



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Logistično inženirstvo
Modul: Poslovna logistika

**EKONOMSKI VIDIK RAZLIČNIH METOD
DEPONIRANJA/OBDELAVE STRANSKEGA
PRODUKTA, KI NASTANE PRI
PROIZVODNJI POLIESTRSKIH SMOL**

Mentor: mag. Robert Mašera
Lektorica: Lucija Jošt, mag. prof. slovenistike

Kandidat: Vladimir Jolić

Kranj, junij 2025

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju g. mag. Robertu Mašeri.

Zahvaljujem se tudi lektorici ge. Luciji Jošt, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

IZJAVA

Študent Vladimir Jolić izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom Roberta Mašera, mag.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne: _____

Podpis: _____

POVZETEK

V diplomskem delu smo preučili proizvodnjo poliestrskih smol, tehnološko napreden proces, ki vključuje kompleksne kemijske reakcije in zahteva natančen nadzor nad parametri za doseg kakovostnih in okoljsko sprejemljivih produktov. Poleg same proizvodnje pa je ključnega pomena ravnanje s stranskimi produkti, zlasti z reakcijsko vodo, ki nastaja kot stranski produkt kemijskih reakcij. Reakcijska voda in drugi odpadki lahko vsebujejo nevarne snovi, zato je potrebno zagotoviti ustrezno obdelavo in odstranjevanje teh snovi, da bi zmanjšali okoljski vpliv in zagotovili skladnost z zakonodajo. Analizirali smo ekonomske in okoljske vidike dveh metod ravnanja z odpadki pri proizvodnji poliestrskih smol: sežig in oksidacijo. Oksidacija je stroškovno ugodnejša, vendar prinaša tehnične in operativne izzive, kot so visoki stroški kemikalij in zastarel nadzorni sistem. Sežig je tehnično učinkovitejši, a energetsko zahteven in povezan z večjimi okoljskimi tveganji. Kljub temu imata obe metodi svoje prednosti in omejitve, kar kaže na potrebo po iskanju bolj optimalnih rešitev. Ključnega pomena bo nadaljnje vlaganje v raziskave in razvoj, da bi zmanjšali vpliv na okolje in optimizirali obdelavo stranskih produktov. V prihodnje bi bilo smiselno razmisliti o nadgradnji sistema oksidacije ali o kombinaciji obeh metod, da bi izboljšali zanesljivost in stroškovno učinkovitost ob obvladovanju odpadkov.

KLJUČNE BESEDE

- poliestrske smole
- reakcijska voda
- odlaganje odpadkov
- sežig
- oksidacija

SUMMARY

In the thesis, we examined the production of polyester resins, a technologically advanced process involving complex chemical reactions that require precise control of parameters to achieve high-quality and environmentally acceptable products. In addition to the production process itself, the management of by-products, particularly reaction water, which is generated as a by-product of chemical reactions, is of crucial importance. Reaction water and other waste materials may contain hazardous substances, and therefore, appropriate treatment and disposal are necessary to minimize environmental impact and ensure compliance with legislation. We analyzed the economic and environmental aspects of two waste management methods used in polyester resin production: incineration and oxidation. Oxidation is more cost-effective but brings technical and operational challenges, such as high chemical consumption and outdated control systems. Incineration is technically more efficient, as it ensures complete decomposition of compounds and waste reduction, but it is energy-intensive and associated with greater environmental risks. Nevertheless, both methods have their advantages and limitations, highlighting the need for more optimal solutions. Continued investment in research and development will be essential to further reduce environmental impact and optimize the treatment of by-products. In the future, it would be reasonable to consider upgrading the oxidation system or combining both methods to improve reliability and cost-efficiency in waste management.

KEYWORDS

- polyester resins
- reaction water
- waste disposal
- incineration
- oxidation

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema	1
1.2	Namen in cilji naloge	1
1.3	Predstavitev okolja	2
1.4	Predpostavke in omejitve.....	2
1.5	Metode dela.....	3
2	TEORETIČNE OSNOVE	4
2.1	Poliestrska smola in njena proizvodnja	4
2.1.1	Reakcijska voda in njena sestava	5
2.1.2	Drugi stranski produkti in odpadki	6
2.2	Zakonodaja o nevarnih odpadkih	8
2.2.1	Direktiva in uredbe.....	8
2.2.2	Standardi	9
2.3	Zbiranje, obdelava in deponiranje reakcijske vode.....	10
2.3.1	Sežig	11
2.3.2	Oksidacija.....	12
3	PRAKTIČNI DEL – ANALIZA PODATKOV.....	14
3.1	Sežig	15
3.1.1	Direktni stroški	16
3.1.2	Indirektni stroški.....	17
3.2	Oksidacija	18
3.2.1	Direktni stroški	21
3.2.2	Indirektni stroški.....	23
4	PRIMERJAVA SEŽIGA IN OKSIDACIJE	25
5	ZAKLJUČKI	27
6	LITERATURA IN VIRI	28

KAZALO SLIK

Slika 1: Proces esterifikacije, pri katerem nastaja reakcijska voda.....	5
Slika 2: Shema sežiga.....	12
Slika 3: Shema AOP – naprednega oksidacijskega procesa.	13
Slika 4: Tehnološka shema nastajanja in zbiranja reakcijske vode	14
Slika 5: Tehnološka shema zbiranja reakcijske vode in odvoza na sežig.....	16
Slika 6: Tehnološka shema zbiranja reakcijske vode in procesa oksidacije	20

KAZALO TABEL

Tabela 1: Seznam drugih stranskih produktov in odpadkov proizvodnje poliestrskih smol	7
Tabela 2: Standardi in njihova uporaba v proizvodnji poliestrskih smol in pri ravnanju z reakcijsko vodo.....	9
Tabela 3: Direktni stroški enega transporta na sežig	17
Tabela 4: Indirektni stroški transporta na sežig.....	18
Tabela 5: Direktni stroški na oksidacijo.....	22
Tabela 6: Indirektni stroški oksidacije na leto.....	24
Tabela 7: Primerjava stroškov sežiga in oksidacije na odvoz	26

KRATICE IN AKRONIMI

HOS:	hlapne organske spojine
CČN:	Centralna čistilna naprava
AOP:	napredni oksidacijski procesi (advanced oxidation processes)

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Poliestrške smole so najbolj razširjene smole, zlasti v pomorski in avtomobilski industriji. Večina jadrnic, jaht in čolnov, izdelanih iz kompozitov, uporablja ta sistem smole. Smole te vrste so nenasičene in predstavljajo približno 75 % vseh smol, ki se uporabljajo v industriji kompozitov (Loos, 2015). Proizvodnja poliestrske smole vključuje uporabo nevarnih kemikalij in topil, hkrati pa v proizvodnem procesu nastane nešteto stranskih produktov, kar lahko negativno vpliva na okolje. Odlaganje odpadkov in emisij iz proizvodnega procesa lahko povzroči onesnaženje zraka, vode in tal ter predstavlja tveganje za zdravje delavcev in bližnjih skupnosti, zato je pomembno, da izberemo pravi način.

Sežig je hitra, eksotermna reakcija med gorivom in kisikom. Pri sežiganju so gorivo pretežno odpadki (čeprav se fosilna goriva lahko sosežigajo), vir kisika pa je zrak. Pri tem procesu nastane veliko enakih stabilnih končnih produktov, ne glede na to, ali je zgoreli material zemeljski plin, premog, les, bencin, trdni komunalni odpadki, nevarni odpadki ali medicinski odpadki (National Research Council, 2000). Oksidacijo organskih substratov z železom (III) in vodikovim peroksidom imenujemo "Fentonova reakcija". Je učinkovita pri čiščenju različnih komponent industrijske odpadne vode. Kot rezultat se le-ta uporablja za obdelavo različnih odpadkov (Barbusinski, 2009).

Pri odločanju o ravnanju s stranskimi produkti proizvodnje poliesterskih smol je ključno upoštevati tako okoljske kot tudi ekonomske vidike. Glede na omenjene vplive je pomembno razmisliti o alternativnih možnostih za njihovo uporabo ali recikliranje. Hkrati pa je potrebno upoštevati tudi ekonomske faktorje, saj mora biti rešitev finančno vzdržna in konkurenčna na trgu. Pomembno je torej najti ravnovesje med varovanjem okolja in ohranjanjem ekonomske stabilnosti podjetja. Pri obdelavi in deponiranju reakcijske vode, ki nastaja pri proizvodnji poliestrskih smol, se srečujemo z več ključnimi izzivi. Ti zajemajo tako tehnične kot okoljske in ekonomske vidike, kot so kompleksna sestava, okoljski vpliv, zakonske omejitve, stroški obdelave, tehnološki izzivi ter spreminjajoče se zahteve.

1.2 Namen in cilji naloge

Glede na ključne izzive, s katerimi se soočamo pri obdelavi in deponiranju reakcijske vode, stremimo k najboljši rešitvi na vseh področjih. Namen diplomske naloge je torej na podlagi teoretičnih izhodišč in zbranih statističnih podatkov, od začetka leta 2022 do konca leta 2024 podjetja X, celovito analizirati in ovrednotiti ekonomske vidike dveh različnih metod obdelave in deponiranja tega stranskega produkta, ki nastane

pri proizvodnji poliesterskih smol. Obravnavali smo metodo sežiga ter metodo oksidacije z vidika obdelave oziroma odlaganja odpadne vode. Cilj je prepoznati, katera med dvema različnima metodama je najbolj optimalna in trajnostna rešitev za ravnanje s temi odpadki, pri čemer se upoštevajo tako ekonomski kot okoljski vidiki.

Cilji diplomske naloge so:

- S pomočjo analize literature ugotoviti prednosti/slabosti sežiga in oksidacije z okoljskega vidika.
- S pomočjo analize kvantitativnih podatkov, zbranih med letoma 2022 in 2024, preučiti ekonomske kazalnike za sežig in oksidacijo.
- S primerjavo teoretičnih izhodišč (na podlagi literature) in podatkovne baze obeh metod izbrati najbolj ustrezen način odlaganja odpadne vode, tako z ekonomskega kot okoljskega vidika.

1.3 Predstavitev okolja

Podjetje X, odkoder smo črpali podatke za praktično raziskavo, se specializira za proizvodnjo premazov, lakov in smol, ki se uporabljajo v industrijah, kot so avtomobilska, lesna, kovinska in gradbena industrija. Ponuja širok spekter izdelkov, vključno z zaščitnimi premazi in smolami za kompozitne materiale. Ima lastne raziskovalno-razvojne zmogljivosti in poudarek na trajnostnih rešitvah.

Podjetje je srednje veliko in deluje kot del večje evropske skupine. Proizvodnja poteka v napredno opremljenih obratih. Organizacija je vertikalno strukturirana, z vodstvom na vrhu in razdelitvijo funkcij na oddelke za raziskave, proizvodnjo, prodajo, logistiko in kakovost. Poudarek je na usposabljanju zaposlenih in natančnem usklajevanju procesov za doseg visoke kakovosti in inovativnosti.

1.4 Predpostavke in omejitve

Pri obdelavi in deponiranju reakcijske vode, ki nastaja kot stranski produkt pri proizvodnji poliesterskih smol, se srečujemo z več ključnimi okoljskimi in ekonomskimi izzivi. V ta namen je ključno ugotoviti, kateri način odlaganja tega stranskega produkta je najbolj primeren za podjetje X z obeh vidikov.

