastic Composite Pipe) – termoplastične kompozitne cijevi

**PA** - poliamid

**PERT** – polietilen za visoke temperature

**T<sub>g</sub>** – Temperatura stakla

**DSC** (*engl.* Differential Scanning Calorimetry) – diferencijalna kalorimetrija skeniranja

**3LPE** – troslojna polietilenska zaštita

**PP** - polipropilen

**3LPP** – troslojna polipropilenska zaštita

**CSPE** – vulkanizirani kloro-sulfo-polietilen

**PVDF** – polivinildenfluorid

## POPIS OZNAKA I JEDINICA

**MOP** (*engl.* Maximum Operating Pressure) – maksimalni radni tlak, bar

**MRS** (*engl.* Minimum Required Strength) – minimalna zahtijevana čvrstoća cijevi, bar

**HDS** (*engl.* Hydrostatic Design Stress) – projektirano hidrostatičko naprezanje, bar

**SDR** (*engl.* Standard Dimension Ratio) – koeficijent uvjetovan geometrijom cijevi, -

**D** – vanjski promjer cijevi, mm

**t** – debljina stijenke, mm

**C** – sigurnosni faktor, -

**f<sub>0</sub>** - faktor dizajna materijala, -

**f<sub>1</sub>** – faktor određen radnom temperaturom cjevovoda, -

**f<sub>2</sub>** – faktor određen načinom ugradnje cjevovoda, -

**f<sub>3</sub>** – faktor određen tipom transportiranog fluida, -



## 1. UVOD

Polimeri su materijali sastavljeni od vrlo velikih lanaca molekula ili makromolekula koje su sastavljene od mnogo manjih strukturnih jedinica, monomera. Prema podrijetlu, polimeri se dijele na prirodne i sintetske, pri čemu je od interesa naftne industrije proučavanje svojstava i primjena isključivo sintetskih polimera. Sintetski polimeri dobivaju se polimerizacijom polimera i osnova su za izradu polimernih materijala. Općenito se dijele na tri temeljne skupine:

- **Plastomeri**, sintetički polimeri čije molekule grade duge, linearne ili razgranate lance. Njihovo osnovno svojstvo jest da zagrijavanjem omekšavaju, a hlađenjem se stvrdnjavaju i pri tome ne mijenjaju svoj kemijski sastav niti svojstva.
- **Elastomeri**, sintetički polimeri čije su molekule međusobno povezane manjim brojem poprečnih veza, odlikuju se savitljivošću pri sobnoj temperaturi
- **Duromeri**, sintetički polimeri građeni od gusto umreženih polimernih struktura. Zagrijavanjem se ne mogu preoblikovati i lako se lome.

Polimerni materijali imaju široku upotrebu u naftnoj industriji, od primjene u procesima izrade kanala bušotine gdje se primjenjuju za postizanje željenih svojstava bušotinskog fluida i čine važan dio opreme ušća bušotine, do primjene u optimiziranju proizvodnje bušotina. Međutim, najširu primjenu imaju u sustavu transporta ugljikovodika i nusprodukata, gdje se koriste kao materijali od kojih se izrađuju cjevovodi za transport korozivnih fluida ili kao trake za oblaganje cjevovoda za zaštitu od korozije. Najveće prednosti tih materijala, u usporedbi s prirodnim polimerima i metalima su:

- Dobri su izolatori
- Otporni su na koroziju
- Lako se oblikuju
- Dobro podnose vibracije
- Imaju niski faktor trenja
- Otporni su na trošenje.

Najveću primjenu u sustavu transporta ugljikovodika imaju upravo plastomeri, odnosno polimerni spojevi unutar te skupine, od kojih su najčešći polietilen (PE), polipropilen (PP) i polivinil-klorid (PVC), a dobivaju se preradom pojedinih frakcija iz nafte (enciklopedija.hr, 2020).

## 2. POLIETILENSKE (PE) CIJEVI

U sustavu transporta nafte i plina, dominantni materijal je još uvijek čelik, no postoje slučajevi kada čelične cijevi nisu učinkovito rješenje. U tom slučaju primijenjuju se cijevi izrađene od polimernih materijala, najčešće polietilena. Polietilenske cijevi (slika 2-1.) su cijevi izrađene od polimernog materijala prvi puta proizvedenog 1933. godine koji je postao jedan od najčešće korištenih termoplastičnih materijala u svijetu. Prvi puta, polietilen je bio ciljano proizveden kao supstitut za gumu za potrebe izolacije električnih vodova tijekom 2. svjetskog rata. PE cijevi su prvi puta, za transport fluida korištene još sredinom 1950.-ih i to za potrebe navodnjavanja ruralnih krajeva u Sjevernoj Americi (PPI Handbook, 2008). Danas, PE cijevi imaju široku upotrebu u naftnoj industriji, od primjene za izradu horizontalnih usmjerenih bušotina do primjene u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina, distribucije prirodnog plina, te antikorozivne zaštite cjevovoda. Prednosti PE cijevi u odnosu na čelične su: jeftinije su, spojevi cijevi su dovoljno čvrsti, pa su otporne na propuštanje, otporne su na koroziju i na trošenje materijala, otporne su na potrese i na djelovanje temperature, dugotrajne su s vijekom uporabe od 50 do 100 godina, te su hidraulički učinkovitije u odnosu na čelične, zbog glatkih površina unutrašnje stijenke (PPI Handbook, 2008).

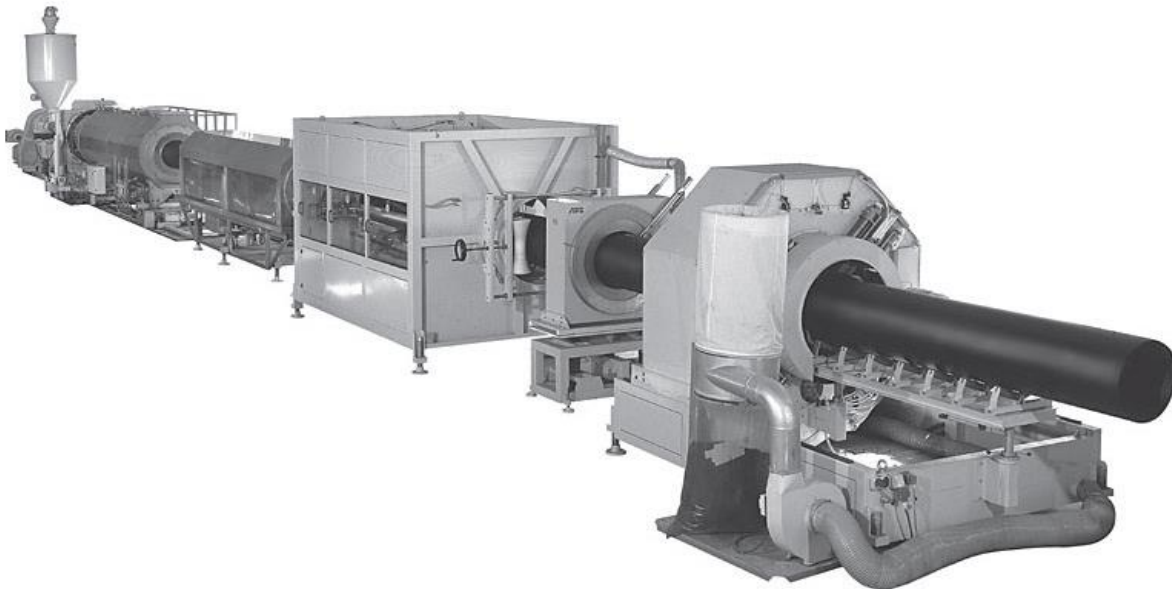


**Slika 2-1.** Polietilenske cijevi (www.jamidarpipes.com, 2020)

### 2.1. Proizvodnja PE cijevi

Proizvodnja PE cijevi započinje zagrijavanjem, taljenjem i miješanjem granula polietilena, te oblikovanjem rastaljene mase u određeni oblik i hlađenju proizvoda. PE cijevi čvrstih stijenki izrađuju se u promjerima od 12,7 mm do 1600,2 mm (1/2" do 63"). Polietilen se proizvođaču

dostavlja u obliku nepigmentiranih granula, a tijekom proizvodnje dodaju mu se pigmenti crne ili žute boje. U pravilu, žute PE cijevi se koriste isključivo za transport i distribuciju prirodnog plina, dok se crne PE cijevi koriste za transport nafte, pitke vode ili otpadnih voda. Proces izrade PE cijevi započinje dodavanjem granula polietilena u ekstruder. Ekstruder (slika 2-2.) je stroj u kojem se granulirani polietilen zagrijava, topi i miješa, a potom prenosi rastaljenu sirovinu do matrice u kojoj se oblikuje u cijev. Postoji nekoliko izvedbi takvih strojeva, no svima je zajedničko da sadrže ekstrudirajući vijak i cilindar. Ekstrudirajući vijak (slika 2-3.) je rotirajući element čija je funkcija homogeniziranje rastaljenog polietilena na način da rastaljenu masu polietilena svojom rotacijom usmjerava na stijenke cilindra ekstrudera. Pritom je polimerni materijal izložen visokom tlaku i temperaturi, te smičnoj sili, a njihov intenzitet ovisi o brzini i dizajnu vijka, te o temperaturi u cilindru ekstrudera (PPI Handbook, 2008).



**Slika 2-2.** Ekstruder-stroj za izradu PE cijevi (PPI Handbook, 2008)



**Slika 2-3.** Ekstrudirajući vijak (PPI Handbook, 2008)

Ekstruder je najčešće opisan promjerom provrta i duljinom cijevi koju izrađuje. Ekstruderi za cijevi najčešće imaju unutarnji promjer od 50,8 mm do 152,4 mm (2" do 6") i duljinu cijevi od 20 do 32 puta promjera provrta. Duljina cijevi podijeljena s promjerom provrta daje L/D omjer. Ekstruderi s L/D omjerom od 24:1 ili većim osiguravaju dovoljno vrijeme zadržavanja kako bi se dobila homogena smjesa rastaljene sirovine za proizvodnju PE cijevi. Sam ekstruder služi za

zagrijavanje polietilena i protiskivanje rastaljene smjese, pomoću ekstruzijskog vijka, u ekstruzijsku matricu. Na cijevi ekstrudera se nalazi 4 do 6 grijaćih pojasa, a temperatura svakog pojasa je posebno kontrolirana pomoću termoparova. Najvećim je dijelom, toplina kojom se zagrijava polimer, smična energija koja dolazi od ekstrudirajućeg vijka i pogonskog motora. Hlađenje je osigurano na nekoliko mjesta duž ekstrudera, gdje se održava temperatura rastaljenog polietilena između 200 °C (390 °F) i 232 °C (450 °F). Cijeli taj proces se odvija pod visokim tlakom, od 138 bar (2000 psi) do 276 bar (4000 psi). Rastaljeni polimer napušta ekstruder u dvije vrpce te se protiskuje kroz žičane mrežaste otvore na perforiranoj čeličnoj ploči. Nadalje, ulazi u ekstrudirajuću matricu u kojoj se nalazi trn, element konusnog oblika, koji se protiskuje kroz rastaljenu smjesu polimera i oblikuje stijenke PE cijevi. Nakon oblikovanja cijevi, slijedi proces hlađenja, koji može biti izveden uranjanjem cijevi u vodenu kupku ili pomoću uštrcavanja hladne vode pod tlakom. Hlađenje uranjanjem cijevi primjenjuje se za cijevi manjeg promjera, dok se hlađenje uštrcavanjem vode pod tlakom primjenjuje za cijevi većeg promjera. U oba slučaja hlađenja, mora se osigurati da temperatura cijevi padne ispod 71 °C (160 °F). Nakon hlađenja, cijevi su spremne za transport i ugradnju. PE cijevi se mogu proizvoditi duljine do nekoliko stotina metara i namatati na bubanj, te tako transportirati do mjesta ugradnje, to je najčešća praksa za cijevi malog promjera (do 6"). Drugi način izrade cijevi, koji je specifičan za cijevi velikih promjera, je izrada cijevi do duljine od 15,34 m (50 ft) i njihovo skladištenje i transport kamionima do mjesta ugradnje (PPI Handbook, 2008).

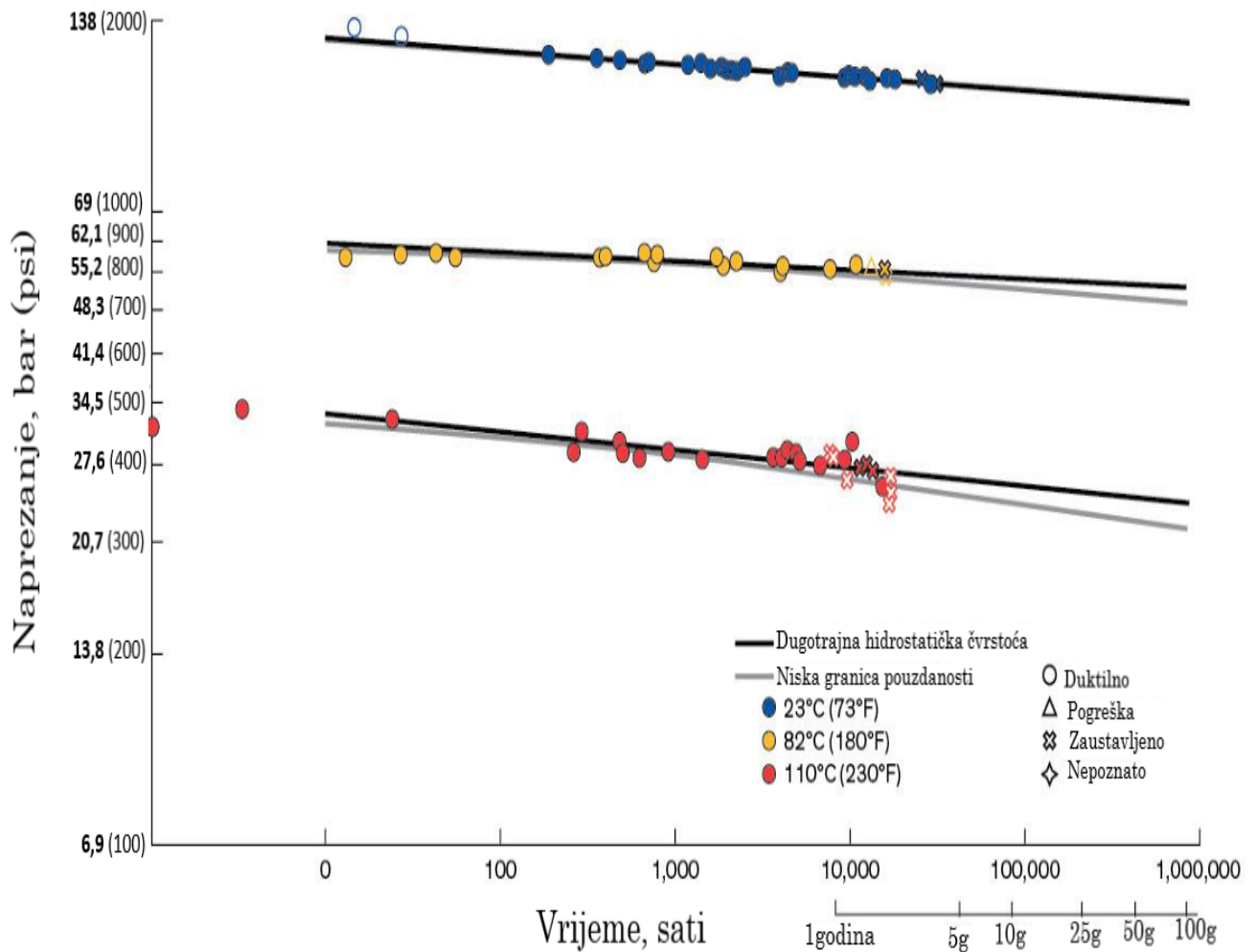
Polietilenske cijevi mogu se međusobno spajati toplinskom fuzijom, električnom fuzijom ili prirubnicama. Toplinska fuzija je postupak spajanja cijevi koji se postiže zagrijavanjem materijala na određenu temperaturu, koja će uzrokovati taljenje materijala, do te mjere da on počne teći, to će uzrokovati miješanje rastaljenog materijala između dvije cijevi. Kada se cijevi spoje na taj način, sam spoj cijevi postaje čvrst ili čak i čvršći od tijela cijevi, i po vlačnoj i po tlačnoj čvrstoći. Kada se toplinski spojen spoj ohladi do temperature okoline, tada je on spreman za rukovanje. Drugi način fuzijskog spajanja cijevi je električna fuzija, koja se razlikuje od konvencionalne, toplinske fuzije po tome što se zagrijavanje materijala cijevi ne obavlja direktno pomoću grijaćeg alata. Kod te metode spajanja cijevi, krajevi cijevi, koji se trebaju spojiti, spajaju se pomoću dodatnog elementa u sastavljenom stanju. To se provodi pomoću toplinski vodljivog materijala. Energija potrebna za zavarivanje spoja dovodi se izvana, pri tome spojni element najčešće sadrži elektrootpornu žicu koja se, prolaskom električne struje, zagrijava i uzrokuje taljenje materijala s unutrašnje stijenke spojnog elementa i s vanjske stijenke cijevi. Da bi se elektrofuzijski spoj uopće i izveo, potrebno je za spajanje dviju cijevi

primijeniti elektrofuzijske parove. Nakon što se spoj ohladi na okolišnu temperaturu, sustav spojenih cijevi je spreman za korištenje. Mehanički spoj cijevi izvodi se pomoću prirubnica i elemenata za spajanje cijevi (PPI Handbook, 2008).

