

# Tehnologije zaštite okoliša u elektranama

---

**Mikić, Andreja**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:610258>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURAJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**TEHNOLOGIJE ZAŠTITE OKOLIŠA U  
ELEKTRANAMA**

**Završni rad**

**Andreja Mikić**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 18.09.2020.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Andreja Mikić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4405, 24.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	79207346372
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Tehnologije zaštite okoliša u elektranama
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	18.09.2020.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	23.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 24.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Andreja Mikić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4405, 24.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Tehnologije zaštite okoliša u elektranama**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	2
2. Termoelektrane i ekologija fosilnih goriva .....	3
2.1. Povijest korištenja energije.....	3
2.2. Uporaba fosilnih goriva .....	3
2.2.1. Ugljen .....	4
2.2.2. Nafta i prirodni plin.....	5
2.3. Termoelektrane i njihov utjecaj na okoliš .....	5
3. Nove tehnologije zaštite okoliša .....	8
3.1. Pročišćavanje dimnih plinova.....	8
3.1.1. Odsumporavanje dimnih plinova (FGD).....	8
3.1.2. Selektivna katalitička redukcija (SCR) .....	10
3.1.3. Elektrostatski filteri (ESP) .....	11
3.2. Tehnologije čistog ugljena (CCT) .....	13
3.2.1. Povećanje učinkovitosti u postojećim elektranama .....	16
3.2.2. Napredne tehnologije .....	18
3.2.2.1. Kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja (IGCC).....	18
3.2.2.2. Izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (CFBC).....	21
3.2.3. Nulta emisija .....	24
3.3. Hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (CCS).....	24
3.3.1. Prikupljanje ugljikovog dioksida .....	25
3.3.2. Transport ugljikovog dioksida .....	28
3.3.3. Skladištenje ugljikovog dioksida .....	28
4. Tehno-ekonomska analiza termoelektrana s CCS tehnologijom .....	31
4.1. Termoelektrane na ugljen bez sustava za prikupljanje CO <sub>2</sub> .....	32
4.2. Termoelektrane na ugljen sa sustavom za prikupljanje CO <sub>2</sub> .....	38
5. Zaključak.....	43
Literatura .....	45
Sažetak .....	49
Abstract .....	49

## 1. UVOD

Mnogo ozbiljnih ekoloških problema, svjetskih razmjera, povezano je sa proizvodnjom i uporabom energije. Jedan od značajnijih izvora plinova koji uzrokuju staklenički učinak, za koje možemo reći da su uzročnici klimatskih promjena i pojava ekstremnih vremenskih prilika, je energetska sektor s naglaskom na elektrane na fosilna goriva (u daljnjem tekstu termoelektrane). Ako se u obzir uzmu i ostali aspekti zagađivanja, kao što su čađ, čestice ugljene prašine, pepeo, šljaka, otpadne vode i dr., tada se za termoelektrane može reći da imaju velik utjecaj na životnu sredinu.

Međutim, obzirom da se radi o objektima koji su od vitalnog značaja za jednu državu i da se radi o elektroenergetskom sektoru, ovom problemu se pristupa s velikom pažnjom. Da bi se pokušali zadovoljiti propisani protokoli i konvencije koji za cilj imaju zaštitu okoliša te zdravlje ljudi poduzimaju se brojne metode smanjivanja negativnog utjecaja termoelektrana na navedeno kao što su: ugradnja raznih filtera, smanjivanje sadržaja sumpora u ugljenu, odlaganje pepela i šljake, zaštita pepelišta ovlaživanjem i dr., što opet u konačnici poskupljuje izlaznu cijenu električne energije iz termoelektrana.

U posljednjim desetljećima aktualizirano je pitanje prelaska na druge izvore energije, jer je evidentno da se ovakav trend ne može održati iz razloga što se zalihe fosilnih goriva enormno troše i ne mogu se obnavljati. Najčešće se razmatra prelazak na obnovljive izvore energije, gdje ipak treba naglasiti da sunčeva energija predstavlja najperspektivniji oblik energije u smislu konstrukcije, pouzdanosti pa i ekologije.

Ako se u obzir uzmu predviđanja da će svoj puni kapacitet korištenja nafta dostići do 2030. a ugljen do 2050. godine, neosporno je da će konvencionalne termoelektrane imati u naredna 3-4 desetljeća značajan udio u proizvodnji električne energije. Pošto su danas postavljeni vrlo visoki zahtjevi u vezi očuvanja okoliša na svjetskoj razini, postavlja se pitanje kako ih ispuniti.

Ovaj rad sa zadanom temom ima za cilj da dijelom ponudi odgovore kroz predstavljanje novih tehnologija koje se koriste u elektranama, a za svrhu imaju smanjiti negativan utjecaj istih na okoliš.

Završni rad se sastoji od 5 poglavlja. U prvom poglavlju ukratko je obrazložen cilj rada. U drugom poglavlju opisan je ekološki problem termoelektrana na fosilna goriva. Treće poglavlje predstavlja nove sustave s razvijenim tehnologijama za zaštitu okoliša. U četvrtom

poglavlju, prema prikupljenim podacima, provedena je analiza isplativosti uvođenja sustava za prikupljanje i skladištenje ugljikovog dioksida, te su prokomentirani rezultati. U petom poglavlju na osnovi dobivenih rezultata oblikovan je zaključak.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

U završnom radu potrebno je predstaviti najsuvremenije tehnologije zaštite okoliša u elektranama koje još uvijek nisu u potpunosti primijenjene. Nakon teorijske obrade tehnologija, potrebno je napraviti tehno-ekonomsku usporedbu termoelektrana sa i bez ugrađenog sustava za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida, te procijeniti na osnovi izračunatih rezultata isplativost te tehnologije.

## **2. TERMOELEKTRANE I EKOLOGIJA FOSILNIH GORIVA**

### **2.1. Povijest korištenja energije**

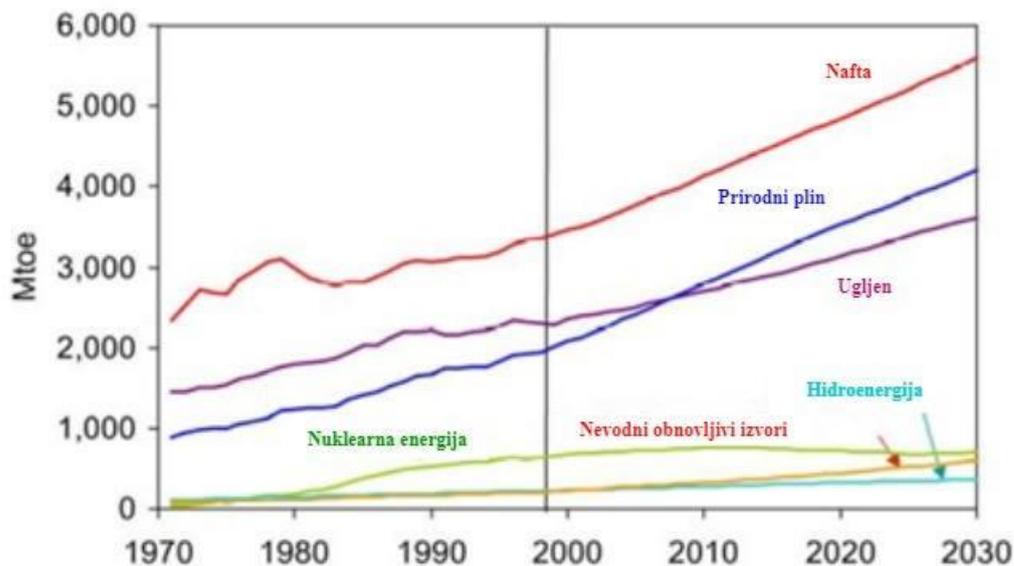
Tijekom povijesti razvoj energenata tekao je sporo. Ljudska snaga važila je za glavni izvor energije dosta dugo. Tek pojavom vatre kao izvora energije dolazi do znatnijih promjena. Krajem 18. stoljeća glavni izvor energije drvo, zbog manjka dostupne količine, biva zamijenjeno ugljenom. Otkrićem parnog stroja 1769. godine, odnosno korištenjem motora s vanjskim izgaranjem pojavljuje se novi izvor energije, para. Dotadašnji prirodni izvori energije, kao što su životinjska snaga i snaga vode, postaju sekundarni izvori. Druga polovica 19. stoljeća obilježena je otkrićem motora s unutarnjim izgaranjem. Vozila s takvim motorima kao gorivo koristila su plin. Poslije otkrićem benzinskog četverotaktnog i dizelskog motora raste potražnja goriva na bazi nafte, benzina i dizela.