Za namen doseganja ciljev diplomske naloge bomo zastavili raziskovalno vprašanje:
RV1: Ali je za odlaganje reakcijske vode z okoljskega in ekonomskega vidika bolj primerna metoda sežiga ali oksidacije?

V namen odgovarjanja na zastavljeno raziskovalno vprašanje bomo postavili dve hipotezi:

H1: Najbolj primerna metoda odlaganja reakcijske vode z okoljskega in ekonomskega vidika je metoda sežiga.

H2: Najbolj primerna metoda odlaganja reakcijske vode z okoljskega in ekonomskega vidika je metoda oksidacije.

Omejitve raziskave pri obravnavanju problema so:

- omejitev pridobivanja podatkov podjetja,
- omejitev na dve metodi odlaganja reakcijske vode,
- omejitev na podatke enega podjetja.

1.5 Metode dela

Teoretični del diplomske naloge temelji na pregledu zanesljive literature, ki je dostopna na spletu. Prva metoda, ki smo jo uporabili, je opisna metoda, s katero smo predstavili osnove proizvodnega procesa poliestrskih smol ter opisali principe sežiga in oksidacije za lažje razumevanje samih pojmov in temeljev diplomske naloge. Nadaljevali smo z deduktivno metodo za pregled zakonodaje (direktiv, uredb, standardov), kjer smo splošno zakonodajo aplicirali na posamezne načine omenjenih odlaganj odpadkov, ki so interes naše diplomske naloge z okoljskega vidika.

Empirični del temelji na analitični metodi, kjer smo s pomočjo razčlenjevanja posameznega načina odlaganja odpadne vode in podrobnega preučevanja baze podatkov le-teh ugotovili lastnosti z ekonomskega vidika.

Diplomsko nalogo smo zaključili z uporabo metode kompilacije, kjer smo združili vse teoretične izsledke različnih avtorjev in jih primerjali z empiričnim delom raziskave z metodo sinteze, kjer so združene glavne ugotovitve raziskovalnega dela v namen določanja najbolj ustrezne metode odlaganja odpadne vode z okoljskega in ekonomskega vidika.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Poliestrska smola in njena proizvodnja

Smole predstavljajo široko paleto naravnih in sintetičnih organskih spojin, ki so pri sobni temperaturi običajno viskozne tekočine ali trdne snovi. V kontekstu industrijske proizvodnje se termin "smole" najpogosteje nanaša na polimerne materiale, ki so ključne surovine za izdelavo številnih končnih produktov, vključno s premazi, lepili, kompozitnimi materiali, plastiko in elastomeri. Proizvodnja poliestrskih smol je kemijski proces, ki je kompleksen in poteka v več zaporednih fazah. Pri njem v nadzorovanih pogojih reagirajo dikarboksilne kisline, kot so ftalni anhidrid, maleinski anhidrid in dioli, na primer etilenglikol, propilenglikol v postopkih esterifikacije in polikondenzacije. Končni produkt so torej nenasičene ali nasičene poliestrske smole, ki se jih uporablja v kompozitih, premazih, lepilih in različnih industrijskih izdelkih (KaiserTech Consulting, 2023).

Ključne faze v proizvodnji poliestrskih smol so priprava surovin, esterifikacija, polimerizacija ter hlajenje in oblikovanje. Zelo pomembna je kvaliteta oziroma »čistost« surovin. To je pomembno z vidika vsebovanja nečistoč, kar bi lahko imelo negativen vpliv na kvaliteto končnega produkta (JinZong Machinery, 2023a). Faza esterifikacije poteka v reaktorjih iz nerjavečega jekla pri temperaturah med 180 in 220 °C. V tem procesu se tvorijo estrske vezi med kislino in alkoholom z izločanjem vode, ki se odstranjuje s pomočjo destilacije pod inertnim plinom (KaiserTech Consulting, 2023). Po esterifikaciji sledi polimerizacija, kjer se odstranijo ostanki vode z zniževanjem tlaka v reaktorju, s čimer se doseže višja molekulska masa smole. To se dogaja pod vakuumom pri temperaturi do 250 °C (JinZong Machinery, 2023b). Na koncu sledi ohlajanje in oblikovanje. Ko se smola ohladi, se lahko transportira kot tekočina v obliki granulata, pastil ali plošč, odvisno od potreb za uporabo (JinZong Machinery, 2023c).

V procesu pridobivanja poliestrske smole se uporabljajo reaktorji, opremljeni z mešali, sistemi za kondenzacijo in grelnimi telesi ali mediji. Ponavadi so procesi avtomatizirani, da omogočajo zbiranje in obdelavo podatkov (JinZong Machinery, 2023a).

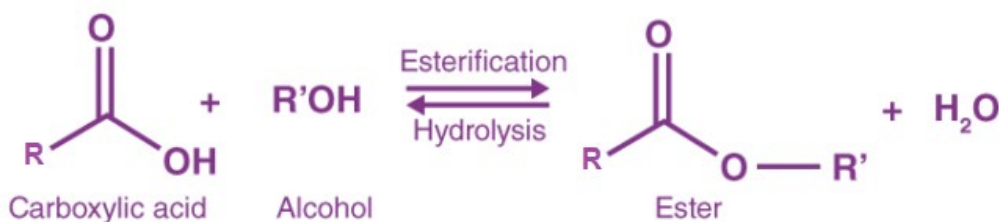
Nadzor kakovosti zajema vhodno kontrolo surovin, pri kateri se spremlja kvaliteta, na primer čistost. Sledi spremljanje reakcijskih parametrov, kot so temperatura, tlak, čas, kislinsko število in viskoznost. Nato pa se izvede še kontrola končnega produkta s testi za viskoznost, trdnost, barvo in kemijsko odpornost. Uporabljajo se standarne fizikalno-kemijske analize in napredne metode, kot so FTIR spektroskopija in gel permeacijska kromatografija (JinZong Machinery, 2023b).

Poliestrška smola je občutljiva na svetlobo, vlago in toploto, zato se skladišči v kovinskih ali plastičnih sodih, IBC kontejnerjih ali cisternah, ki zagotavljajo nepropustnost in zaščito pred zunanjimi vplivi. Embalaža mora biti opremljena z vsemi obveznimi oznakami, vključno z varnostnimi navodili (KaiserTech Consulting, 2023).

Proizvodnja poliestrskih smol je torej zrel in tehnološko razvit industrijski proces, ki zahteva natančen nadzor in optimizacijo na vseh stopnjah. Poleg tehnične učinkovitosti je ključno tudi dosledno upoštevanje okoljskih in varnostnih standardov.

2.1.1 Reakcijska voda in njena sestava

Reakcijska voda je stranski produkt kemijske reakcije esterifikacije oziroma polikondenzacije, ki predstavlja osnovni proces pri sintezi poliestrov. Reakcija poteka med dikarboksilnimi kislinami (ali njihovimi anhidridi) in dioli (večvalentnimi alkoholi), pri čemer se tvorijo estrske vezi in se sprošča molekula vode (H_2O) za vsako novo vez (JinZong Machinery, 2023a).



Slika 1: Proces esterifikacije, pri katerem nastaja reakcijska voda

(Vir: Byju's app, n.d)

Nadalje se tvorijo daljše polimerne verige, pri čemer nastaja vse več reakcijske vode. V vsakem koraku, ko se tvori nova estrska vez, se sprosti dodatna molekula vode. Ker je reakcija reverzibilna, je pomembno, da se voda sproti odstranjuje iz sistema in se s tem reakcijsko ravnotežje premakne v smer produkta. Če reakcijska voda ni ustrezno odstranjena, ta ostane ujeta v smoli in povzroči znižano molekulsko maso, povišano kislinsko vrednost, spremeni viskoznost ali pa povzroči tvorbo stranskih produktov kot posledica neželenih reakcij (KaiserTech Consulting, 2023).

Da na koncu pridobimo kakovosten polimer in imamo visoko konverzijo, je ključno, da učinkovito odstranimo reakcijsko vodo. Za to uporabljamo različne metode. Najpogostejša je destilacija s ksilenom, ki tvori azeotrop z vodo in omogoča njeno lažje izparevanje pri nižjih temperaturah (JinZong Machinery, 2023c). Alternativno se lahko uporabi vakuum, ki znižuje vrelišče vode in je primeren za temperaturno občutljive smole. V redkejših primerih se uporablja kemična vezava vode z desikanti, a zaradi zahtevne ločitve ta pristop ni pogost v industriji. Prav tako se lahko uporablja

tudi pretok suhega inertnega plina, kot je dušik, ki pomaga odstranjevati vodno paro iz reakcijske zmesi (KaiserTech Consulting, 2023).

Čeprav se kot stranski produkt sinteze poliestrov formalno sprošča navadna voda (H_2O), je reakcijska voda, ki jo v industrijskem procesu dejansko zajamemo, precej bolj kompleksna. Ne gre zgolj za čisto vodo, temveč za kemijsko bogato in pogosto onesnaženo mešanico, ki vsebuje različne organske, anorganske in v določenih primerih tudi hlapne komponente (Carraher, 2017; Auras et al., 2010). V reakcijski vodi se znajdejo ostanki začetnih reaktantov, kar je posledica nepopolne reakcije. Tako lahko v njej najdemo na primer etilenglikol, dimetil tereftalat (v primeru transesterifikacijske poti) ali tereftalno kislino (O dian, 2004). Poleg tega se zaradi toplotnih in katalitskih pogojev med sintezo tvorijo razgradni produkti, kot so aldehidi (npr. acetaldehid), ketoni ter kratkoveržne karboksilne kisline, med katerimi sta najpogostejši očetna in mravljična. Pri proizvodnji aromatskih poliestrov se lahko pojavijo tudi fenolne spojine, ki izvirajo iz delne razgradnje aromatskih komponent (Sperling, 2006).

Reakcijska voda pogosto vsebuje tudi kovinske ione, ki izhajajo iz uporabljenih katalizatorjev. Najpogostejši so antimon, titan, cink in germánij, ki se uporabljajo za pospeševanje kondenzacijskih ali transesterifikacijskih reakcij (Gogolewski, 1990). Prisotni so lahko tudi ostanki topil – na primer metanol, ki nastaja kot stranski produkt pri transesterifikaciji dimetil tereftalata (Vollmert, 1973). Poleg tega se v vodi v sledovih lahko pojavijo še aditivi, kot so barvila, stabilizatorji in antioksidanti, če so bili ti dodani v začetno formulacijo poliesterske smole. Zaradi te kemijske raznolikosti reakcijska voda ni zgolj enostaven stranski produkt, temveč predstavlja pomemben odpadni tok, ki zahteva natančno kemijsko analizo in ustrezno obdelavo pred morebitno ponovno uporabo ali varnim izpustom v okolje (Peters et al., 2003).

2.1.2 Drugi stranski produkti in odpadki

V Tabeli 1 so prikazani ostali stranski odpadki oziroma produkti, ki nastajajo v procesu proizvodnje poliestrskih smol. Ti so klasificirani po številkah evropskega seznama odpadkov (EWC).