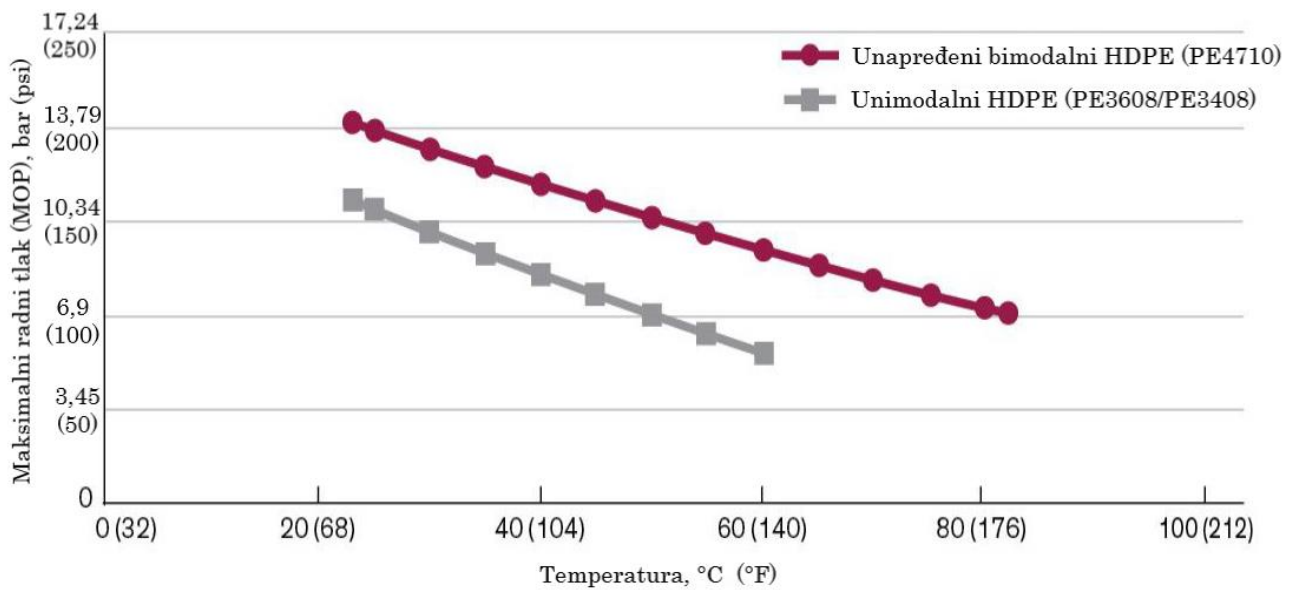
## **2.2. Polimerni materijali za izradu PE cijevi**

PE cijevi se izrađuju iz polietilena koji se kategorizira, obzirom na svoju gustoću, na polietilen niske (LDPE), srednje (MDPE) i visoke gustoće (HDPE). Pri tome su, najčešće korištene PE cijevi u sustavu transporta i distribucije prirodnog plina izrađene od MDPE i HDPE polimernih materijala. Nova generacija polietilenskih cijevi klasificiranih kao PE100 i PE4710 odlikuje se izvrsnim mehaničkim svojstvima i visokom otpornosti materijala na trošenje pri radu u ekstremnim radnim i okolišnim uvjetima, kao što su visoki radni tlakovi i temperature. Ta svojstva su postignuta primjenom bimodalnog polietilena visoke gustoće kao materijala za izradu cijevi koji objedinjuje svojstva MDPE i HDPE materijala. Bimodalni HDPE polimeri dobivaju se u reaktorima kombiniranim miješanjem kašaste i plinske faze, tako se u prvoj fazi u reaktoru, vodik miješa s etilenom, te se dobiva polietilen s niskom molarnom masom. U drugom reaktoru, etilen se miješa s manjom količinom vodika, pa se dobiva polietilen visoke molarne mase. Te dvije proizvedene vrste polietilena se miješaju, pri čemu polietilen visoke molarne mase tvori amorfnu strukturu u materijalu, a polietilen niske molarne mase tvori kristalinsku strukturu u materijalu. Prednost tako proizvedenog HDPE polimera jest njegova bimodalnost koja omogućuje poboljšana mehanička svojstva, a očituje se u promijenjenoj mikrostrukturi u odnosu na unimodalni HDPE polimer. Bimodalni HDPE polimer ima čvrstoću i krutost kao i unimodalni HDPE polimer, a otpornost na naprezanje, trošenje i stvaranje pukotina kao polietilen srednje gustoće (MDPE polimer), te imaju manju molarnu masu što je posljedica tanjih molekula u polimernom lancu (Fan i ostali, 2009).

Svojstva cijevi izrađenih od bimodalnog HDPE polimera omogućuju njegovu primjenu u uvjetima visokih radnih temperatura i tlakova. Posebna prednost cijevi izrađenih od bimodalnog HDPE polimera jest mogućnost njihove primjene u uvjetima radnih temperatura većih od 82 °C, pri čemu i dalje zadržavaju visoku otpornost cijevi na naprezanje kako je prikazano na slikama 2-4. i 2-5. (Chang i Baker, 2016).



**Slika 2-4.** Ovisnost naprezanja bimodalnog HDPE materijala o vremenu za različite radne temperature (Chang i Baker, 2016)



**Slika 2-5.** Ovisnost maksimalnog radnog tlaka o temperaturi za bimodalnu i unimodalnu HDPE cijev s koeficijentom SDR=11 (Chang i Baker, 2016)

Bimodalni MDPE polimeri najčešće se koriste za izradu PE cijevi u sustavu distribucije prirodnog plina. Pod tu skupinu PE cijevi spadaju nove generacije cijevi PE2708 i PE80. U usporedbi s bimodalnim HDPE polimerima, imaju bolju otpornost na trošenje koja je oko 30% manja nego što je to slučaj kod bimodalnih HDPE polimera, te time osiguravaju dulji radni vijek cjevovoda (Michie i ostali, 2008).

Primjena bimodalnih polietilenskih polimera omogućila je u sustavu sabiranja i transporta plina povećanje radne učinkovitosti cjevovoda odnosno primjenu cijevi većih promjera i manjih debljina stijenki što omogućuje konkurentniju cijenu PE cijevi u odnosu na čelične cijevi istog promjera, zbog manjeg utroška materijala za izradu cijevi (Chang i Baker, 2016).

### **2.3. Svojstva, dizajn i klasifikacija PE cijevi**

U usporedbi sa svojstvima čeličnih cijevi, svojstva PE cijevi se od njih bitno razlikuju i imaju brojne prednosti. Cijena nabave, ugradnje i održavanja PE cijevi je bitno manja od čeličnih cijevi. Zbog glatkih unutarnjih stijenki cijevi, materijal cijevi se sporije troši, a fuzijski spojeni spojevi PE cijevi onemogućavaju propuštanje. Otpornost na koroziju i kemijska otpornost još je jedno bitno svojstvo PE cijevi koje omogućuje njihovu primjenu u izrazito korozivnim uvjetima, poput jako kiselog tla ili tla s visokim udjelom soli, ili za transport fluida s visokim udjelom kiselih plinova. Njihova važna prednost je i savitljivost jer imaju veliki radijus savijanja čija vrijednost može biti do 30 promjera PE cijevi što eliminira potrebu za ugradnjom spojnica i elemenata za skretanje trase cjevovoda. Također, imaju i veliku otpornost na habanje materijala jer mogu izdržati tlakove i do 100% veće od maksimalnog radnog tlaka cjevovoda bez ikakvog oštećenja. Zbog svoje žilavosti, duktilnosti, savitljivosti i drugih karakteristika kao što je nepropusnost u području spoja cijevi, predstavljaju idealan materijal za primjenu u seizmički aktivnim područjima. Troškovi njihove ugradnje su puno manji od ugradnje čeličnih cijevi, imaju dugi radni vijek, od 50 do 100 godina, troškovi održavanja su također bitno smanjeni zbog samog dizajna cijevi koji osigurava hidrauličku učinkovitost i načina spajanja koji onemogućava propuštanje na mjestu spajanja. Hidraulička učinkovitost znači da, u usporedbi s ostalim cijevima, pružaju najmanji otpor protjecanju fluida zahvaljujući unutrašnjim stijenkama cijevi koje su glatke, a tijekom vijeka korištenja vrlo teško mogu ohrapaviti jer su otporne na koroziju, a i kemijski su otporne, pa ne može doći ni do taloženja kamenca na stijenke cijevi. PE cijevi su vrlo stabilne u slučaju promjene temperature. Primijenjuju se pri radnim temperaturama od -18 °C (0 °F) do 60 °C (140 °F), a novije

generacije cijevi koje se izrađuju iz bimodalnih HDPE i MDPE polimera imaju otpornost na djelovanje temperatura iznad 82 °C (180 °F). Uspoređujući PE cijevi s drugim cijevima izrađenim od polimernih materijala, PE cijevi će zadržati 50% svoje čvrstoće pri temperaturi od 60 °C (140 °F) što omogućava njihovu primjenu u širokom rasponu temperatura. Još jedno važno svojstvo PE cijevi je duktilnost. Duktilnost je svojstvo materijala da podnese plastičnu deformaciju bez loma materijala - što veću plastičnu deformaciju materijal može podnijeti, ima veću duktilnost. Duktilnost PE cijevi omogućuje njihovu ugradnju u rovove i pokrivanje sa zemljom (PPI Handbook, 2008).

Polietilenske cijevi se, s obzirom na svojstva kao što su gustoća, otpornost na širenje pukotina i minimalna potrebna čvrstoća, klasificiraju prema važećim međunarodnim standardima. To su najčešće, međunarodno prihvaćeni, ASTM i ISO standardi. Pri tome je ASTM standard referentan standard za anglosaksonke zemlje proizvođače PE cijevi, dok se po ISO standardu ravnaju europski proizvođači PE cijevi.

Dizajn PE cijevi za transport plina temelji se na pretpostavci da se svi rizici koji se javljaju u sustavu transporta plina svedu na minimum. Preliminarni dizajn baziran je prvenstveno na studiji o upravljanju sigurnošću. Studiju o upravljanju sigurnošću slijedi postupak svođenja rizika na što je moguće nižu vrijednost. Preliminarni dizajn se modificira sve dok se svi mogući rizici ne svedu na što niže prihvatljive vrijednosti, nakon čega se ustanovljuje konačni dizajn cijevi, kao na shemi prikazanoj na slici 2-6. (Micic, 2018) .



**Slika 2-6.** Koraci koji se primjenjuju kod dizajniranja PE cijevi (Micic, 2018)

U procesu dizajniranja PE cijevi, vrlo je bitna minimalna potrebna čvrstoća cijevi koja je određena mehaničkim svojstvima PE materijala, te pruža cijevi dugoročnu čvrstoću i otpornost



na deformacije. Maksimalni radni tlak cjevovoda, prema ISO standardu, ovisan je o vrijednostima minimalne potrebne čvrstoće cijevi i SDR koeficijenta, prema jednadžbi:

$$MOP = \frac{20 * MRS}{C * (SDR - 1)} \quad (2-1)$$

Gdje je:

$$SDR = \frac{D}{t} \quad (2-2)$$

$$C = f_0 * f_1 * f_2 * f_3 \quad (2-3)$$

Pri čemu je:

MOP – maksimalni radni tlak cjevovoda, bar

MRS - maksimalna potrebna čvrstoća, MPa

C - faktor sigurnosti određen radnom temperaturom, strukturom materijala, načinom ugradnje i tipom transportiranog fluida, ovisno o vrsti namjene može biti 1,25 ili 2,0

SDR - koeficijent uvjetovan geometrijom cijevi (standard dimension ratio), -

D - vanjski promjer cijevi, mm

t - debljina stijenke, mm

f<sub>0</sub> - faktor dizajna materijala, -

f<sub>1</sub> - faktor određen radnom temperaturom cjevovoda, -

f<sub>2</sub> - faktor određen načinom ugradnje cjevovoda, -

f<sub>3</sub> - faktor određen tipom transportiranog fluida, -

Faktor sigurnosti C ovisi isključivo o namjeni cjevovoda. Cjevovodi izrađeni od PE cijevi koji se koriste u sustavu sabiranja ili distribucije prirodnog plina imaju faktor sigurnosti 2,0. Za razliku od njih cjevovodi izrađeni od PE cijevi koji se primjenjuju u transportu vode imaju faktor sigurnosti 1,25. U svakom slučaju, bez obzira na namjenu, PE cjevovodi moraju biti predimenzionirani kako bi se minimizirali svi mogući rizici (pe100plus.com, 2020).

Prema ASTM standardu, maksimalni radni tlak cjevovoda izrađenog od PE cijevi definiran je jednadžbom (PPI, 2014):

$$MOP = \frac{2 \cdot HDS}{SDR - 1} \quad (2-4)$$

Pri tome je:

MOP – maksimalni radni tlak, bar

SDR – koeficijent uvjetovan geometrijom cijevi (standard dimension ratio)

HDS – projektirano hidrostatičko naprezanje, bar.

Prema ASTM standardu, materijali od kojih se izrađuju PE cijevi se klasificiraju s obzirom na gustoću polietilena, otpornost na širenje pukotina (SCG), te maksimalno hidrostatičko naprezanje za koje je cijev konstruirana. SCG (*engl.* slow crack growth) ispitivanje je ispitivanje materijala PE cijevi na način da se mjeri vrijeme potrebno da dođe do širenja pukotine. Prema ASTM F1473 standardu, SCG se utvrđuje PENT testom, na temperaturi od 80 °C (176 °F) i tlaku od 24 bar (350 psi), te se mjeri vrijeme u satima koje treba proći da dođe do širenja pukotine. Najveću otpornost materijala imati će cijevi s najvećim brojem sati potrebnim da dođe do širenja pukotine (Chang i Baker, 2016).

