

**»Mladi raziskovalci Slovenije 2021«**  
**55. državno srečanje**

**PIROLIZA IN GAZIFIKACIJA**

Raziskovalno področje: kemija ali kemijska tehnologija

Raziskovalna naloga

**Mentorica**  
**SIMONA ŠKET ŽIBERNA**

**Avtor**  
**BRIN NATERER**



**Osnovna šola Malečnik**

**Murska Sobota, 2021**

**»Mladi raziskovalci Slovenije 2021«  
55. državno srečanje**

**PIROLIZA IN GAZIFIKACIJA**

Raziskovalno področje: kemija ali kemijska tehnologija

Raziskovalna naloga

**Mentorica  
SIMONA ŠKET ŽIBERNA**

**Avtor  
BRIN NATERER**



**Osnovna šola Malečnik**

**Murska Sobota, 2021**

## Povzetek

Raziskovalna naloga Piroliza in gazifikacija se ukvarja z analizo postopkov pirolize in napravami, ki so temu namenjene. Poleg pregleda industrijskih naprav je v teoretičnem delu poseben poudarek namenjen pregledu pirolize v domačem okolju in pripravam, ki to omogočajo. Empirični del vključuje izdelavo lastne priprave za pirolizo in testiranja njenega delovanja pri produkciji lesnega plina in depolimerizaciji umetnih snovi. Na podlagi dobljenih rezultatov naloga v sklepnem delu navaja najustreznejše postopke pirolize, ki jih je mogoče izvajati v domačem okolju za zagotavljanje energetske samozadostnosti. Vidik družbene odgovornosti temelji na poskusu rešitve dveh problemov, in sicer racionalnega ravnanja z odpadki in zagotavljanja energetske samozadostnosti. Z analizo postopkov depolimerizacije in demonstracijo naloga naslavlja dva temeljna problema 21. stoletja, in sicer ravnanje z odpadki in energetska preskrba.

## Zahvala

Rad bi se zahvalil svoji mentorici, ki mi je ob pisanju naloge podala veliko uporabnih nasvetov, lektorici za lektoriranje naloge ter svojemu očetu, brez katerega sestavljanje peči in testiranje ne bi bilo mogoče.

# KAZALO

1. UVOD .....	1
1.1 Raziskovalni cilji, raziskovalna vprašanja in hipoteze .....	1
1.2 Pregled osnovnih konceptov in definicije pojmov .....	3
1.2.1 Piroliza.....	3
1.2.2 Gazifikacija .....	4
1.2.3 Depolimerizacija .....	4
2. TEORETIČNI DEL.....	5
2.1 Pregled zgodovine .....	5
2.2 Komerzialna piroliza in gazifikacija.....	6
2.3 Piroliza in gazifikacija v domačem okolju.....	9
3. EKSPERIMENTALNI DEL .....	11
3.1 Metoda dela in material .....	11
3.1.1 Opis izdelanih modelov priprav za izvajanje pirolize .....	11
3.1.2 Opis meritev .....	11
3.2 Prvi test – izdelava gazifikatorja .....	12
3.3 Drugi test – izdelava peči.....	15
3.4 Tretji test – izdelava nove peči »hobo stove«.....	19
3.5 Četrty test – gazifikacija papirja, lesa, plastike .....	20
3.5.1 Gazifikacija papirja.....	21
3.5.2 Gazifikacija lesa .....	24
3.5.3 Gazifikacija plastike .....	27
3.6 Interpretacija rezultatov gazifikacije .....	29
3.7 Gazometer.....	35
3.7.1 Delovanje gazometra in njegova domača izdelava .....	37
3.7.2 Test gazometra.....	38
4. REZULTATI IN DISKUSIJA.....	42
5. DRUŽBENA ODGOVORNOST .....	43
6. SKLEP .....	44
7. LITERATURA .....	47
7.1. Knjižni viri.....	47
7.2. Internetni viri .....	47

## 1. UVOD

Pričujoča naloga ima izhodišče v prepoznavanju temeljnih problemov 21. stoletja. Med glavnimi izzivi tega časa so globalno segrevanje ozračja in oceanov, kopičenje odpadkov in slabe možnosti njihove predelave, odvisnost od energentov, predvsem fosilnih goriv, ki prihajajo iz nestabilnih regij v svetu, in odvisnost od svetovnega trga dobrin. Razmišljanje o teh zadevah me je vzpodbudilo k preučevanju možnosti, kako omenjene probleme na novo obravnavati in jih povezati v skupno rešitev. Začel sem pri vprašanju, kako pristopiti k izzivom, da jih spremenimo v izvedljive rešitve. Na primer, kako obravnavati odpadke, da prenehajo biti problem in postanejo rešitev. Odpadke je mogoče obravnavati tudi kot surovino in tako rešiti številne težave, ki se na ta problem navezujejo. Ob takšnem razmišljanju in zbiranju informacij sem odkril koncept lesnega plina. Na YouTubeu in drugih spletnih platformah sem našel veliko posnetkov in člankov na temo lesnega plina in zelo me je presenetilo to, da jih pozna in uporablja dokaj veliko število ljudi, izdelujejo pa jih tudi sami iz odpadnega materiala. Tako sem se odločil, da bom sam iz odpadnega materiala zgradil svoj gazifikator in izvedel pirolizo.

### 1.1 Raziskovalni cilji, raziskovalna vprašanja in hipoteze

Pričujoča raziskovalna naloga temelji na **dveh zastavljenih ciljih**, in sicer:

- preveriti, ali je mogoče uporabiti znanje s področja pirolize za produkcijo lesnega plina v domačem okolju in
- ali je mogoče za postopke pirolize uporabiti material, ki je na voljo v domačem okolju.

Na podlagi teh ciljev sem si zastavil naslednji **raziskovalni vprašnji**:

- Kakšen je najučinkovitejši model priprave za izvajanje pirolize oziroma gazifikacije v domačem okolju?
- Katero gorivo je najprimernejše za produkcijo plina v domačem okolju?

V procesu izdelave raziskovalne naloge je bilo moje osnovno vodilo, da so materiali, pripomočki in postopki dostopni oziroma izvedljivi v domačem okolju, torej brez specialne opreme in strokovne podpore.

Pred začetkom dela sem postavil naslednji hipotezi:

1. Najučinkovitejše gorivo za pirolizo doma je les. Ta hipoteza temelji na tem, da se velika večina gazifikatorjev, ki sem jih videl na spletu, poganja na les.
2. Učinkovit model za pripravo pirolize oziroma gazifikacije je mogoče izdelati v domačem okolju brez večje specialne opreme.

## 1.2 Pregled osnovnih konceptov in definicije pojmov

Osnovni pojmi, na katerih temelji moja raziskovalna naloga, so:

- piroliza,
- gazifikacija,
- depolimerizacija.

Njihova opredelitev je potrebna zaradi konceptualne jasnosti, razumljivosti zbranih podatkov in utemeljenosti sklepov.

### 1.2.1 Piroliza

Prvi pojem, ki ga je pomembno definirati v moji raziskovalni nalogi, je pojem pirolize. Predpona piro- izhaja iz grškega *pyros*, kar pomeni ogenj (Snoj, 1997), iz česar gre sklepati, da je to postopek, ki vključuje gorenje.

Spletna stran Kemija.net pirolizo opredeli na naslednji način (Kemija.net, 2021: n. p.):

»Piroliza je postopek razkroja snovi pri višji temperaturi in za gorljive snovi tudi brez dostopa zraka, saj sicer pride do sežiga snovi. Produkti pirolize so številne organske molekule, ki imajo nižjo molsko maso kot snov, ki jo piroliziramo. Znana je na primer piroliza odpadkov, ki vsebujejo polimerne snovi.«

Podobno definicijo najdemo tudi pri IUPAC (2021: n. p.):

»Piroliza oziroma termoliza se običajno povezuje z izpostavitvijo visoki temperaturi.«

Izraz se v splošnem nanaša na reakcijo v internem okolju in je pogosto uporabljen kot izraz za obdelavo pri visoki temperaturi, posebej pri izdelavi keramičnih izdelkov.

Podrobnejšo definicijo pirolize navaja tudi Biogreen-energy.com (2021: n. p.):

»Piroliza je proces termokemične obdelave, ki jo lahko uporabimo za kateri koli organski material. Pri tej obdelavi je material izpostavljen visoki temperaturi in v odsotnosti kisika gre skozi kemično in fizikalno ločitev molekul.«

Sam bom v svoji raziskovalni nalogi uporabljal pojem pirolize za postopke, ki ob visoki temperaturi razkrajajo testirane snovi brez dostopa zraka.

### 1.2.2 Gazifikacija

Drugi pojem, na katerem temelji moja naloga, je pojem gazifikacija. Gas izhaja iz nemščine »gas« oziroma plin, prevzeto iz grščine »khaos«, to je prazen prostor, praznina. (Snoj, 1997)

Osnovna definicija se glasi (Kemija.net, 2021: n. p.):

»Gazifikacija pomeni uplinjanje snovi (na primer premoga) oziroma oskrbovanje naselij in področij s plinom za gorivo in kot surovino za razne kemijske procese.«

Podrobnejšo definicijo najdemo pri NNFC (2009: stran 1–2):

»Gazifikacija je postopek, pri katerem se trdna snov, ki vsebuje ogljik, na primer premog ali biomasa, pretvori v plin. To je termokemični postopek, kar pomeni, da se surovina segreje na visoko temperaturo, pri čemer nastajajo plini, ki kemično reagirajo in tvorijo sintezni plin.«

Sam bom v svoji raziskovalni nalogi uporabljal pojem gazifikacije za postopke, ki ob visoki temperaturi iz surovine producirajo plin.

### 1.2.3 Depolimerizacija

Depolimerizacija je proces pretvorbe polimera, oziroma sestavljene molekule v monomer, oziroma enostavno molekulo (IUPAC, 2021: n. p.). Depolimerizacija se navadno sproži s povečanjem entropije. Točka, na kateri se depolimerizacija zgodi, je odvisna od »stropne temperature« polimera (ceiling temperature, maksimalna temperatura, pri kateri se polimer razgradi).



## 2. TEORETIČNI DEL

Teoretični del naloge predstavlja pregled osnovnih konceptov, teoretično ozadje problema in nekaj primerov pirolize in gazifikacije. Poglavje je sestavljeno iz pregleda zgodovinskih primerov, pregleda komercialnih različic gazifikatorjev in predstavitev izbranih primerov gazifikacije in pirolize v domačem okolju.

### 2.1 Pregled zgodovine

Piroliza in gazifikacija sta dva postopka, ki sta znana že dolgo. Enega najstarejših primerov pirolize najdemo že pri oglarjih, kjer se s tem postopkom iz lesne mase s segrevanjem brez kisika pridobiva lesno oglje. Glede na to, da je oglarstvo tesno povezano z rudarjenjem in predelavo kovin, gre sklepati, da je to znanje staro najmanj 3000 let (Šmid, 1935 v Klub oglarjev Slovenije, 2021). V Sloveniji je oglarstvo predstavljalo pomembno gospodarsko panogo od 16. vse do 20. stoletja.