Izumom prvog elektrogeneratora (Faradey, 1832.), koji pretvara mehaničku u električnu energiju, mijenja se uporaba energije u proizvodnji. Njena potrošnja je samo u zadnjih 50 godina porasla 13 puta. U tom razdoblju, razvoj energije temeljen na fosilnim gorivima, prouzročio je pravi ekološki egzodus.[1]

### **2.2. Uporaba fosilnih goriva**

U proizvodnji primarne energije najveći dio dobiva se iz fosilnih goriva, čak 87,7%, dok ostatak otpada na ostale izvore. Nafta kao vodeći resurs od fosilnih goriva ima najveći udjel u proizvodnji sa 37,65%, pa slijede ugljen sa 25,56% i prirodni plin sa 21,64%. [2] Potrošnja fosilnih goriva svakodnevno raste zbog sve većih potreba za energijom, iako se povećava i proizvodnja energije iz obnovljivih izvora, taj porast je zanemariv u usporedbi s fosilnim gorivima. Fosilna goriva su neobnovljivi izvori energije ili je njihova obnova dugotrajna. Zato je važno razmatrati njihovu dostupnost u budućnosti.

Slika 2.1. nam prikazuje da se potrebe u energiji, najvećim dijelom, zadovoljavaju iz fosilnih goriva. Prognozira se da će do 2030. godine dominantan izvor energije i dalje biti fosilna goriva, zato što je poznato da su rezerve fosilnih goriva ograničene, ali njihova točna granica nije poznata. [3]



Slika 2.1. Potrošnja primarne energije u svijetu – dosadašnja i predviđanja [3]

### 2.2.1. Ugljen

Ugljen je zapaljiva organska sedimentna stijena čiji su glavni sastojci ugljik, vodik i kisik. Od svih fosilnih goriva ima najveće zalihe, te je njegova povijest korištenja najduža.[4] Važan je svjetski izvor primarne energije, te se predviđa da će se u razdoblju od 2000 do 2050. godine njegova potražnja udvostručiti i premašiti 7000 milijuna tona ekvivalenta ugljena što znači da će sudjelovati u proizvodnji primarne energije sa približno 28%. [5] Najštetniji je izvor energije, u sebi ima zarobljene nečistoće, primjese sumpora i dušika. Sagorijevanjem ugljena, te nečistoće odlaze u atmosferu. Tamo se spajaju s parom i tvore kapljice koje se vraćaju na tlo kao kisele kiše. Unutar ugljena nalaze se još sitne čestice minerala koje ne sagorijevaju. One stvaraju pepeo koji ostaje nakon sagorijevanja. Jedan dio tih čestica zajedno s parom stvara dim koji dolazi iz elektrana na ugljen. Izgaranjem ugljena, ugljik reagira s kisikom iz zraka i na takav način nastaje ugljikov dioksid. Ugljikov dioksid je staklenički plin, bez boje i mirisa. Posljednjih nekoliko godina uloženi su veliki naponi kako bi se ugljen učinio čistim izvorom energije. Snažne svjetske politike za zaštitu okoliša uvidjele su nedostatke ugljena kao izvora energije, no s obzirom na količinu njegovih zaliha te iz ekonomskih razloga sve veći je pritisak za iskorištavanje ovog resursa. Izumljena je skupina tehnologija za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida koje nude potencijal za ostvarivanje ravnoteže ciljeva energetske sigurnosti, ekonomskog razvoja i održivosti okoliša, čiji princip se temelji na smanjuju emisija ugljikovog dioksida u atmosferu efikasnijim sagorijevanjem ugljena. [6]

### 2.2.2. Nafta i prirodni plin

Nafta je primarni, neobnovljivi, tekući energent koji se uglavnom sastoji od vodika i ugljikovih spojeva. Svojom preradom onečišćuje okoliš ispuštanjem ugljikovog dioksida u atmosferu.

Rast potražnje za benzinom i dizelom između 2019. i 2025. godine se smanjuje kako zemlje širom svijeta provode politike za poboljšanje učinkovitosti i smanjenje emisija ugljikovog dioksida, te kako se popularnost električnih vozila povećava. Globalna naftna industrija suočena je s velikim izazovima, iako nastavlja zadovoljavati rastuću potražnju, mora se također pozabaviti potrebom suzbijanja emisija i poboljšati održivost. [7]

Prirodni plin u usporedbi s naftom i ugljenom, koji predstavljaju velike onečišćivače okoliša, manje je štetan. Razlog tomu je što se sastoji od metana koji izgara u potpunosti. To je plin bez mirisa i okusa, gotovo neprimjetno zagađuje zrak i zato predstavlja jednu od alternativa u upotrebi fosilnih goriva.

### 2.3. Termoelektrane i njihov utjecaj na okoliš

Termoelektrane su termoenergetska postrojenja koja proizvode električnu energiju sagorijevanjem goriva. [8] Odnosno za njih možemo reći da primarne energente transformiraju u rad koji se zatim koristi za dobivanje električne energije. Tijekom izgaranja goriva, ovisno o vrsti (kemijskom sastavu) goriva te o korištenoj tehnologiji izgaranja, emitiraju se različite vrste organskih i anorganskih tvari u okoliš, koje su smjesa stakleničkih plinova, pepela i šljake.

Termoelektrane su značajan izvor onečišćenja okoliša. Najvažniji pokazatelji utjecaja termoelektrana na okoliš su emisije sumporovih oksida ( $\text{SO}_x$ ), dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ), ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), ugljikovog monoksida ( $\text{CO}$ ) i krutih čestica (pepela i čađe). Od sumporovih oksida u najvećoj mjeri izgaranjem nastaje jedan od najvećih polutanata zraka, sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ), a od dušikovih oksida su to dušikov monoksid ( $\text{NO}$ ), dušikov dioksid ( $\text{NO}_2$ ) i didušikov oksid ( $\text{N}_2\text{O}$ ). [9]

Veliki problem za okoliš stvaraju anorganske tvari koje nastaju kao posljedica izgaranja. Dio tih tvari raspršuje se direktno u atmosferu, dok drugi dio ostaje na dnu peći kao teški talog. Dio koji ide u atmosferu naziva se lebdeći pepeo (engl. *fly ash*), to su nezapaljivi mineralni ostaci čija veličina čestica varira od 1 do 100  $\mu\text{m}$ . Takve čestice najčešće se uklanjaju pomoću

dimnih plinova i obično se skupljaju elektrostatskim taložnicima. Dok drugi dio koji predstavlja talog nazivamo teški pepeo (engl. *bottom ash*). On nakon sagorijevanja ostaje na dnu peći, zato se njegovo odlaganje može kontrolirati. Krutog je oblika, sivo-crne boje i oko 15-20% ukupnog pepela koji nastaje je teški pepeo. Sastoji se od nakupina čestica pepela koje su prevelike da bi se nosile zajedno s dimnim plinovima, zato propadaju kroz rešetke do spremnika za pepeo na dnu kotla. Četiri glavna elementa koja čine čestice pepela su aluminij, silicij, željezo i kalcij, ostali elementi poput kalija, magnezija, kobalta, kadmija, cinka, olova itd. prisutni su u tragovima. [10] Ti potencijalno toksični elementi vezani su za čestice samo djelomično te se lako distribuiraju u tlo i vodu, dok štetni dimni plinovi kao što su  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  direktno odlaze u atmosferu gdje se vjetrom prenose u druga okolna područja.