Po ASTM standardu, PE cijevi se klasificiraju prema četiri znamenke koje opisuju prethodno navedene vrijednosti. Pri tome, prva znamenka u kodu PE cijevi opisuje gustoću polietilena od kojeg je cijev napravljena, druga znamenka opisuje vrijednosti SCG testa, dok posljednje dvije znamenke opisuju hidrostatičko naprezanje materijala cijevi. Projektirano hidrostatičko naprezanje materijala cijevi (HDS) je maksimalno naprezanje stijenki cijevi u radijalnom smjeru uzrokovano hidrostatičkim tlakom fluida u cijevi. Prema ASTM standardu, HDS se određuje prema hidrostatičkom tlaku vode pri temperaturi od 23 °C (73 °F). Klasificiranje cijevi, prema ASTM standardu, prema navedenim kriterijima prikazano je u tablici 2-1., a u tablici 2-2. prikazana su svojstva nekoliko vrsta PE cijevi klasificiranih prema ASTM standardu (PPI Handbook, 2008).

**Tablica 2-1.** Klasifikacija PE cijevi obzirom na svojstva materijala prema ASTM standardu (PPI Handbook, 2008)

Znamenka	Svojstvo	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	-	≤ 0,925	0,925-0,940	0,940-0,947	0,947-0,955	>0,955	-	-	-
2.	SCG (sati), PENT test	-	-	-	-	10	30	100	500	-
3. i 4.	Hidrostatskičko naprezanje (HDS)	06			08			10		
		4,34 MPa (630 psi)			5,516 MPa (800 psi)			6,895 MPa (1000 psi)		

**Tablica 2-2.** Svojstva PE cijevi klasificiranih prema ASTM standardu (PPI Handbook, 2008)

Kod PE cijevi	1. znamenka Gustoća materijala (g/cm <sup>3</sup> )	2. znamenka Vrijednost SCG testa (sati)	3. i 4. znamenka Hidrostatskičko naprezanje, MPa (psi)
PE2406	0,925-0,94	10	4,34 (630)
PE3708	0,94-0,947	500	5,52 (800)
PE4710	0,947-0,955	500	6,89 (1000)

PE cijevi klasificirane prema ISO standardu, klasificiraju se samo s obzirom na minimalnu zahtijevanu čvrstoću materijala cijevi, kako je i prikazano u tablici 2-3. (PPI Handbook, 2008).

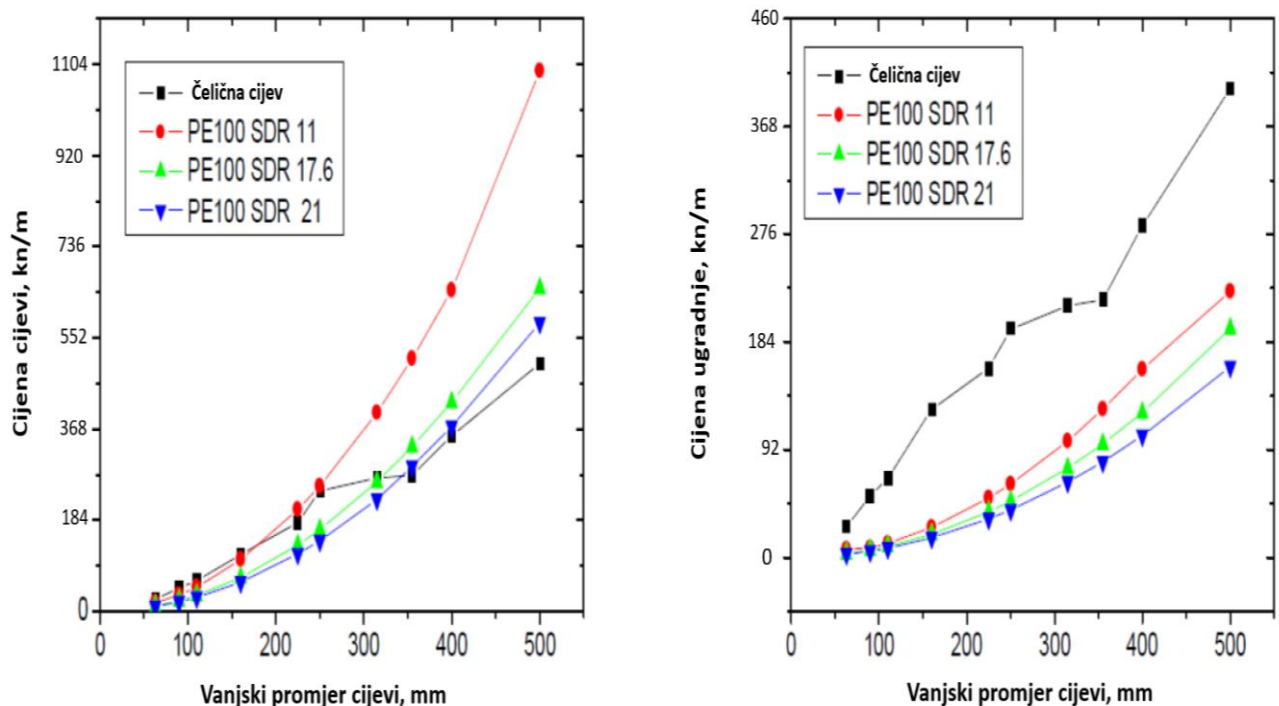
**Tablica 2-3.** Klasifikacija PE cijevi obzirom na svojstva materijala prema ISO standardu (PPI Handbook)

Polimerni materijal	Minimalna potrebna čvrstoća, MRS (MPa)
PE100	10,0
PE80	8,0

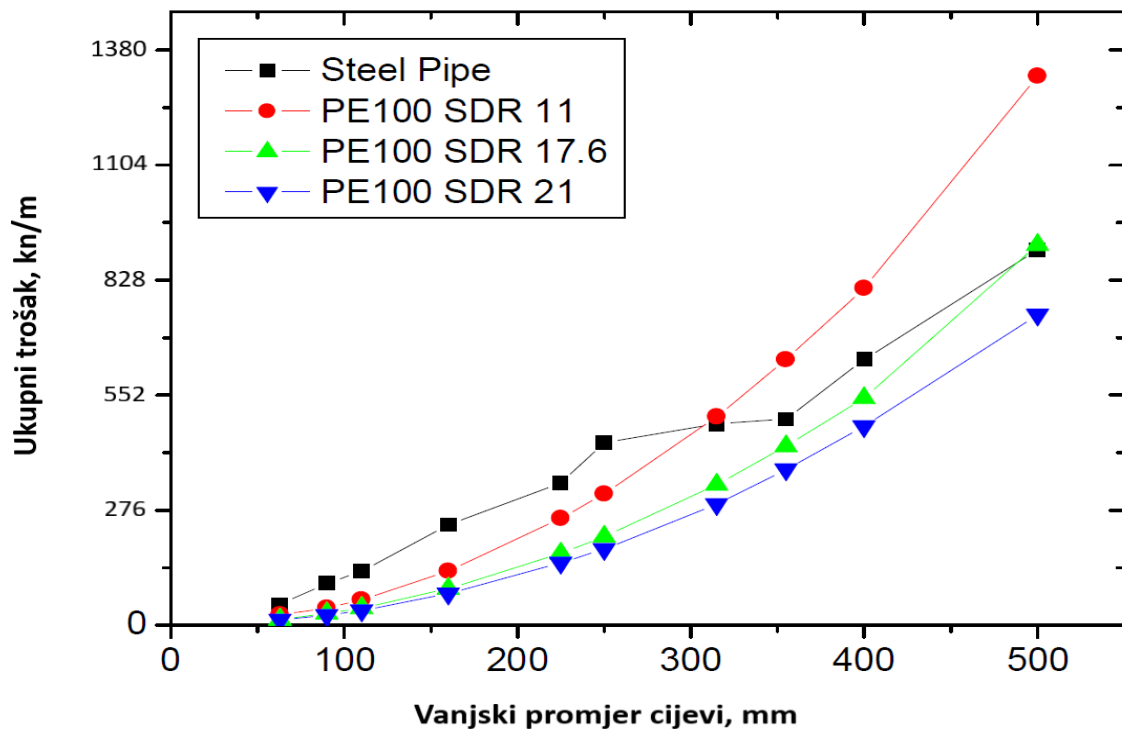
#### 2.4. Ekonomska analiza primjene PE cijevi

PE cijevi se, u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina koriste najčešće za distribuciju prirodnog plina ili za sabiranje i transport proizvedenog prirodnog plina. PE cijevi predstavljaju alternativu u odnosu na čelične cijevi istog promjera zbog svoje fleksibilnosti, jednostavnosti ugradnje, visoke kemijske otpornosti, otpornosti na koroziju, te dugog radnog vijeka. U slučaju ugradnje PE cijevi manjih promjera, velike duljine cijevi, do nekoliko stotina metara, se transportiraju namotane na bubanj do mjesta ugradnje, umanjujući tako trošak transporta u usporedbi s troškovima transporta čeličnih cijevi. U slučaju ugradnje PE cijevi velikih promjera, većih od 152,4 mm (6"), pojedinačne cijevi duljine 15,34 m (50 ft) transportiraju se kamionima

do mjesta ugradnje, a spajanje cijevi mora se obaviti na svakih 15,34 m duljine cijevi, što poskupljuje trošak ugradnje. Cijene koštanja PE100 cijevi, koja je najčešće korištena klasa PE cijevi u sustavu sabiranja i transporta plina, raste sukladno povećanju vanjskog promjera cijevi. To se jasno može vidjeti na slici 2-7. koja je poslužila kao ekonomska analiza za projekt izgradnje cjevovoda za sustav sabiranja i transporta metana iz ležišta ugljena u sjeverozapadnoj Kini. Na slici se vidi kako je cijena koštanja PE100 cijevi s SDR koeficijentom 17,6 i 21 značajno manja od čeličnih cijevi, sve do promjera većih od 300 mm kada cijena PE100 cijevi premašuje cijene čeličnih cijevi. S povećavanjem vanjskog promjera PE100 cijevi s SDR koeficijentom 11 na promjere veće od 250 mm, cijena PE100 cijevi premašuje cijenu koštanja čeličnih cijevi. Cijene ugradnje PE100 cijevi su značajno manje od cijena ugradnje čeličnih cijevi bez obzira na dimenzije zbog jednostavnijeg postupka ugradnje i spajanja PE100 cijevi. U konačnici se može zaključiti da su ukupni troškovi izgradnje cjevovoda od PE100 cijevi značajno manji od troškova izgradnje cjevovoda od čeličnih cijevi istog promjera za veće SDR koeficijente, odnosno veće vanjske promjere i manje debljine stijenke (slika 2-8.). Veći SDR koeficijenti će se postići izradom cijevi većih promjera i manjih debljina stijenki što je omogućeno primjenom bimodalnog HDPE polimera kao primarnog materijala za izradu PE100 cijevi (Xiong i Wei, 2014).



**Slika 2-7.** Cijena koštanja (lijevo) i ugradnje (desno) različitih dimenzija PE100 cijevi u usporedbi s cijenama koštanja i ugradnje čeličnih cijevi (Xiong i Wei 2014)



**Slika 2-8.** Ukupni troškovi izgradnje cjevovoda od PE100 cijevi u usporedbi s ukupnim troškovima izgradnje čeličnog cjevovoda (Xiong i Wei, 2014)

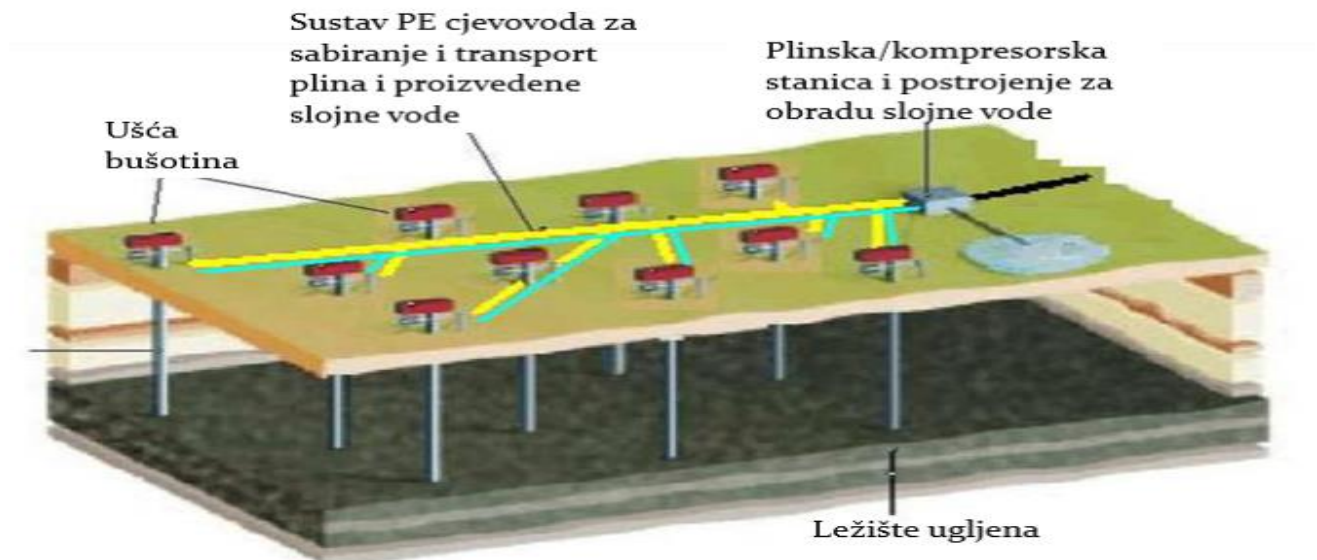
## 2.5. Primjeri primjene PE cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina

### 2.5.1. Sustav sabiranja i transporta pri proizvodnji plina

Eksploatacija plina iz ležišta ugljena je danas jedan od najbrže rastućih trendova u naftnoj industriji koji je Australiju prometno u sami vrh zemalja izvoznica plina. Privođenje proizvodnji metana iz ležišta ugljena omogućeno je zbog relativno malih dubina zalijeganja, od 500 m do 1500 m, a sam postupak eksploatacije se temelji na ispumpavanju slojne vode iz ležišta ugljena čime se narušava slojni tlak u ležištu i uzrokuje oslobađanje plina iz pora ležišta ugljena. Za sustav sabiranja i transporta plina i proizvedene slojne vode za projekt eksploatacije plina iz ležišta ugljena u Bowen bazenu i Surat bazenu u istočnoj Australiji odabrane su PE100 cijevi, pomoću kojih se planira spojiti više od 30 000 bušotina sa sustavom plinskih i kompresorskih stanica i postrojenjima za obradu slojne vode kako je prikazano na slici 2-9. Za tu je svrhu potrebno izgraditi sustav cjevovoda od PE100 cijevi duljine preko 50 000 km s promjerima cjevovoda iznad 800 mm. Cijevi za izgradnju cjevovoda bilo je potrebno konstruirati za specifične radne uvjete, kao što je prosječna temperatura fluida mjerena na ušću bušotine od 30 °C do 40 °C, te na prosječne dnevne temperature od preko 40 °C i sa zahtjevima

da se osigura operativnost PE cjevovoda na rok očekivanog vremena eksploatacije od 20 godina (Heathcote i ostali, 2012).

Projekt je i dalje aktivan, te je do danas izgrađen sustav cjevovoda od PE cijevi za sabiranje plina iz ležišta ugljena duljine od preko 22 000 km (pipa.com.au/applications, 2020).