Slika 1: Piroliza lesa v postopku oglarjenja  
(Vir: Ogljarski Klub Slovenije)



Slika 2: Avtobus na lesni plin, 1943  
(Vir: Wood gas – Wikipedia, 2021)

Nekoliko mlajši je postopek gazifikacije. Skozi zgodovino se pogosto pojavlja v kontekstu pridelave lesnega plina. Izdelavo prvega generatorja lesnega plina pripisujejo Gustavu Bischofu leta 1839, prvo vozilo s pogonom na lesni plin je naredil Thomas Hugh Parker leta 1901.

V začetku 20. stoletja je veliko mest tudi dostavljalo lesni plin do gospodinjestev, vse do 1930-ih, ko se je začel uveljavljati zemeljski plin.

V novejši zgodovini je bila uporaba lesnega plina na višku med drugo svetovno vojno, veliko te surovine pa je bilo namenjene transportu (DeDecker, 2021: n. p.):

»Leta 1943 je bilo 73.000 vozil na lesni plin na Švedskem, 65.000 v Franciji, 10.000 na Danskem in skoraj 8.000 v Švici. Leta 1944 je Finska imela okoli 34.000 »lesnih« vozil, od katerih je bilo 30.000 avtobusov in tovornjakov, 7.000 osebnih avtomobilov, 4.000 traktorjev in tudi 600 motornih čolnov.«

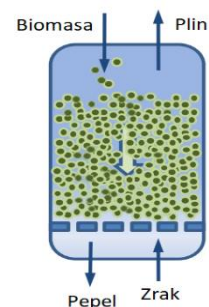
Danes se generatorji lesnega plina še vedno izdelujejo komercialno v Rusiji in na Kitajskem, kot generatorje električne energije za industrijske namene. Trenutno se lesni plin uporablja največ še v Severni Koreji, najpogosteje pri traktorjih in tovornjakih v ruralnih območjih na vzhodni obali polotoka, vse skupaj pa je povezano s pomanjkanjem drugih energentov, predvsem nafte.

## 2.2 Komercialna piroliza in gazifikacija

Piroliza in gazifikacija sta v sodobnem svetu najbolj prisotni v komercialni in industrijski obliki. V uporabi sta predvsem za produkcijo energentov in za obdelavo odpadnih surovin. Podroben pregled tipov komercialnih in industrijskih gazifikatorjev najdemo v dokumentaciji NNFC (2009: 3–5):

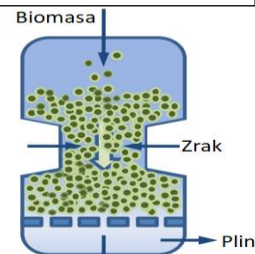
**Updraft fixed bed:** gazifikator s pritrjenim ležiščem in izhodom plina na vrhu. Pri tej vrsti gazifikatorja biomasa dovaja na vrh izgorevalne posode in vnos kisika je na dnu, zato se biomasa in plini gibljejo v nasprotnih smereh. Nekaj nastalega oglja pade in se sežge ter plin, bogat z metanom in katranom, zapusti vrh gazifikatorja, pri tem pa pepel pade skozi rešetko na dnu (glej Shemo 1).

Shema 1: Updraft gazifikator (E4tech, 2009)



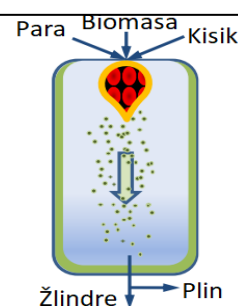
**Downdraft fixed bed:** gazifikator s pritrjenim ležiščem in izhodom plina na dnu. Biomasa se dovaja na vrhu gazifikatorja in vnos zraka oziroma kisika je tudi na vrhu ali na strani posode, zato se biomasa giblje v enaki smeri kot pridobljen plin (glej Shemo 2).

Shema 2: Downdraft gazifikator (E4tech, 2009)



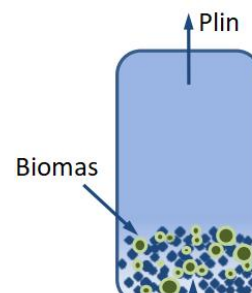
**Entrained flow:** gazifikator z ujetim pretokom. Biomasa v prahu se dovaja v gazifikator skupaj s stisnjnim kisikom. Močen plamen na vrhu gazifikatorja zagotavlja temperaturo od 1200 do 1500 °C (glej Shemo 3).

Shema 3: Ujeti pretok (E4tech, 2009)



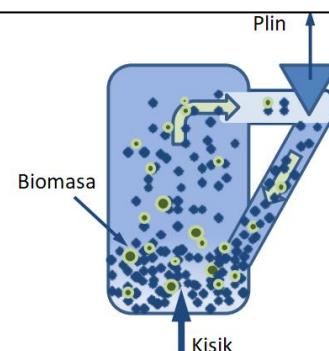
**Mehurčkasto fluidizirano ležišče:** pri tem gazifikatorju na dnu uplinjevalnika leži dno iz finega materiala. Zrak, kisik in para se črpajo navzgor skozi ležišče in biomasa se dovaja s strani. Gazifikator deluje pri temperaturah pod 900 °C, da se izogne taljenju in lepljenju pepela (glej Shemo 4).

Shema 4: Mehurčkasto ležišče (E4tech, 2009)



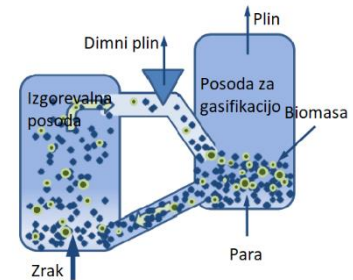
Shema 5: Obtočno ležišče s sistemom kroženja (E4tech, 2009)

**Obtočno fluidizirano ležišče:** v ležišču iz finega inertnega materiala piha zrak, kisik ali para navzgor. Biomasa se dovaja s strani in zmes sintetičnega plina ter delcev ločimo pod temperaturo 900 °C. To vrsto gazifikatorja lahko izpostavimo večjemu pritisku (glej Shemo 5).



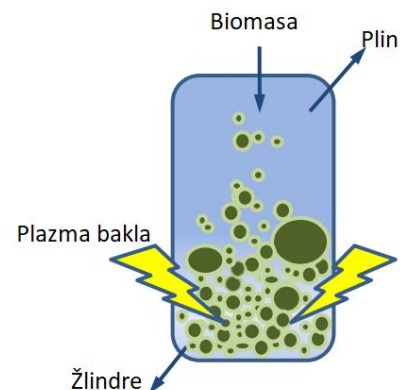
**Dvojno fluidizirano ležišče:** sistem je enak navedenemu zgoraj, le da ima dve komori, eno za gazificiranje, drugo pa za izogrevanje (glej Shemo 6).

Shema 6: Dvojno fluidizirano ležišče (E4tech, 2009)



**Plazma:** ta sistem deluje pod atmosferskim pritiskom in temperaturami od 1500 do 5000 °C. Uporablja se za pridobivanje zelo kvalitetnega naravnega plina in uporablja plazma bakle (glej Shemo 7).

Shema 7: Plazma (E4tech, 2009)



Iz pregleda tipov gazifikatorjev je razvidno, da obstajajo številni sistemi gazifikacije, med katerimi so eni bolj kompleksni, drugi manj, vsi pa opravljajo podobno nalogo, to je gazificiranje snovi, ki vsebujejo ogljik. Po opravljenem pregledu industrijske gazifikacije sem se odločil, da preučim, kako je z izvajanjem teh postopkov v domačem okolju.

## 2.3 Piroliza in gazifikacija v domačem okolju

V pregledu zgodovine sem v nalogi pokazal, da postopki pirolize in gazifikacije niso nič novega. V večini zgodovine sta se pravzaprav ta dva postopka odvijala zunaj komercialnega okolja, in sicer v sklopu domače obrti oziroma gospodinjstva.

Zanimiv primer pirolize v domačem okolju pa sem našel v članku z naslovom »Oče je izumil stroj, ki pretvori odpadke v kurilno olje« (JPS, 2018). Članek predstavi 48-letnega gospoda Nika Spencerja iz Eveshama v Angliji, ki je zgradil povsem funkcionalen pirolizator plastike, ki embalažo in plastenke spremeni v nafto, jo očisti in nato rafinira v kurilno olje.



Slika 3: Domača depolimerizacija (JPS, 2018)



Slika 4: Yugo z gazifikatorjem (Freeweb, 2021)

Tudi gazifikacija je mogoča v domačem okolju in z domačimi pripravami. Ljudje, ki se odločajo za te postopke, največkrat uporabljajo lesni plin kot pogonsko gorivo.

Med številnimi viri na to temo, ki sem jih pregledal, se mi je zdel najzanimivejši članek o gospodu Antonu Peterki iz Beograda, ki je predelal svojo Zastavo Yugo, da deluje na lesni plin (Freeweb, 2021). Projekt je izpeljal s svojim sinom Igorjem, in sicer tako, da je na zadnji del avtomobila pričvrstil gazifikator tipa Imbert in ga povezal z motorjem preko cevi. Tako je lesni plin dovajala do sprednjega dela avta in neposredno v uplinjač motorja. Kapaciteta posode gazifikatorja je bila 35 kilogramov, s čimer bi se gospod Peterka lahko peljal 150 kilometrov.

Po opravljenem teoretičnem delu naloge sem prišel do sklepa, da je piroliza in gazifikacija v domačem okolju mogoča in da imam dostop do potrebnih informacij, pripomočkov in surovin, da lahko izpeljem empirični del naloge, ki zajema:

- izgradnjo učinkovite priprave za izvajanje pirolize,
- testiranje različnih vrst goriva v procesu gazifikacije,
- raziskovanje možnosti za uporabo oziroma skladiščenje proizvedenega plina.

### 3. EKSPERIMENTALNI DEL

Eksperimentalni del predstavlja drugi jedrni del moje naloge. Sestavljen je iz predstavitve metode ter podrobnega kronološkega in tehničnega opisa razvoja lastnega gazifikatorja in opisa testov pirolize. Informacije sem zbiral neposredno.

#### 3.1 Metoda dela in material

Za potrebe raziskovalne naloge sem oblikoval kombinirano metodo, ki je vključevala (1) eksperimentalno delo za razvoj celotnega aparata za gazifikacijo in (2) izvajanje sprotnih meritev vsakega razvitega prototipa.

##### 3.1.1 Opis izdelanih modelov priprav za izvajanje pirolize

**Za potrebe raziskovalne naloge sem sam izdelal dve peči in reakcijsko posodo.** Prva peč je bila izdelana po principu **raketnih peči**, pri svoji izdelavi pa sem izdelal kombinacijo dveh modelov **raketnih peči (J in L)**. Druga peč predstavlja izboljšano **različico kurišča**, ki sem jo izdelal na podlagi rezultatov testiranja prve različice. Gre za peč, ki je oblikovana po principu »hobo« peči, saj je za gazifikator bila potrebna višja temperatura. Zraven tega sem izdelal tudi reakcijsko posodo, ki jo je mogoče neprodušno zapreti in ima vse ustrezne priključke in varovalke. Več podrobnosti o razvoju eksperimentalnih modelov peči sledi v prihodnjih podpoglavjih. Pri izdelavi peči sem se v veliki meri držal principa, da uporabljam surovine, ki so mi na voljo v domačem okolju, pri izbiri materiala pa sem dajal prednost odpadnemu materialu, ki sem ga uporabil za izgradnjo peči.