Koncentracija i sastav dimnih plinova najviše ovise o kemijskom sastavu, količini i načinu izgaranja goriva. Poznato je da je problem zagađivanja okoliša najviše zastupljen kod termoelektrana na ugljen. Formiranjem kristalne rešetke ugljena, ugrađuju se različite štetne tvari iz okolnih sedimentnih stijena, uključujući arsen, sumpor, živu, nikal, olovo i druge elemente u tragovima. [11] Čijim izgaranjem u zrak se oslobađaju štetni staklenički plinovi poput ugljikovog dioksida, dušikovih oksida, sumporovih oksida, klorofluorouglikovih plinova (CFC spojevi) i metana ( $\text{CH}_4$ ) koji predstavljaju veliku opasnost za život i zdravlje živih organizama. Neki od njih uzrokuju rak, narušavaju reprodukciju i normalan razvoj djece, oštećuju živčani i imunološki sustav, a mogu pogoršati i stanje astme. Osim toga u velikoj mjeri su odgovorni za klimatske promijene. [12] Svojim povećanjem mijenjaju količinu zračenja koja dopire na zemlju, te uzrokuju globalno zagrijavanje i efekt staklenika koji je odgovoran za porast temperature. [13] Bez stakleničkog efekta prosječna temperatura u atmosferi bila bi za 30 stupnjeva niža nego danas. [14] Emisija stakleničkih plinova u zadnjih sto godina se povećava i uzrok je ekstremnih vremenskih prilika poput suša, poplava, požara i toplinskih udara. Termoelektrane na ugljen su najveći izvori emisija štetnih plinova kao što su  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  i tehnološkog otpada kao što su pepeo i čađa, dok su te emisije najmanje pri izgaranju prirodnog plina. Ugljen sadrži znatne količine sumpora (do 5%) kao i nafta, ali znatno manje nego ugljen (do 3,5%). Prelaskom na kvalitetniji ugljen i naftu, tj. s nižim masenim udjelom sumpora u njima, smanjit će se emisije  $\text{SO}_x$ . Dok uporabom prirodnog plina u kojemu je koncentracija sumpora zanemarivo mala, emisije  $\text{SO}_x$  su skoro zanemarive. Kao jedna od osnovnih mjera za smanjenje  $\text{SO}_x$  provodi se da maseni udio sumpora u ugljenu i nafti ne smije biti veći od 1%. Što je od ključne važnosti zato što je  $\text{SO}_x$  jedan od najagresivnijih polutanata zraka. Zajedno s  $\text{NO}_x$  sudjeluje u stvaranju kiseline s vlagom pri

čemu dolazi do efekta poznatim pod nazivom kisele kiše. One uništavaju vegetaciju, koja je osnova postojanja ekoloških sustava, onečišćuje tlo, te površinske i podzemne vode. Navedeni utjecaji ne mogu se u potpunosti izbjeći, ali primjenom odgovarajućih tehnologija i mjera zaštite okoliša mogu se uvelike smanjiti. [9] Iz navedenih razloga na snagu je stupio Protokol iz Kyota u kojem je dogovoreno da bi se do kraja 2020. godine termoelektrane trebale izbaciti iz upotrebe. Općenito, najmanji utjecaj na okoliš imaju termoelektrane na plinska goriva, slijede ih termoelektrane na tekuća goriva, te kao najštetnija opcija za okoliš, termoelektrane na ugljen.

Danas raste svijest o direktnom korištenju fosilnih goriva i postavlja se pitanja da li ih je uopće isplativo koristiti s obzirom na to kolike posljedice ostavljaju na okoliš. Gotovo svi procesi dobivanja energije svode se na izgaranje i štetne tvari koje pri tom nastaju. Pa se postavlja pitanje „ jesu li koristi od takvog dobivanja energije veće od šteta koje nanose emisije štetnih tvari “. [13] Zato treba koristiti ekološki prihvatljivije izvore energije kao što su obnovljivi izvori. Obnovljivi izvori svakodnevno su nam dostupni, ali u ograničenim količinama. Iako provedena znanstvena istraživanja pokazuju dobre rezultate u dobivanju energije od sunca, vjetra, valova i vodika, njihova ekonomičnost i učinkovitost neusporediva je s neobnovljivim izvorima energije. Obnovljivi izvori imaju dobru perspektivu za budućnost, međutim energija koja se iz njih dobiva je skupa, pa će još neko vrijeme morati pričekati da u potpunosti zamijene fosilna goriva.

Kao rješenje ovog problema, kako bi se osigurao nadzor onečišćenja okoliša, donesena je zakonska regulativa u svim zemljama članicama EU. Direktivom 2010/75/EUT su propisani obavezni uvjeti zaštite okoliša kojih se sva termoenergetska postrojenja jednaka ili veća od 50 MW moraju pridržavati. Ti uvjeti uključuju zahtjeve da se dozvole za rad industrijskih subjekata temelje na primjeni najboljih raspoloživih tehnologija i mjera u postizanju najvišeg stupnja zaštite okoliša. Konvencionalne termoelektrane na ugljen koriste stare tehnologije koje zagađuju okoliš puno više od termoelektrana na ugljen koje koriste nove tehnologije. Nove tehnologije imaju veću učinkovitost, smanjuju emisije štetnih plinova i većina njih koristi manje količine ugljena. [9]

### 3. NOVE TEHNOLOGIJE ZAŠTITE OKOLIŠA

Budući da je ugljen najveći zagađivač okoliša od svih fosilnih goriva mnoge ga zemlje nastoje izbaciti iz uporabe. Međutim, ugljen nudi energetske učinkovitost i pristupačnost, stoga će se on nastaviti koristiti, ali uz uvjet da se emisije koje nastaju izgaranjem svedu na minimum. Ovakve tehnologije su i dalje u razvoju, te se još uvijek smatraju skupima i rizičnim za ulaganje.[15]

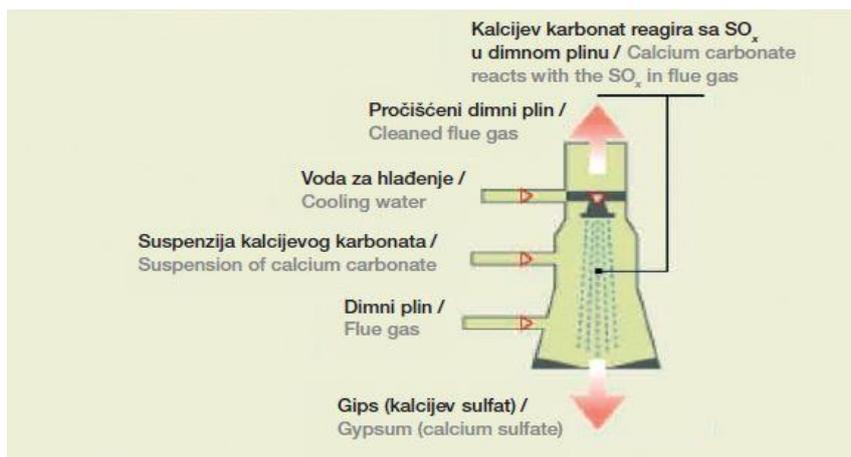
U ovom radu dan je kratak pregled novih elektroenergetskih sustava s razvijenim tehnologijama koje nude visoke ekološke performanse na osnovi izgaranja ugljena. Te tehnologije su: pročišćavanje dimnih plinova, koje uključuju odsumporavanje (FGD), selektivnu katalitičku redukciju (SCR) i elektrostatske taložnike (ESP), zatim ostale tehnologije čistog ugljena koje uključuju nadkritične i ultranadkritične elektrane, tehnologiju sagorijevanja u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (CFBC), kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja (IGCC), te konceptualni sustav hvatanja i skladištenja ugljika (CCS).

#### 3.1. Pročišćavanje dimnih plinova

Sve češće nameće se pitanje kako smanjiti emisije čestičnih tvari čija posljedica su kisele kiše uzrokovane dušikovim i sumpornim oksidima, te u novije vrijeme i živom (Hg). Danas su elektrostatski taložnici (ESP) najčešće korištena tehnologija za kontrolu čestičnih tvari, osim njih koriste se još gravitacijski i centrifugalni filteri. Još jedna od tehnologija pročišćavanja dimnih plinova je odsumporavanje (FGD) koja je u elektranama instalirana kako bi kontrolirala količinu SO<sub>2</sub> emisija. Najviše korištena tehnologija za kontrolu NO<sub>x</sub> nakon izgaranja je selektivna katalitička redukcija (SRC), te poslije nje selektivna nekatalitička redukcija (SRCN). Ovo poglavlje predstavlja sve navedene tehnologije pročišćavanja dimnih plinova.