Koda odpadka	Vrsta odpadka
07 03 04*	Oddekantirano topilo od reakcijske vode
07 02 11*	Blato, nevarne snovi iz čiščenja odpadnih vod
08 01 11*	Gošča – prečrpljiva
08 01 13*	Gošča – pastona, gelirana, trdna
07 03 10*	Odpadni filtri
15 02 02*	Absorbenti, pometanine z nevarnimi snovmi
15 02 02*	Odpadne krpe, rokavice, obleka
15 01 10*	Trda plastika – 1m ³ kontejnerji z ostanki smol
15 01 10*	Plastični sodi – metakrilna kislina (9 kg)
16 10 02	Odpadne vodne raztopine, niso v 16 10 01
15 01 04	Odpadni kovinski sodi
15 01 04	Odpadne kovinske doze, hoboki
15 01 01	Papirnate vreče, karton
15 01 02	Big-bag vreče
15 01 02	PVC vreče, folija
15 01 02	Odpadna čista plastična embalaža
20 03 01	Mešani komunalni odpadki
17 06 04	Odpadni toplotno izolacijski material

Tabela 1: Seznam drugih stranskih produktov in odpadkov proizvodnje poliestrskih smol

(Lastni vir in Evropska komisija, 2018)

Tabela torej prikazuje različne vrste odpadkov, razvrščene po klasifikacijskih kodah odpadkov v skladu z evropskim seznamom odpadkov. Vsaka koda označuje določeno vrsto odpadka, pri čemer zvezdica (*) nakazuje, da gre za nevaren odpadek. V tabeli so predstavljene tako nevarne kot nenevarne odpadne snovi. Nevarni odpadki iz industrijskih procesov so na primer oddekantirana topila (07 03 04*), blato iz čiščenja odpadnih vod (07 02 11*) ter nevarni absorbenti in kontaminirane krpe (15 02 02*). Odpadki iz embalaže so plastični sodi, trda plastika, big-bag vreče in PVC vreče (kategorije 15 01 02 in 15 01 10). Navedeni so tudi splošni nenevarni komunalni odpadki (20 03 01) ter gradbeni materiali, kot je na primer toplotna izolacija (17 06 04). Tabela vključuje tudi razlike v fizikalnih stanjih odpadkov, npr. gošča je označena kot prečrpljiva, gelirana ali trdna (08 01 11*, 08 01 13*), kar je pomembno pri ravnanju in odstranjevanju teh snovi. Vsi ti podatki lahko služijo za potrebe okoljskega poročanja, ravnanja z odpadki, evidentiranja v skladu z zakonodajo in za nadzor nad nevarnimi snovmi (Evropska komisija, 2018).

Odpadna topila od reakcijske vode nastanejo, ko se kemijska reakcija pridobivanja poliestrskih smol konča. Ta pogosto vsebujejo nevarne kemikalije, zaradi česar so označena kot nevarni odpadki. Ko se čistijo odpadne vode v proizvodnem procesu,

nastane tudi blato, ki vsebuje nevarne kemikalije, kot so smole in topila, zaradi česar tudi to spada med nevarne odpadke. Ostali stranski odpadki vsebujejo tudi trdo plastiko – te plastike so lahko pakirni materiali ali produkti postprocesnih korakov in so nevarni, saj ravno tako vsebujejo nevarne kemikalije. Gošča, ki nastane pri proizvodnji poliestrskih smol, je viskozna snov, ki vsebuje kemične snovi in je lahko nevarna za okolje, saj lahko onesnaži tla in vodne vire. Tista, ki pa nastane med polimerizacijo poliestrskih smol, je gelirana ali pastozna in vsebuje kemikalije, zaradi katerih je nevarna in spada med nevarne odpadke (Evropska komisija, 2018).

2.2 Zakonodaja o nevarnih odpadkih

Zaradi nevarne narave reakcijske vode in drugih stranskih produktov, ki nastanejo pri proizvodnji poliestrskih smol, je ključnega pomena upoštevanje nacionalne in evropske zakonodaje na področju ravnanja z nevarnimi odpadki.

2.2.1 Direktiva in uredbe

Direktiva 2008/98/ES o odpadkih, znana tudi kot Okvirna direktiva o odpadkih, določa osnovna načela ravnanja z odpadki ter hierarhijo ravnanja, ki vključuje preprečevanje nastajanja odpadkov, njihovo pripravo za ponovno uporabo, recikliranje, drugo predelavo in odstranjevanje. To vzpodbuja zmanjševanje nastajanja reakcijske vode in smolnih ostankov ter njihovo recikliranje ali ustrezno obdelavo (Evropski parlament in Svet, 2008). Poleg tega Uredba (ES) št. 1272/2008 (CLP) določa klasifikacijo, označevanje in pakiranje snovi in zmesi, kar je ključno za pravilno identifikacijo nevarnih lastnosti snovi, vključno s tistimi, ki so del reakcijske vode v proizvodnji poliestrskih smol. Smole in reakcijsko vodo je torej potrebno pravilno označiti in skladiščiti v skladu s to uredbo (Evropski parlament in Svet, 2008). Za kemikalije v reakcijski vodi se uporablja tudi Uredba (ES) št. 1907/2006 (REACH), ki ureja registracijo, evalvacijo in avtorizacijo kemikalij. Sestavine za proizvodnjo smol in kemikalije v reakcijski vodi morajo torej biti registrirane in ocenjene glede njihovega vpliva na zdravje in okolje (Evropski parlament in Svet, 2006). Glede klasifikacije odpadkov, vključno z nevarnimi, se uporablja Evropski seznam odpadkov (2000/532/ES), kjer je reakcijska voda iz proizvodnje poliestrskih smol lahko uvrščena pod kodo 07 02 01* – vodni izpusti, ki vsebujejo nevarne snovi (Evropska komisija, 2000).

V Sloveniji temelji zakonodaja na Zakonu o varstvu okolja (ZVO-2), ki določa splošna načela za varovanje okolja, vključno z ravnanjem z odpadki. Glede le-tega morajo proizvajalci imeti ustrezno dovoljenje (npr. IPPC ali IED) in izpolnjevati okoljske obveznosti (monitoring emisij, skladiščenje ipd.) (ZVO-2, 2006). Uredba o ravnanju z odpadki (Uradni list RS, št. 77/22) določa podrobnosti o zbiranju, prevozu, predelavi in odstranjevanju odpadkov. Proizvajalci smol morajo torej voditi evidenco o nastalih

odpadkih, tudi o reakcijski vodi, ter zagotoviti njeno ustrezno obdelavo (Uredba o ravnanju z odpadki, 2022). Za nevarne odpadke, vključno z reakcijsko vodo, velja tudi Uredba o odpadkih, ki vsebujejo nevarne snovi, ki natančno določa klasifikacijo, dokumentacijo in sledenje nevarnim odpadkom (Uredba o odpadkih, ki vsebujejo nevarne snovi, n.d.). Če se reakcijska voda skladišči v sodih ali cisternah, je potrebno upoštevati tudi Pravilnik o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo (Pravilnik o ravnanju z embalažo, n.d.).

2.2.2 Standardi

Pri ravnanju z nevarnimi odpadki, kot so ostanki poliestrskih smol in reakcijska voda, se uporabljajo številni mednarodni in nacionalni standardi, ki so navedeni v Tabeli 2. Ti zagotavljajo varnost, učinkovitost in skladnost s predpisi.

Standard	Naziv	Uporaba v proizvodnji poliestrskih smol ali pri ravnanju z reakcijsko vodo
SIST EN ISO 14001:2015	Sistemi ravnanja z okoljem – Zahteve z navodili za uporabo	Vzpostavitev sistema ravnanja z okoljem v obratu; nadzor nad emisijami, odpadki in tveganji pri ravnanju s kemikalijami.
SIST EN 14899:2006	Karakterizacija odpadkov – Vzorčenje	Pravilno vzorčenje reakcijske vode ali drugih nevarnih odpadkov za nadaljnjo kemijsko ali toksikološko analizo.
SIST EN 12566 (deli 1–7)	Male čistilne naprave za odpadne vode	Predhodna obdelava reakcijske vode v manjših obratih pred oddajo v javni sistem ali specializirano čiščenje.
SIST EN ISO 10628:2021	Tehnični diagrami procesnih sistemov – Osnovna pravila	Načrtovanje procesnih tokov, reaktorjev in čistilnih enot v proizvodnji smol ali za čiščenje reakcijske vode.
SIST EN 15359:2011	Trdni gorljivi odpadki – Specifikacija in razvrščanje	Uporaba pri obdelavi trdnih ostankov smol (npr. filtrirnih medijev ali gošče), če so primerni za energetsko predelavo.

Tabela 2: Standardi in njihova uporaba v proizvodnji poliestrskih smol in pri ravnanju z reakcijsko vodo

(Vir: Slovenski inštitut za standardizacijo, n.d.)

Temeljni standard na področju varstva okolja je SIST EN ISO 14001:2015, ki določa zahteve za vzpostavitev in izvajanje sistemov ravnanja z okoljem. Podjetjem omogoča sistematično spremljanje vplivov na okolje ter obvladovanje okoljskih tveganj, vključno z ravnanjem z nevarnimi kemikalijami in emisijami iz reakcijske vode (ISO, 2015). Za pravilno oceno nevarnosti in sestave odpadkov se uporablja standard SIST EN 14899:2006, ki določa metodologijo vzorčenja odpadkov in njihovo karakterizacijo. Ta standard je bistven za ugotavljanje, ali reakcijska voda vsebuje nevarne snovi, ter za nadaljnjo odločitev o načinu njene obdelave (CEN, 2006). V primerih, ko proizvodni obrati uporabljajo manjše sisteme za predhodno čiščenje

reakcijske vode, se lahko uporabljajo smernice iz standardov SIST EN 12566 (deli 1–7), ki urejajo delovanje malih čistilnih naprav za odpadne vode (CEN, 2005–2013). Poleg tega je za tehnično dokumentacijo in načrtovanje procesnih tokov ter naprav za obdelavo reakcijske vode in odpadkov priporočljiv standard SIST EN ISO 10628:2021, ki omogoča enotno označevanje procesne opreme in pretokov (ISO, 2021). Če odpadki iz postopkov vsebujejo trdne gorljive frakcije (npr. ostanki smol), ki so primerni za energetska predelava, se uporablja standard SIST EN 15359:2011, ki določa merila za razvrščanje in specifikacijo trdnih gorljivih odpadkov (CEN, 2011).

2.3 Zbiranje, obdelava in deponiranje reakcijske vode

Kot smo že omenili, se reakcijska voda zaradi možne vsebnosti nevarnih snovi uvršča med industrijske ali celo nevarne odpadne vode (Evropski parlament in Svet, 2008).

Ustrezno ravnanje z reakcijsko vodo je zato ključno za preprečevanje negativnih vplivov na okolje, zlasti na vodne vire in tla. Postopki obravnave reakcijske vode se začnejo že pri njenem zbiralnem sistemu, ki mora biti tehnično ustrezno izveden (npr. z lovilnimi posodami, vodotesnimi skladišči) skladno z Uredbo o ravnanju z odpadki (Uradni list RS, št. 77/22). Sledi predobdelava reakcijske vode, ki lahko vključuje mehansko ločevanje, nevtralizacijo, dekantacijo, adsorpcijo ali biološko obdelavo (Slovenski inštitut za standardizacijo, 2006).