##### 3.1.2 Opis meritev

Meritve sem izvedel s pomočjo naslednjih pripomočkov (glej Sliko 5):

- daljinski ročni infrardeči termometer z meritvenim razponom od -50 °C do 550 °C,
- merilec vlažnosti, nastavljen na meritveni razpon od 0,00 % do 40,00 % vlažnosti,
- precizna digitalna gospodinjska tehtnica (natančnost 1 g),
- mikroskop Optus z digitalno kamero s priklopom na računalnik.



Slika 5: Merilni inštrumenti: mikroskop, termometer, digitalna tehtnica, merilec vlage

### 3.2 Prvi test – izdelava gazifikatorja

19. 12. 2020 sem pripravil vse potrebno za prvi test. Namen tega testa je preveriti, ali je mogoče sprožiti proces gazifikacije s pripomočki, ki so na voljo v domačem okolju. **Glavni cilji prvega testa so bili:**

- a) oblikovati in testirati osnovni model gazifikatorja,
- b) pridobiti osnovne parametre gazifikacije (čas do uplinjenja, temperatura uplinjenja, trajanje gazifikacije),
- c) preveriti končni rezultat gazifikacije (gorljivost lesnega plina in količina neizgorelega goriva).

Osebna zaščitna sredstva:

- rokavice,
- zaščitna očala,



- primerni čevlji.

Potrebščine za izdelavo, testiranje gazifikatorja in opravljanje meritev:

- nova pločevinka, bakrena cev, podložke,

- vrtni stroj, varilni aparat, žaga za kovino, ročni plinski gorilnik in vžigalnik.

Na začetku sem poskrbel za varnost. Nadel sem si rokavice in varnostna očala, pripravil sem gasilni aparat in test izvajal v dobro prezračenem prostoru, opremljenim z detektorjem ogljikovega monoksida.

V naslednjem koraku sem pripravili opremo za izvajanje prvega testa (Slika 6). Za reakcijsko posodo sem uporabil novo pločevinko za barvo. Za novo sem se odločil, saj bi uporaba rabljene, še posebej, če bi v njej ostali ostanki barve ali lepila, lahko vplivala na rezultate ali bila celo nevarna. V pokrov pločevinke sem zvrtno luknjo in vstavil bakreno cev za odvod lesnega plina. Pokrov in odvodna cev sta bila združena mehansko in neprodušno, saj je uspešna gazifikacija odvisna od neprodušnosti reakcijske posode. Nato sem iz jeklenih ploščic in navojne palice izdelal varovalke za dodatno zagotavljanje neprodušnosti in varnosti, saj sproščanje lesnega plina v reakcijski posodi poveča pritisk, kar lahko povzroči popuščanje tesnila na pokrovu, kar pa bi imelo za posledico neuspešno gazifikacijo zaradi vdora kisika ali celo eksplozijo reakcijske posode. Uporabil sem tudi taborniški gorilnik, ki je služil kot primarni vir energije.



Slika 6: Oprema za test 1



Slika 7: Izvedba testa 1

Pločevinko sem grel na taborniškem gorilniku in meril temperaturo vsakih 5 minut, približno na sredini pločevinke. Temperatura do konca testa ni narasla na več kot 70 °C, kar posledično še vedno ni sprožilo produkcije plina. Po 20 minutah sem test prekinil in pločevinko postavil na večji gorilnik. Na večjem gorilniku sem test začel znova. Nadaljeval sem z merjenjem temperature na sredini pločevinke vsakih 5 minut in opazoval začetek produkcije plina. Ker tudi po 20 minutah temperatura na sredini pločevinke ni narasla na več kot 87 °C, sem stranice pločevinke začel pomožno ogrevati z ročnim plinskim gorilnikom. Ob tem je temperatura reakcijske posode začela hitro naraščati in v nekaj minutah se je v reaktorju sprožil proces gazifikacije, kar sem opazil po očitnem izločanju dima na koncu oddušne cevi. Vsebnost plina v izločenem dimu sem preverjal z vžigalnikom, ampak plin je bil v manjši meri gorljiv. Tudi po 10 minutah podpornega gretja reakcijske posode kvaliteta izločenega lesnega plina ni bila dovolj dobra, da bi plamen na koncu oddušne cevi samostojno gorel. To me je privedlo do spoznanja, da je za uspešno gazifikacijo lesa treba dvigniti temperaturo reakcijske posode. To sem rešil tako, da sem pločevinko postavil v tuljavo dimnika in jo ogreval iz vseh strani (glej Sliko 8).

Po približno petih minutah je reakcijska posoda dosegla začel zadostno temperaturo in na oddušni cevi se je začel izločati dim, kar pomeni, da je stekel proces gazifikacije. Glede na to, da je dim uhajal z veliko silo, sem sklepal, da je posoda pod velikim pritiskom, kar bi pomenilo, da se izloča željena količina lesnega plina. Vsebnost plina sem preveril z vžigalnikom in plamen je v kratkem samostojno gorel, kar pomeni, da je izločeni dim vseboval zadostno količino lesnega plina. Po približno 3-eh minutah samostojnega gorenja je reaktor proizvajal čisti lesni plin, kar sem opazil tako, da je na oddušku bil samo še plamen brez kakršnihkoli znakov dima. Plamen je dogorel po približno 4-ih minutah, kar pomeni, da se je proces gazifikacije ustavil, ker se je iztrošilo gorivo v reakcijski posodi. Ko se je reakcijska posoda ohladila, sem jo odprl in pregledal ostanek goriva. Po končani gazifikaciji je od lesnih paličic, ki sem jih uporabil za gorivo, ostalo čisto oglje.



Slika 8: Modificirani test 1



Slika 9: Rezultat testa 1 – čisto oglje

#### Ugotovitve prvega testa:

- ugotovil sem, da je treba pločevinko enakomerno ogrevati z vseh strani z visoko temperaturo,
- treba je uvesti filtracijo, predvsem zaradi gostega dima, ki vsebuje vodno paro, katran in druge snovi, ki onemogočajo učinkovito izgorevanje plina na koncu oddušne cevi.

#### Sklep:

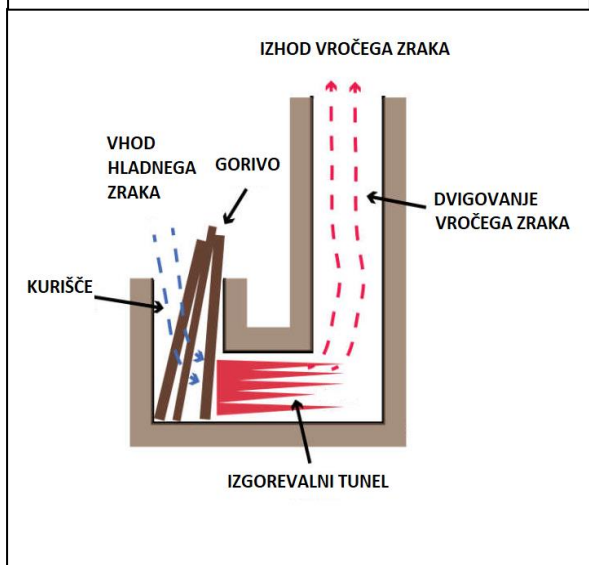
- za potrebe ustrežnejšega gretja je potrebno zgraditi »rocket stove« (posebna oblika kurišča),
- potrebno je poskrbeti za filtracijo, kar bom uredil s pomočjo improviziranega vodnega filtra.

### 3.3 Drugi test – izdelava peči

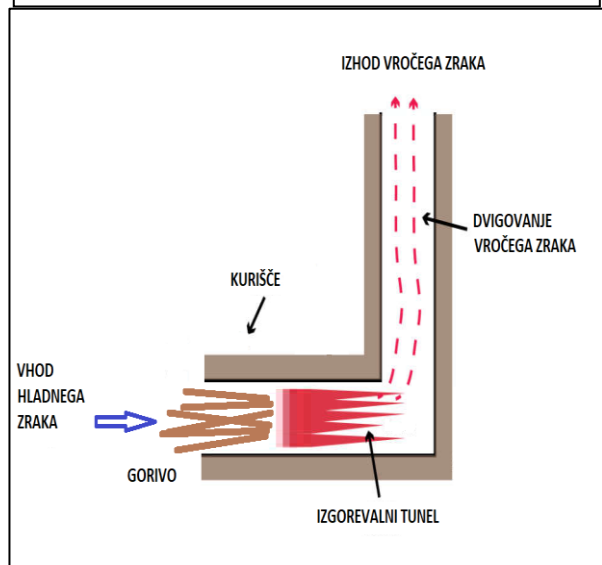
Na podlagi izsledkov iz testa 1, sem se za test 2 najprej opremil z znanjem za izdelavo raketne peči, ki bo morala biti precej močnejša od plinskega gorilnika. Raketna peč je oblika ogrevalnega sistema s počasnim sproščanjem toplote, ki je namenjen predvsem ogrevanju ljudi in talnemu gretju (RMS, 2020). Funkcije raketnih peči lahko razširimo tudi na kuhanje, ogrevanje vode in pripravo toplega zraka za distribucijo. Po pregledu literature sem prišel do sklepa, da jo lahko uporabim tudi za ogrevanje reaktorja gazifikatorja.

Osnovni gradniki raketne peči so kurišče, vodoravni izgorevalni tunel in dimnik, ki je hkrati tudi radiator. Raketne peči imajo odličen izkoristek zaradi specifične strukture in porabijo manj goriva v primerjavi z navadnimi pečmi, kjer toplota uhaja na vrhu. Toplota potuje skozi tunel, ki je lahko poljubno dolg in tako greje veliko večjo površino. Obstajajo peči, ki imajo obliko črke J in so primernejše za talno ogrevanje, ter peči, ki imajo obliko črke L in so primernejše za kuhanje (glej Shemo 8 in 9). Sam sem se odločil, da bom uporabil tip peči L.

Shema 8: Shematski prikaz raketne peči tip J (Wikipedija)



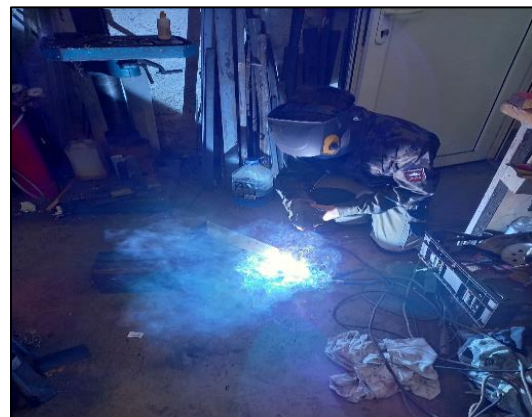
Shema 9: Shematski prikaz raketne peči tip L (Wikipedija)



Pri izgradnji peči sem na začetku vzel širok kos kvadratne jeklene cevi in vanjo vrezal dve luknji. Tja sem zavaril dve manjši štirikotni cevi, eno za vhod kisika, drugo pa za vhod goriva. Nato sem vzel manjši in debelejši kos jekla in vanj zvrtil veliko lukenj ter ga uporabil kot sito za



Slika 10: Razrez elementov raketne peči (lastni vir)



Slika 11: Varjenje elementov (lastni vir)

pepel. Nato sem na večji kos debelega jekla privaril štiri noge, katere se lahko snamejo. To služi kot podstavek za celotno peč (glej Sliko 10 in 11). Peč sem testiral tako, da sem v njej zakuril in na vrh postavil posodo z vodo. Liter vode pri sobni temperaturi je zavrel v približno 3-eh minutah, kar sem ocenil kot izjemno hitro.