##### 3.1.1. Odsumporavanje dimnih plinova (FGD)

Sumporovi oksidi nastaju uslijed izgaranja goriva koja sadrže sumpor. Najčešće korištena metoda (88%) za odsumporavanje dimnih plinova (engl. *Flue-Gas Desulphurisation*, skraćeno *FGD*) iz ložišta konvencionalnih termoenergetskih postrojenja je mokri postupak odsumporavanja (Slika 3.1.) kojim je moguće odstraniti čak do 95% SO<sub>x</sub>, a manje se primjenjuju polusuhi (8%) i suhi postupci (3%). [16]



**Slika 3.1.** Postrojenje za odsumporavanje dimnih plinova - toranj s raspršivanjem tekućine [16]

U mokrom postupku dimni plin iz ložišta ulazi u FGD apsorber i struji prema gore, pri čemu dolazi u kontakt s vodenom suspenzijom usitnjenog kalcijevog karbonata (vapnenca) koji se upuhuje mlaznicama sa strane. Direktnim kontaktom vodene suspenzije mljevenog vapnenca sa  $\text{SO}_2$  kao produkt nastaje kalcijev sulfid ( $\text{CaSO}_3$ ), a zatim dodavanjem zraka u režimu oksidacije nastaje kalcijev sulfat dihidrat, odnosno gips ( $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ) koji se odstranjuje i koristi u građevinskoj industriji. Pročišćeni dimni plin izlazi kroz ispuh na gornjoj strani uređaja te se emitira u atmosferu, dok se produkti reakcije povlače iz apsorbera i šalju na uklanjanje vode, te daljnju obradu.[18]

Sprej za suho raspršivanje druga je najpopularnija FGD metoda. Općenito se za sve polusuhe sustave koriste samo sorbensi na bazi kalcija. Ovi postupci za uklanjanje  $\text{SO}_2$  iz dimnih plinova koriste suspenziju vapna, koja se naziva još i vapneno mlijeko. Ona se ubrizgava u apsorber u obliku sitnih kapljica. Voda se isparava toplinom dimnih plinova prije nego kapljice padnu na dno apsorbera. Vrijeme boravka u apsorberu (oko 10 sekundi) dovoljno je da  $\text{SO}_2$  i ostali kiseli plinovi poput  $\text{SO}_3$  i  $\text{HCl}$  reagiraju s hidratiziranim vapnom, te da se dobije suha smjesa kalcijeva sulfata i sulfita. Ovi sustavi zahtijevaju uređaje za kontrolu čestica kao što su npr. elektrostatski taložnici (ESP), koji skupljaju sitnije čestice nošene strujom plina dok na dno padaju krupne čestice. Ovdje pročišćavanje otpadnih voda nije potrebno, jer voda potpuno ispari u apsorpciji suhog spreja. Primjena ove tehnologije ograničena je na postrojenja prosječno do 200 MWe. [17]

Suhi postupci odsumporavanja, rade na principu ubrizgavanja suhog sorbensa u gornji dio ložišta ili odvod dimnog plina. Fino mljeveni sorbens brzo i ravnomjerno se distribuira po cijelom presjeku u gornji dio ložišta gdje su temperature od 750 do 1250 °C. Sorbens reagira sa  $\text{SO}_2$  i  $\text{O}_2$  nakon čega se formira  $\text{CaSO}_4$ . Ukoliko se kao sorbens upotrebljava hidratizirano vapno

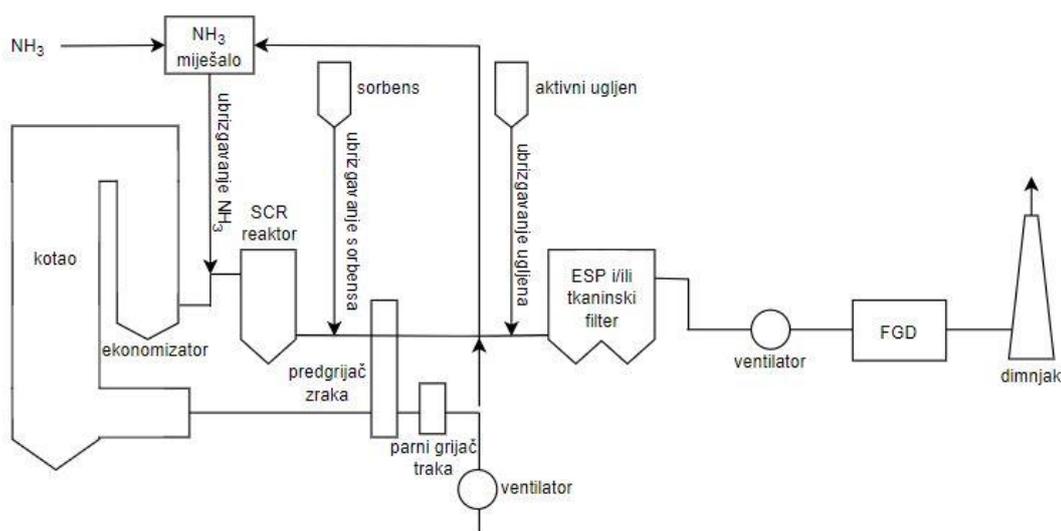
učinkovitost uklanjanja je do 50%, u drugom slučaju kada se koristi vapnenac učinkovitost je puno manja.[17]

Danas je ukupno instalirano preko 780 FGD sustava, čiji je kapacitet preko 260 GWe, a kapitalni troškovi smanjeni su na 125 \$/kW. [17]

### 3.1.2. Selektivna katalitička redukcija (SCR)

Emisiju dušikovih oksida moguće je smanjiti primarnim mjerama (do 40%), koje se provode tijekom izgaranja. Primarne mjere realiziraju se stupnjevitim dovođenjem goriva i zraka te posebnom konstrukcijom plamenika. Time se smanjuje temperatura izgaranja i koncentracija kisika u području izgaranja. [16]

Sekundarne mjere primjenjuju se iza zone izgaranja i uključuju selektivne katalitičke redukcije (engl. *Selective Catalytic Reduction*, skraćeno SCR) i selektivne nekatalitičke redukcije (engl. *Selective Non-Catalytic Reduction*, skraćeno SNCR). U SRC sustavu amonijak pomiješan sa zrakom ubrizgava se u tok otpadnog plina na temperaturi od 300 do 400 ° C, zatim prolazi kroz katalizator pri čemu se NO<sub>x</sub> reducira od NH<sub>3</sub> do N<sub>2</sub>. Aktivna komponenta katalizatora se obično temelji na oksidima titana, vanadijuma i volframa te drugih metala. Ovom tehnologijom smanjuje se koncentracija NO<sub>x</sub> tipično od 80 do 90%. Iako je ovo komercijalno zrela tehnologija i dalje se nastoji riješiti problem razgradnje katalizatora i prevelikih troškova. Tim je postupkom do sada stečeno najveće iskustvo odvajanja NO<sub>x</sub>. Slika 3.2. prikazuje sustav sa selektivnim katalitičkim katalizatorom.[19] [16]



Slika 3.2. Postrojenje sa selektivnim katalitičkim katalizatorom [20]

Na slici su prikazane još neke funkcije postrojenja kao što je dodavanje sorbensa za kontrolu  $\text{SO}_3$ . Sorbens se može ubrizgavati u bilo koji ulaz, npr. prije grijača zraka, ali gotovo se uvijek ubrizgava uzvodno od uređaja za kontrolu čestica. Zatim ubrizgavanje ugljena jedna je od metoda uklanjanja žive iz struje plina. To je proces koji se događa uzvodno od uređaja za kontrolu čestica koji se obično sastoji od suhog ESP i/ili tkaninskog filtera.[20]

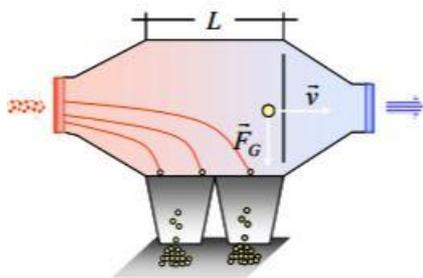
U procesu selektivne nekatalitičke redukcije, kemijski reagens, obično amonijak, rjeđe urea, ubrizgava se u vodenom ili plinovitom obliku izravno u ložište pri temperaturi od 800 do 900 °C. Ovisno o vrsti reagensa i radnim uvjetima učinkovitost odvajanja  $\text{NO}_x$  ovom tehnologijom je od 40 do 50%. [19]

### 3.1.3. Elektrostatski filteri (ESP)

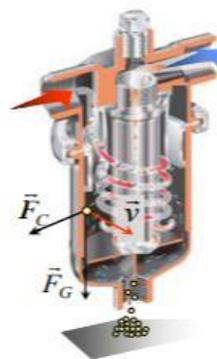
Elektrostatski filteri ili taložnici (engl. *Electrostatic Precipitators*, skraćeno ESP) predstavljaju najefikasniju tehnologiju filtriranja nano čestica od kojih se inače sastoji lebdeći pepeo, koji je nepoželjni produkt izgaranja fosilnih goriva. Osim ovoga, postoje još dvije glavne vrste uređaja koje se koriste za usmjeravanje čestica, a to su gravitacijski filteri (engl. *gravity settlers* - taložnici) i centrifugalni filteri (engl. *cyclone separators* - separatori).[21]