**Slika 2-9.** Sustav cjevovoda izrađenih od PE cijevi za sabiranje i transport plina i proizvedene slojne vode (Heathcote i ostali, 2012)

### 2.5.2. Sustav distribucije prirodnog plina

PE cijevi imaju najširu primjenu u sustavu distribucije prirodnog plina, odnosno transportu plina u niskotlačnoj plinskoj mreži do krajnjih korisnika. Posljednjih godina, zamjena čeličnih cijevi u plinskoj distributivnoj mreži sa PE cijevima uzima sve više maha, čemu svjedoči i podatak da je više od 90% plinske distribucijske mreže u SAD-u i Kanadi izrađeno od PE cijevi (muellersystems.com, 2020).

U 2018. godini, u Japanu, ukupna duljina ugrađenih PE cijevi je iznosila 101 500 km što čini 39% ukupne plinske distribucijske mreže Japana. U budućnosti će se nastaviti daljnja ekspanzija PE cijevi u sustavu transporta prirodnog plina. Razlog tako velikog udjela PE cijevi u sustavu distribucije plina jest visoka otpornost tih cijevi na potrese po čemu je Japan specifičan. U tu svrhu, još je 1979. godine utvrđen Japanski industrijski standard (JIS) koji je propisivao svojstva PE cijevi kako bi se izdržali mogući budući potresi i osigurao dugi radni vijek plinskog distribucijskog sustava (Nakagami i Kasatani, 2018).

U Europi, prva zemlja koja je još 1970. uvela PE cijevi u svoju plinsku distribucijsku mrežu bila je Francuska. Do 2017. godine, gotovo sve države članice EU su u svoju plinsku distribucijsku mrežu uvele PE cijevi, koje su u velikoj mjeri potisnule čelične, što prikazuje i tablica 2-4.

**Tablica 2-4.** Primjena PE cijevi u sustavu distribucije plina u 2017. godini u državama članicama EU (marcogaz.org, 2020)

Država (EU28)	Ukupna distribucijska mreža (km)	PE cijevi u plinskoj distribucijskoj mreži (km)	Udio PE cijevi u plinskoj distribucijskoj mreži (%)
Austrija	43400	28683	66%
Belgija	71609	52561	73%
Češka	73181	42445	58%
Danska	18229	15677	86%
Njemačka	498500	254235	51%
Irska	11339	11226	99%
Italija	257844	72067	28%
Nizozemska	125000	21250	17%
Poljska	170900	68360	40%
Portugal	17450	15339	88%
Slovačka	33301	14519	44%
Španjolska	70307	59761	85%
Francuska	203092	143003	70%
Finska	1911	1808	95%
Slovenija	4342	2229	51%
UK	126335	81657	65%
Grčka	6087	4663	77%
Rumunjska	17218	8958	52%
Cipar	0	0	0%
Latvija	5500	2824	51%
Estonija	2150	1104	51%
Litva	8300	4261	51%
<b>Hrvatska</b>	<b>18386</b>	<b>9439</b>	<b>51%</b>
Malta	0	0	0%
Švedska	2720	1396	51%
Bugarska	249	128	51%
Luksemburg	1962	1007	51%
Mađarska	84000	43124	51%
<b>Ukupno</b>	<b>1873312</b>	<b>961724</b>	<b>51%</b>

### 3. TERMOPLASTIČNE KOMPOZITNE CIJEVI (TCP)

Termoplastične kompozitne cijevi su cijevi čvrstih stijenki izrađene od polimernih materijala s vlaknima od stakla, ugljika ili kevlar. Predstavljaju tehnologiju čije prednosti, poput visoke čvrstoće, manje gustoće u odnosu na gustoću vode, antikorozivna svojstva i manja kapitalna ulaganja dolaze do izražaja kod primjene na odobalnim postrojenjima za transport pridobivenih fluida od ušća proizvodne bušotine do proizvodne platforme. Isto tako, moguća je i njihova primjena na kopnu u sredinama velike korozivnosti kao što su izrazito kisela tla ili u slučaju proizvodnje fluida s visokim sadržajem kiselih plinova. Takve cijevi imaju rastuću primjenu u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina, te zbrinjavanja otpada nastalog u procesima obrade ugljikovodika. Prvenstveno su razvijene kao alternativa čeličnim cijevima zbog njihovih ograničenja u primjeni, kao što je slaba otpornost na koroziju, relativno velika masa samih cijevi, ali i cijena. Termoplastične cijevi imaju zadovoljavajuću savitljivost i izrađuju se u jednom komadu velike duljine, od 300 ili 400 m za primjenu na kopnu, pa do nekoliko tisuća metara za primjenu na moru. U oba slučaja, cijevi se nakon proizvodnje, namataju na bubanj i tako transportiraju do mjesta ugradnje. Spajanje s novim nizom cijevi se izvodi tek na svakih 300 m ili 400 m u slučaju ugradnje na kopnu. U usporedbi s čeličnim cijevima istog promjera ugrađuju se relativno brzo. Uz to, imaju visoku otpornost na habanje, niske cijene održavanja i poboljšane karakteristike protoka.

Općenito se cijevi promjera od 50,8 mm do 406,4 mm (2" do 16") primjenjuju na kopnu, dok se cijevi promjera od 50,8 mm do 203,2 mm (2" do 8") primjenjuju na odobalnim postrojenjima, a trenutno je u razvoju i cijev promjera 254 mm (10") za primjenu na moru. Dobro podnose tlakove iznad 1000 bar, dubina ugradnje na odobalnim lokacijama seže od 2500 m do 3000 m ispod razine površine vode, a dobro podnose i kiselu okolinu.

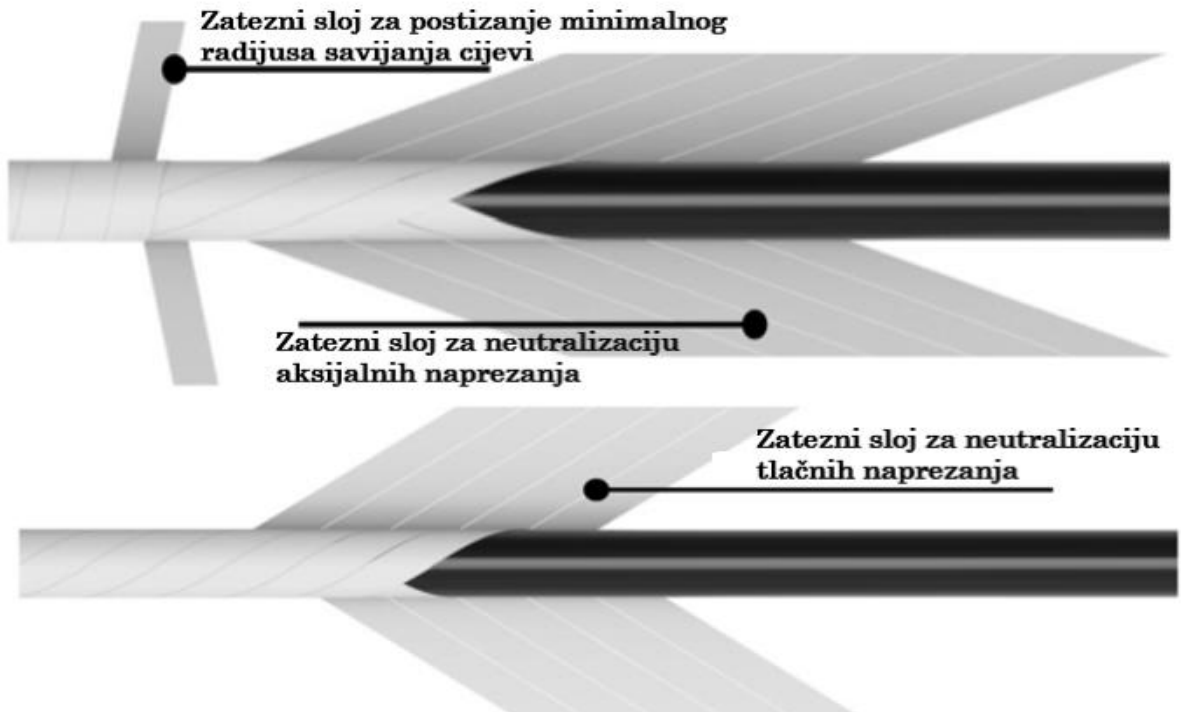
Termoplastične kompozitne cijevi sadrže „trup“ na koji se postavljaju još barem dva ili tri sloja materijala (slika 3-1.). „Trup“ cijevi je od termoplastičnih materijala kao što su polietilen (HDPE i PEX) i poliamidi (PA). Prvi sloj materijala koji se postavlja na „trup“ cijevi čini ojačani oblog koji podnosi veće tlakove, sabijanje ili sažimanje i veća aksijalna opterećenja. S obzirom na okolišne uvjete i karakteristike protoka koji ovisi o svojstvima fluida koji protječe unutar cijevi, taj sloj izvodi se iz zateznih traka za povećavanje otpornosti cijevi na aksijalna naprezanja i traka za neutraliziranje tlačnih naprezanja, prikazano na slici 3-2. Same trake mogu biti izrađene od stakla, ugljika, vlakna od kevlar ili ugljičnog čelika, a moraju biti izvedene tako da uzrokuju minimalan polumjer savijanja cijevi, što je izrazito bitno kod odobalne ugradnje TCP, pri čemu tada neće doći do efekta „razmotavanja“ cijevi. Drugi sloj, koji štiti



cijev tijekom instalacije i održavanja, najčešće je izrađen od polietilena visoke gustoće (HDPE). Naposljetku, vanjski, treći sloj materijala se koristi za povećanje težine same cijevi, a postavlja se zavisno o potrebi i mjestu ugradnje (Cheldi i ostali, 2019).



Slika 3-1. Struktura TCP (Cheldi i ostali, 2019)



Slika 3-2. Trake koje se postavljaju na trup cijevi za neutralizaciju vlačnih i tlačnih napreznja čine prvi sloj materijala na trupu cijevi (Barbosa i ostali, 2019)

Termoplastične kompozitne cijevi su standardizirane prema važećim međunarodnim standardima kako bi se mogle primjenjivati u naftnoj industriji. Cijevi se testiraju nakon proizvodnje i klasificiraju prema važećim standardima, prikazanim u tablici 3-1.

**Tablica 3-1.** Međunarodni standardi prema kojima su klasificirane plastične i termoplastične cijevi (Cheldi i ostali, 2019)

Standard	Opis
API 15HR	Cijevi od stakloplastike za visoke tlakove
API 15S	Klasifikacija namotanih ojačanih plastičnih cijevi
API 17B	Preporučeni postupci za rad sa fleksibilnim cijevima
API 17TR2	Starenje PA-11 u fleksibilnim cijevima
API 17K	Tehnički podaci za spojene fleksibilne cijevi
API 17TR1	Standard za polimerni unutrašnji tlačni omotač za visoke temperature fleksibilnih cijevi
ISO 23936-2	Naftna, petrokemijska i industrija prirodnog plina-nemetalni materijali u kontaktu sa medijima koji se proizvode u naftnoj industriji, 1. dio, Termoplastični materijali
ASTM F686	Tehnički podaci za staklom ojačane termoplastične cijevi
DNV-OS-C501	Kompozitne komponente
DNVGL-RP-F119	Termoplastične kompozitne cijevi
ISO TS 18226	Ojačani termoplastični sustavi za plinovita goriva

TCP se u onshore projektima primjenjuju samo u slučaju ekstremnih okolišnih uvjeta i izrazito korozivnih svojstava fluida koji se treba transportirati. Cijena ugradnje TCP, u usporedbi s cijenom ugradnje čeličnih cijevi je bitno manja. Transport cijevi do mjesta ugradnje obavlja se kamionima, a ugradnja cijevi (slika 3-3.) zahtijeva jednostavnu opremu s kojom se može postaviti 6 km cijevi po danu (Cheldi i ostali, 2019).



**Slika 3-3.** Ugradnja termoplastičnih kompozitnih cijevi na kopnu (Cheldi i ostali, 2019)

Kako bi se spojile cijevi s dva ili više kalema, nužno je da spoj bude napravljen od kompozitnog, ugljičnog ili nehrđajućeg čelika. To se postiže tako što se na svakom završetku cijevi nalazi vrat za zavarivanje ili priрубnica napravljena od materijala s visokom otpornošću na koroziju, kako je prikazano na slici 3-4. Svako spajanje takvih cijevi najčešće izvodi izvođač ovlašten direktno od samog proizvođača cijevi.



**Slika 3-4.** Spoj TCP izveden pomoću priрубnice (lijevo) i vrata za zavarivanje (desno) (Cheldi i ostali, 2019)

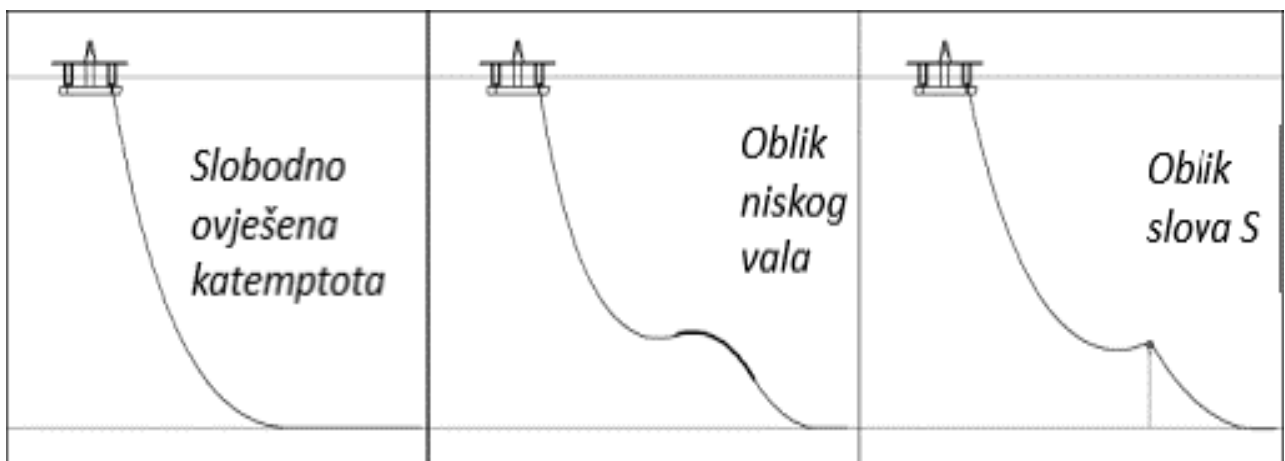
Odobalna ugradnja TCP izvodi se pomoću barži (slika 3-5.) na kojima se transportiraju cijevi, namotane na bubanj, čija duljina može iznositi od 3000 m do 6000 m. Sami odobalni transport i ugradnja obavljaju se pomoću barži, čija je duljina i nosivost značajno manja od barži za transport i ugradnju čeličnih cijevi (Cheldi i ostali, 2019).



**Slika 3-5.** Odobalna ugradnja TCP pomoću barži (Cheldi i ostali, 2019)

Uloga termoplastičnih kompozitnih cijevi primijenjenih u offshore projektima jest da povezuju ušća proizvodnih bušotina, koje se nalaza na morskom dnu, s plutajućim postrojenjem za proizvodnju, skladištenje i istovar (FPSO) ili proizvodnom platformom koji se nalaze na površini vode. Prednosti primjene tehnologije termoplastičnih kompozitnih cijevi u usporedbi s konvencionalnom tehnologijom, su višestruke: antikorozivne su, uzrokuju manje opterećenje proizvodnog postrojenja, imaju puno bolju otpornost na habanje materijala, troškovi ugradnje su značajno manji, mogu biti postavljene u ekonomski najpovoljnijoj konfiguraciji slobodno ovješene katemptote, zbog glatkih unutrašnjih stijenki cijevi omogućeno je kvalitetnije čišćenje cijevi i poboljšane su karakteristike protoka kroz samu cijev.