V primeru, da voda po obdelavi še vedno vsebuje presežne koncentracije nevarnih snovi, jo je treba oddati pooblaščenemu zbiralcu nevarnih odpadkov ali jo dodatno obdelati v specializirani čistilni napravi (ARSO, n.d.). V zadnji fazi, kadar je nadaljnja uporaba ali predelava tehnično ali ekonomsko neizvedljiva, sledi deponiranje ali sežig ostankov reakcijske vode, pri čemer mora biti zagotovljena popolna sledljivost in skladnost z zakonodajo (Direktiva 2008/98/ES; Uredba (ES) št. 1272/2008).

Ravnanje z reakcijsko vodo je tako predmet strogih nacionalnih in evropskih predpisov ter mora biti v skladu z načeli okoljske varnosti, preprečevanja in odgovornosti povzročitelja (ZVO-2, 2006).

2.3.1 Sežig

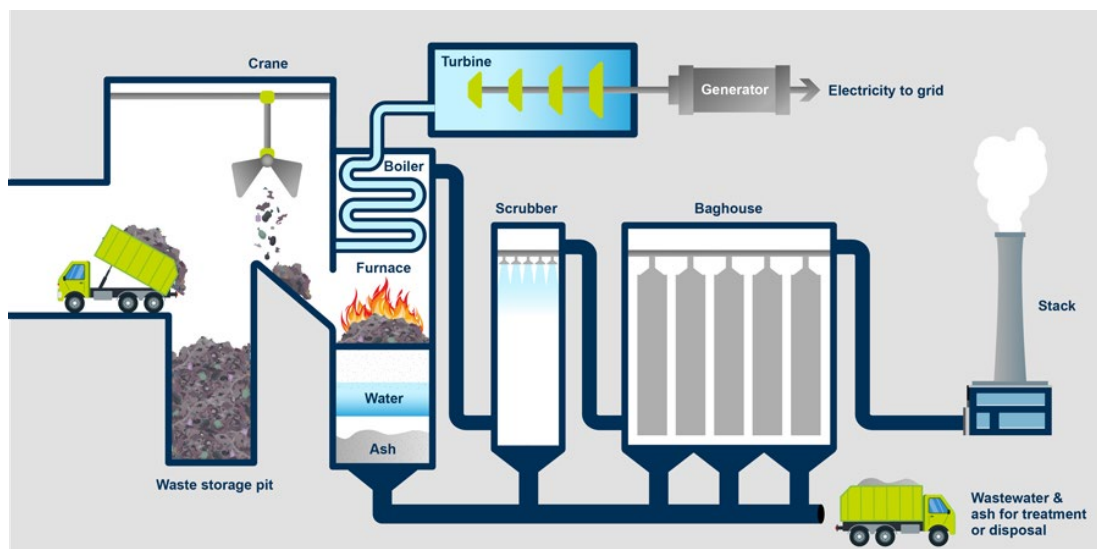
Sežiganje odpadkov ali termična obdelava je visoko učinkovit postopek zmanjševanja prostornine in nevarnosti odpadkov, ki temelji na zgorevanju pri temperaturah nad 850 °C. V sežigalnicah proces poteka kontrolirano, pogosto z možnostjo pridobivanja energije, kar se imenuje energetska predelava odpadkov (European Commission, 2019). V proizvodnji poliestrskih smol se pogosto pojavljajo odpadne vode z visoko vsebnostjo hlapnih organskih spojin (HOS), kot so stiren, glikoli, kisline in topila. Za te vrste industrijske reakcijske vode je sežig ena od ključnih metod uničenja organskih kontaminantov (Knežević, 2019).

Proces vključuje več stopenj: sprejem, skladiščenje in predobdelavo odpadkov, zgorevanje v različnih tipih peči (rešetkaste, rotacijske, fluidizirane), čiščenje dimnih plinov in obdelavo trdnih ostankov (žlindra, pepel). Zgorevanje poteka ob nadzorovanem dotoku kisika in dovolj dolgem zadrževanju pri visoki temperaturi, da se zagotovi popolna razgradnja organskih snovi (U.S. EPA, 2020). Poseben poudarek je na čiščenju dimnih plinov, saj ti lahko vsebujejo kisle pline, težke kovine, NO_x, dioksine in druge škodljive snovi. V ta namen se uporabljajo cikloni, vrečasti filtri, nevtralizacija plinov in katalitska oksidacija (Buekens & Huang, 1998).

Za reakcijsko vodo iz proizvodnje poliestrskih smol se uporabljajo tri glavne metode, to so direktno sežiganje, termična oksidacija hlapov in sežig koncentratov. Direktno sežiganje vključuje vbrizgavanje reakcijske vode neposredno v peč, kjer organske snovi zgorijo, preostanek pa je para in ogljikov dioksid. Ta metoda je zelo učinkovita (>99,9 %) pri uničevanju spojin, kot so stiren, etilenglikol, metanol in druge hlapne organske spojine (Tischler et al., 2011). Vendar pa zahteva predpripravo in ima visoke stroške (European Commission, 2014). Termična oksidacija hlapov (TO) se uporablja za hlapne HOS, ki so kondenzirani iz reakcijske vode. Ti hlapi se oksidirajo pri približno 800 °C, kar omogoča njihovo razgradnjo (He et al., 2017). Ta metoda je še posebej primerna za obdelavo nizkih koncentracij HOS, zato se pogosto uporablja kot dopolnilni sistem. Sežig koncentratov je metoda, ki vključuje predobdelavo reakcijske vode z izhlapevanjem ali membransko filtracijo, kar zmanjša volumen odpadka. Močno koncentriran tok sledi organskih snovi se nato usmeri v peč za sežig, kar optimizira energijsko porabo in zmanjša potrebo po dodatnem obdelovanju (TSE, 2018).

Čeprav ima sežig pomembne okoljske prednosti, kot so zmanjšanje količine odpadkov, uničenje patogenov in pridobivanje energije, ostajajo izzivi pri emisijah (če ni ustreznega čiščenja) in pri ravnanju s stranskimi produkti, kot je leteči pepel, ki pogosto vsebuje težke kovine in dioksine ter zahteva posebna odlagališča (European Environment Agency, 2021). Zaradi tehnološkega napredka in strogih okoljskih predpisov, kot je Direktiva 2010/75/EU o industrijskih emisijah, se sežiganje danes

obravnavajo kot varna in trajnostna metoda za obdelavo tistih frakcij odpadkov, ki jih ni mogoče reciklirati ali drugače uporabiti (Ministrstvo za okolje in prostor, 2022).



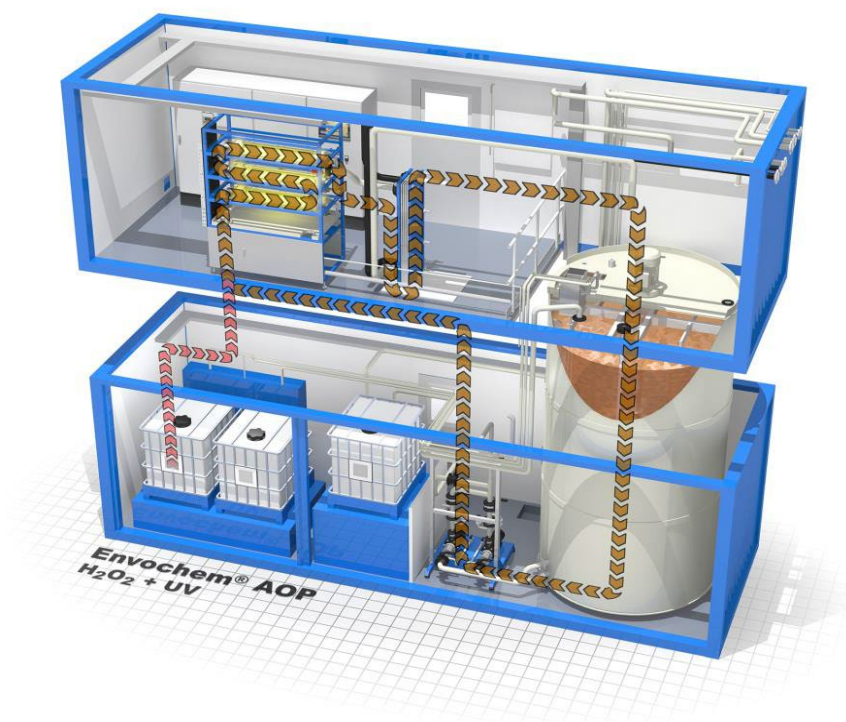
Slika 2: Shema sežiga
(Vir: Future Learn, 2021)

2.3.2 Oksidacija

Oksidacija v primeru zbiranja, obdelave in deponiranja reakcijske vode pomeni kemijski proces, v katerem se organske spojine v reakcijski vodi razgrajujejo s pomočjo oksidacijskih sredstev, kot so kisik, ozon, vodikov peroksid ali UV svetloba. Ta postopek omogoča odstranjevanje onesnaževal, ki so prisotna v industrijski reakcijski vodi, kot so HOS, metanol, glikoli in kisline (Metcalf & Eddy, 2014).

Med obdelavo reakcijske vode se oksidacija uporablja predvsem za razgradnjo kompleksnih in toksičnih organskih spojin v preproste, manj škodljive snovi, kot so ogljikov dioksid (CO_2) in voda (H_2O). V tem procesu sodelujejo oksidacijska sredstva, ki omogočajo nastanek reaktivnih radikalov, kot so hidroksilni radikali (OH), ki napadajo in razgrajujejo organske onesnaževalce (Andreozzi et al., 2003). Ena izmed najbolj razširjenih metod oksidacije je uporaba naprednih oksidacijskih procesov (AOP), ki vključujejo kombinacijo različnih oksidacijskih sredstev in svetlobnih virov (UV ali vidna svetloba). Te metode omogočajo učinkovito obdelavo industrijskih odpadnih voda, vključno z reakcijsko vodo, saj so sposobne odstranjevati tudi najbolj odporne onesnaževalce (Sillanpää et al., 2019). V postopkih, kot sta Fentonova reakcija ali foto-Fenton proces, je ključna vloga železovih ionov in vodikovega peroksida pri tvorbi hidroksilnih radikalov, ki učinkovito oksidirajo organske snovi (Gómez et al., 2018).