Gravitacijski filter (Slika 3.3.) je dugačka komora unutar koje cirkulira zagađeni zrak. Radi na temelju gravitacijske sile, uslijed čijeg se djelovanja čestice natalože na dno. Na dnu se nalazi pregrada koja sprječava da sav protok prođe kroz sredinu i time znatno umanjuje efikasnost filtera.[21]

Centrifugalni filter (Slika 3.4.) je cilindrična komora u koju se zagađeni zrak uvodi tangencijalno čime se oblikuje kružni vrtlog prema dolje. Na čestice koje se kreću po toj zakrivljenoj putanji djeluje centrifugalna sila  $F_C$ . Uslijed gravitacije čestice se zalijepe za zid i spontano se spuštaju prema dolje. [21]



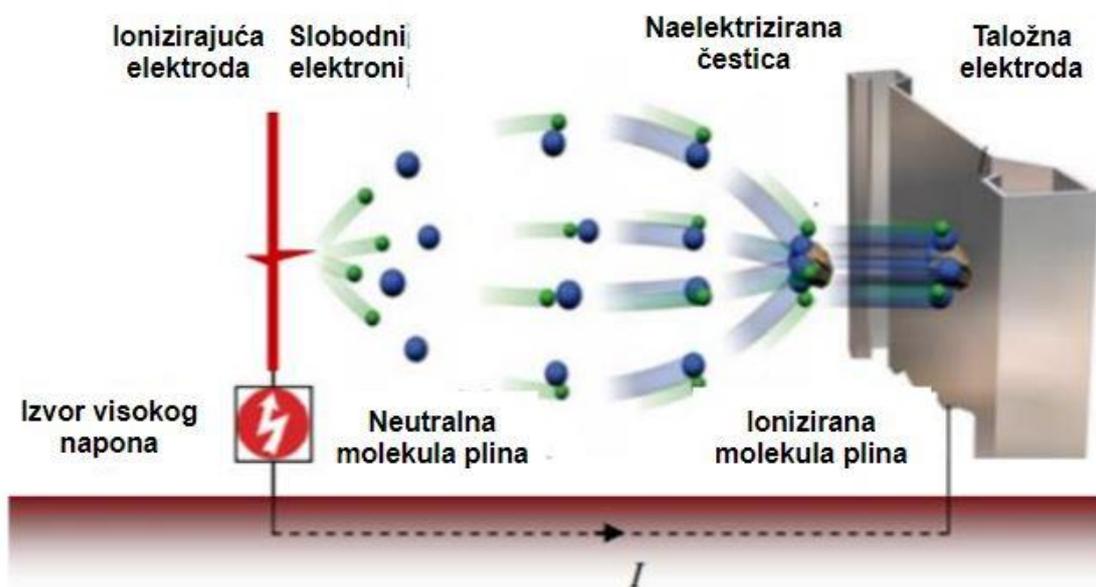
Slika 3.3. Gravitacijski filter [21]



Slika 3.4. Centifugalni filter [21]

Elektrostatski filteri su optimalan izbor za odvajanje krutih čestica nakon izgaranja.

Način rada elektrostatskog filtera je jednostavan: naelektrizirati česticu, dovesti ju u električno polje i odstraniti nataloženu česticu. Slika 3.5. prikazuje način rada elektrostatskog filtera, a detaljan princip opisan je u nastavku.[21]



Slika 3.5. Detaljan način rada elektrostatskog filtera [21]

Elektrostatski filter sastoji se od aktivnih, negativnih elektroda za ionizaciju, anoda (engl. *discharge*) i pasivnih, pozitivnih elektroda za prikupljanje čestica, katoda (engl. *collection*). Aktivne elektrode su žičane elektrode, a pasivne elektrode su ploče ili cijevi različitih poprečnih presjeka. Na ionizirajuće elektrode, za razliku od ostalih dijelova filtera doveden je visoki napon istosmjerne struje (HVDC – engl. *High Voltage Direct Current*).[22] Taj napon kontrolira jačinu električnog polja između aktivnih i pasivnih elektroda. Zbog odbojnih sila elektroni iz molekula fluida udaljavaju se od anode i tako nastaju pozitivni ioni. Elektroni ioniziraju svaku molekulu s kojom se sudare, pri čemu se stvara lavinski efekt novih elektrona i pozitivnih iona. Elektroni nastali ionizacijom vežu se za molekule okolnog fluida i formiraju oblak negativnih iona koji teži ka uzemljenoj elektrodi. Elektroni koji napuste električno polje gube energiju i dopijevaju u međuprostor između elektroda zajedno s molekulama plina za koje se vežu. Molekule plina tada

su negativno naelektrizirane i privučene elektrodom koja je uzemljena.[21] Ovaj fenomen poznat je kao elektrodinamički (EDH) protok (poznat i kao ionski vjetar ili elektroforeza).[22]

Da bi se omogućio kontinuirani rad, nakupljene čestice moraju se ukloniti. U suhom elektrostatskom taložniku, akumulirane čestice povremeno se odvajaju od pločastih elektroda i padaju u spremnik. Ovaj proces naziva se sustav za čišćenje taložnih elektroda (engl. *rappet*).[22]

Neovisno o tipu, elektrostatski filter može raditi i u suhom i u vlažnom režimu. Razlika u prikupljanju čestica ne postoji, jedina je razlika u odstranjivanju čestica s taložne elektrode.[21]

Elektrostatski filteri također se grupiraju i po temperaturi plina koji ulazi u filter. Pa s obzirom na to dijelimo ih na hladnostrane (engl. *cold side*) i toplostrane (engl. *hot side*). Toplostrani filteri rade u režimu između 300 °C i 400 °C, a hladnostrani rade na temperaturama između 130 °C i 180 °C. Većina postrojenja s ovom tehnologijom ima ugrađene hladnostrane filtere. Postoji oko 2500 PCC postrojenja (engl. *Pulverised Coal Combustion*), od kojih čak 95% ima neki oblik kontrole čestica dimnih plinova, a otprilike 80% od toga su hladnostarni elektrostatski taložnici, dakle oko 1800 elektrana ima ovu tehnologiju pročišćavanja dimnih plinova.[21][22]

Većina prikupljenog letećeg pepela koristi se u građevinskoj industriji za proizvodnju cementa, betona i maltera. Ali određene norme kvalitete moraju biti zadovoljene.

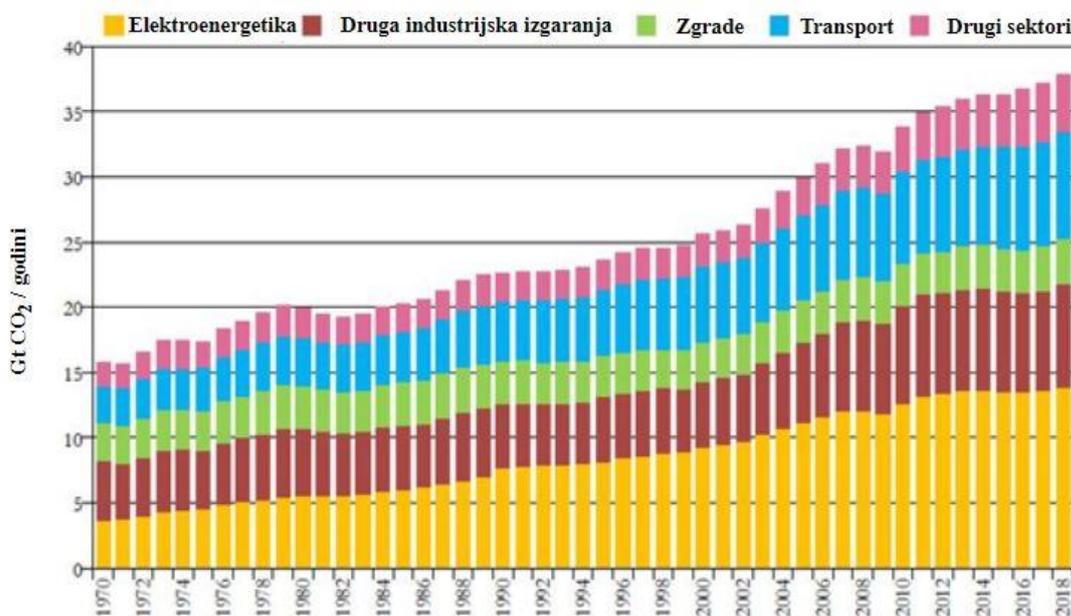
Glavni nedostatak ove tehnologije je visoka investicijska vrijednost, te pojava od iskrenja, zbog čega se ovi filteri ne mogu upotrijebiti za prikupljanje zapaljivih čestica ili pročišćavanje eksplozivnih smjesa.[21]