V četrtek, 31. 12. 2020, sem znova testiral gazifikator v novi raketni peči (glej Sliko 12). Poleg nove peči sem modificiral tudi ključna dva sestavna dela gazifikatorja:

1. Podaljšal sem grelni modul za vstavljanje reaktorja, kar naj bi imelo za cilj spuščanje reaktorja globlje v kurišče. V prvem testu sem namreč spoznal, da mora biti reaktor izpostavljen visokim temperaturam, da bi gazifikacija uspešno stekla.
2. Preoblikoval sem odvodno cev reakcijske posode, kar je bilo nujno, ker je reaktor ležal globlje v peči.



Slika 12: Test kombinirane raketne peči (lastni vir)

Drugi test je potekal pod spodaj zapisanimi parametri.

**Tabela 1 – Parametri drugega testa**

<b>Vrsta goriva</b>	<b>Les (trske)</b>
Teža v gramih	220 g
Volumen	700 ml
Vlažnost goriva	0,6 %
Temperatura goriva ob zaprtju reaktorja	6 °C
Začetna temperatura peči ob vstavitvi reaktorja	420 °C
Začetek gazifikacije (čas od vstavitve reaktorja)	3 min
Plin postane gorljiv (čas od vstavitve reaktorja)	28 min
Čas samostojnega gorenja plina na izhodni cevi	4 min
Teža ostanka goriva	46 g
Celotno trajanje testa	35 min

Gazifikacijo v novi peči ocenjujem kot neuspešno, predvsem zaradi nizkega izkoristka, ki je očitno v razliki med časom, ki je potreben za produkcijo vnetljivega plina (28 minut), in trajanja njegovega gorenja (4 minute). Nizek izkoristek pripisujem predvsem obliki oddušne cevi. Ta zaradi razdalje med 90-stopinjskim zavojem in priključkom na reaktor onemogoča ustrezno odvajanje lesnega plina. Ta razdalja povzroča, da se ustvarjeni lesni plin na poti proti zavoju ohladi, kondenzira in pade nazaj v reaktor.

Sklep 1: Zavoj cevi mora biti čim bližje priključku na reaktor, da bodo plini čim hitreje

odvedeni iz reaktorja, kar pa pri tej obliki peči ni mogoče.

Sklep 2: Oblikovati moram ново peč, primernejšo za nove potrebe.

### 3.4 Tretji test – izdelava nove peči »hobo stove«

Odločil sem se za model peči **»hobo stove«**. To je peč, katere namen je, da vzdržuje plamen dolgo ob majhni potrošnji goriva in je namenjena ogrevanju, konstrukcija je enostavna in zgraditi jo je mogoče tudi iz pločevine.

Odločil sem se, da bo pri novi peči dovod zraka samo od spodaj in da bo kurišče čim krajše, saj mora peč v prvi vrsti dosežati visoko temperaturo, zraven tega pa mora zavoj izhodne destilacijske cevi biti čim bližje reaktorju. Pri raketni peči je namreč zaradi predolge cevi plin destiliriral in odtekal v reaktor, izločeni katran pa je začel mašiti odvod lesnega plina in tako onemogočati uspešnost testa.

#### Material:

- šest votlih kvadratnih profilov,
- kovinski disk,
- štiri manjši kvadratni profili,
- večji O profil.

Skoraj ves potreben material sem našel med odpadnim železom. Kupiti je bilo potrebno zgolj glavno cev, ki je morala zaradi visoke temperature imeti nekoliko debelejšo steno v primerjavi s testiranim modelom raketne peči. Prvi test novega modela peči je bil uspešen (glej Sliko 14), saj je gazifikacija pod parametri testa 2 stekla uspešno, lesni plin se je po približno 8-ih minutah destiliriral do točke, da je plamen gorel samostojno in mirno.



Slika 13: Material za »hobo stove« (lastni vir)



Slika 14: Uspešen prvi test »hobo stove« (lastni vir)

### Ugotovitve:

- **potrdil sem domnevo, da mora biti razdalja med priključkom reaktorja in zavojem oddušne cevi čim krajša;**
- **ugotovil sem, da mora biti temperatura reakcijske posode približno 500 °C, da bi gazifikacija stekla do točke, da plamen samostojno gori.**

Sklep 1: Za četrti test bom izvedel gazifikacijo s pomočjo peči (model »hobo stove«) na osnovi treh različnih goriv (les, papir in plastika).

### 3.5 Četrti test – gazifikacija papirja, lesa, plastike

Četrti test sem izvajal med 2. in 3. januarjem 2021. Test sem izvajal z novim modelom peči in na odprtem prostoru, skozi celoten test sem izvajal različne meritve. Meril sem:

- težo goriva v gramih (kontrolni parameter, postavljen na 250 g za les in papir, za plastiko pa 125 g zaradi velikega volumna),
- vlažnost goriva (kontrolni parameter postavljen na maksimalno 1 % vlage, vse do te vrednosti sem obravnaval kot enako suho),
- volumen goriva, temperaturo peči, temperaturo reaktorja, čas gazifikacije,
- težo neizgorelega goriva.



Vsak test sem za potrebe zbiranj podatkov in evidence tudi posnel z videokamero.

### 3.5.1 Gazifikacija papirja

Gazifikacija papirja je potekala na podlagi parametrov v spodnji tabeli.

Tabela 2: Parametri pirolize papirja

<b>Vrsta goriva</b>	<b>Papir (časopisni papir)</b>
Teža <b>goriva</b> v gramih	250 g
Volumen	750 ml
Vlažnost goriva	0,4 %
Temperatura goriva ob zaprtju reaktorja	4 °C
Začetna temperatura peči ob vstavitvi reaktorja	320 °C
Začetek gazifikacije (čas od vstavitve reaktorja)	46 s
Temperatura reaktorja ob začetku gazifikacije	85 °C
Temperatura reaktorja ob začetku produkcije gorljivega plina	450 °C
Plin postane gorljiv (čas od vstavitve reaktorja)	5 m 46 s
Čas samostojnega gorenja plina na izhodni cevi	42 m 35 s
Teža ostanka neizgorelega goriva	105 g
Celotno trajanje testa	48 m 21 s

#### Potek testiranja:

1. Zbral sem 250 g odpadnega papirja in ga tesno zvil v zvitek. V tej količini je prevladoval časopisni papir (glej Sliko 15).

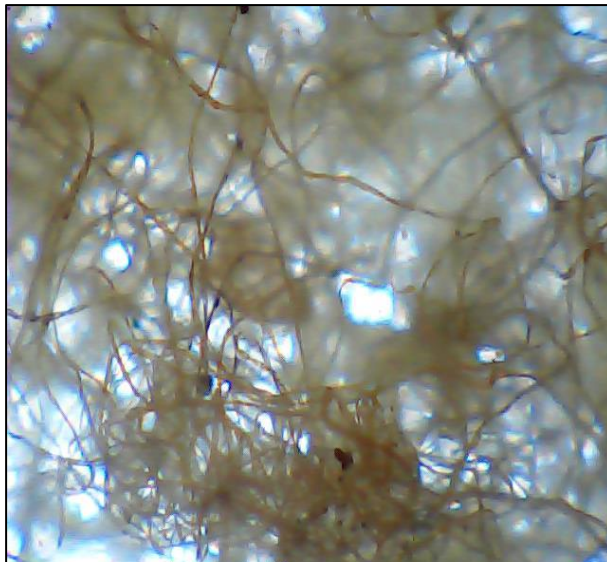


Slika 15: Papirni zvitek (lastni vir)

2. Papirni zvitek sem vstavil v reaktor in ga neprodušno zaprl.
3. Ko je peč dosegla 320 °C, sem reaktor vstavil v peč in ko je reaktor dosegel 85 °C, se je začel proces gazifikacije (39 sekund od vstavitve reaktorja v peč).
4. Ko je reaktor dosegel temperaturo od 450 do 510 °C je gazificirani plin postal gorljiv in je samostojno vzdrževal plamen 2555 sekund. Pred vžigom plina sem s pomočjo medicinske gaze izmeril čistost izpusta gazificiranega plina (glej Sliko 16 in 17). Po tem času se je gazifikacija samodejno ustavila, iz česar se sklepalo, da je gorivo v reaktorju porabljeno.



Slika 16: Gaza z izpustom plina iz papirne mase (lastni vir)



Slika 17: Mikroskopski posnetek gaze z emisijami gazificiranega plina iz papirja (povečava 4 x 10) (lastni vir)

5. Ko se je reaktor ohladil, sem ga odprl in pregledal ostanek goriva. Pri gazifikaciji papirja je ostalo 105 g neizgorelega goriva (glej Sliko 18).



Slika 18: Neizgorelo gorivo papirja (lastni vir)

### 3.5.2 Gazifikacija lesa

Gazifikacija lesa je potekala na podlagi parametrov v spodnji tabeli.

Tabela 3: Parametri pirolize lesa

<b>Vrsta goriva</b>	<b>Les (smreka)</b>
Teža v gramih	250 g
Volumen	700 ml
Vlažnost goriva	0,6 %
Temperatura goriva ob zaprtju reaktorja	6 °C
Začetna temperatura peči ob vstavitvi reaktorja	321 °C
Začetek gazifikacije (čas od vstavitve reaktorja)	49 s
Temperatura reaktorja ob začetku gazifikacije	183 °C
Temperatura reaktorja ob začetku produkcije gorljivega plina	471 do 504 °C
Plin postane gorljiv (čas od vstavitve reaktorja)	10 min 00 s
Čas samostojnega gorenja plina na izhodni cevi	16 min 00 s
Teža ostanka neizgorelega goriva	55 g
Celotno trajanje testa	26 min 00 s

Postopek testiranja:

1. Zbral sem 250 g odpadnega lesa. V tej količini je bil izključno smrekov les (glej Sliko 19).

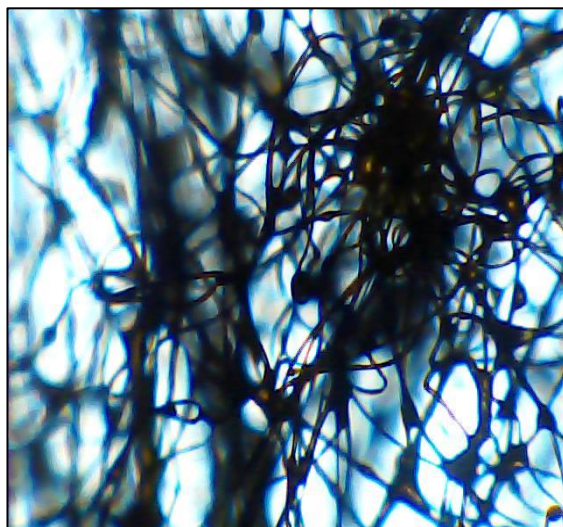


Slika 19: Smrekov les (lastni vir)

2. Deščice sem vstavil v reaktor in ga neprodušno zaprl.
3. Ko je peč dosegla 321 °C, sem reaktor vstavil v peč in ko je reaktor dosegel 183 °C, se je začel proces gazifikacije (49 sekund od vstavitve reaktorja v peč).
4. Ko je reaktor dosegel temperaturo od 471 do 504 °C, je gazificirani plin postal gorljiv in je samostojno vzdrževal plamen 960 sekund. Pred vžigom plina sem s pomočjo medicinske gaze izmeril čistost izpusta gazificiranega plina (glej Sliko 20 in 21).