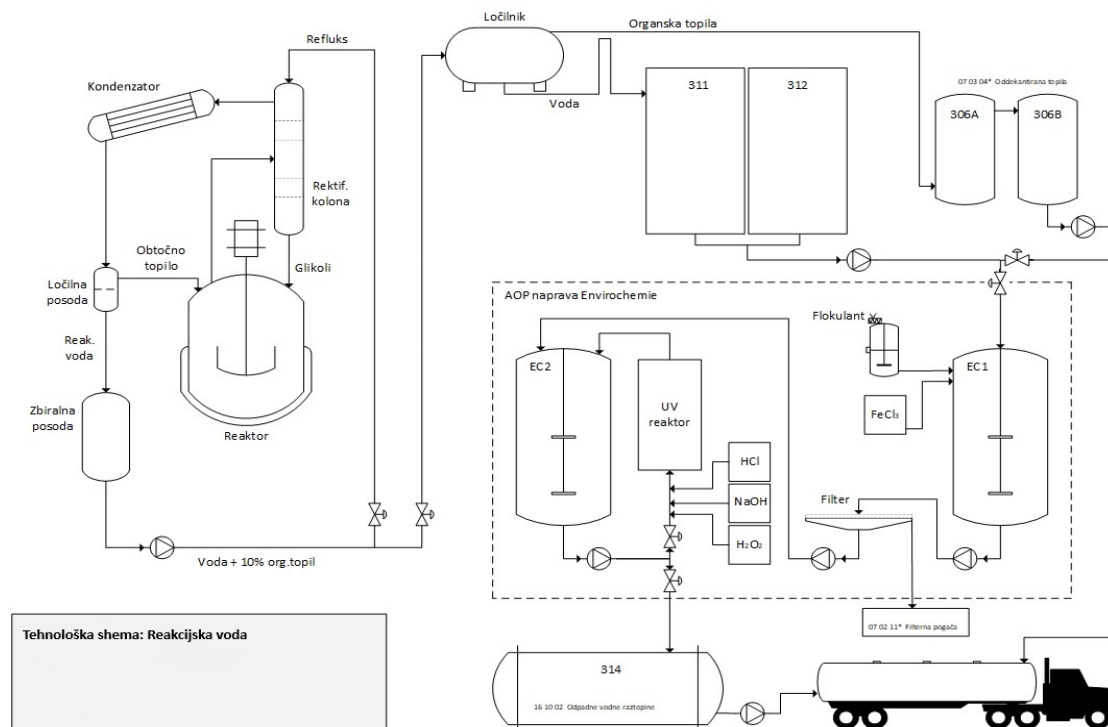
Kljub svoji učinkovitosti pa oksidacija v obdelavi reakcijske vode vključuje tudi nekatere omejitve, kot so visoki stroški reagentov (npr. ozon, vodikov peroksid), potreba po nadzoru optimalnih pogojev (pH, čas, temperatura) in potencialni nastanek stranskih produktov, ki lahko zahtevajo dodatno obdelavo (Zhang et al., 2019).



*Slika 3: Shema AOP – naprednega oksidacijskega procesa.
(Vir: Lastni vir)*

3 PRAKTIČNI DEL – ANALIZA PODATKOV

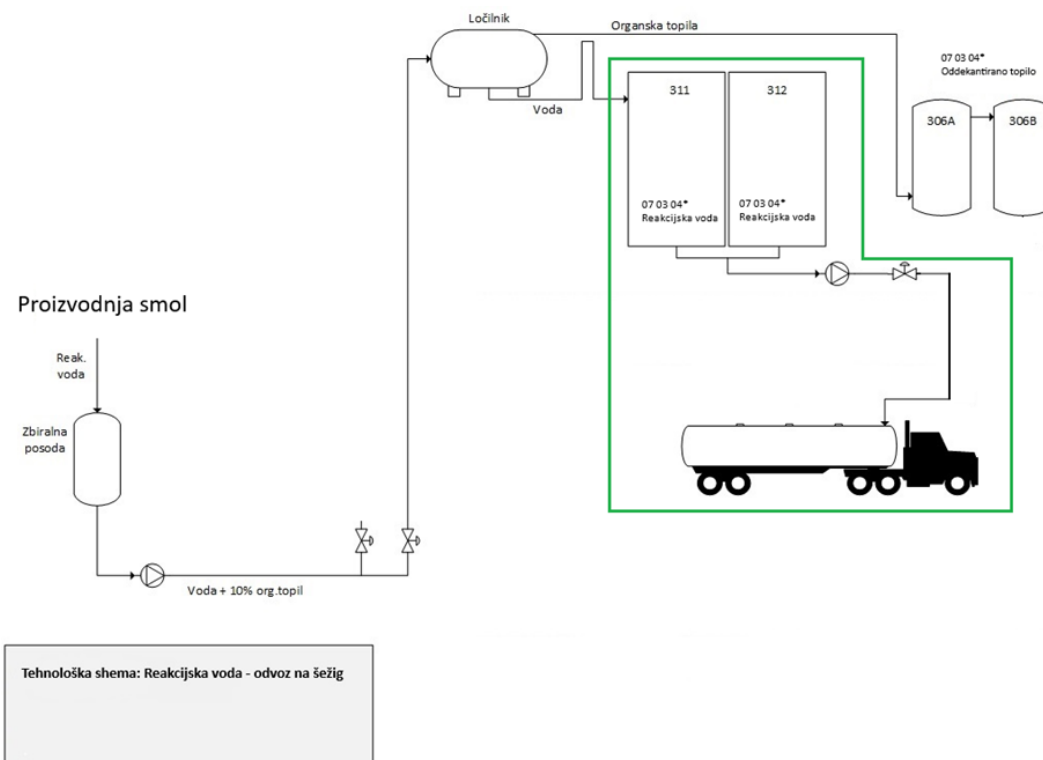
Kot že omenjeno, je glavni stranski produkt proizvodnje poliestrskih smol reakcijska voda. V podjetju X na letni ravni med proizvodnjo nastane približno 1500 ton reakcijske vode, kar na dnevnem nivoju pomeni nekje 4500 do 5000 kg, od tega približno 10 do 15 odstotkov organske faze oziroma topil. Vsa reakcijska voda se zbira v zbiralnih posodah, ki so sestavni element postrojenja oziroma del reaktorske linije. Ta se nato prečrpa preko kontinuirnega ločevalnika v zbirne rezervoarje. V ločilniku se na podlagi različne gostote iz reakcijske vode izloči vodna faza (070304* Odpadne vode z nevarnimi snovmi), ki vsebuje tudi sledi smol, glikolov in kislin. Ta se zbira v zbirnih rezervoarjih 311 in 312 na sliki 4, ki sta skupnega volumna 50 kubičnih metrov. Posebej se izloči še organska faza (070304* Oddekantrana topila), ki se zbira v ločenih zbirnih rezervoarjih 306A in 306B na sliki 4, skupnega volumna 14 kubičnih metrov. Od tam se le-ta prečrpava v avtocisterno, ki zadevno transportira na sežig. Zbirni rezervoarji tako za organsko fazo kot za vodno fazo so opremljeni z nadzornimi senzorji za nivo polnjenja in odzračevalnim sistemom, ki je povezan na RTO (regenerativna termična oksidacija), ki prepreči uhajanje plinov in vonjav. Ko je v rezervoarju zadosti reakcijske vode, se ta lahko prečrpava v avtocisterno in odpelje na sežig ali pa podvrže dodatni obdelavi na napravi za oksidacijo in nato transportira do čistilne naprave.



Slika 4: Tehnološka shema nastajanja in zbiranja reakcijske vode
(Lastni vir)

3.1 Sežig

Postopek prečrpavanja reakcijske vode v avtocisterno za odvoz na sežig poteka po vnaprej določenih varnostnih in tehničnih protokolih, katerega proces je označen na sliki 5. Najprej se zagotovi, da je reakcijska voda popolnoma ločena od ostalih produktov proizvodnje ter shranjena v ustreznem zadrževalnem rezervoarju, ki je zgrajen iz materialov, odpornih na kemikalije, in ima zagotovljeno sekundarno zadrževanje. Pred začetkom črpanja se izvede vizualni pregled povezovalne opreme, kot so cevi, spoji in ventili, ter se preveri brezhibnost črpalke, ki se uporablja za prečrpavanje. Nato se avtocisterna ustrezno pozicionira na predvidenem manipulativnem prostoru, ki je opremljen z lovilnim bazenom v primeru morebitnih razlitij. Avtocisterna mora biti prazna, tehnično brezhibna ter ustrezno označena in dokumentirana v skladu s predpisi o prevozu nevarnih snovi (ADR). Pred priklopom cevi se ozemlji tako črpalni sistem kot avtocisterno, da se prepreči možnost elektrostaticne iskre. Ko so vsi varnostni pogoji izpolnjeni, se cev priklapi. Najprej na rezervoar, nato na avtocisterno, pri čemer se uporabi suhi spoj, da se prepreči izlitje tekočine. Po vzpostavitvi povezave se odpre ventil na strani rezervoarja in nato postopoma tudi na strani cisterne. Zažene se črpalka, preveri se morebitno puščanje spojev in delovanje sistema. Ves čas prečrpavanja je prisotna usposobljena oseba, ki nadzoruje proces in spremlja delovanje sistema ter nivo napolnjenosti cisterne. Ko je črpanje zaključeno, se sistem izprazni, cev se najprej zapre na strani rezervoarja, nato pa na strani cisterne, ta se odklopi in očisti po protokolu. Ozemljitvene povezave se odstranijo šele po popolni prekinitvi črpanja. Na koncu se zabeleži količina prečrpane vode, izpolnijo se spremni dokumenti za čezmejni prevoz nevarnih odpadkov v Avstrijo in cisterna se zapečati ter pripravi na odvoz v sežigalnico.



*Slika 5: Tehnološka shema zbiranja reakcijske vode in odvoza na sežig
(Lastni vir)*

Pri obravnavi postopka za sežig in tovrstnega ravnanja z reakcijsko vodo je smiselno razlikovati med direktnimi in indirektnimi stroški, saj so prvi neposredno vezani na operativno izvedbo posameznega transporta, medtem ko drugi predstavljajo podporne ali dolgoročne stroške, ki posredno vplivajo na izvedbo postopka in zagotavljanje skladnosti z zakonodajo ter varnostnimi standardi.

3.1.1 Direktni stroški

Direktni stroški, prikazani v tabeli 3, vključujejo vse stroške, ki nastanejo neposredno pri posameznem postopku prečrpavanja in transporta, kjer se operira s približno 25 kubičnimi metri reakcijske vode. Mednje sodi strošek dela operaterjev, ki izvajajo prečrpavanje, pri čemer dve osebi za delo potrebuje približno dve uri, kar predstavlja strošek 40 €. Sledi strošek električne energije za delovanje črpalke, ki porabi med 9 in 10 kWh, torej znaša približno 1,10 €. Strošek kemikalij, predvsem natrijevega hidroksida (NaOH), za uravnavanje pH vrednosti znaša približno 50 € za 100 kg porabljene surovine. Obraba in vzdrževanje opreme, vključno s črpalko, cevmi in ventili, se upošteva pavšalno na vsak cikel. Enako velja za zaščitno opremo osebja, to so rokavice, zaščitna obleka, očala, maska ..., ki se vsakič po uporabi zavrže (torej je za enkratno uporabo).

Strošek transporta (400 km) z avtocisterno, vključno z gorivom in delom voznika, znaša med 350 € in 500 €. Strošek sežiga reakcijske vode v sežigalnici v Avstriji, kjer se voda obravnava kot nevarni odpad, znaša med 250 € in 300 € na tono; torej cena za 25 ton znaša med 6.250 € in 7.500 €. Strošek analize vzorca vode, kadar je pred prevozom potrebna kemijska analiza, znaša med 100 € in 200 €. Strošek čiščenja rezervoarjev in cevi po končanem prečrpavanju znaša dodatnih 10 € do 20 €. Skupni direktni stroški na en transport tako znašajo med 6.836 € in 8.467 €, v povprečju torej 7.651,5 €.