### **3.2. Tehnologije čistog ugljena (CCT)**

Razvojem industrijske proizvodnje i povećanjem upotrebe fosilnih goriva u prošlom stoljeću povećala se razina koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi sa oko 280 ppmi (engl. *Partes per milion mol* – dijelova na milijun mola) na skoro 370 ppmi, zbog čega je došlo do efekta staklenika i globalnog zatopljenja. Točna granica koja bi ostavila trajne posljedice na čovječanstvo nije poznata, ali smatra se da je njena donja vrijednost oko 450 - 550 ppmi, veća koncentracija izazvala bi katastrofalne posljedice te povećanje globalne temperature za 2 °C. Kada se ne bi provodile nikakve mjere smanjenja ugljikovog dioksida u atmosferi, njegova koncentracija do 2100. godine dosegla bi 900 ppmi. Proizvodnja električne energije izgaranjem fosilnih goriva uzrok je za više od 30% ukupne emisije ugljikovog dioksida, dok industrijski procesi generiraju 23% tijekom proizvodnje cementa, kemikalija, željeza i papira.[23] Ugljikov

dioksid ima najveći štetan utjecaj na efekt staklenika, uzrokujući oko 55% uočenog globalnog zagrijavanja.[24]

EDGAR (engl. *Emissions database for global atmospheric research*) trenutno ima dostupnu bazu podataka koja sadrži procjene globalne emisije CO<sub>2</sub> od izgaranja fosilnih goriva u razdoblju od 1970 do 2018., što je prikazano na slici 3.6. Slika prikazuje globalne godišnje emisije CO<sub>2</sub> u Gt po pojedinim sektorima, kao što su elektroenergetika (postrojenja za proizvodnju električne energije i topline), druga industrijska izgaranja (koja uključuju izgaranja za proizvodnju goriva i industrijsku proizvodnju), transport, zgrade i drugi sektori. [43]



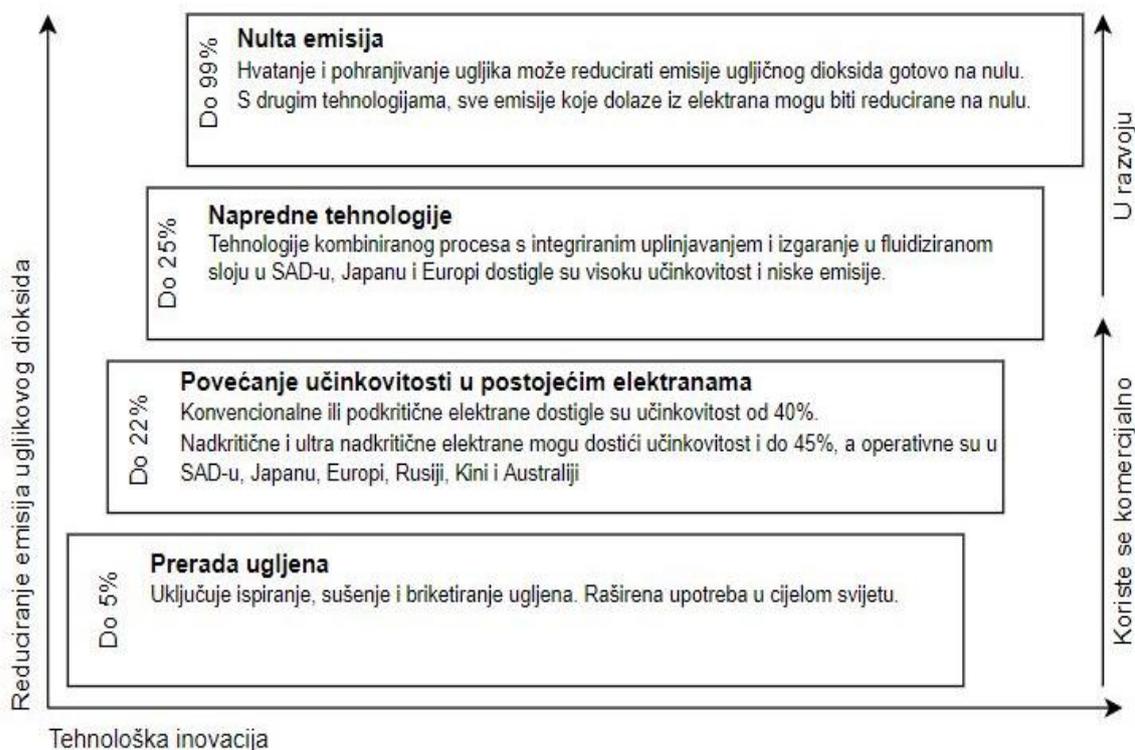
**Slika 3.6.** Globalna emisija CO<sub>2</sub> od izgaranja fosilnih goriva po sektorima, 1970 – 2018 [43]

Iz slike 3.6. je vidljivo da globalne emisije ugljikovog dioksida rastu u usporedbi s emisijama iz 1970-ih. Nastavak ovakvog trenda porasta predviđa se i u budućnosti. Razdoblje između 2015. i 2016. godine je razdoblje bez većeg porasta emisija CO<sub>2</sub> (0% u 2015. i 0,4% u 2016.), dok je veći porast primijećen između 2016. i 2017. godine (1,2%). U 2018. godini emisije CO<sub>2</sub> porasle su za 1,9% u odnosu na 2017. godinu, te su dosegle ukupno 37,9 Gt CO<sub>2</sub>. [43]

Kako bi se smanjile emisije ugljikovog dioksida u energetske sustavima na fosilna goriva provode se primarne i sekundarne mjere. Primarne mjere uključuju različite opcije kao što su povećanje alternativnih izvora u proizvodnji energije, povećanje učinkovitosti elektroenergetskih sustava rekonstrukcijom i zamjenom pojedinih dijelova kao što su turbine, kotlovi i pumpe, proizvodnja pare pri nadkritičnim vrijednostima tlaka i temperature, smanjenje zahtjeva za energijom pri čemu se smanjuju i emisije ugljikovog dioksida, te brojne druge opcije. Međutim

zbog stanja koje je alarmantno potrebno je provoditi sekundarne mjere koje podrazumijevaju uklanjanje ugljikovog dioksida iz atmosfere (dimnih plinova) i njegovo odlaganje. Ove mjere provode se pomoću CCS tehnologije (engl. *Carbon Capture and Storage*) što u prijevodu znači hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida. Čine je tri komponente, izdvajanje ugljikovog dioksida od ostalih dimnih plinova, transport ugljikovog dioksida, te njegovo pohranjivanje duboko u zemlju.

Međunarodna agencija za energiju (IEA) 1991. godine inicirala je Program za razvoj i istraživanje stakleničkih plinova. U suradnji s 26 zemalja i Europskom komisijom, potaknula je razvoj tehnologija za smanjenje emisija stakleničkih plinova, te je sponzorirala provedbu programa i godišnje izvještaje o njihovom progresu.[23] Naglom upotrebom novih tehnologija za zaštitu okoliša smanjen je utjecaj zagađenja na okoliš iskorištavanjem ugljena u posljednjih 40 godina. U tu svrhu implementirane su tehnologije čistog ugljena (engl. *Clean Coal Technology*, skraćeno CCT). IEA je definirala četiri skupine CTT-a: prerada ugljena, povećanje učinkovitosti u postojećim elektranama, napredne tehnologije i tehnologije s gotovo nultom emisijom ugljika (Slika 3.7.). Kao peta skupina CTT-a navodi se tehnologija za prikupljanje i skladištenje ugljikovog dioksida.[5]



**Slika 3.7.** Smanjenje emisija ugljikovog dioksida kroz tehnološke inovacije [5]

Prerada ugljena samo je jedan od puteva koji vodi do konačnog cilja, najučinkovitije tehnologije s gotovo nultom emisijom. Ispiranje/sušenje ugljena i njegovo briketiranje ima važnu primjenu jer omogućava trenutno smanjenje emisija ugljikovog dioksida za čak 5%. [5]

### 3.2.1. Povećanje učinkovitosti u postojećim elektranama

Postrojenja za izgaranje ugljena u prahu (engl. *Pulverised coal combustion*, skraćeno PCC) su najčešće korištene tehnologije u termoelektranama za proizvodnju energije od ugljena.