TCP se za svaki offshore projekt dizajniraju posebno, zavisno o okolišnim uvjetima koja trebaju izdržati, te karakteristikama protoka i svojstvima fluida koji se njima transportira. Prilikom dizajniranja cijevi, posebnu pažnju treba usmjeriti na čvrstoću same cijevi, kako bi ona izdržala sva naprezanja u vodenoj sredini tijekom proizvodnje ili remontnih radova i različitih okolišnih uvjeta, te na konfiguraciju povezivanja (slika 3-6.) cijevi s ušćem proizvodne bušotine koja može biti, prema API Standardu 17B, u obliku: slobodno ovješene katemptote (*engl. „free hanging catenary“*), niskog vala (*engl. „low lazy wave“*) ili pak u obliku slova S (Barbosa i ostali, 2019). Primjenom TCP omogućeno je postavljanje cijevi u ekonomski najpovoljnijoj konfiguraciji slobodno ovješene katemptote jer je opterećenje proizvodnog postrojenja ostvareno s takvim cijevima, u usporedbi s konvencionalnim fleksibilnim cijevima, oko 70% manje (airborneoilandgas.com, 2020).



**Slika 3-6.** Konfiguracija TCP za odobalnu ugradnju (ctresources.co.uk, 2020)

Vanjski dizajn termoplastičnih kompozitnih cijevi, primijenjenih u odobalnim projektima, mora imati čvrstu strukturu bez obzira da li je ona ispunjena fluidom ili prazna, te treba onemogućiti prekomjerno bočno pomicanje, čak i u ekstremnim okolišnim uvjetima, poput jakih morskih

struja. Da bi se to postiglo, potrebno je uspostaviti stabilan (uravnotežen) sustav, što se postiže određivanjem minimalne linearne težine potrebne da cijevi potonu, odnosno da se svlada sila uzgona. U konačnici, svladavanje uzgona postiže se djelovanjem same težine cijevi, a pri tome, najveći otpor uzgonu pruža posljednji, vanjski sloj cijevi koji ima ulogu utega koji se najčešće izrađuje od HDPE polimera. Najveća prednost primjene takvih cijevi u offshore projektima je njihova dugotrajnost - mogu se koristiti i do 30 godina nakon ugradnje bez velikih operativnih troškova održavanja cijevi, a same cijevi su dizajnirane tako da ni u kojem slučaju neće doći do efekta „razmotavanja“ cijevi (*engl. „birdcaging effect“*), što može biti slučaj kod konvencionalnih tehnologija fleksibilnih cijevi (Cheldi i ostali, 2019).

### 3.1. Primjeri primjene termoplastičnih kompozitnih cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina

#### 3.1.1. Naftno polje Zubair, Irak

Polje Zubair je naftno-plinsko polje smješteno u južnom Iraku, 20 km udaljeno od grada Basre. Iz ležišta se proizvodi kapljevina u struji plina, pa se pridobiveni dvofazni fluid s ušća proizvodne bušotine usmjerava na stanice za otplinjavanje na kojima se nalazi oprema za odvajanje nafte od vode i plina. Međutim, proizvedeni fluid sadrži značajan udio CO<sub>2</sub>, 1.6% mol uz visoki salinitet proizvedene slojne vode (koncentracija NaCl u vodi je 200g/l). Sadržaj navedenih tvari, stvorio je korozivnu sredinu koja je imala štetan utjecaj na unutrašnje stijenke čeličnih cijevi. Zbog toga su za transport proizvedene vode do utisnih bušotina primijenjeni cjevovodi od termoplastičnog materijala. Same cijevi su ukopane u rovove kako bi se anulirao utjecaj temperature okoliša na cijevi, jer su izrađene od polietilena i vlakna od kevlara s ograničenjem maksimalne prihvatljive radne temperature od 65 °C. U tablici 3-2. je dana procjena troškova i vremena ugradnje termoplastičnih i čeličnih cijevi na naftnom polju Zubair koja je poslužila kao analiza za donošenje konačne odluke o ugradnji cijevi.

**Tablica 3-2.** Procjena troškova i vremena ugradnje termoplastičnih i čeličnih cijevi (Cheldi i ostali, 2019)

Opcije	Ukupni trošak (5200m)		Troškovi ugradnje (4500 m)		Vrijeme potrebno za ugradnju	
	1.000 €	€/m	1.000 €	€/m	Broj dana	m/dan
TCP	590	113	100	24	16	300
Čelične cijevi	312	60	285	62	60	75

Iz tablice 3-2. je vidljivo da je vrijeme potrebno za ugradnju termoplastičnih cijevi gotovo četverostruko kraće od onog za ugradnju čeličnih cijevi. Razlog tome je što termoplastične cijevi zahtijevaju izradu spoja tek na svakih 400 m duljine cjevovoda, a samo vrijeme izrade jednog spoja iznosi oko 30 minuta, dok je za duljinu od 400 m čeličnih cijevi potrebno 40 spojeva koji uključuju varenje, a ponekad i popravno varenje spojeva. Stoga je donesena odluka kako će se postaviti dva cjevovoda od termoplastičnog materijala, duljina 2800 m i 1700 m (slika 3-7.) koji će proizvedenu slojnu vodu odvoditi iz stanica za otplinjavanje do utisnih bušotina. Ukupna duljina ugrađenih cijevi promjera 152,4 mm (6“) iznosi 4500 m. Cijevi su na lokaciju transportirane namotane na bubanj. Ukupno je bilo potrebno 13 komada, pri čemu je na svakom bubnju bilo namotano 400 m cijevi (Cheldi i ostali, 2019).



**Slika 3-7.** Ugradnja termoplastičnih kompozitnih cijevi na naftnom polju Zubair (Cheldi i ostali, 2019)

### **3.1.2. Bitumenski pijesci u Sjevernoj Alberti, Kanada**

Bitumenski pijesci u Sjevernoj Alberti nalaze se na malim dubinama zalijeganja, (40 m do 60 m dubine). Postupak proizvodnje iz takvih ležišta je in-situ oplemenjivanje, odnosno utiskivanje vruće pare u naftno ležište kako bi se stimulirao protok ugljikovodika iz ležišta. Za pogon generatora za proizvodnju vruće pare na površini, kao pogonsko gorivo, najčešće se koristi prirodni plin. Kako su za sjeverna područja Kanade specifična kisela tla, čelične cijevi u takvim tlima će u vrlo kratkom vremenskom periodu korodirati. Stoga je 2006. godine tvrtka AltaGas Utilities Inc. u Sjevernoj Alberti postavila distribucijski plinovod od ojačanih termoplastičnih cijevi, koji je omogućio transport prirodnog plina od magistralnog plinovoda do mjesta eksploatacije bitumenskih pijesaka. Trasa je bila duga 7,7 km, pri čemu je prva

dionica od 1,1 km plinovoda napravljena od čelika. Duž te dionice, postavljen je niz mjernih i regulacijskih stanica na kojima se radni tlak sustavno snižavao od maksimalnog radnog tlaka od 99,3 bar (1440 psi) magistralnog plinovoda do tlaka druge dionice izrađene od ojačanih termoplastičnih cijevi. Prva dionica, izrađena od čelika s maksimalnim dozvoljenim radnim tlakom od 48,3 bar (700 psi) i s radnim tlakom od 34,5 bar (500 psi), spojena je s drugom dionicom plinovoda, duljine 6,6 km izrađenom od ojačanih termoplastičnih cijevi i radnim tlakom od 10,34 bar (150 psi). Cijevi, vanjskog promjera 76,2 mm (3") i debljine stijenke 11 mm, transportirane su na bubnju do mjesta ugradnje, te su postavljane u rovove (slika 3-8.) i spajane pomoću prirubnica. S ekonomskog gledišta, ugradnja ojačanih termoplastičnih cijevi je bila prihvatljivija opcija s obzirom da su procijenjeni troškovi nabave i ugradnje čeličnih cijevi iznosili 357,41 kn/m a troškovi nabave i ugradnje termoplastičnih cijevi iznosili su 332,82 kn/m pa je ugradnjom termoplastičnih cijevi ostvarena ušteda od 11%. Toj uštedi, doprinijeli su i puno manji troškovi transporta jer su cijevi transportirane namotane na bubanj, a na svakom bubnju se nalazilo 300 m cijevi (Lesage i ostali, 2010).

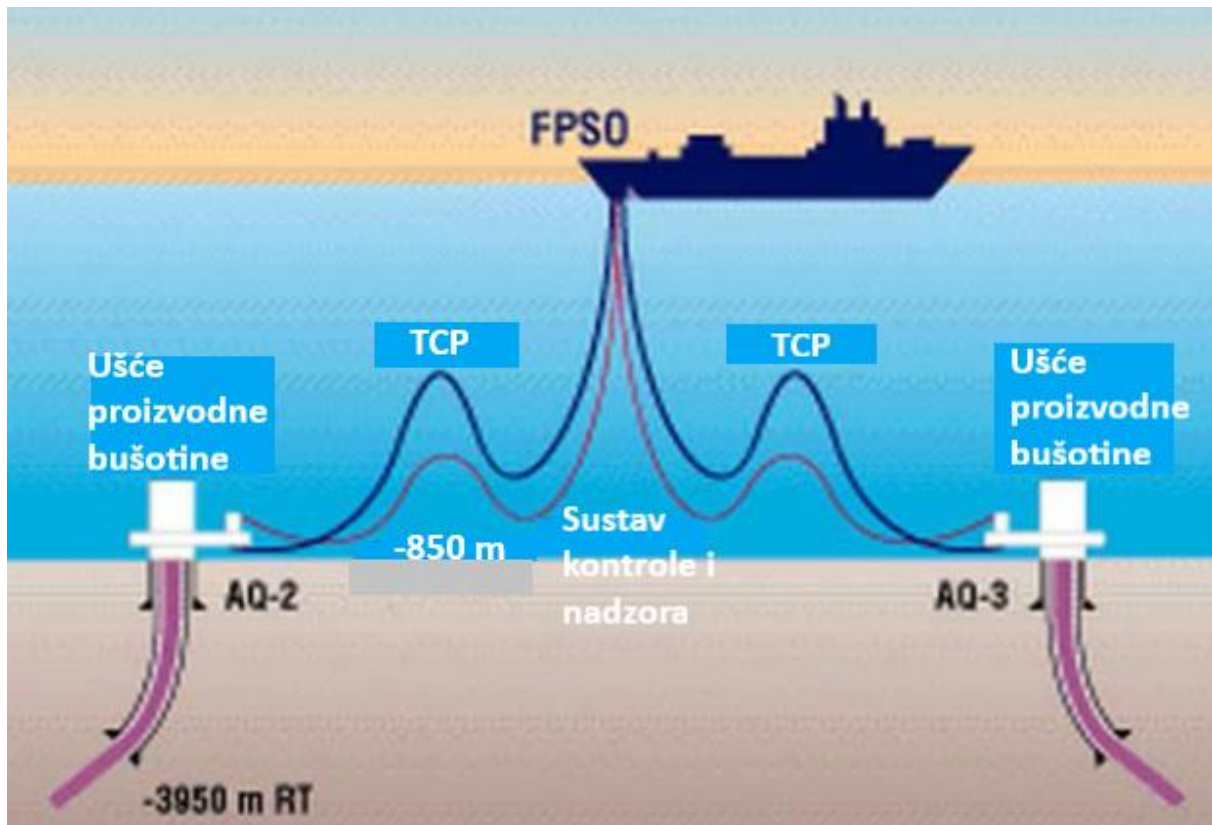


**Slika 3-8.** Polaganje ojačanih termoplastičnih cijevi u rovove, Sjeverna Alberta (Lesage i ostali, 2010)

### **3.1.3. Naftno polje Aquila, Italija**

Naftno polje Aquila smješteno je u Jadranskom moru, u odobalnom području talijanske regije Apulije. Na naftnom polju su i dvije proizvodne plinske bušotine na dubini mora od 850 m čija su ušća povezana s plutajućim postrojenjem za proizvodnju, skladištenje i istovar (FPSO) pomoću termoplastičnih kompozitnih cijevi (slika 3-9.). Bušotine proizvode kiseli plin, odnosno plin s visokim udjelom H<sub>2</sub>S i CO<sub>2</sub>. Cijevi promjera 152,4 mm (6") su na lokaciju

transportirane na bubnju dimenzija 2x20 m. Posebno su dizajnirane za ugradnju na naftnom polju Aquila, prilagođene za temperature okoliša od -5 °C do 25 °C i za maksimalne dopuštene koncentracije H<sub>2</sub>S od 15 000 ppm, s otpornosti na vanjski tlak (tlak gnječenja) veći od 85 bar i maksimalni unutrašnji radni tlak (tlak rasprskavanja) veći od 200 bar što je utvrđeno tlačnom probom izvedenom nakon ugradnje, s dušikom (N<sub>2</sub>) kao ispitnim fluidom (Cheldi i ostali, 2019).



**Slika 3-9.** Shema proizvodnog procesa na naftnom polju Aquila u Jadranskom moru, Italija (Cheldi i ostali, 2019)

### 3.2. PA-PERT cijevi

S razvojem eksploatacije ugljikovodika iz nekonvencionalnih ležišta (šejlova), došlo je do potrebe za termoplastičnim cijevima s boljom otpornošću na koroziju, te nižim troškovima ugradnje i održavanja od čeličnih cijevi. PA-PERT cijevi su cijevi od poliamida (PA12) i polietilena za visoke temperature (PERT). Konstrukcijski gledano nisu klasične termoplastične kompozitne cijevi koje se sastoje od trupa cijevi i još dva ili tri sloja materijala na njemu. Polietilen za visoke temperature (PERT) nova je klasa PE4710 materijala izrađen od



bimodalnog polietilena s vrijednostima SCG testa većim od 10 000 sati i vrijednosti kritičnog tlaka, dobivenog RCP testom, većim od 12 bar (Chang i ostali, 2018).

RCP test je ispitivanje materijala cijevi pri kojem se utvrđuju kritični tlak i kritična temperatura cjevovoda pri kojima će doći do širenja pukotine u aksijalnom smjeru. Kritični tlak cjevovoda biti će manji što je radna temperatura cjevovoda niža, a kritična temperatura cjevovoda biti će manja što je radni tlak cjevovoda veći (Sandstrum i Lively, 2010).

Dizajn PA-PERT cijevi dobiven je kombinacijom poliamida (PA12) otpornih na ugljikovodike i polietilena (PERT) koji je specifičan po dobroj duktilnosti i prihvatljivoj cijeni. Kako bi se osigurala čvrsta veza između sloja poliamida i polietilena, pogotovo pri visokim temperaturama, razvijen je posebni vezivni materijal koji osigurava kompaktnost između slojeva materijala, čak i pri temperaturama od 82 °C (180 °F). Proizvodnja PA-PERT cijevi prikazane na slici 3-10., izvodi se postupkom koekstruzije. Tri ekstrudera, po jedan za svaki od materijala koji se koriste u izradi cijevi nanosi materijal kroz mlaznice na ekstrudirajućoj glavi formirajući tako koaksijalne cilindrične slojeve. Potom se cijev hladi s vodom u vakuum komori do okolišne temperature, a nakon toga se namata na bubanj i transportira (Chang i ostali, 2018).