Postavka	Enota / Opis	Strošek (€)
Delo operaterjev	2 osebi × 2 h	40
Električna energija za črpalko	9–10 kWh × 0,12 €/kWh	1,10
Kemikalije (NaOH)	100 kg × 0,50 €/kg	50
Obraba in vzdrževanje opreme (črpalke, cevi, ventili)	Pavšalno	vključeno v okvir
Zaščitna oprema osebja	Enkratna uporaba	vključeno v okvir
Prevoz cisterne	400 km (v obe smeri)	350–500
Sežig reakcijske vode v Avstriji	250–300 €/t × 25 t	6.250–7.500
Analiza vzorca vode	Kemijska analiza (če zahtevana)	100–200
Čiščenje rezervoarjev in cevi	Voda, čistila, čas	10–20
Skupaj direktni stroški:		6.836–8.467 €

Tabela 3: Direktni stroški enega transporta na sežig
(Lastni vir)

3.1.2 Indirektni stroški

Indirektni stroški, prikazani v tabeli 4, so povezani s podporno infrastrukturo, zakonodajnimi zahtevami in zagotavljanjem dolgoročne varnosti ter učinkovitosti postopkov. Čeprav niso neposredno vezani na vsak posamezen transport, se lahko delijo pavšalno na število letnih ciklov, kjer predpostavljamo 50 transportov letno. Usposabljanje zaposlenih za ravnanje z nevarnimi snovmi letno znaša 2.000 €, kar pomeni 40 € na transport oziroma 25 kubičnih metrov reakcijske vode. Vzdrževanje in kalibracija varnostnih sistemov ter merilnih naprav letno vzame 3.000 €, kar predstavlja 60 € na transport. Administracija in priprava dokumentacije (spremljanje evidenc, čezmejna dokumentacija) se prav tako upošteva kot pavšalni strošek. Interni nadzori in presoje skladnosti z zakonodajo znašajo letno 2.500 €, kar pomeni 50 € na transport. Pridobivanje in vzdrževanje okoljevarstvenih dovoljenj letno znaša 5.000 €, kar pomeni 100 € na transport. Stroški varnostnih ukrepov, kot so ozemljitev sistema, lovilne posode in nadzorni sistemi, znašajo 1.000 € letno, oziroma 20 € na transport. Upravljanje tveganj in zavarovalne premije, povezane z ravnanjem z nevarnimi snovmi, se ocenjujejo na 3.000 € letno, kar pomeni 60 € na transport. Skupni posredni

stroški na transport tako znašajo med 450 in 500 €, v povprečju torej 475 € na transport oziroma 25 kubičnih metrov reakcijske vode.

Postavka	Letni strošek (€)	Strošek na transport (€)
Usposabljanje zaposlenih	2.000	40
Vzdrževanje varnostnih sistemov in naprav	3.000	60
Administracija in dokumentacija	Pavšalno	vključeno
Interni nadzor / presoje skladnosti	2.500	50
Okoljevarstvena dovoljenja	5.000	100
Skladiščenje reakcijske vode pred odvozom	Pavšalno	vključeno
Varnostni ukrepi (ozemljitev, lovilci, alarmi)	1.000	20
Upravljanje tveganj, zavarovalne premije	3.000	60
Skupaj indirektni stroški:		450–500 €

Tabela 4: Indirektni stroški transporta na sežig
(Lastni vir)

3.2 Oksidacija

V postopku ravnanja z odpadno reakcijsko vodo, z metodo oksidacije (slika 6), ki nastane pri proizvodnji poliesterskih smol, se ta voda najprej zbere v zbirnih rezervoarjih z oznakama 311 in 312, nameščenih v bližini proizvodne linije. Ko se doseže ustrezen nivo, se voda s pomočjo črpalke prečrpa v rezervoar za predpripravo vode z oznako EC1, ki se nahaja znotraj naprave za napredno oksidacijo za AOP. Rezervoar z oznako EC1 je opremljen z mešalnikom, nivojsko sondo ter zaščito pred prenapolnitvijo, kar omogoča varno in nadzorovano pripravo vode za nadaljnjo obdelavo. V tej fazi predpriprave (Pre-treatment) voda kroži po sistemu s pomočjo membranske črpalke na stisnjen zrak, vanjo pa se dodajajo različne kemikalije glede na sestavo reakcijske vode. Dodajajo se klorovodikova kislina (HCl) ali natrijev hidroksid (NaOH) za uravnavanje pH vrednosti, železov klorid (FeCl_3) kot katalizator za koagulacijo ter polimer za flokulacijo. Polimer se pripravlja ločeno v namenski dozirni enoti, ki vključuje dva rezervoarja. V zgornjem rezervoarju se iz polimernega prahu in vode pripravi mešanica, ki se meša približno eno uro, nato pa se samodejno pretoči v spodnji rezervoar, iz katerega se natančno odmerjena količina polimera dovaja v proces po potrebi.

Če pride do obarjanja onesnaževal, se voda z oborjenimi snovmi s pomočjo membranske črpalke črpa skozi tračni filter, kjer se trdne snovi mehansko ločijo od vode. V primeru, da do flokulacije ne pride, se tračni filter lahko ročno obide. Prefiltrirana voda se nato zbira v rezervoarju, ki se nahaja pod tračnim filtrom in je

prav tako opremljen z nivojsko sondo in zaščito pred prenapolnitvijo. Iz tega rezervoarja centrifugalna črpalka z vgrajenim frekvenčnim pretvornikom prečrpava odpadno vodo v reaktor EC2, kjer poteka glavni proces napredne oksidacije. V tej fazi oksidacije (Oxidation) se z uporabo UV-sevanja v kombinaciji z vodikovim peroksidom (H_2O_2) preko tako imenovane foto-Fenton reakcije oksidirajo organske in anorganske onesnaževalne snovi. Voda kroži po zaprtem sistemu, v katerem se neprestano meri pH, ki mora biti med 2,0 in 2,5 in se po potrebi regulira s HCl ali NaOH.

Proces dodajanja vodikovega peroksida in UV-sevanja temelji na naprednem oksidacijskem postopku (AOP), kjer sta oba dejavnika natančno usklajena. Celoten postopek je avtomatiziran in poteka po programu, ki je bil nastavljen na podlagi analiz večih vzorcev reakcijske vode in laboratorijskih testov, ki jih je opravil dobavitelj EnviroChemie. Postopek same oksidacije je razdeljen na pet ciklov, ki se med seboj časovno in količinsko dopolnjujejo.

V prvem ciklu gre za uvodno fazo oksidacije, kjer se začne z nižjo koncentracijo dodanega vodikovega peroksida in nizko stopnjo UV-sevanja. Namen te faze je sprožitev reakcije in začetna tvorba hidroksilnih radikalov, ki so močna oksidacijska sredstva. Že v tej fazi sta dodajanje peroksida in UV-sevanje v korelaciji, kar pomeni, da količina peroksida sledi intenziteti UV-sevanja. Drugi cikel pomeni povečanje intenzivnosti. Koncentracija peroksida se poveča, enako velja za energijo UV-sevanja. V tem ciklu se razgrajuje večina kompleksnejših organskih spojin, saj se oksidacijski potencial sistema znatno okrepi. Tretji cikel predstavlja vrhunec procesa. Tukaj sta dodana količina peroksida in moč UV-sevanja najvišji. Koncentracija hidroksilnih radikalov doseže maksimum, s čimer se zagotovi najučinkovitejša razgradnja preostalih onesnaževal. V četrtem ciklu se postopoma zmanjšujeta tako količina dodanega vodikovega peroksida kot tudi moč UV-sevanja. S tem se reakcija začne upočasnjevati, vendar še vedno poteka razgradnja morebitnih ostankov organskih spojin. Hkrati se sistem pripravlja na zaključno fazo postopka. Peti cikel je faza zaključevanja postopka AOP in priprave na nevtralizacijo. V tem ciklu se vodikov peroksid ne dodaja več, UV-sevanje pa ostaja prisotno v zmanjšani meri. Namen tega koraka je razgradnja preostalega peroksida iz prejšnjih ciklov. Popolna razgradnja peroksida je ključna, saj bi njegova prisotnost ob dodajanju natrijevega hidroksida za dvig pH povzročila eksotermno reakcijo, ki bi privedla do neželenega dviga temperature in penjenja. Zato mora biti pred začetkom nevtralizacije koncentracija peroksida povsem nična, čemur služi prav peti cikel z nadaljnjo izpostavitvijo UV-sevanju. Ves čas voda kroži skozi vgrajen toplotni izmenjevalnik, ki zagotavlja, da temperatura vode preseže 55 °C. Če se med oksidacijo tvorijo trdne snovi, je v tem delu procesa mogoče dodatno dozirati polimer za aglomeracijo, pri čemer se zgoščena voda ponovno obdela s tračnim filtrom.

V postopku prečrpavanja reakcijske vode iz proizvodnje poliesterskih smol v napravo za AOP in nato do centralne čistilne naprave se pojavljajo različni direktni in indirektni stroški, ki jih je smiselno identificirati in ovrednotiti. Direktni stroški predstavljajo neposredne stroške delovanja sistema, ki nastajajo pri vsakem posameznem odvozu oziroma ciklu obdelave, medtem ko so indirektni stroški bolj dolgoročne in podporne narave, povezani z zagotavljanjem varnega, zakonitega in nemotenega delovanja sistema.

3.2.1 Direktni stroški

Med direktne stroške oksidacije, predstavljene v tabeli 5, uvrščamo predvsem stroške delovanja in vzdrževanja ključne opreme. Pomemben del predstavlja obratovanje črpalk in njihovega vzdrževanja, vključno s porabo električne energije ter servisiranjem. Skupni strošek obratovanja znaša okoli 1.690 € na en transport, kar vključuje tako amortizacijo opreme kot stroške električne energije (približno 2.000 kWh po ceni 0,12 €/kWh). Poleg tega so pomembni tudi stroški vzdrževanja rezervoarjev za predpripravo in oksidacijo vode, ki vključujejo stroške materiala, montaže, rednega čiščenja in inšpekcijskih pregledov. Ti stroški, ocenjeni na mesečni ravni, znašajo 219,5–251,5 €, kar ob štirih transportih mesečno pomeni približno 55–63 € na en transport. Velik strošek predstavljajo kemikalije, ki se uporabljajo pri pripravi in oksidaciji reakcijske vode. Med njimi so najpogostejši vodikov peroksid, kisline za uravnavanje pH ter flokulanti oziroma polimeri. Skupni stroški kemikalij na en odvoz znašajo približno 1.500–2.430 €. Del sistema predstavljajo tudi AOP naprave, kot so UV-svetila in mešala, katerih delovanje zahteva znatno količino električne energije, kar je vključeno v strošek obratovanja. Zelo pomemben element v nadzoru procesa predstavljajo senzorji in merilna oprema za spremljanje kakovosti vode, kot so pH merilniki, senzorji za TOC (skupni organski ogljik), merilniki prevodnosti in oksidacijskega potenciala. Za natančno delovanje je potrebna redna kalibracija in občasna zamenjava komponent. Strošek amortizacije in kalibracije merilne opreme znaša približno 1.200 € letno, kar ob predpostavki 50 odvozov pomeni okoli 24 € na transport. Del direktnih stroškov je tudi delo osebja, neposredno vključenega v upravljanje procesa – to so operaterji in vzdrževalci, ki zagotavljajo nemoten potek obdelave vode. Na posamezen transport je ta strošek ocenjen na 180–300 € glede na obseg ur in zahtevnost vzdrževanja.