Slika 20: Gaza z izpustom plina iz lesne mase (lastni vir)



Slika 21: Mikroskopski posnetek gaze z emisijami gazificiranega plina iz lesa (povečava 4 x 10) (lastni vir)

Ko se je reaktor ohladil, sem ga odprl in pregledal ostanek goriva. Pri gazifikaciji lesa je ostalo 55 g oglja (glej Sliko 22).



Slika 22: Neizgorelo gorivo lesa – oglje (lastni vir)

### 3.5.3 Gazifikacija plastike

Gazifikacija plastike je potekala na podlagi parametrov v spodnji tabeli.

Tabela 4: Parametri pirolize plastike

Vrsta goriva	Plastika (mešana)
Teža v gramih	125 g*
Volumen goriva	800 ml
Vlažnost goriva	0,1 %
Temperatura goriva ob zaprtju reaktorja	6 °C
Začetna temperatura peči ob vstavitvi reaktorja	306 °C
Začetek gazifikacije (čas od vstavitve reaktorja)	26 s
Temperatura reaktorja ob začetku gazifikacije	76 °C
Temperatura reaktorja ob začetku produkcije gorljivega plina	410 do 500 °C
Plin postane gorljiv (čas od vstavitve reaktorja)	2 m 32 s
Čas samostojnega gorenja plina na izhodni cevi	13 min 29 s
Teža ostanka neizgorelega goriva	5 g
Celotno trajanje testa	16 min 3 s

*Opomba: \* zaradi velikega volumna plastike nisem uspel napolniti reakcijske posode s težo, ki bi bila identična testu gazifikacije lesa in papirja, zato sem v primeru plastike uporabil polovično težo.*

#### Postopek testiranja:

1. Zbral sem 125 g odpadne plastike (glej Sliko 23) (na tehnici je vključena tudi teža pločevinke, kar znaša 100 g).

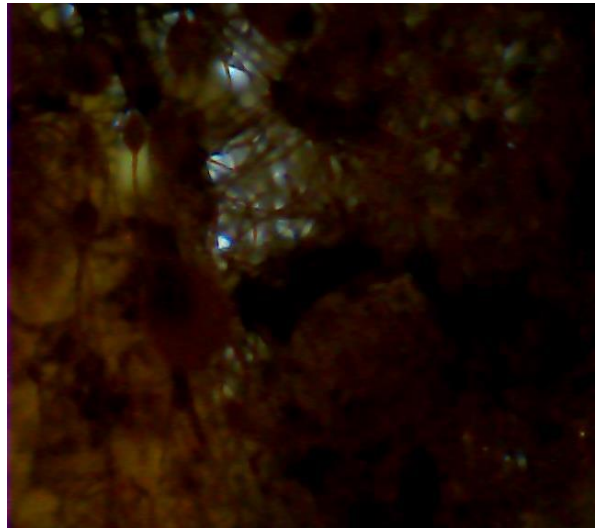


Slika 23: Gorivo za test – plastika (lastni vir)

2. Plastiko sem narezal na približno enake koščke, vse skupaj pa sem vstavil v reaktor in ga neprodušno zaprl.
3. Ko je peč dosegla 306 °C, sem reaktor vstavil v peč in ko je reaktor dosegel 106 °C, se je začel proces gazifikacije (26 sekund od vstavitve reaktorja v peč).
4. Ko je reaktor dosegel temperaturo od 410 do 500 °C, je gazificirani plin postal gorljiv in je samostojno vzdrževal plamen 809 sekund. Pred vžigom plina sem s pomočjo medicinske gaze izmeril čistost izpusta gazificiranega plina (glej Sliko 24 in 25).



Slika 24: Gaza z izpustom plina iz lesne mase (lastni vir)



Slika 25: Mikroskopski posnetek gaze z emisijami gazificiranega plina iz plastike (povečava 4 x 10) (lastni vir)

5. Ko se je reaktor ohladil, sem ga odprl in pregledal ostanek goriva. Pri gazifikaciji lesa je ostalo 5 g zoglenele usedline (glej Sliko 26).



Slika 26: Neizgorelo gorivo plastike (lastni vir)



### 3.6 Interpretacija rezultatov gazifikacije

Na osnovi zbranih rezultatov četrtega testa predstavljam svoje rezultate v obliki tabel in grafov.

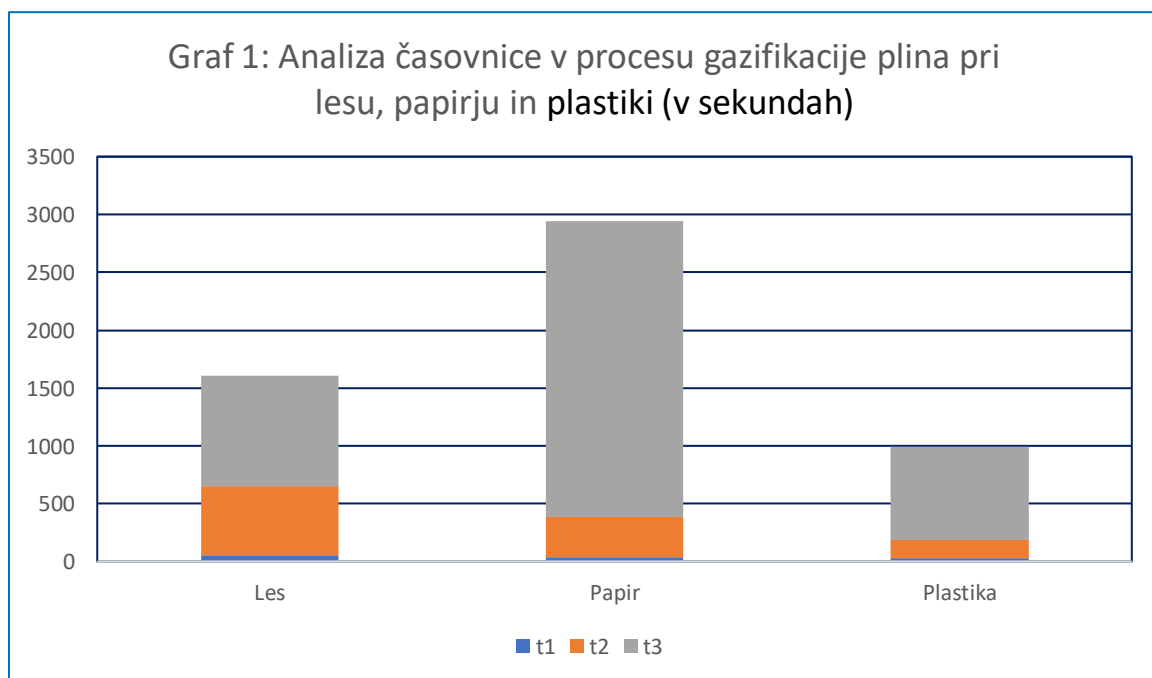
Tabela 5: Časovnica gazifikacije lesa, papirja in plastike

Gorivo	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)	$t_3$ (s)
Les	49	600	960
Papir	39	346	2555
Plastika	28	157	809

Legenda: Čas 1  $t_1$  - čas od vstavitve reaktorja v peč do začetka gazifikacije (v sekundah)

Čas 2  $t_2$  - čas od vstavitve reaktorja do trenutka, ko plin postane gorljiv (v sekundah)

Čas 3  $t_3$  - čas gorenja plina od trenutka, ko je plin postal gorljiv, do porabe goriva (v sekundah)



Zgornji graf in Tabela 6 prikazujeta analizo časovnice pri gazifikaciji lesa, papirja in plastike. Iz zbranih podatkov je razvidno, da je začetek gazifikacije ( $t_1$ ) pri vseh treh gorivih približno enak, saj se je gazifikacija vedno sprožila v povprečju v 30 sekundah. Iz tega je mogoče sklepati, da je ta vidik relativno neodvisen od vrste merjenega goriva. Razlika pa je očitna v času, ki je potreben, da gazificirani plin postane gorljiv do te točke, da samostojno gori ( $t_2$ ). Iz zbranih

podatkov je razvidno, da je bil plin pridobljen z gazifikacijo plastike vnetljiv prvi, saj je že po 157 sekundah samostojno gorel. Plin, pridobljen z gazifikacijo papirja, je potreboval še enkrat toliko, saj je postal samostojno gorljiv po 350 sekundah. Največ časa je v tem smislu trajala gazifikacija lesa, saj je plin dosegel samostojno vnetljivost šele po 600 sekundah. Kljub temu, da se je plin, gazificiran iz plastike, vnel prvi, je tudi prvi ugasnil ( $t_3$ ). Samostojno je gorel 809 sekund, potem pa je zmanjkalo goriva in je ugasnil. Pri tem je potrebno povedati, da je prav ta v vseh treh testih gorel najbolj burno in proizvedel največ emisij v obliki črnega dima in vnetljivega izcedka, ki je gorel na oddušku skupaj s plinom. Na drugem mestu po času gorenja je les, ki je gorel 960 sekund. Plamen je bil čist in umirjen, je pa bilo veliko vidnih emisij, predvsem gostega belega dima, ki je spominjal na vodno paro. Z naskokom je najdlje gorel papir – gorel je 2555 sekund, kar je 3,16 krat več kot plastika in 2,7 krat več kot les. Hkrati je s tem treba omeniti, da je gazifikacija papirja ustvarila plamen, ki je gorel najbolj umirjeno in stabilno ter izpuščal najčistejše emisije od treh izvedenih testov.