Ugljen koji je mljeven u prah, propuhava se zrakom za izgaranje kroz niz plamenika. Izgaranje se odvija na temperaturama od 1300 °C do 1700 °C i tlaku koji je blizu atmosferskog, što olakšava prolazak materijala kroz postrojenje. Čestice ugljena se u kotlu obično zadržavaju od dvije do pet sekundi, a moraju biti dovoljno male da bi tijekom tog vremena došlo do njihovog potpunog izgaranja. Toplina koja se oslobađa tijekom izgaranja ugljena, apsorbira se vodom koja teče cijevima, što kasnije pokreće parne turbine za proizvodnju energije (Rankineov ciklus). Pregrijači i dogrijači koriste se za skupljanje topline iz dimnih plinova, te povećanje temperature pare kako bi se postigla veća toplinska učinkovitost. Pepeo koji pri izgaranju odlazi u sklopu ostalih dimnih plinova u obliku sitnih, čvrstih čestica skuplja se elektrostatskim taložnicima, dok se SO<sub>2</sub> kontrolira s vapnenačkom suspenzijom, postupkom odsumporavanja dimnih plinova (FGD). Elektrostatskim taložnicima moguće je otkloniti čak 5 – 10 mg/m<sup>3</sup> čestica, dok FGD postupkom moguće je dobiti ispod 20 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>. PCC kotlovi napravljeni su tako da odgovaraju parnim turbinama čije su izlazne vrijednosti između 50 i 1300 MWe, a najnovije PCC elektrane imaju parne turbine s više od 300 MWe.[25]

S obzirom na tehnologiju koja je primjenjiva u PCC postrojenjima postoji podjela na: konvencionalne ili podkritične tehnologije (engl. *Subcritical Technology*), nadkritične (engl. *Supercritical Technology*, skraćeno SC), ultra nadkritične tehnologije (engl. *Ultra Supercritical Technology*, skraćeno USC).

Glavna razlika između ove tri tehnologije je u tlaku i temperaturi pare što prikazuje tablica 3.1. Podkritične elektrane obično stvaraju paru s uvjetima 16,5 MPa/538 °C/538 °C (izlazni tlak/temperatura na izlazu pregrijača/temperatura na izlazu dogrijača). Prosječna učinkovitost za veće podkritične elektrane koje se temelje na spaljivanju kvalitetnog ugljena je u rasponu od 35% do 36%, dok starije elektrane koje koriste ugljen lošije kvalitete imaju nižu učinkovitost, oko 30%. Međutim, sve više zastupljena nova postrojenja, s nadkritičnom parom, mogu postići toplinsku učinkovitost u rasponu od 43% do 45%. Nominalni uvjeti pare za nadkritične elektrane

su 24,1 MPa/566 °C/593 °C. U nekim nadkritičnim elektranama koje osiguravaju veću učinkovitost, korišteni su uvjeti 29.6 MPa/579 °C/599 °C i 25 MPa/600 °C/610 °C. Takva elektrane se obično nazivaju ultra nadkritičnim, čija je vanjska temperatura pregrijača oko 600 °C. Viši uvjeti pare, znače i veću učinkovitost.[25]

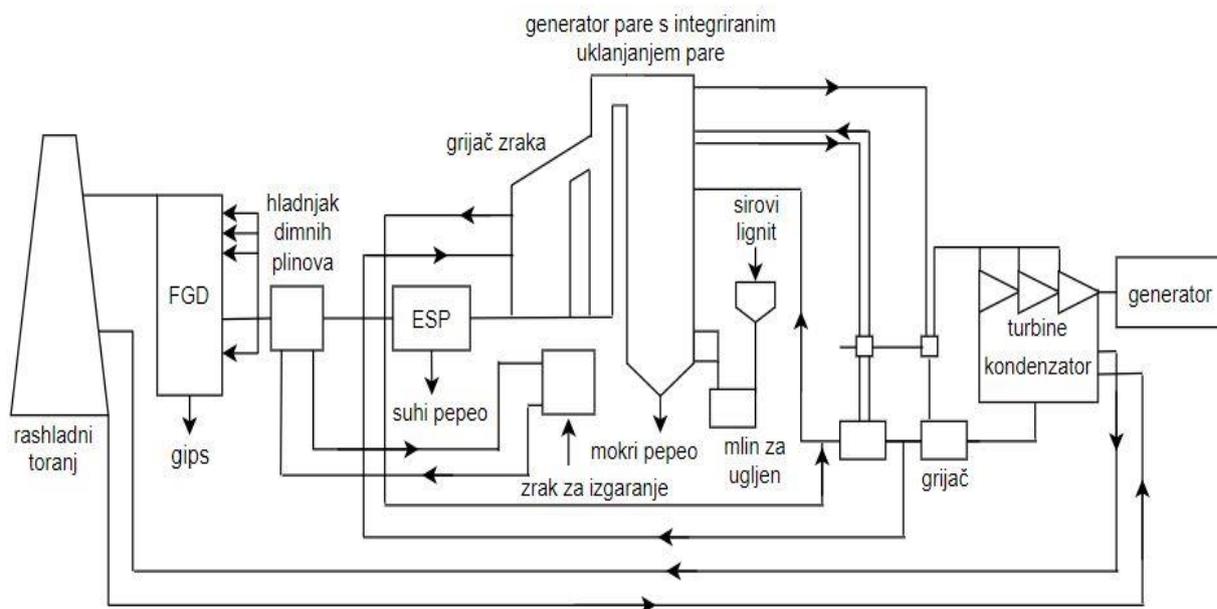
**Tablica 3.1.** *Usporedba stanja pare između podkritičnih, nadkritičnih, ultra nadkritičnih i dugoročnih budućih kotlova [25]*

	Podkritične	Nadkritične	Ultra nadkritične	Dugoročna budućnost
<b>Stanje pare</b>				
<b>Tlak, MPa (izlaz pregrijača)</b>	<b>12,4 – 16,5</b>	<b>24 - 25</b>	<b>30</b>	<b>35,8</b>
<b>Temperatura (izlaz pregrijača/dogrijača)</b>	<b>538/538</b>	<b>540 - 565/560 - 595</b>	<b>595 - 600/600 - 610</b>	<b>700/720</b>

Institut za ugljen procijenio je da u svijetu djeluje preko 240 nadkritičnih elektrana i 24 ultra nadkritične elektrane. Iako su kapitalni troškovi nadkritičnih elektrana 2 – 3% veći u odnosu na podkritične elektrane, ti se troškovi nadoknađuju nižim troškovima goriva, te manjim emisijama dimnih plinova.[5]

Najbolji primjer PCC postrojenja je RWE's Niederaussen jedinica K, odnosno najveća jedinica u svijetu koja se loži na lignit s izlaznom neto vrijednosti od 965 MWe (ili 1000MWe bruto). Slika 3.8. prikazuje shematski dijagram ovog postrojenja. Posjeduje SC tangencijani, zidni, klizni kotao čija glavna svojstva pare su od 27,5 MPa i 580 °C s ponovnim zagrijavanjem na 600 °C. Kako bi kotao izdržao veću temperaturu i tlak pare, za njegovu izradu koriste se napredne legure materijala kao što su P91, legirani čelik s 9 - 12% CrMoV i E911 (X11CrMoWVNb9-1-1). Osim toga, provedene su još mnoge investicije kako bi se poboljšala učinkovitost cjelokupne jedinice. To uključuje: naprednu parnu turbinu (povećanje učinkovitosti od 1,7%), složen krug grijanja dovodne vode, što rezultira krajnjom temperaturom vode od 295 °C (povećanje učinkovitosti od 1,1%), učinkovit povrat topline od niskotemperaturnih dimnih plinova kroz hladnjak dimnih plinova (povećanje u učinkovitost od 0,9%), nizak tlak ispušnih turbina korištenjem visokog tornja za hlađenje (200 m) za rashladnu vodu čija je temperatura manja od 15 °C (povećanje učinkovitosti za 1,4%)[25]

Kao rezultat, Niederaussen jedinica K postiže neto efikasnost od 43,2%, usprkos korištenju lignita čiji je udio vlage iznad 50%, u usporedbi s tipičnim iskorištenjem postojećih postrojenja na lignit od 31–35%. To je najveća neto učinkovitost trenutno postignuta PCC jedinicom na lignit.[25]