Po obdelavi voda ni primerna za izpust neposredno v okolje, zato se transportira do centralne čistilne naprave (CČN). Strošek vključuje tako prevoz z avtocisterno (345 €) kot plačilo za sprejem in nadaljnjo obdelavo vode na CČN (1.380–1.495 €, glede na 60–65 €/m³ za 23 m³ tekočine). Poleg tega je zaradi zahtev glede sledljivosti in zagotavljanja kakovosti potrebno redno vzorčenje in analiziranje obdelane vode, kar vključuje kemijske analize, ki so obvezne za monitoring in morebitno nadaljnjo obdelavo. Ti stroški so že vključeni v postavke nadzora kakovosti in se lahko ocenijo

posamično glede na regulatorne zahteve. Skupni direktni stroški na en transport reakcijske vode tako znašajo med 5.174 € in 6.347 €, v povprečju 5.760,5 €, kar predstavlja znaten delež v celotnih stroških obratovanja sistema.

Postavka	Opis / Enota	Strošek (€)
Obratovanje sistema	Amortizacija, električna, servis	1.690
Vzdrževanje rezervoarjev in cevovodov	Čiščenje, pregledi, energija, kemikalije	55–63
Kemikalije za pripravo in oksidacijo	H ₂ O ₂ , pH regulatorji, katalizatorji, polimeri	1.500–2.430
Senzorji in merilna oprema	Kalibracija, amortizacija, potrošni material	24
Osebe v postopku	30 ur dela (operaterji, vzdrževalci)	180–300
Odvoz na CČN	Sprejem (60–65 €/m ³ × 23 m ³)	1.380–1.495
Prevoz s cisterno	Avtocisterna – en odvoz	345
Skupaj direktni stroški:		5.174–6.347 €

Tabela 5: Direktni stroški na oksidacijo
(Lastni vir)

3.2.2 Indirektni stroški

Indirektni stroški oksidacije predstavljajo podporno okolje, ki omogoča varno in skladno delovanje sistema AOP. Pomemben del teh stroškov predstavlja upravljanje sistema, vključno z administracijo, vodenjem evidenc ter pripravo in oddajo poročil pristojnim nadzornim organom. Ti stroški znašajo približno 1.500 € letno torej 30 € na odvoz. Ker gre za delo z nevarnimi kemikalijami in visoko energijsko intenzivnim sistemom, je potrebno redno usposabljanje osebja s področja varnosti pri delu in ravnanja s kemikalijami. Letni stroški izobraževanja znašajo 2000 €, torej 40 € na odvoz, pri čemer se upoštevajo redni varnostni seminarji in delavnice. Pomemben del stroškov predstavlja tudi amortizacija opreme in infrastrukture, ki vključuje črpalke, cevovode, rezervoarje ter AOP naprave. Ob predpostavki življenjske dobe osem let in vrednosti opreme 40.000 €, znaša letna amortizacija 5.000 €, kar na en odvoz pomeni 100 €. Letni stroški vzdrževanja sistema, ki vključujejo redne servise, pregledovanje opreme ter zamenjave komponent, znašajo dodatnih 2.000 €, torej 40 € na odvoz. Za delovanje sistema je nujno pridobiti in vzdrževati okoljska dovoljenja, kar zajema tudi izvedbo periodičnih okoljskih pregledov in poročil. Ti stroški znašajo okvirno 2.500 € letno, kar pomeni 50 € na odvoz. Poleg tega je sistem ustrezno zavarovan – tako proti škodi na opremi kot za primer okoljske odgovornosti. Letni strošek zavarovanj znaša 2.500 € (50 € na odvoz). K varnosti delovanja prispevajo tudi zaščitni ukrepi, kot so osebna varovalna oprema, gasilni aparati ter detekcijski sistemi za nevarne pline, kar skupaj letno predstavlja strošek v višini 800 €, torej 16 € na odvoz. Na koncu je potrebno upoštevati še okoljske dajatve in prispevke, ki jih določa zakonodaja za obremenjevanje okolja oziroma za obdelavo nevarnih odpadnih voda. Ti so v analizi ocenjeni na simboličnih 500 € letno (10 € na odvoz), kar zajema morebitne pristojbine za emisije v okolje, čeprav je večina vode nadalje obdelana na CČN. To skupno pomeni 336 € stroška na en odvoz do čistilne naprave.

Postavka	Opis / Enota	Strošek na transport(€)
Upravljanje in administracija	1.500 €/leto	30
Usposabljanje osebja	Letna izobraževanja (varnost, kemikalije)	40
Amortizacija infrastrukture	40.000 €/8 let	100
Vzdrževanje sistema	Servisi, zamenjave komponent	40
Okoljska dovoljenja in pregledi	Dajatve, pregledi	50
Zavarovanja	Oprema in odgovornost	50
Varnost in zaščita	Osebna oprema, gasilni aparati, detektorji	16
Okoljske dajatve	Ocenjene dajatve glede emisij	10
Skupaj indirektni stroški:		336 €

Tabela 6: Indirektni stroški oksidacije na leto
(Lastni vir)

4 PRIMERJAVA SEŽIGA IN OKSIDACIJE

Sežig reakcijske vode, ki nastane kot stranski produkt pri proizvodnji poliestrskih smol, temelji na visoko temperaturnem zgorevanju, pri katerem se škodljive organske spojine razgradijo na ogljikov dioksid in vodo. Postopek poteka v specializiranih sežigalnicah za nevarne odpadke, kamor se reakcijska voda najprej varno pripelje s cisternami, pri čemer je celoten proces podvržen strogim varnostnim in tehničnim protokolom. Glavna prednost sežiga je njegova visoka učinkovitost, saj omogoča več kot 99,9-odstotno razgradnjo tudi najbolj trdovratnih organskih onesnaževalcev, kot so stiren, glikoli in metanol. Prednost je tudi večja zmanjšana količina odpadne reakcijske vode na en odvoz (do 25 m³/odvoz) kot pri postopku oksidacije. Ker se celoten proces odstranitve onesnaževalcev izvede izven proizvodnega obrata, to dodatno zmanjša operativna tveganja znotraj podjetja in prispeva k večji varnosti zaposlenih. V določenih primerih se toplota, ki nastane pri zgorevanju, lahko tudi energetsko izkoristi, kar dodatno izboljša energetsko bilanco procesa.

Kljub tem prednostim pa sežig prinaša tudi pomembne pomanjkljivosti. Gre za najdražjo obliko obdelave reakcijske vode, saj visoke stroške povzročajo tako transport (zlasti kadar je sežigalnica v tujini, denimo v Avstriji) kot tudi sama storitev sežiga, ki lahko doseže tudi do 300 evrov na tono. Poleg tega obstajajo okoljska tveganja, povezana z emisijami škodljivih plinov, kot so dušikovi oksidi, dioksini in težke kovine, zlasti če sistemi za čiščenje dimnih plinov niso optimalno nastavljeni ali vzdrževani. Dodatno težavo predstavlja odvisnost od zunanjih izvajalcev – morebitne zamude, spremembe terminov ali odpovedi s strani sežigalnic lahko povzročijo logistične zaplete. Sežigalnice pogosto delujejo z omejenimi kapacitetami in zahtevajo vnaprejšnjo najavo ter dogovorjene termine, kar zmanjšuje fleksibilnost in otežuje sprotno prilagajanje obratovanju podjetja.

Pri obratovanju sistema za oksidacijo se je izkazalo več pomembnih tehnoloških in operativnih pomanjkljivosti, ki neposredno vplivajo na učinkovitost in zanesljivost procesa. Ena od glavnih težav je prekomerna poraba materialov, saj je dejanska poraba kemikalij za oksidacijo reakcijske vode bistveno višja od predvidene, kar povzroča dodatne stroške in operativne zaplete. Težava je tudi nizko zmanjšanje količin odpadne vode na odvoz (19 m³/odvoz), odpelje pa se 23 m³. Dejansko pridelamo 4 m³ dodatnega odpadka na prevoz (to so kemikalije, ki se uporabljajo pri oksidaciji reakcijske vode). Veliko oviro predstavlja tudi tehnični in informacijski del sistema, saj ni optimalen. Podpora s strani dobavitelja sistema pa je izredno slaba in v praksi skoraj neuporabna. Zaradi te omejene funkcionalnosti sistema ni možno uvajati tehnoloških izboljšav, saj nove rešitve ni mogoče vključiti v obstoječi nadzorni sistem. To predstavlja veliko oviro pri optimizaciji postopka in reševanju obstoječih problemov. Druga pomembna težava procesa oksidacije je odvisnost od CČN, saj je to trenutno edini obrat v Sloveniji, ki ima dovoljenje za obdelavo te vrste obdelane

odpadne vode. CČN ima omejitve največ 40m³ dnevno, kar predstavlja logistično oviro. Poleg tega moramo manjši del vode dostavljati v IBC kontejnerjih, kar dodatno obremeni operativne zmogljivosti. Vse te težave skupaj kažejo na resne omejitve trenutnega sistema AOP, ki kljub osnovni funkcionalnosti ne omogoča zanesljivega, varnega in stroškovno učinkovitega dolgoročnega obratovanja brez temeljite nadgradnje tako strojne kot programske opreme.

Kar se tiče stroškov je, glede na primerjalno tabelo 7, oksidacija cenejša v primerjavi s sežigom, kar je predvsem posledica nižjih direktnih stroškov. V direktnih stroških oksidacije so ključni prispevki amortizacija sistema, kemikalije ter odvoz do čistilne naprave, ki skupaj znašajo med 5.174 in 6.347 €. Stroški prevoza z avtocisterno in obratovanje sistema so nižji kot pri sežigu, kjer so višji stroški predvsem zaradi sežiga reakcijske vode in višjih prevoznih stroškov (350–500 €). Stroški sežiga reakcijske vode v Avstriji, ki znašajo med 6.250 in 7.500 €, so glavni razlog za višje direktne stroške sežiga, ki skupaj dosežejo znesek med 6.836 in 8.467 €. Ko pogledamo indirektne stroške, je razlika manj očitna. Oksidacija vključuje manjše indirektne stroške (336 €), saj so ti predvsem povezani z osnovnim upravljanjem, usposabljanjem osebja in amortizacijo infrastrukture. V nasprotju s tem sežig povzroča višje indirektne stroške (450–500 €), ker vključuje dodatne stroške za varnostne ukrepe, okoljevarstvena dovoljenja, notranji nadzor kakovosti in druge administrativne naloge. Zaradi večje kompleksnosti postopka se sežig tudi bolj obremenjuje z zakonodajnimi in varnostnimi zahtevami, kar povzroči višje stroške. Skupno gledano je oksidacija bolj stroškovno učinkovita možnost, saj so skupni stroški v razponu 5.510–6.683 €, medtem ko sežig doseže višji znesek, in sicer 7.286–8.967 €, predvsem zaradi višjih indirektnih stroškov in višjih stroškov le-tega.