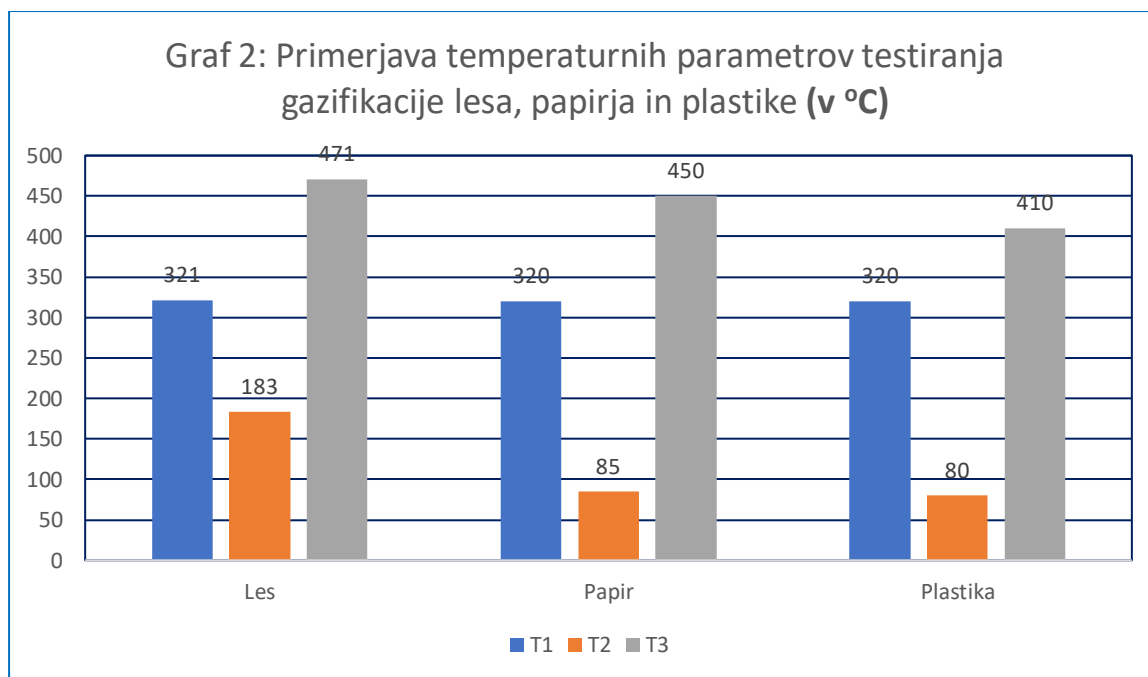
Tabela 6: Temperaturni parametri pri gazifikaciji lesa, papirja in plastike

Gorivo	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)
Les	321	183	471
Papir	320	85	450
Plastika	320	106	410

Legenda: Temp 1  $T_1$  – temperatura peči ob vstavitvi (v °C)

Temp 2  $T_2$  – temperatura reaktorja ob začetku (v °C)

Temp 3  $T_3$  – temperatura reaktorja ob gorljivosti plina (v °C)



Iz zbranih podatkov, veznih na temperaturo, lahko vidimo, da temperatura peči ( $T_1$ ) predstavlja v testiranju neodvisno spremenljivko. Temperatura peči in čas sta dve spremenljivki, ki sem jih kontroliral za potrebe ustreznosti in primerljivosti podatkov, dobljenih skozi testiranje – izhodiščna temperatura peči je bila 320 °C, kar hkrati predstavlja točko 0 v času. Iz podatkov, vezanih na temperaturo začetka gazifikacije, vidimo, da je najnižja temperatura potrebna za gazifikacijo papirja (85 °C). Pri nekoliko višji temperaturi se gazifikacija sproži pri plastiki (106 °C), medtem ko les potrebuje višjo temperaturo (183 °C). Podatki kažejo tudi, da je v vseh treh testih temperaturna meja za samozadosten plamen med 400 in 500 °C, kar predstavlja kritično temperaturo reaktorja – piroliza plastike sproži gazifikacijo vnetljivega plina pri 410 °C, papir pri 450 °C, lesna masa pa pri 471 °C.

V naslednjem koraku sem analiziral relacijo med maso, volumnom in časom gorenja. Analiza temelji na predvidevanju, da večja masa in volumen pomenita daljši čas gorenja.

Tabela 7: Primerjava mase, volumna in časa gorenja glede na gorivo

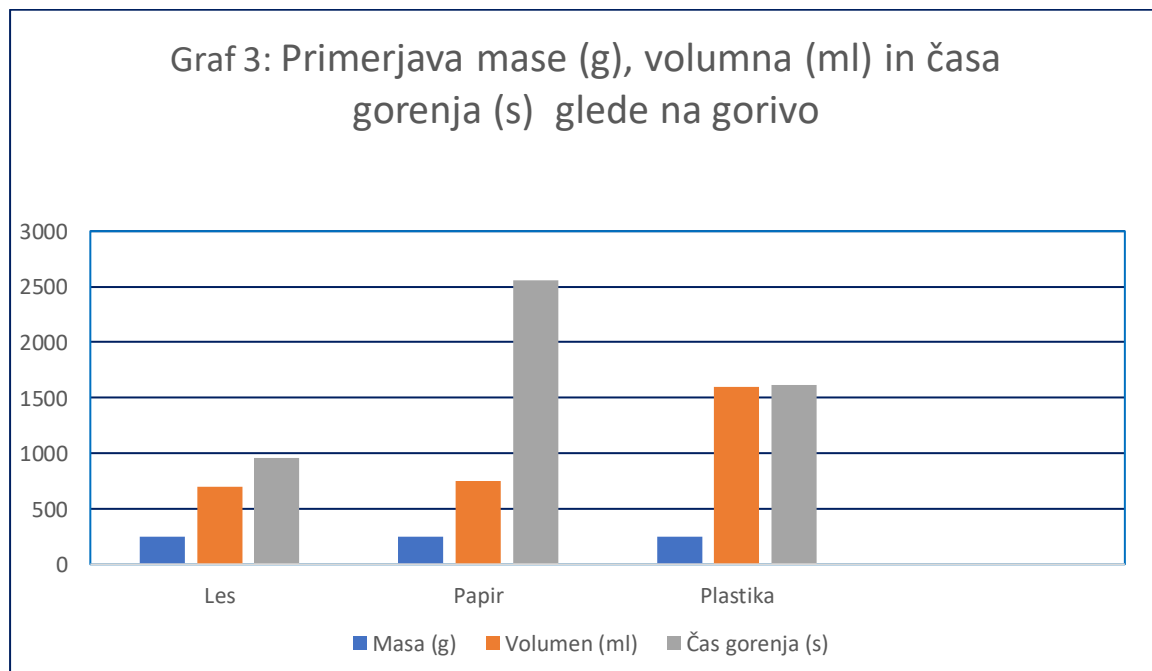
Gorivo	Masa (g)	Volumen (ml)	Čas gorenja (s)
Les	250 g	700 ml	960 s
Papir	250 g	750 ml	2555 s
Plastika	125 g/250 g*	800 ml/1600 ml**	809 s/1618 s***

Opomba:

\* Plastika je v testu imela zaradi velikega volumna 125 g, kar je v tabeli zaradi poenotenja pomnoženo z 2.

\*\* Plastika je v testu imela volumen 800 ml, kar je v tabeli zaradi poenotenja pomnoženo z 2.

\*\*\* Plastika je v testu gorela 809 sekund, kar je zaradi poenotenja pomnoženo z 2.



Iz podatkov, predstavljenih v grafikonu in tabeli, vidimo, da je bila masa goriva uporabljena kot konstantna enota, in sicer z namenom zagotavljanja primerljivosti ostalih parametrov. V

grafikonu in tabeli vidimo, da masa pri vseh testiranih gorivih ne vpliva enako na čas gorenja. 250 g lesa je gorelo 960 sekund, 250 g papirja je gorelo 2555 sekund, 125 g plastike je gorelo 809 sekund, kar pomeni, da bi preračunana masa 250 g plastike gorela 1618 sekund.

V grafikonu in tabeli prav tako vidimo, da tudi volumen ne vpliva na čas gorenja enako pri vseh gorivih. 700 ml lesa je gorelo 960 sekund, pri papirju je 750 ml gorelo 2555 sekund in 800 ml plastike je gorelo 809 sekund, kar pomeni, da bi ob upoštevanju preračunane vrednosti 1600 ml plastike gorelo 1618 sekund. Iz navedenega sklepam, da volumen, teža in čas gorenja niso povezani univerzalno, ampak so odvisni od vrste goriva.

Med testiranjem sem meril tudi težo ostanka goriva, ki sem ga našel v reaktorju po končani pirolizi. Tabela 8 prikazuje razmerja v teži med izvorno maso goriva, časom gorenja in nezgorelim ostankom.

Tabela 8: Primerjava mase, časa gorenja in mase ostanka glede na gorivo

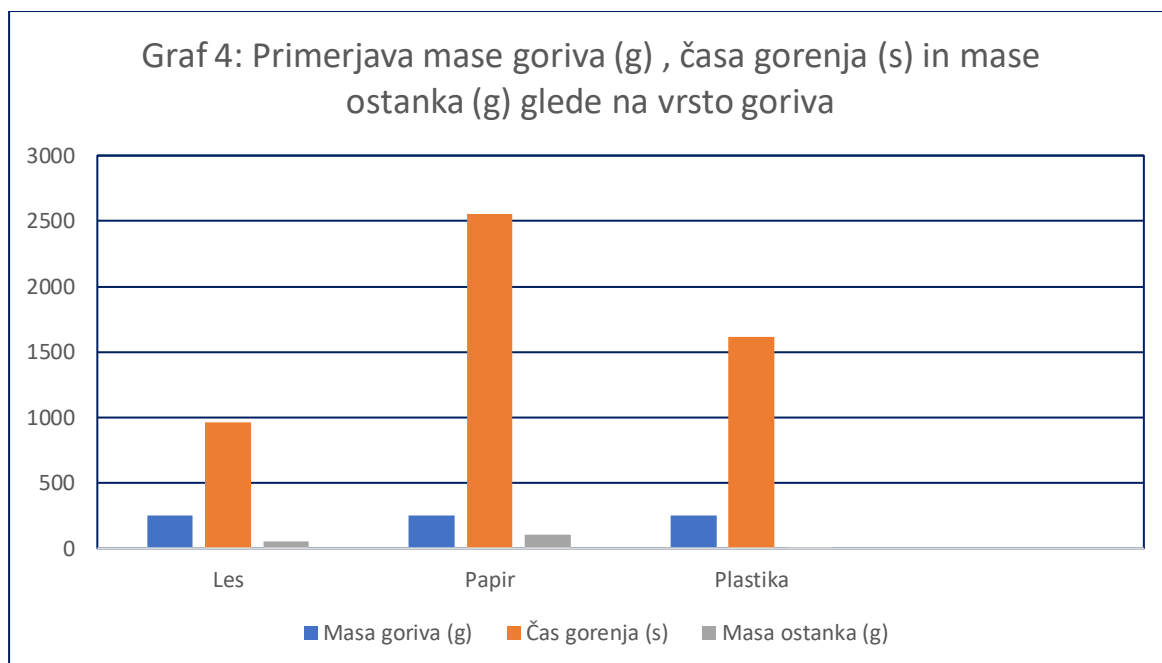
Gorivo	Izvorna masa (g)	Čas gorenja (s)	Masa ostanka (g)
Les	250 g	960 s	55 g
Papir	250 g	2555 s	105 g
Plastika	125 g/250 g*	809 s/1618 s***	4 g/8 g**

Opomba:

\* Plastika je v testu imela zaradi velikega volumna 125 g, kar je v tabeli zaradi poenotenja pomnoženo z 2.

\*\* Pri plastiki je znašala masa ostanka 4 g, kar je v tabeli zaradi poenotenja pomnoženo z 2.

\*\*\* Plastika je v testu gorela 809 sekund, kar je zaradi poenotenja pomnoženo z 2.