**Slika 3-10.** Neojačana PA-PERT cijev (Chang i ostali, 2018)

Kod PA-PERT cijevi plinovi, poput CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>, uslijed naglog pada tlaka u cjevovodu, mogu prodrijeti kroz unutrašnje stijenke cijevi i time stvoriti džepove plina između slojeva materijala od kojih je cijev izrađena i time narušiti kompaktnost same cijevi, pa je zato potrebno provesti odgovarajuće ispitivanje cjevovoda. Test se provodi pri tlaku od 150 bar i temperaturi od 85 °C

sa smjesom plina od 20% CO<sub>2</sub> i 80% N<sub>2</sub>, uz smanjenje tlaka od 70 bar/minuti. Samo ispitivanje cjevovoda se provodi kroz 24 sata tijekom kojeg se kontinuirano ponavljaju ciklusi povećanja i smanjenja tlaka u cjevovodu, a pri čemu se promatra pojava deformacija cijevi u obliku pojave džepova plina.

Test starenja materijala se u slučaju primjene PA-PERT cijevi provodi u sustavu transporta sirove nafte kako bi se utvrdila otpornost materijala cijevi na starenje uslijed djelovanja aromatskih spojeva iz sirove nafte. Test se provodi sa fluidom, standardiziranim prema ASTM D471 kao gorivo C koje se sastoji od 50% volumnog udjela izooktana i 50% volumnog udjela toulena. Materijal cijevi se ostavlja u navedenom fluidu 1000 sati pri temperaturi od 60 °C. Nakon toga, uzorci se suše u komori za sušenje tijekom 16 sati, potom se određuje sila koju je potrebno primijeniti za odvajanje slojeva.

Tlačna proba za PA-PERT cijevi se provodi tako da uzorci cijevi budu izloženi temperaturi od 80 °C i naprezanju od 4,6 MPa (660 psi), ali prije toga se uzorci postavljaju na nekoliko sati u vodenu kupku na temperaturu od 80 °C. Nakon provođenja testa, cijevi se mogu upotrebljavati ukoliko su izdržali 1000 sati u navedenim uvjetima bez pojave oštećenja (Chang i ostali, 2018).

### ***3.2.1. Primjena PA-PERT cijevi u sustavu sabiranja i transporta nafte***

U konkretnom slučaju, PA-PERT cijevi su primijenjene u sustavu sabiranja nafte u Rocky Mountainu, u SAD-u. Razlog njihove primjene bili su problemi s taloženjem parafina na unutarnje stijenke čeličnih cijevi što je uzrokovalo probleme u transportu proizvodnog fluida do sabirne stanice. Opseg taloženja parafina (slika 3-11.) bio je toliki da se zahtijevalo redovito čišćenje cijevi tijekom kojeg se cjevovod morao staviti izvan funkcije. To je uzrokovalo povećane troškove održavanja i manju proizvodnju. Stoga su postavljene ojačane PA-PERT cijevi promjera 152,4 mm (6"), s unutrašnjim slojem od najlona koji ima prirodnu otpornost na taloženje parafina. Učestalost čišćenja cijevi radi otklanjanja parafina smanjila se s nekoliko dana za čelične cijevi na svakih nekoliko tjedana u slučaju PA-PERT cijevi. Time je poboljšana i produktivnost samog polja jer je povećan radni vijek cjevovoda (Chang i ostali, 2018).



**Slika 3-11.** Postavljanje ojačanih PA-PERT cijevi promjera 152,4 mm (6") (lijevo) i čepovi parafina u čeličnoj cijevi (desno) (Chang i ostali, 2018)

## **4. PRIMJENA POLIMERNIH MATERIJALA U ZAŠTITI OD KOROZIJE**

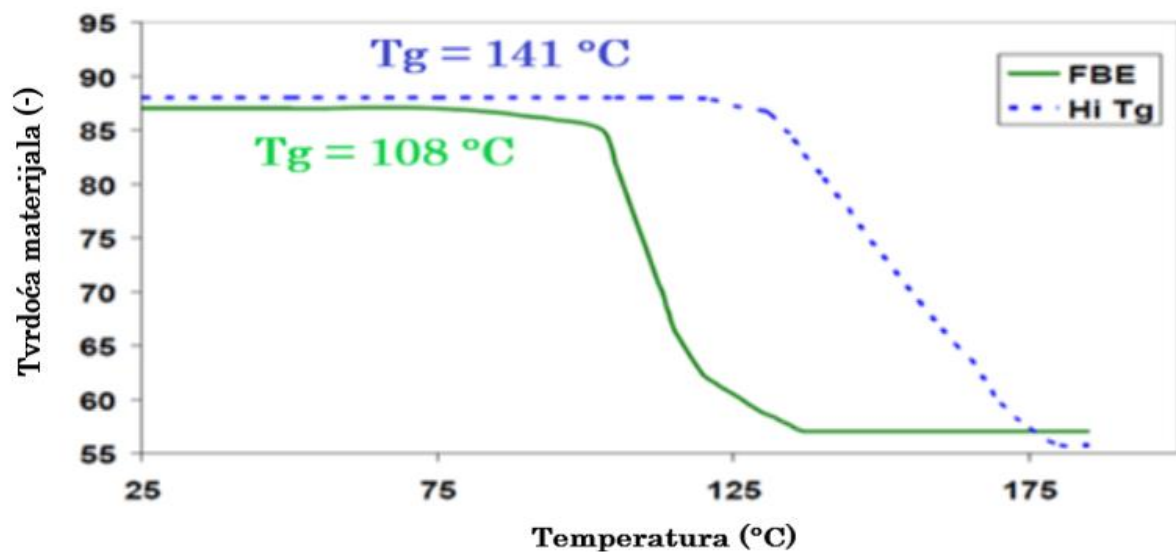
### **4.1. Vanjska zaštita od korozije**

#### **4.1.1. Epoksidne prevlake**

Ovisno o okolnostima i okolišnim uvjetima, prevlačenje cjevovoda antikorozivnom zaštitom može biti izvedeno u obliku: epoksidnog sloja, dvostrukog epoksidnog sloja, troslojne polipropilenske zaštite (3LPP), troslojnog polipropilenskog izolirajućeg sustava ili višeslojnog izolirajućeg sustava (3LPE). U svim slučajevima, epoksidni slojevi se uvijek primjenjuju, bilo samostalno ili u kombinaciji s drugim polimernim materijalima. Primarna je uloga epoksidnog sloja u sustavu zaštite cjevovoda od korozije sprječavanje prodora kisika na površinu čelika. Međutim, bitno je spomenuti i temperaturu iznad radne temperature cjevovoda i ispod temperature taljenja materijala tzv. „temperaturu stakla“ ( $T_g$ ), pri kojoj materijal prestaje biti staklast, smanjuje mu se tvrdoća pa on postaje mekan i viskozan (slika 4-1.), što može dovesti do oštećenja cjevovoda (Perez i ostali, 2008).

Temperatura stakla određuje se pomoću diferencijalne kalorimetrije skeniranja (DSC), termoanalitičke metode kojom se ispituju svojstva polimernih materijala na način da se uzorak

izlaže različitim temperaturama, te se prati promjena svojstava materijala, poput tvrdoće koja se za gume i polimere utvrđuje sa durometrom (www.intertek.com/analysis/dsc, 2020).

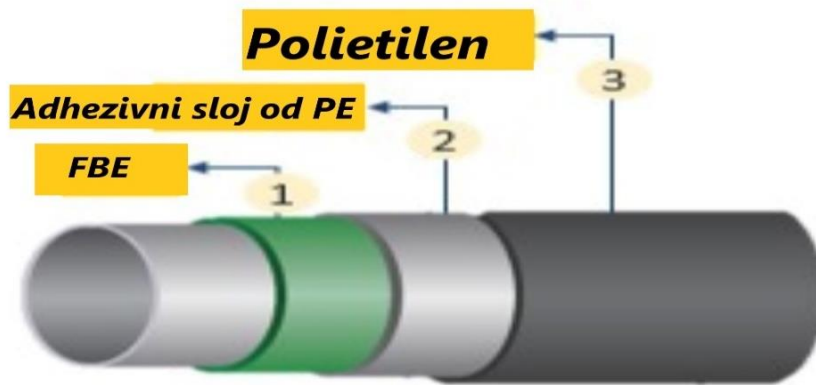


**Slika 4-1.** Temperatura stakla određena pomoću diferencijalne kalorimetrije skeniranja za fuzijski spojen epoksidni sloj (zeleno) i za materijal s visokom „temperaturom stakla“ (plavo) (Perez i ostali, 2008)

Ukoliko se iznad epoksidnog sloja nalazi i izolatorski sustav od poliuretana ili nekog drugog polimera, antikorozivna zaštita će funkcionirati i iznad „temperature stakla“. Sama primjena epoksidnih slojeva ipak nije tako učinkovita kod visokih temperatura upravo zbog niske „temperature stakla“ što dovodi do problema održavanja adhezije na površini čelika. Stoga se u slučaju visokih temperatura najčešće koriste polipropilenski (PP) ili polietilenski (PE) troslojni sustavi zaštite. Oba polimera sadrže maleinski anhidrid koji ima jako dobra adhezivna svojstva (Perez i ostali, 2008).

#### **4.1.2. Polietilenske prevlake**

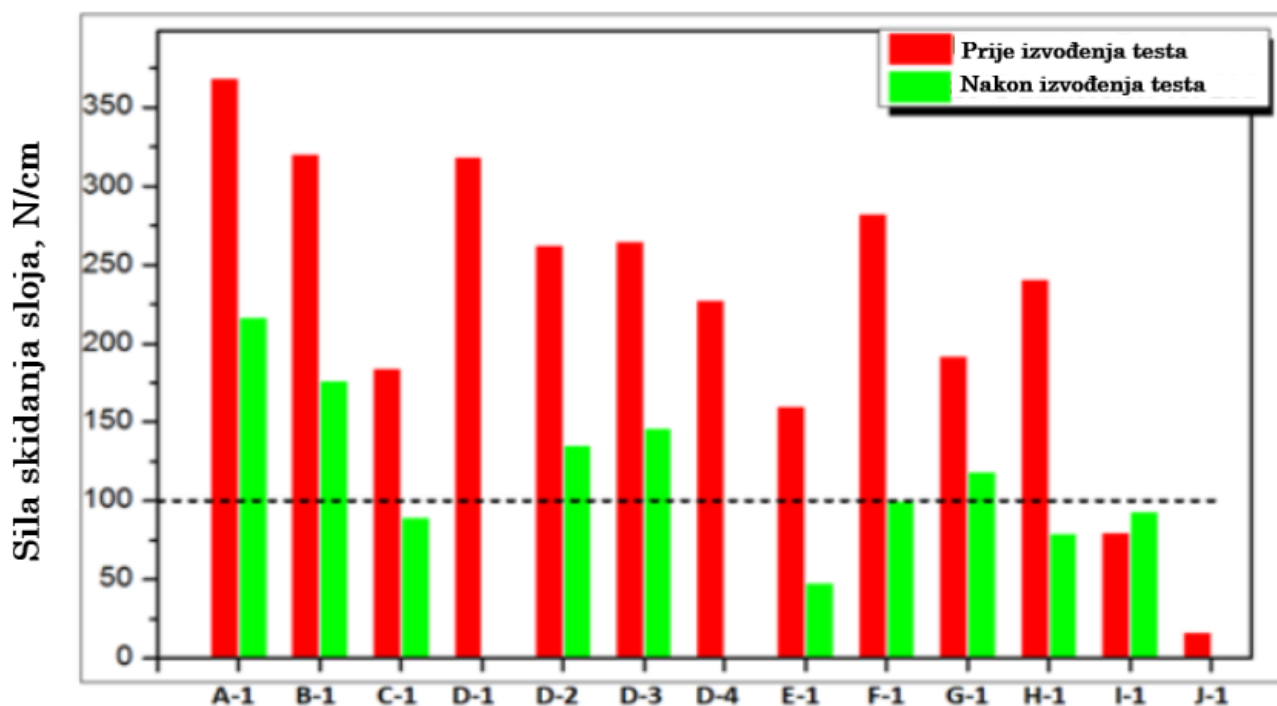
Široku primjenu u sustavu zaštite od korozije imaju troslojne polietilenske prevlake (3LPE). Polietilenske prevlake imaju najveću primjenu u zaštiti od korozije kopnenih cjevovoda jer dobro podnose okoliše s visokom koncentracijom kisika, te kisela tla. Uobičajena 3LPE prevlaka sastoji se od tri sloja, od kojih unutarnji sloj čine fuzijski spojeni epoksidni slojevi, vanjski gornji sloj je od polietilena (PE), a međusloj također od PE polimera koji omogućuje adheziju između donjeg epoksidnog sloja i vanjskog sloja od polietilena (slika 4-2.).



**Slika 4-2.** Sustav za zaštitu od korozije izrađen od polietilena (wascoenergy.com, 2020)

Nedostatak primjene antikoroziivne zaštite na bazi PE jest slabija otpornost na utjecaj visokih temperatura tijekom duljeg vremenskog perioda, što često zna biti ograničavajući faktor za njihovu primjenu u sustavu transporta nafte i plina zbog visokih radnih temperatura cjevovoda, pogotovo u slučaju transporta nafte, slojne vode ili smjese nafte i vode. Otpornost antikoroziivnih polimernih prevlaka na utjecaj visoke temperature utvrđuje se testiranjem polimernih traka uranjanjem u vruću vodu na određeni vremenski period, najčešće u trajanju od 28 dana. Pritom se polimerne trake izlažu temperaturama vode od 50, 60, 70 ili 80 °C, te se nakon ispitnog perioda mjeri adhezivna moć sloja na način da se određuje sila koju je potrebno primijeniti za skidanje antikoroziivne prevlake. Samo testiranje 3LPE prevlaka koristi se kako bi se utvrdila izdržljivost prevlaka istog kemijskog sastava, ali različitih proizvođača, u ekstremnim radnim uvjetima. Na taj način će se odabrati prevlaka optimalnih svojstava za određene okolišne uvjete i radne temperature cjevovoda na kojima se treba primijeniti (Feng i ostali, 2019).

Na slici 4-3. prikazani su rezultati laboratorijskog testiranja troslojnih polietilenskih prevlaka koje je provela tvrtka Petrochina Pipeline R&D. Testirani su uzorci prevlaka različitih proizvođača koji su bili uronjeni u vodu pri temperaturi od 80 °C tijekom vremenskog perioda od 28 dana. Nakon testiranja, svi su uzorci pokazali smanjenje adhezivne moći u odnosu na adhezivnu moć koju su imali prije testiranja.



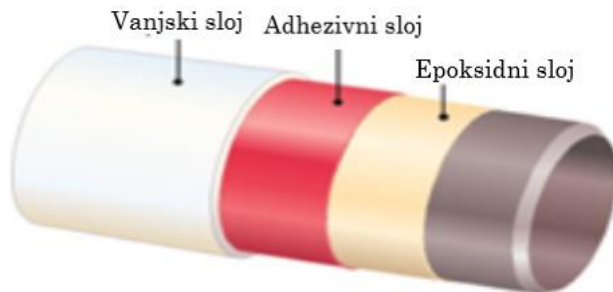
**Slika 4-3.** Usporedba sile koju je potrebno primijeniti za skidanje antikoroziivnih presvlaka prije (crveno) i poslije (zeleno) izvođenja testa za uzorke polimernih traka različitih proizvođača (Feng i ostali, 2019)

#### 4.1.3. Polipropilenske prevlake

Polipropilen se u sustavu transporta nafte i plina najčešće primjenjuje za zaštitu cjevovoda od korozije u obliku troslojne polipropilenske prevlake. Najveću primjenu ima u podvodnim cjevovodima jer od svih polimernih materijala, koji se koriste u zaštiti od korozije, ima najveću sposobnost temperaturne izolacije, ali i najmanji udio apsorpcije vode koji iznosi od 0,02% do 0,03%. Isto tako, ima dobra mehanička svojstva, kao što su maksimalno vlačno naprezanje od 25 MPa, visoku otpornost materijala na savijanje od 1200 MPa, lom materijala tek pri istezanju od 400% početne duljine, te visoku temperaturu taljenja od 165 °C. Troslojna polipropilenska zaštita (3LPP) se sastoji od primarnog, donjeg epoksidnog sloja, polipropilenskog adhezivnog sloja koji omogućava povezivanje donjeg epoksidnog sloja s gornjim slojem od polipropilena, kao što je prikazano na slici 4-5. Preporučena radna temperatura cjevovoda za polipropilensku zaštitu, u slučaju primjene na kopnu, iznosi 110 °C, a za primjenu na moru 140 °C (Turner, NACE, 2011).