Kategorija	Oksidacija	Sežig
Direktni stroški	5.174–6.347 €	6.836–8.467 €
Indirektni stroški	336 €	450–500 €
Skupaj stroški	5.510–6.683 €	7.286–8.967 €

Tabela 7: Primerjava stroškov sežiga in oksidacije na odvoz
(Lastni vir)

5 ZAKLJUČKI

V okviru diplomskega dela smo preučili proizvodnjo poliestrskih smol, ključne faze njihove proizvodnje ter pomembne vidike, povezane z ravnanjem z odpadki, zlasti reakcijsko vodo in drugimi stranskimi produkti. Proizvodnja poliestrskih smol predstavlja tehnološko napreden proces s kompleksnimi kemijskimi reakcijami, ki zahtevajo natančen nadzor nad parametri in visoko raven optimizacije za doseg kakovostnih in okoljsko sprejemljivih produktov. Poleg same proizvodnje je pomemben tudi vidik obvladovanja stranskih produktov, zlasti reakcijske vode, ki je stranski produkt kemijskih reakcij, ki potekajo pri sintezi smol. Reakcijska voda kot tudi drugi stranski odpadki lahko vsebujejo nevarne snovi, ki zahtevajo ustrezno ravnanje in obdelavo. Učinkovito odstranjevanje in obvladovanje teh odpadkov sta ključnega pomena za zmanjšanje vplivov na okolje ter zagotavljanje skladnosti z zakonodajo, tako nacionalno kot evropsko. Pregled zakonodajnih smernic, kot so Direktiva 2008/98/ES o odpadkih, Uredba (ES) št. 1272/2008 (CLP) in zakonodaja na področju ravnanja z nevarnimi odpadki v Sloveniji ter relevantni standardi, potrjujejo, da se ravnanje z reakcijsko vodo in drugimi odpadki v industriji poliestrskih smol ne more obravnavati zgolj kot tehnološki izziv, ampak tudi kot pomemben okoljski in zakonski vidik, ki zahteva dosledno spoštovanje predpisov.

V diplomskem delu smo analizirali ekonomske in okoljske vidike dveh metod ravnanja s stranskimi produkti pri proizvodnji poliestrskih smol: sežig in oksidacijo. Na podlagi analize teoretičnih izhodišč in zbranih podatkov podjetja X smo ugotovili, da vsaka metoda prinaša prednosti in omejitve. Primerjava med oksidacijo in sežigom reakcijske vode kaže, da je oksidacija sicer stroškovno ugodnejša kot sežig, predvsem zaradi nižjih direktnih in indirektnih stroškov. Vendar se v praksi pri oksidaciji pojavljajo resne tehnične in operativne težave, kot so prekomerna poraba kemikalij, zastarel nadzorni sistem in slaba podpora dobavitelja. Sežig je tehnično učinkovitejši, saj omogoča popolno razgradnjo spojin in zmanjšanje količine odpadkov, vendar je postopek energetsko zahteven, hkrati pa povzroča več okoljskih tveganj.

Sklepno lahko trdimo, da je proizvodnja poliestrskih smol kompleksna, vendar tehnološko razvita industrijska panoga, katere uspešnost ni odvisna le od samega tehnološkega postopka, temveč tudi od učinkovitega ravnanja z nastalimi odpadki in usklajenosti z okoljskimi in zakonskimi normami. V prihodnje bo ključno nadaljnje vlaganje v raziskave in razvoj s ciljem še večjega zmanjšanja vplivov na okolje in optimizacije obdelave stranskih produktov, kot so reakcijska voda in ostali industrijski odpadki. Za dolgoročno rešitev bi bilo treba sistem oksidacije tehnološko nadgraditi ali razmisliti o kombinaciji obeh metod, da bi dosegli zanesljivost, učinkovitost in stroškovno optimizacijo ter se ne bi omejili le na enega ponudnika storitve, kot ga imamo na voljo pri vsaki metodi.

6 LITERATURA IN VIRI

- Agencija Republike Slovenije za okolje – ARSO. (n.d.). *Odpadne vode in nevarne snovi*. Pridobljeno 19. maja 2025 z naslova <https://www.arso.gov.si>
- Andreozzi, R., et al. (2003). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art*. Water Research, 37(9), 1920-1930.
- Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M., & Tsuji, H. (2010). *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. Wiley
- Barbusinski, K.. (2009). Fenton reaction – Controversy concerning the chemistry. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 16(3), 347-358.
- Buekens, A., & Huang, H. (1998). Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins/furans in municipal waste incineration. *Journal of Hazardous Materials*, 62(1), 1–33.
- Carraher, C. E. (2017). *Introduction to Polymer Chemistry* (4th ed.). CRC Press.
- Caffaro-Filho, R. A. (2009). Toxicity-directed approach of polyester manufacturing industry wastewater provides useful information for conducting treatability studies. *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 92-97.
- CEN. (2006). *SIST EN 14899:2006 – Karakterizacija odpadkov – Vzorčenje*. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- CEN. (2005–2013). *SIST EN 12566 – Male čistilne naprave za odpadne vode (deli 1–7)*. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- CEN. (2011). *SIST EN 15359:2011 – Trdni gorljivi odpadki – Specifikacija in razvrščanje*. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- Direktiva 2008/98/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19. novembra 2008 o odpadkih in razveljavitvi nekaterih direktiv. (2008). *Uradni list* 312: str. 3–30.
- European Commission. (2014). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Polymers*. European Union.
- European Commission. (2019). *Waste incineration: Best Available Techniques (BAT) Reference Document*. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/waste-incineration>
- European Environment Agency. (2021). *Waste incineration and emission trends in the EU*. <https://www.eea.europa.eu>
- Evropska komisija. (2018). *Seznam odpadkov (European Waste Catalogue - EWC)*. Pridobljeno z <https://eur-lex.europa.eu>
- Evropski parlament in Svet. (2008). *Direktiva 2008/98/ES o odpadkih (Okvirna direktiva o odpadkih)*. Uradni list Evropske unije, L 312, 3–30. Pridobljeno z <https://eur-lex.europa.eu>
- Evropski parlament in Svet. (2008). *Uredba (ES) št. 1272/2008 (CLP): klasifikacija, označevanje in pakiranje snovi in zmesi*. Uradni list Evropske unije, L 353, 1–1355. Pridobljeno z <https://eur-lex.europa.eu>
- Evropski parlament in Svet. (2006). *Uredba (ES) št. 1907/2006 (REACH): registracija, evalvacija in avtorizacija kemikalij*. Uradni list Evropske unije, L 396, 1–849. Pridobljeno z <https://eur-lex.europa.eu>

- Evropska komisija. (2000). *Evropski seznam odpadkov (2000/532/ES)*. Uradni list Evropske unije, L 226, 3–24. Pridobljeno z <https://eur-lex.europa.eu>
- Gogolewski, S. (1990). "Synthesis, Degradation, and Application of Aliphatic Polyesters." *Polymer Degradation and Stability*, 30(1), 1–16.
- Gómez, M., et al. (2018). *Photo-Fenton treatment of wastewater contaminated with pharmaceuticals and personal care products*. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 17–25.
- Future Learn. (2021). *Solid Waste Incineration*, Central Queensland University. Pridobljeno z naslova <https://www.futurelearn.com/info/courses/introduction-to-environmental-science/0/steps/271560>
- He, H., et al. (2017). Thermal oxidation of volatile organic compounds (VOC) from industrial waste streams. *Environmental Science and Technology*, 51(14), 8117–8125.
- ISO. (2015). *SIST EN ISO 14001:2015 – Sistemi ravnanja z okoljem – Zahteve z navodili za uporabo*. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- ISO. (2021). *SIST EN ISO 10628:2021 – Tehnični diagrami procesnih sistemov – Osnovna pravila*. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- JinZong Machinery. (2023a). *Polyester Resin Reactors: Automated Production Lines*. Pridobljeno 19. 5. 2025 z naslova <https://www.jinzongmachinery.com/a-news-polyester-resin-reactors-automated-production-lines>
- JinZong Machinery. (2023b). *Advancements in Polyester Resin Reactors*. Pridobljeno 19. 5. 2025 z naslova <https://www.jinzongmachinery.com/a-news-advancements-in-polyester-resin-reactors>
- JinZong Machinery. (2023c). *Sustainable Manufacturing of Polyester Resins*. Pridobljeno 19. 5. 2025 z naslova <https://www.jinzongmachinery.com/a-news-polyester-resin-reactors-sustainable-manufacturing>
- KaiserTech Consulting. (2023). *Polyester Resin Plants: Technologies and Developments*. Pridobljeno 19. 5. 2025 z naslova <https://kaisertechconsulting.de/en/polyester-resin-plants-a-report-of-latest-technologies-and-developments>
- Knežević, D. (2019). *Tehnologije ravnanja z nevarnimi odpadki*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.
- Loos, M. (2015). *Carbon Nanotube Reinforced Composites*. Elsevier Inc.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th Edition, McGraw-Hill Education.
- MDPI. (2022). A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites. *Sustainability*. Pridobljeno 21. 5. 2025 z naslova <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/24/16855>
- Ministrstvo za okolje in prostor. (2015). Uredba o odpadkih. *Uradni list RS*, št. 37/15, 69/15, 129/20, 44/22 – ZVO-2 in 77/22.
- Ministrstvo za okolje in prostor. (2022). *Sežiganje odpadkov – informacije in dovoljenja*. Pridobljeno s <https://www.gov.si>

National Research Council Committee on Health Effects of Waste Incineration. (2000). *Waste Incineration & Public Health*. Washington (DC): National Academies Press.

Odian, G. (2004). *Principles of Polymerization* (4th ed.). Wiley-Interscience.

Possible Challenges in the Polyester Resin Production. (2024). Persia Resin. Pridobljeno 7. 4. 2025 z naslova <https://persiaresin.com/en/polyester-resin-production/>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5th ed.). McGraw-Hill.

Pravilnik o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo. (n.d.). *Uradni list Republike Slovenije*.

Sillanpää, M., et al. (2019). *Solar-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review*. *Environmental Science & Technology*, 53(1), 1–19.

Slovenski inštitut za standardizacijo. (n.d.). *SIST standardi s področja ravnanja z odpadki in okoljskega upravljanja*. Pridobljeno 19. maja 2025 s spletne strani: <https://www.sist.si>

Sperling, L. H. (2006). *Introduction to Physical Polymer Science* (4th ed.). Wiley.

Vollmert, B. (1973). *Polymer Chemistry: An Introduction*. Springer.

Tischler, M., et al. (2011). Wastewater treatment and waste minimization in the polyester industry. *Journal of Environmental Management*, 92(2), 341-348.

Turkish Standards Institute (TSE). (2018). *Energy Efficiency and Waste Management in Chemical Industry*. Turkish Standards Institute.

Uredba o ravnanju z odpadki. (2022). *Uradni list Republike Slovenije*, št. 77/22.

Uredba o odpadkih, ki vsebujejo nevarne snovi. (n.d.). *Uradni list Republike Slovenije*.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Incineration*. <https://www.epa.gov/hw/thermal-treatment-technology>

What is Esterification?. (n.d). Byju's The Learning App. Pridobljeno 19. 5. 2025 z naslova <https://byjus.com/chemistry/esterification/#What-is-Esterification-Reaction?>

ZVO-2. (2006). *Zakon o varstvu okolja (ZVO-2)*. *Uradni list Republike Slovenije*, št. 39/06.