Do te točke sem obdelal teme gazifikatorja. Ob razmišljanju, kako nadaljevati z nalogo, sta se mi odprli dve potencialni smeri. Prva smer je predvidevala nadaljevanje raziskovanja v smeri uporabe pridobljenega plina. To bi zahtevalo oblikovanje povezave med gazifikatorjem in potrošnikom, na primer motorjem z notranjim izgorevanjem. Takšna povezava bi omogočala testiranje pridobljenega plina in sklenitev mojega testiranja v cikel, ki predstavlja zaključen krog od produkcije do potrošnje.

Druga smer raziskovanja pa se je nakazovala v odkrivanju možnosti za shranjevanje dobljenega plina. Ta smer se mi je zdela bolj zanimiva, saj sem vedel, da je potrošnja plina mogoča, nisem si pa znal predstavljati, da je doma pridelani plin mogoče tudi skladiščiti. Na podlagi tega sem se odločil, da raziskovanje nadaljujem v smeri skladiščenja plina.

### 3.7 Gazometer

Danes poznamo 3 načine shranjevanja plina. Bolj popularni sta dve opciji, in sicer LNG («liquified natural gas») in »line packing« (shranjevanje plina v podzemnem sistemu cevi). Tretja opcija, in sicer gazometer, danes ni več popularna, saj je v primerjavi z modernimi alternativami neučinkovita in nevarna. Za shranjevanje utekočinjenega naravnega plina uporabljamo posode oziroma sisteme cevi, ki omogočajo shranjevanje plina za dolga časovna obdobja, medtem ko so gazometre uporabljali za shranjevanje plina na krajši rok.

Eden najzgodnejših in najenostavnejših načinov zajemanja in skladiščenja plina je že omenjeni gazometer. Gazometer je velika posoda, namenjena shranjevanju naravnega ali zemeljskega plina pod pritiskom, ki je le nekoliko večji od atmosferskega, pri čemer temperatura ne presega sobne. Običajno so zgrajeni iz jekla, betona in suhe opeke, a gradbeni materiali prve generacije gazometrov so bili močno odvisni od materialov, ki so bili na voljo v okolici (Thomas, 2010). Volumen gazometra je odvisen od specifičnih zahtev, a tipični gazometri za komercialno uporabo merijo okoli 50.000 kubičnih metrov in imajo premer 60 metrov.



Slika 27: Gazometer s kovinskim ohišjem in betonskim rezervoarjem, Južna Anglija (Russell, 2010)

V viktorijanskih časih so zaradi dvomov glede varnosti gazometrov bili ti stacionirani v okrepljenih stavbah, ki so se imenovale gazometerske hiše. To je bila ločena stavba, zgrajena okoli gazometra z namenom zagotavljanja varnosti pred uhajanjem, požarom in eksplozijo. Logika za tem je temeljila na prepričanju, da obstaja možnost, da gazometer pušča, pri tem pa okrepljena hiša služi kot ščit.

Obstaja tudi nekaj primerov, kjer so bile jame za gazometre izdolbene v skalno osnovo (*bedrock*). Ti sistemi so potrebovali zelo veliko vode za tesnjenje in terjali veliko izkopavanja materiala. V teh primerih so konstruktorji pri večjih gazometrih na dnu jame oblikovali »grbo«, da bi tako privarčevali pri količini potrebne vode. Strmina grbe je bila odvisna iz gradbenega materiala.

V preteklosti je gazometer deloval tako, da so ga lahko čez dan polnili s plinom, zvečer pa je začelo mesto uporabljati akumulirani plin. Gazometer je v drugi polovici dvajsetega stoletja stal tudi v Mariboru in sicer na Plinarniški ulici.

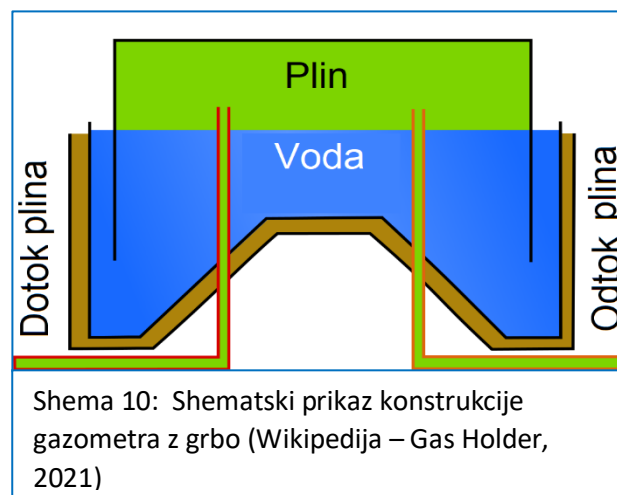


Slika 28: Gazometer v Mariboru, 1970 (vir: Ciglič, 2020)



### 3.7.1 Delovanje gazometra in njegova domača izdelava

Gazometer je sestavljen iz dveh velikih tulcev, ki se tesno prilegata, spoj pa omogoča premikanje posode, ki je na vrhu. Večji tulec vsebuje vodo in je trdno pritrjen na podlago, vanj pa je potopljen manjši tulec, ki služi zajemanju plina. Manjši ima vstopni in izstopni ventil, ki omogoča polnjenje in praznjenje gazometra (glej Shema 10).



Odločil sem se, da bom gazometer izdelal sam iz dostopnih materialov – iz dveh PVC cevi, ki so običajno namenjene odtočnim cevem. Uporabil sem dve 50-centimetrski cevi premera 11 in 12 cm. Vsako cev sem zaprl z ustreznim PVC čepom, spoj pa zatesnil z epoksi smolo. Na pokrov notranje posode sem namestil ventile, ki sem jih našel na odsluženem acetilenskem gorilniku v očetovi garaži (glej Sliko 29: Domači gazometer).



Tesnjenje svojega gazometra sem preveril tako, da sem večjo posodo napolnil z vodo, nato pa vanjo manjšo potopil, pri tem pa sta vhodni in izhodni ventil ostala zaprta. Po 30 minutah se manjša posoda ni spustila globlje, iz česar sem sklepal, da so pokrov in ventili ustrezno zatesnjeni. S tako testiranim gazometrom je bilo vse pripravljeno za priključitev gazometra na gazifikator. Odločil sem se, da bom tri teste, ki sem jih na gazifikatorju že opravil, tokrat ponovil s priključenim gazometrom.

### 3.7.2 Test gazometra

15. 1. 2021 sem izvedel prvi test gazometra. Glavni namen testa je bil ugotoviti, ali je mogoče z doma izdelanim gazometrom uskladiščiti proizvedeni lesni plin. Gazometer sem postavil zraven peči in ga s PVC cevjo priključil neposredno na reaktor. Pričvrstil sem ga s pomočjo kovinske cevi, ki je ostala od dimnika – na mizo izdelane raketne peči sem postavil kovinski del dimnika, v premeru nekoliko širšega od gazometra, ter vanj postavil sam gazometer in tako zagotovil stabilnost. Konec odvodne cevi na gazifikatorju sem povezal s trpežno in fleksibilno gumijasto cevjo, drugi konec te cevi pa z vhodnim ventilom gazometra. Nato sem pričel s testom, pri tem pa pazil, da sta vhodni in izhodni ventil na gazometru ostala odprta. To je ključno, da se gazometer enakomerno napolni s proizvedenim plinom, hkrati s tem pa tudi izpiha zrak, ki bi lahko v kombinaciji z vnetljivim plinom predstavljal nevarnost za eksplozijo.

Reakcija je stekla hitro in v dveh minutah je bil plin na izhodnem ventilu gazometra vnetljiv. To me je zelo presenetilo, saj je pri testu brez gazometra reaktor potreboval 10 minut, da je plin samostojno gorel. V tem trenutku sem zaprl izhodni ventil in opazoval polnjenje gazometra. Med reakcijo sem občasno odprl ventil, saj se je gazometer polnil zelo hitro. Zaradi hitrega pregrevanja odvodne cevi iz reaktorja je po petih minutah reakcije (se je) odpadla in se stopila tudi fleksibilna cev, kljub temu da je bila trdno pritrjena (glej Sliko 30).

V tem trenutku sem zaprl tudi dovodni ventil gazometra, da zajeti plin ne bi uhajal. Plin v gazometru sem testiral in gorel je z mirnim plamenom brez saj.



Slika 30: Stopljena cev gazometra (lastni vir)

Po opravljenem testu sem gazometer odprl in pregledal vodo. Bil je polna usedlin, plavajočega katrana in izjemno močnega vonja. Iz tega sem sklepal, da gazometer poleg shranjevanja plina opravlja tudi funkcijo prečiščevanja in ohlajanja plina. Zraven potrditve ustreznega delovanja gazometra me je to pripeljalo tudi do ugotovitve, da je mogoče doma pridelani plin tudi ustrezno rafinirati. Odločil sem se, da bom v postopek gazifikacije vključil dva nadaljnja koraka:

1. Hlajenje plina, ki bo omogočilo, da bo celotni krog od produkcije do skladiščenja plina ostal neprodušno zaprt, saj fleksibilni PVC priključek ne bo odpadel.
2. Filtriranje plina, ki bo zmanjšalo količino izločenega katrana in usedlin v gazometru.

Za potrebe drugega testa gazometra sem izdelal nastavek za peč, ki ga je mogoče uporabiti za namestitvev hladilnega elementa in filtra. Hladilni element sem izdelal iz odpadne bakrene cevi, ki je bila v preteklosti uporabljena kot dovodna cev ogrevalnega sistema. Cev sem ukrivil v obliko spirale ter jo priključil neposredno na reaktor. V jedro hladilnega elementa sem privaril votlo železno cev, ki služi kot odjemalec toplote (glej Sliko 31). Vse skupaj sem povezal z gazometrom in opravil nov test.



Slika 31: Sistem z novim hladilnikom plina (lastni vir)

Drugi test gazometra je pokazal, da hladilni sistem deluje. Sem pa opazil, da je proizvedeni plin še vedno dokaj umazan in da na odvodnem ventilu gazometra še vedno kaplja katran. Zato sem izdelal zračni **filter**. Tega sem izdelal iz običajnega kozarca za vlaganje zelenjave, v pokrov sem zvrtil dve luknji. V luknji sem pritrdil dva priključka, dovodnega za ohlajeni plin iz reaktorja in odvodnega za gazometer. Oboje sem povezal s fleksibilno PVC cevjo (glej Sliko 32).

Po ponovnem testu, tokrat z dodanim zračnim filtrom, sem opazil, da je reakcija stekla hitro. Gazifikacija je stekla po 30 sekundah od vstavitve reaktorja v peč, plin pa je bil na izhodnem

ventilu gazometra samostojno gorljiv že po dveh minutah. Opazil sem tudi, da je filtracija dobro delovala, saj se je na dnu kozarca za vlaganje nabralo veliko katrana in vode, kar pomeni, da zračni filter deluje tudi kot kondenzator. Zračni filter je tako mogoče razumeti kot pomemben korak pri rafiniranju plina, saj iz njega izloči vodno paro, zaradi česar je plin bolj gorljiv. Dokaz, da filter dobro deluje, sem dobil tudi po končanem testu, ko sem ponovno razstavil gazometer. Voda je bila sicer še vedno nekoliko umazana, a bistveno manj kot v testu brez zračnega filtra.