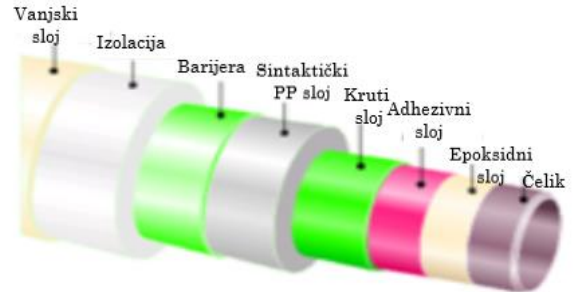
## Sustavi antikorozivne zaštite cjevovoda od polipropilena

Uobičajeni troslojni polipropilenski sloj



Radne temperature:  
-20 °C do 110 °C

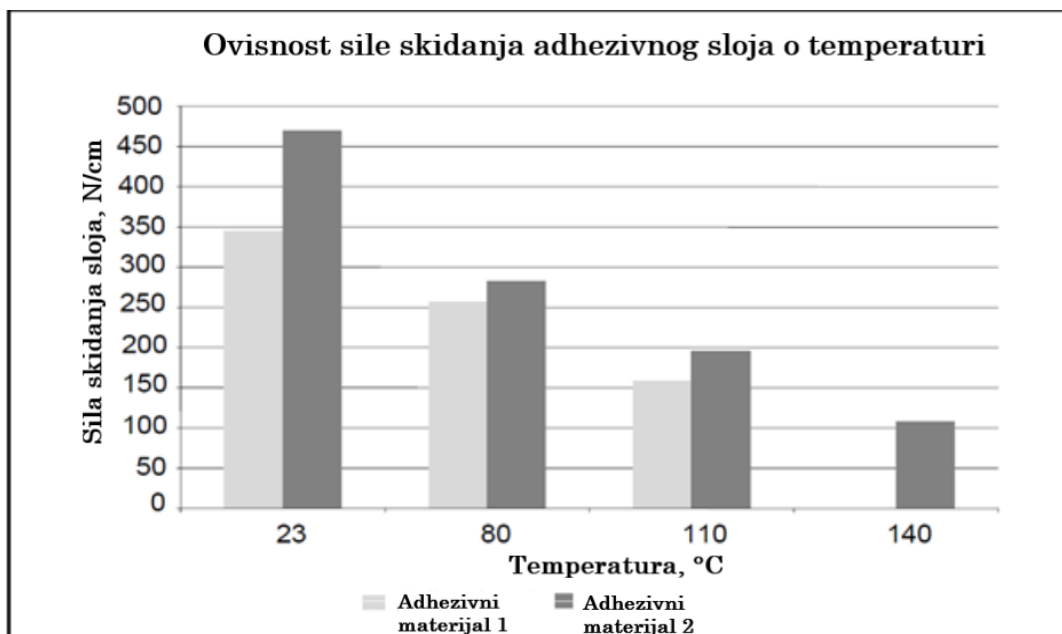
Sustav toplinske izolacije od polipropilena koji se postavlja na podvodne cjevovode



Radne temperature:  
-20 °C do 140 °C

**Slika 4-4.** Sustavi polipropilenske zaštite od polipropilena (Turner, NACE, 2011)

Na slici 4-5. prikazana je slojevita građa antikorozivne zaštite čelične cijevi za slučajeve ugradnje na kopnu i na moru. Pri tome, prvi sloj zaštite, epoksidni sloj, služi kao sloj koji sprječava prodor kisika do površine cijevi, dok polipropilenski međusloj, koji ima adhezivnu funkciju, i nadsloj, služe kao barijera prolasku vode do površine čelika. Polipropilenske prevlake imaju posebnu prednost kod primjene u podvodnim sustavima transporta fluida zbog sposobnosti termalne izolacije, što je posljedica niže temperature okoliša i manje koncentracije kisika, uvjeta koje polipropilen puno bolje podnosi. To svojstvo osigurava minimalan pad temperature fluida koji se transportira cjevovodom čime se onemogućava značajno hlađenje transportiranog fluida u vodenoj sredini, odnosno onemogućeno je stvaranje parafina i hidrata na unutarnjoj stijenci cjevovoda koji mogu uzrokovati čepljenje cjevovoda. Stoga je sustav troslojne polipropilenske zaštite cjevovoda najčešće dizajniran za transport fluida pri temperaturama većim od 140 °C, što je najvećim djelom omogućeno postavljanjem sintaktičkog polipropilenskog sloja koji je ispunjen mjehurićima plina. Adhezivni sloj od polipropilena kemijski je modificiran kako bi podnosio puno veće radne temperature cjevovoda pomoću cijepljenih reaktivnih skupina koji omogućavaju povezivanje gornje površine međusloja s inertnim polipropilenskim nadslojem i adhezivnije donje površine međusloja s epoksidnim slojem. Time će se osigurati jako dobro prijanjanje za epoksidni sloj pri visokim radnim temperaturama, kako je prikazano na slici 4-6. (Turner, NACE 2011).



**Slika 4-5.** Utjecaj temperature na jačinu adhezivne sile materijala od polipropilena (Turner, NACE, 2011)

#### **4.1.4. Vulkanizirani kloro-sulfo-polietilen**

Primjena kloro-sulfo-polietilena (CSPE) kao zaštitnog sredstva otpornog na pukotine i koroziju ostvarena je svojstvima polimera, odnosno polietilena koji ima dobru istezljivost, veliku vlačnu čvrstoću, te dobra adhezivna svojstva. Uz to, materijal se odlikuje izvrsnim mehaničkim i dielektričnim svojstvima, te ima visoku otpornost na habanje i vremenske uvjete. S obzirom da su sve komponente koje čine CSPE prevlaku proizvedene iz aromatskih otapala poput ksilena i tulena, koji su vrlo toksični i zapaljivi spojevi, sam postupak izrade temelji se na primjeni Mannichove lužine kao strukturne komponente koja omogućuje ekološki prihvatljivu i sigurnu proizvodnju. Mannichova lužina dobiva se Mannichovom reakcijom, što je zapravo vrlo složena organska reakcija neutralizacije kiselina i lužina. Spontana vulkanizacija smjese klora, sulfonata, polietilena i organskih otapala izaziva se dodatkom alifatskih poliamina. Istraživanja su pokazala da CSPE guma ima jako dobru otpornost na koroziju u bazičnim i kiselim medijima zbog visokih adhezivnih sila prianjanja za metalnu podlogu, a sama debljina prevlake iznosi od 0,3 mm do 0,4 mm. Temeljne prednosti CSPE prevlaka jesu da podnosi velika vlačna opterećenja, ima jako dobra adhezivna svojstva, te je jeftinija u odnosu na konkurentne prevlake (Figovsky i Beilin, 2010).



## 4.2. Unutarnja zaštita od korozije

### 4.2.1. Fluorouglični polimeri

S inovacijama i razvojem tehnologije dolazi do otkrića novih stabilnijih materijala otpornijih na trošenje poput fluorougličnih polimera, od kojih najveću primjenu ima polivinilidenfluorid (PVDF). PVDF je elektrostatički nanesen praškasti premaz, koji se najčešće koristi za unutarnju zaštitu od korozije zbog svoje visoke čvrstoće, kemijske otpornosti, te otpornosti na trošenje. Postupak nanošenja antikorozivnog obloga izvodi se mlazom praškastog polivinilidenfluorida pod tlakom na pregrijani element na temperaturi od oko 260 °C (500 °F), kojim se može postići debljina premaza od 2 mm do 10 mm. PVDF se u zaštiti od korozije unutrašnjosti cijevi pokazao kao uspješna zamjena za staklenim vlaknima ojačane plastične materijale, epoksidne, elastomerne i uretanske obloge. Međutim, sama PVDF tehnologija elektrostatičkog nanošenja ima i određena ograničenja poput slabije adhezije, poroznosti i skupljanja nakon određenog vremena primjene. U sustavu transporta nafte i plina, najčešće se njime oblažu dijelovi cjevovoda koji su najizloženiji trošenju, poput ventila (slika 4-7). Što se tiče zaštite unutrašnjih stijenki cjevovoda od trošenja, zbog visokih cijena prevlačenja, provodi se analiza ekonomske isplativosti takvog postupka. Najčešće se prevlače samo cjevovodi vrlo velikih promjera (Figovsky i Beilin, 2010).

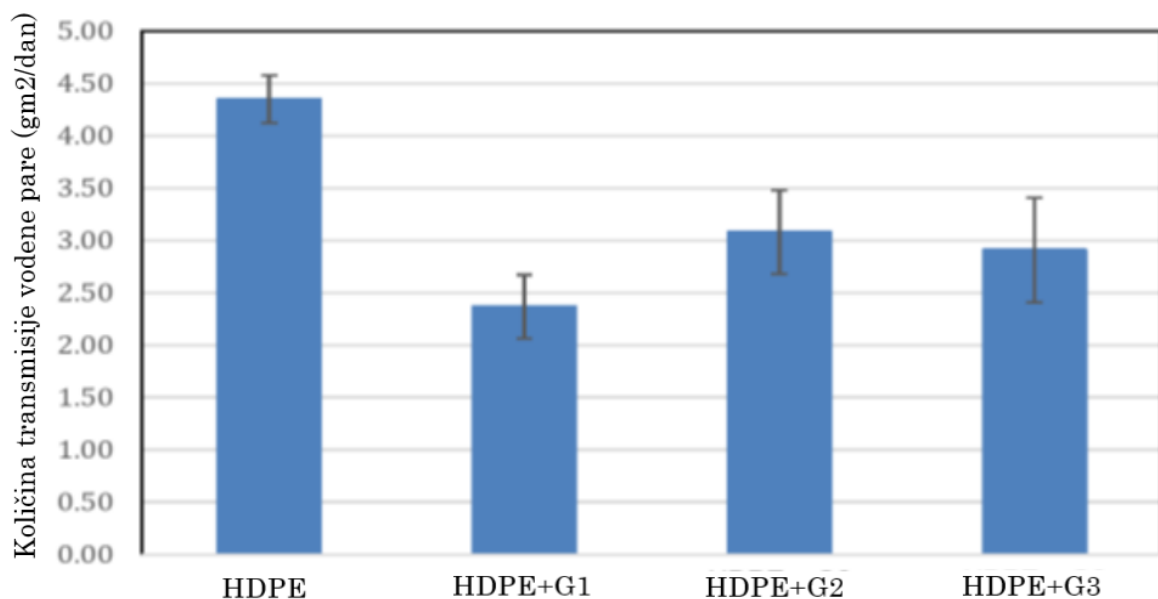


**Slika 4-6.** Prikaz kuglastog ventila s gumom kao materijalom za zaštitu od korozije (lijevo) i kuglastog ventila čija je unutrašnjost presvučena s PVDF (desno) (Figovsky i Beilin 2010)

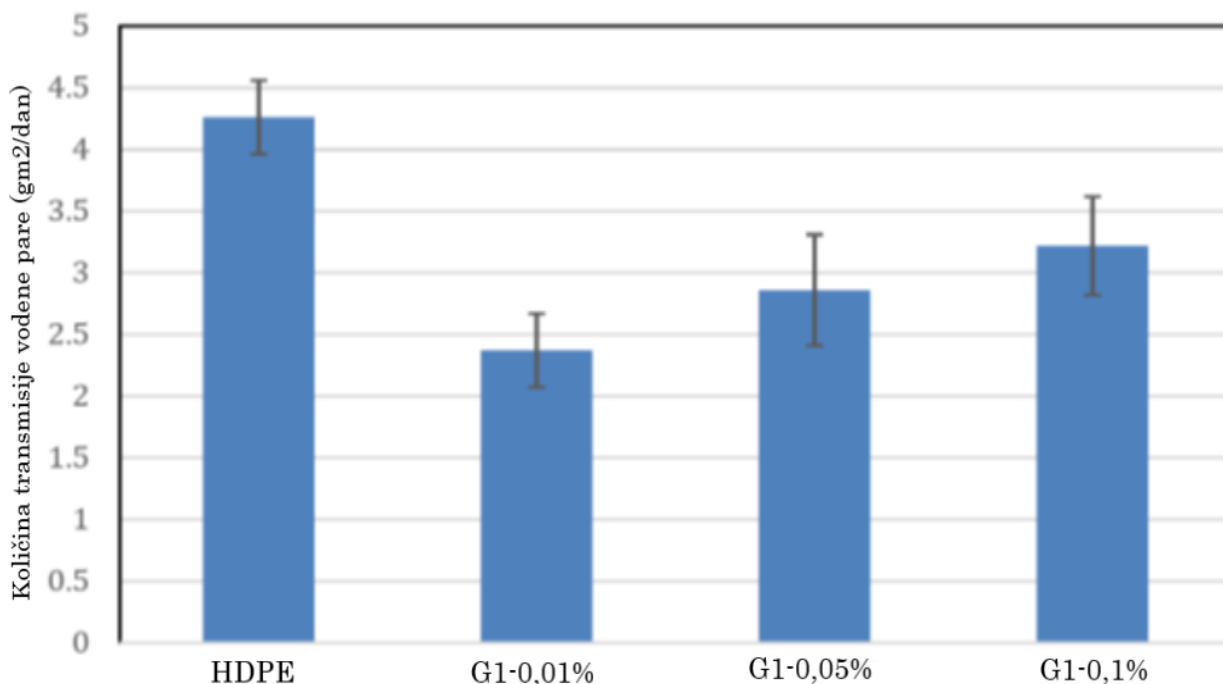
### 4.2.2. Grafen-HDPE nanokompozitni materijal

Oblaganje cijevi termoplastičnim materijalom poput polietilena visoke gustoće (HDPE) vrlo je učinkovito rješenje za zaštitu unutaršnjih stijenki cijevi od korozije. Zadnjih godina, vođena su brojna istraživanja kako bi se poboljšala svojstva obloga od termoplastičnih materijala,

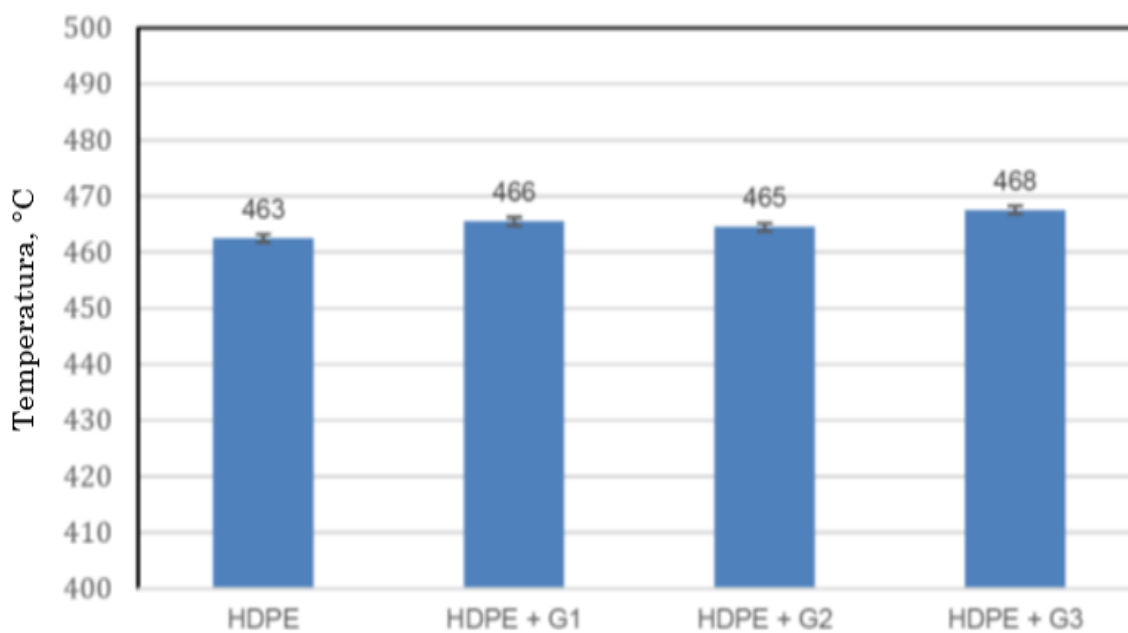
prvenstveno s ciljem smanjenja propusnosti za fluide, odnosno kako bi se stvorio materijal koji je vrlo malo propustan za fluide, u idealnom slučaju nepropustan. Tom cilju se približilo uprešavanjem nano-čestica u strukturu HDPE polimera. Za uprešavanje nano-čestica, koje se provodi pri visokoj temperaturi, razmatrana su dva materijala, nano-čestice gline i nano-čestice grafena. Samo svojstvo propusnosti nanokompozitnog materijala, u najvećoj mjeri ovisi o svojstvima čestice uprešane u strukturu polimera, disperziji čestica u strukturi polimera i molekularnim vezama u strukturi samog polimera. Najbolja svojstva, u smislu otežavanja prolaska molekula vode i plina kroz strukturu polimera ima grafen. Međutim, djelotvornost nanokompozitnog materijala od HDPE polimera i grafena ovisi o debljini i dispergiranosti grafena u strukturi polimera. Testiranje termoplastičnog obloga od nanokompozitnog materijala, polimera HDPE i grafena provela je tvrtka Petronas. U istraživanju je bilo potrebno utvrditi debljinu čestica grafena, težinski udio čestica grafena u nanokompozitnoj smjesi, te otpornost na djelovanje visokih temperatura kako bi se odredila optimalna količina grafena u strukturi polimera za učinkovito djelovanje nanokompozitnog obloga. Na slikama 4-7., 4-8. i 4-9. dani su rezultati istraživanja četiri uzorka nanokompozitnog materijala od HDPE polimera i grafena. Pritom je prvi uzorak čisti HDPE polimer, a ostala tri uzorka su materijali od HDPE polimera s različitim udjelima grafena u nanokompozitnom materijalu (0,01%, 0,05% i 0,1% težinskog udjela grafena). Drugi uzorak sadržavao je listiće grafena debljine do 1 nm, treći uzorak listiće grafena debljine od 2 nm do 4 nm, a četvrti uzorak listiće grafena debljine od 5 nm do 10 nm.



**Slika 4-7.** Vrijednosti transmisije vodene pare kroz HDPE oblog za različite debljine listića grafena (Samsudin i ostali, 2019)



**Slika 4-8.** Vrijednosti transmisije vodene pare kroz HDPE oblog za različite težinske udjele grafena (Samsudin i ostali, 2019)



**Slika 4-9.** Prikaz vrijednosti temperatura koji uzrokuju termalno raspadanje materijala (Samsudin i ostali, 2019)

Rezultati istraživanja prikazuju kako se dodatkom grafena u matriks HDPE polimera smanjuje propusnost materijala. Propusnost materijala će biti manja što su listići grafena manje debljine. Utvrđeno je također da povećanje težinskog udjela grafena u nanokompozitnom materijalu HDPE polimera i grafena ne utječe na poboljšanje svojstava materijala. Utjecaj različitih

debljina listića grafena pokazuje da ta količina grafena ne može utjecati na temperaturnu stabilnost nanokompozitnog materijala jer sama količina grafena nije dovoljna da uzrokuje poboljšanje temperaturne stabilnosti materijala (Samsudin i ostali, 2019).

#### **4.3. Primjena novih tehnologija u sustavu zaštite od korozije**

U industriji nafte i plina, zaštita od korozije se dosada najčešće izvodila nanošenjem materijala na elemente koje treba zaštititi. Gotovi proizvodi iz polimernih materijala izvodili su se procesima poput ekstrudiranja, kalendriranja, injekcijskog prešanja ili oblikovanja zagrijavanjem materijala poput polimernih traka od polietilena i polipropilena za zaštitu čeličnih cijevi od korozije koji su se kao gotovi proizvodi polagali na čelične cijevi. To je u određenoj mjeri imalo i nekih nedostataka, kao što su puno slabija adhezivna svojstva polimernih materijala pri visokim radnim temperaturama. Ograničavajuća veličina kod dizajniranja cjevovoda na maksimalnu radnu temperaturu cjevovoda bila je i temperatura taljenja polimernog materijala koji se primjenjivao u sustavu antikorozivne zaštite. Međutim, nove tehnologije poput aditivne proizvodnje uzimaju sve više maha kod konstruiranja i proizvodnje materijala od polimera koji imaju visoku temperaturu taljenja. Sama aditivna proizvodnja spada u dio proizvodnog strojarstva, a bavi se proizvodnjom tvorevina koji se na cijev ili čelični dio koji treba zaštititi od korozije nanose u tankim slojevima čestica. Pri tome, proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela nakon čega se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Ovisno o tehnologiji dobivanja slojeva i upotrijebljenim materijalima, koji mogu biti u krutom, tekućem i praškastom stanju, razvijeno je više postupaka aditivne proizvodnje, od kojih se za potrebe industrije nafte i plina najčešće koristi metoda trodimenzionalnog ispisa (3D-printing). U slučaju zaštite cijevi od korozije to će biti nanošenje tankih slojeva polimernog materijala na čeličnu cijev. Prednosti ove metode nanošenja polimernih materijala na tijelo elemenata koje treba zaštititi jest da se dobiva integrirani dizajn složene geometrije gusto raspoređenih čestica polimera s visokim adhezivnim silama između čestica i podloge. Kao polimerni materijali za 3D ispis najčešće se u tom slučaju koriste polimeri koji podnose temperature okoline veće od 150°C (Advinsula, 2019).

## 5. ZAKLJUČAK

Iako se u naftnoj industriji najčešće primjenjuju materijali od metalnih kovina, poput čelika, u nekim slučajevima se pokazalo, i po ekonomskim i po tehničkim pokazateljima, da materijali izrađeni od polimera nude bolja rješenja problema u sustavima proizvodnje, sabiranja i transporta nafte i plina.

Primjenom cijevi od polietilena u sustavima sabiranja i transporta pridobivenog prirodnog plina i slojne vode u nekim slučajevima kao što je to eksploatacija plina iz ležišta ugljena, te u sustavima distribucije prirodnog plina, pokazalo se da su one ekonomski prihvatljivije rješenje s vrlo dugim radnim vijekom i niskim troškovima ugradnje i održavanja.

U slučajevima potrebe za transportom izrazito korozivnih fluida, poput pridobivenih fluida s visokim sadržajem kiselih plinova, CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>S, primjenjuju se termoplastične cijevi koje osiguravaju dugi radni vijek bez velikih troškova održavanja. Uz to, ti su materijali otporniji na adheziju parafina prilikom transporta teških nafte, te su u potpunosti otporne na taloženje kamenca prilikom transporta proizvedene slojne vode ili smjese kapljevine, osiguravajući time rjeđe potrebe za čišćenjem cjevovoda povećavajući tako učinkovitost cjevovoda.

Neizostavna je uloga polimernih materijala u sustavu zaštite čeličnih cjevovoda od korozije pri čemu oni izoliraju vanjske stijenke čelika od djelovanja okolišnih uvjeta i unutrašnje stijenke cjevovoda od djelovanja korozivnih fluida, produljujući tako radni vijek cjevovoda. Razvojem tehnologije aditivne proizvodnje, polimerni slojevi za zaštitu od korozije postat će još učinkovitiji zbog primjene polimera visokih svojstava koji dobro podnose rad pri visokim radnim temperaturama.

Polimerni materijali u svijetu općenito, svakim danom imaju sve veću primjenu, te su postali neizostavan materijal u gotovo svim industrijama. Posebno je to vidljivo u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina gdje će njihova primjena u budućnosti nastaviti rasti.

## 6. LITERATURA

1. ADVINCULA, R. C. (2019.) 3D Printing High Performance Polymers and the Oil and Gas Industry. NACE International  
Document ID: NACE-2019-13505
2. BARBOSA, T., BASTOS, R., DE BOER, H., & ROJAS-DIAZ, R. (2019.) Thermoplastic Composite Pipes: A Reliable Cost-Effective Solution for Pre-salt. Offshore Technology Conference  
doi:10.4043/29819-MS
3. CHELDI, T., CAVASSI, P., SERRICHIO, M., SPINELLI, C. M., VIETINA, G., & BALLABIO, S. (2019.) Use of Spoolable Reinforced Thermoplastic Pipes for Oil and Water Transportation. Offshore Mediterranean Conference  
Document ID: OMC-2019-1087
4. FENG, S., & SAO, S. (SHAN) (2019.) A New Look at Three Layer Polyethylene Coatings in Hot Water Immersion Test. NACE International  
Document ID: NACE-2019-13503
5. FIGOVSKY, O. L., & BEILIN, D. A. (2010, January 1). Crack- Resistant And Anticorrosive Coatings Based On Vulcanized Water Dispersion Of Chlorine-Sulfo-Polyethylene. NACE International  
Document ID: NACE-10036
6. FISHER, G., & GILMORE, B. (2018, July 20). High Build PVDF Fluorocarbon Polymer Coatings for Corrosion Resistant Applications. NACE International  
Document ID: NACE-2018.11286
7. PEREZ, M., KEHR, J. A., ATTAGUILE, S., & SMITH, M. (2008.) New Technology Helps Develop Coatings For High-Operating temperature Pipelines. NACE International  
Document ID: 08040
8. SAMSUDIN, M. S. F., AHMAD MAHTAR, M., & LEONG, K. H. (2019.) Barrier and Thermal Performance of Graphene-HDPE Nanocomposites for Pipeline Liner Application. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/195069-MS  
Document ID: SPE-1965069-MS
9. TURNER, B. J. (2011.) Polypropylene Coatings For High Temperatures And Thermal Insulation Of Pipelines. NACE International  
Document ID: NACE-11030

## WWW izvori:

10. ABE, J., KASATANI, T., HIGUCHI, Y., 2018. : „*Various approaches to the improvement of polyethylene piping construction quality in Osaka gas*“, URL: <http://www.plasticpipesconference.com/content/263/295/5c86661ccb7c9.pdf> (20.7.2020.)
11. CHANG, D., BAKER, C., 2016. : „*A new high temperature pressure rated HDPE pipe resin expands the capability of Polyethylene pipes*“, URL: <http://www.plasticpipesconference.com/content/263/295/5c86661e8a998.pdf> (20.7.2020.)
12. FAN, Y., XUE, Y., NIE, W., JI, X., BO, S., 2009. : „*Characterization of the microstructure of bimodal HDPE resin*“, Polymer Journal 2009. URL: <https://www.nature.com/articles/pj2009106.pdf?origin=ppub> (20.7.2020.)
13. HEATHCOTE, M., MICIC, P., WHITTLE, A., 2012. : „*PE100 pipeline system in coal seam gas industry*“, URL: <http://www.plasticpipesconference.com/content/156/268/5c86660ea1715.pdf> (20.7.2020.)
14. LESAGE, N., WELLER, B., SAKR, A., 2010. : „*Using Reinforced Thermoplastic Pipe in natural gas distribution application*“, URL: <http://www.plasticpipesconference.com/content/235/272/5c8666117ba27.pdf> (20.7.2020.)
15. MICIC, P., Qenos Pty Ltd, 2018. : „*Use of risk 'fit for purpose' design for safe and structurally reliable PE pressure pipelines*“, URL: <http://www.plasticpipesconference.com/content/303/304/5c866622d741e.pdf> (28.7.2020.)
16. MICHIE, W.,J., CHANG, D., WHITED, S., 2008. : „*Advanced bimodal MDPE for piping application*“, URL:

<http://www.plasticpipesconference.com/content/183/275/5c86661007dcc.pdf>

(28.7.2020.)

17. SANDSTRUM, S.D., LIVELY, K.S., 2010. : „*Using RCP data to design polyethylene gas distribution system in the United States*“, URL:

<http://www.plasticpipesconference.com/content/235/272/5c86661046966.pdf>

(28.7.2020.)

18. XIONG, Z., WEI, R., 2014. : „*PE100 pipes joining in coalbed methane industry in China*“, URL:

<http://www.plasticpipesconference.com/content/208/266/5c86661c18979.pdf>

(28.7.2020.)

19. YU, L., PONDA, A., CHANG, D., 2018. : „*Design and qualification of PA-PERT pipe for oil and gas transportation*“, URL:

<http://www.plasticpipesconference.com/content/303/304/5c866620854a0.pdf>

(28.7.2020.)

20. Guide to differences in pressure rating PE water pipe using ASTM/PPI and ISO methods, PPI 2014., URL: [https://plasticpipe.org/pdf/tn-28\\_pressure\\_differences\\_between\\_iso\\_astm.pdf](https://plasticpipe.org/pdf/tn-28_pressure_differences_between_iso_astm.pdf) (2.8.2020.)

21. PPI Handbook (2008.) :

URL: <https://plasticpipe.org/publications/index.html> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/publications/pe-handbook.html> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter01.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter02.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter03.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter04.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter05.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter06.pdf> (16.7.2020.)

URL: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter09.pdf> (16.7.2020.)



22. URL: <https://www.pe100plus.com/PE-Pipes/Technical-guidance/model/Design/PE-pressure-pipe/operating-pressure-i245.html> (1.8.2020.)
23. URL: <https://airborneoilandgas.com/> (20.7.2020.)
24. URL: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49180> (20.7.2020.)
25. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49183> (20.7.2020.)
26. URL: <https://www.wascoenergy.com/what-we-do/pipeline-services/pipe-coating/type-of-coating> (26.7.2020.)
27. URL: <http://www.jamidarpipe.com/pe-pipe-gas.html> (5.8.2020.)
28. URL: <https://www.marcogaz.org/publications-1/> (5.8.2020.)
29. URL: <https://muellersystems.com/news/controlling-and-stopping-flow-in-polyethylene-pe-natural-gas-pipelines/> (5.8.2020.)
30. URL: <http://ctresources.co.uk/ccp/paper.html?id=3302> (28.8.2020.)
31. URL: <https://pipa.com.au/applications/other-applications/> (29.8.2020.)
32. URL: <https://www.intertek.com/analysis/dsc/> (29.8.2020.)

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom „Primjena polimernih materijala u sustavu sabiranja i transporta nafte i plina“ izradio samostalno, na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



---

Tin Herbst



KLASA: 402-04/20-01/113  
URBROJ: 251-70-03-20-3  
U Zagrebu, 01.09.2020.

**Tin Herbst, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/113, UR.BR. 251-70-12-20-1 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### PRIMJENA POLIMERNIH MATERIJALA U SUSTAVU SABIRANJA I TRANSPORTA NAFTE I PLINA

Za voditeljicu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditeljica**

(potpis)

Prof. dr. sc. Katarina Simon

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)