Slika 32: Končni izdelek gazifikatorja s hladilnikom, filtrom in gazometrom (lastni vir)

Po končanem zadnjem testu gazifikatorja s hladilnim elementom, zračnim filtrom in gazometrom sem se odločil, da s testiranjem zaključim. Zadnji model (glej Sliko 32) razumem kot uspešno izdelan in testiran model gazifikatorja. Predstavlja zaključen krog produkcije, filtracije in skladiščenja lesnega plina s pomočjo pirolize.

#### 4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultati so pokazali, da les v praksi ni najučinkovitejše gorivo, zato moram svojo prvo hipotezo ovreči. Ovržena hipoteza pomeni, da sem prišel do novega spoznanja, in sicer da je papir in ne les najboljša izbira. To me je presenetilo, ker sem mislil, da bo les najboljša izbira, saj se iz lesa dela papir. Papir ima v sebi več umetnih snovi in belil, zato sem bil prepričan, da je les boljši. Sklepam, da je papir boljši zato, ker se ob predelavi lesa v papir izloči veliko nečistoč in katrana. To lahko vidimo, ko primerjamo neizgoreli ostanek lesa in papirja. Potencial gazificiranja papirja nedvomno obstaja, a mislim, da ga ni mogoče izkoristiti, saj se lahko odpadni papir v nasprotju z lesom ponovno reciklira in uporabi. Drugo hipotezo pa v celoti potrjujem, saj mi je uspelo izdelati stabilno in delujočo pripravo za izvajanje testov v raziskovalni nalogi. Za izdelavo priprave sem uporabil pripomočke in surovine, najdene gospodinjstvu in okolici, ampak novega znanja pa kljub potrjeni drugi hipotezi nisem pridobil.

## 5. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Družbena odgovornost moje raziskovalne naloge in njenih izsledkov se na občni ravni kaže v razkrivanju znanja in informacij, vezanih na alternativne oblike pridobivanja za življenje potrebnih virov, v mojem primeru lesnega plina kot alternativnega energenta. Izsledki moje raziskovalne naloge pomenijo obliko opolnomočenja, saj dokazujejo, da je neodvisnost od uradnih energentov mogoča vsaj do neke mere. Družbena odgovornost se kaže tudi v dokazu, da je mogoče plin pridobiti iz odpadne biomase. Ta ugotovitev predstavlja dokaz o obstoju trajnostne alternative naftnim energentom. Ob izdelovanju raziskovalne naloge sem tudi sam dobil občutek upanja, da obstaja zamenjava za nafto, ko je bo v prihodnosti pričelo primanjkovati.

Kljub številnim rezultatom in novim spoznanjem pušča naloga številna odprta vprašanja. Trenutno sta zame odprti dve smeri raziskovanja. Prva je v smeri povečanja kapacitet skladiščenja plina. V prihodnosti nameravam raziskati nove oblike shranjevanja plina, predvsem takšne, ki vključujejo stiskanje plina s pomočjo kompresorjev. Druga smer pa se nakazuje v smeri potrošnje. Raziskovalno se bom ukvarjal predvsem z možnostmi povezave izdelanega gazifikatorja z motorji z notranjim izgorevanjem.

## 6. SKLEP

Ob začetku pisanja svoje raziskovalne naloge sem si zastavil dva osnovna cilja;

- 1) preveriti ali je mogoče uporabiti znanje s področja pirolize za produkcijo lesnega plina v domačem okolju in
- 2) ali je mogoče za postopke pirolize uporabiti material, ki je na voljo v domačem okolju.

Za potrebe pričujoče naloge sem v teoretičnem delu predelal ključne pojme, teorijo pirolize in gazifikacije, priprave in postopke za izvajanje pirolize, doma narejene gazifikatorje in zgodovino koncepta. Posebej dobro sem si pogledal postopke gazifikacije. V teoretičnem delu sem nabral veliko znanja in novih informacij, ki so mi pomagale iskati odgovore na dva izhodiščna raziskovalna cilja. Na podlagi dobljenega teoretičnega znanja sem se najprej lotil izdelave lastnega gazifikatorja. Samostojno sem iz materiala, ki mi je bil na voljo, izdelal:

- dva delujoča prototipa peči («rocket stove» in »hobo stove«),
- tri modele reaktorjev z različnimi priključki (kratek priključek za peč s plitkim kuriščem, dolgo cev za peč z globokim kuriščem in cev s hladilnikom za priključek na gazometer),
- zračni filter za filtracijo plina,
- gazometer za zajemanje in skladiščenje plina.

Zraven tega sem v celotnem postopku opravil več kot 15 različnih testov in številne meritve ter prišel do pomembnih spoznanj. Po opravljeni raziskovalni nalogi lahko sklenem:

1. Da je mogoče nadzorovano izvajati postopke pirolize oziroma gazifikacije s surovinami, ki so na voljo v domačem okolju, kar je pritrđen odgovor na moje prvo raziskovalno vprašanje.
2. Da je mogoče s surovinami, ki so na voljo v domačem okolju, izdelati pripravo za izvajanje pirolize in jo povezati v funkcionalni krog od produkcije do zajetja in skladiščenja, kar predstavlja pritrđen odgovor na moje drugo raziskovalno vprašanje.



3. **Da je med vsemi testiranimi gorivi les najprimernejši; papir se je sicer pokazal za gorivo, ki najdlje časa gori, vendar je les zaradi nizke stopnje predhodne predelave najprimernejše gorivo za zagotavljanje trajnostne uporabe alternativnih goriv.**

V testih sem sicer uporabljal zgolj eno vrsto lesa, vendar domnevam, da bi bili rezultati z drugimi vrstami lesa, tudi odpadnim, primerljivi. Uporaba odpadnega lesa bi dodatno razbremenila okolje in omogočila racionalnejšo uporabo odpadnih surovin.

Izsledki moje naloge imajo tudi številne neposredne in posredne potencialne implikacije. Pridobljeni plin je mogoče uporabiti za pogon motorjev z notranjim izgorevanjem, kar odpre številne možnosti od mobilnosti do proizvodnje energije. Lesni plin lahko v času krize nadomesti pogonska goriva kmetijskih in delovnih strojev, vozil javnega transporta in drugih oblik mobilnosti. Pravzaprav obstajajo številni zgodovinski primeri, ko je lesni plin nadomestil pogonska goriva, ko so ta izostala. Zraven tega moji izsledki dokazujejo tudi, da je proizvedeni plin mogoče zajeti in skladiščiti in na ta način porabo pomakniti v prihodnost. Uskladiščeni lesni plin je mogoče uporabiti kot gorivo v svetilkah in gorilnikih, in sicer v času, ko njegova produkcija iz nekega razloga ni mogoča. Aplikacija mojih izsledkov je mogoča tudi v procesih predelave hrane. Pridelani lesni plin je namreč mogoče uporabiti v procesu hladnega dimljenja različnih prehranskih artiklov, na primer mesa, rib ali sira in tako izboljšati njihov okus in podaljšati njihovo obstojnost. Izsledki moje naloge, ki se nanašajo na ostanke v postopku pirolize, prav tako predvidevajo številne aplikacije. Glede na to, da je ostanek pirolize lesa čisto oglje, je tega mogoče uporabiti na številne načine, na katere se nanaša uporaba oglja. Uporabiti ga je mogoče kot gorivo, kot likovni pripomoček ali v medicinske namene. Tudi katran, ki se pojavlja v procesu pirolize kot ostanek, ima potencialno vrednost, in sicer kot impregnacijsko sredstvo, hidroizolacija ali kot komponenta v doma izdelanem lepilu.

Kljub omenjenim pozitivnim vidikom mojega modela pa ima ta model tudi nekatere omejitve in pomanjkljivosti:

- Gre za model manjšega obsega, kar nedvomno vpliva na dobljene podatke; za mali model sem se odločil, da bi dokazal koncept, hkrati s tem pa sem bil omejen z materiali, ki so mi kot učencu osnovne šole dostopni – s spremembo velikosti modela bi se nedvomno spremenili tudi dobljeni rezultati in potencial za aplikacijo.

- Gre za model, kjer so bile testirane samo 3 vrste goriva v omejenih količinah – s spremembo teh parametrov bi se nedvomno spremenili tudi rezultati.
- Omejenost glede meritvenih kapacitet različnih parametrov; uporabljal sem merilne instrumente, ki so mi na voljo v domačem okolju (merilec vlage, termometer, tehtnica, mikroskop) – z uporabo zahtevnejših merilnih instrumentov bi bili moji podatki popolnejši.

## 7. LITERATURA

### 7.1. Knjižni viri

Snoj, Marko (1997): Slovenski etimološki slovar. Ljubljana: Mladinska knjiga.

### 7.2. Internetni viri

- Biogreen (2021). Dostopno preko: <http://www.biogreen-energy.com> (15. 1. 2021).

- DeDecker, Kris (2021): Wood gas vehicles: firewood in the fuel tank. Dostopno preko:

[Wood gas vehicles: firewood in the fuel tank - LOW-TECH MAGAZINE](#) (15. 1. 2021).

- Faircap (2015): DIY ACTIVATED CARBON. Dostopno preko: <https://faircap.org/diy-activated-carbon/> (12. 1. 2021).

- Freeweb.deltha.hu (2021). Yugo runs by wood-gas. Dostopno preko:

<http://freeweb.deltha.hu/zastava.in.hu/wood-gas.htm> (20. 1. 2021).

- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)(2021). Dostopno preko:

<https://goldbook.iupac.org/> (18. 1. 2021).

- Johnston Press Staff (JPS) (2018): Dad invents machine to turn household waste into fuel to heat his home. Dostopno preko: <https://inews.co.uk/news/environment/dad-invents-machine-turn-household-waste-fuel-heat-home-152563> (15. 1. 2021).

-Kemija.net (2021): Slovarček. Dostopno preko: <https://kemija.net/slovarcek>. (19. 1. 2021).

- Klub oglarjev Slovenije (2021). Dostopno preko:

<https://sites.google.com/site/ogljarskiklub/zgodovina-oglarjenja/oglarjenje-na-slovenskem> (20. 1. 2021).

- NNFCC (2009): Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes, Final report. Dostopno preko:

<http://wiki.gekgasifier.com/f/Review+of+Biomass+Gasification+Technologies.NNFCC.Jun09.pdf%20> (19. 1. 2021).

- Ogljarjenje na Slovenskem (2021). Dostopno preko:

<https://sites.google.com/site/ogljarskiklub/zgodovina-ogljarenja/oglarjenje-na-slovenskem>

(11. 2. 2021).

- Rocket mass heater (2020). Dostopno preko:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket\\_mass\\_heater](https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_mass_heater) (20. 12. 2020).

- Thomas, Russell (2010): Gasholders and their tanks. Dostopno preko:

[https://www.researchgate.net/publication/268447774\\_Gasholders\\_and\\_their\\_Tanks](https://www.researchgate.net/publication/268447774_Gasholders_and_their_Tanks)

(2. 1. 2021).

- Wikipedia (2021). Dostopno preko: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wood\\_gas](https://en.wikipedia.org/wiki/Wood_gas) (14. 9. 2020).