Slika 3.8. Shematski dijagram Niederaussen jedinice [25]

### 3.2.2. Napredne tehnologije

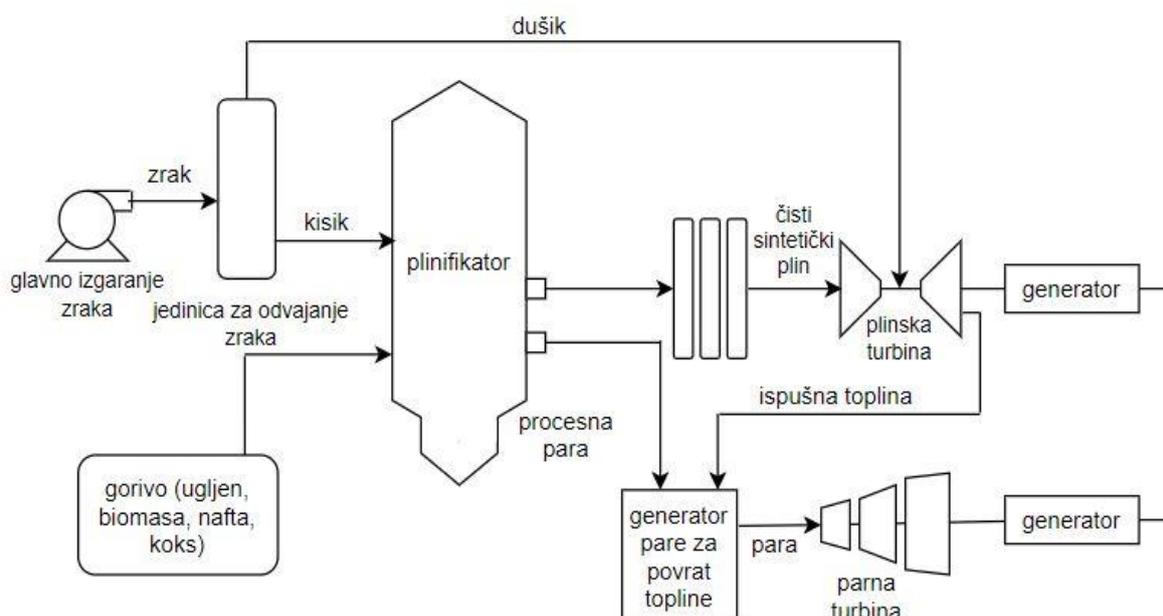
Iako je PCC i dalje vodeća tehnologija u energetsom sektoru, bitan dio postrojenja temelji se na cirkulirajućem sagorijevanju u fluidiziranom sloju. Brojne su prednosti te tehnologije u usporedbi s PCC, posebno u korištenju niske kvalitete ugljena i mješavine ugljena sa ostalim gorivima. To je tehnologija koja je se od svoje prve primjene pa sve do sada i dalje razvija.

Značajan potencijal za ostvarivanje veće učinkovitosti od SC ili USC ima kombinirani ciklus s integriranim uplinjavanjem. Međutim, takvi sustavi tek ulaze u fazu komercijalizacije, i za njihov napredak potrebna su daljnja istraživanja, razvoj i radno iskustvo.

#### 3.2.2.1. Kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja (IGCC)

IGCC (engl. *Integrated Gasification Combined Cycle*, skraćeno IGCC) proces je kombinirani plinsko-parni ciklus s integriranim rasplinjavanjem ugljena. Osnovna shema IGCC procesa prikazana je na slici 3.9. Slika prikazuje sažeti princip rada elektrane s IGCC tehnologijom. Dakle to je tehnologija za proizvodnju energije koja koristi visokotlačni plinifikator za pretvaranje ugljena i drugih goriva na bazi ugljena u sintetski plin. Kao i svi kombinirani ciklusi, ova tehnologija koristi plinsku i parnu turbinu, ali prvo se priprema gorivo za plinsku turbinu. Sintetski plin nastaje rasplinjavanjem ugljena u reaktoru pod tlakom i s ograničenom količinom kisika. Za razliku od običnog plina koji se sastoji od  $\text{CH}_4$ , sintetički plin

iz ugljena se uglavnom sastoji od  $H_2$  i  $CO$ . Procesom se pritom oslobađa toplina koja se preko parne turbine pomoću generatora pretvara u energiju (Rankineov ciklus). Plin dobiven plinifikacijom, nakon hlađenja i čišćenja izgara u peći za izgaranje plinske turbine, (povratni - Braytonov ciklus). Većina plinifikatora koristi čisti kisik umjesto zraka, za to je odgovorna jedinica za odvajanje zraka (engl. *air separation unit*). Na taj način smanjuje se veličina plinifikatora, a time i troškovi. Upotrebom kisika umjesto zraka proizvode se sintetski plinovi veće toplinske vrijednosti, što znači da su potrebni manji izmjenjivači topline. Međutim, ta prednost elektranu čini složenijom za izgradnju i rad.[15]



**Slika 3.9.** Osnovna shema IGCC procesa [15]

Postrojenja s IGCC tehnologijom efikasnija su od konvencionalnih termoelektrana koje su zasnovane na PCC tehnologiji i njihov rad nastavit će se poboljšavati daljnjim tehničkim napretkom. IGCC sustavi su potencijalna opcija za niske emisije i visoku učinkovitost (HELE), posebno u zemljama u kojima je kvaliteta ugljena niska, gdje ugljen ima veliki postotak sumpora. Vrući sintetički plin pročišćava se prije izgaranja što uklanja potrebu za ugradnjom tehnologija za pročišćavanje dimnih plinova, koje se ugrađuju nakon zone izgaranja. Sustav čišćenja uklanja čestice, sulfide i elemente u tragovima. Međutim nemaju sve IGCC elektrane taj sustav. Sintetički plin proizvodi se na temperaturama do  $1700^{\circ}C$  (ovisno o vrsti plinifikatora), a to je previsoko za većinu sustava za čišćenje plina. [15]

Većina IGCC tehnologija zasniva se na uklanjanju  $CO_2$  iz sintetičkog plina prije izgaranja goriva u turbini. I taj proces izdvajanja  $CO_2$  IGCC tehnologijom puno je jednostavniji nego uklanjanje

CO<sub>2</sub> iz konvencionalnih termoelektrana drugim tehnologijama. Međutim hvatanje i obrada CO<sub>2</sub> zahtjeva energiju i kao rezultat toga ukupna neto učinkovitost postrojenja s IGCC tehnologijom može pasti za 7-11% pa koeficijent učinkovitosti postrojenja je oko 35 - 45%. Kod elektrana temeljenih na PCC tehnologiji smanjenje učinkovitosti poslije izgaranja je od 8-15%. IGCC sustavi se zato smatraju prikladnom tehnologijom za proizvodnju buduće energije koja je temeljena na ugljenu jer nudi potencijal proizvodnje električne energije istovremeno postizući gotovo nultu emisiju. Prema Miyao (2016) prosječna nadkritična termoelektrana proizvodi 958 gCO<sub>2</sub>/kWh, ultra nadkritična (USC) elektrana proizvodi 806 gCO<sub>2</sub>/kWh, dok IGCC elektrane mogu imati znatno niže emisije, približno 660 gCO<sub>2</sub>/kWh. Niža razina emisije CO<sub>2</sub> je rezultat veće učinkovitosti IGCC sustava. Šljaka proizvedena iz većine IGCC postrojenja prodaje se za cement, a sumpor uklonjen čišćenjem plina može se prodati kao kemikalija za industriju. Kao što je gore spomenuto, IGCC sustavi nude nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalne sustave za izgaranje ugljena. Nude potencijalno veću učinkovitost postrojenja, nižu emisiju, kapacitet za rasplinjavanje raznih vrsta ugljena te koriste manje vode od konvencionalnih postrojenja na ugljen i stoga bi bile pogodnije u područjima s ograničenom opskrbom vodom.[15]

Pregled dosadašnjih projekata sugerira da je tehnologija složenija i zahtjevnija nego što je predviđeno. Većina elektrana koje se grade prešle su proračun i vrijeme, čak i najviše uspješne jedinice koje koštaju 15-20% više u odnosu na klasična PCC postrojenja. Mnoge zemlje trenutno IGCC postrojenja vide kao preskupo i rizično rješenje. Postoji geografska podjela u spremnosti za daljnjim ulaganjima u projekte IGCC-a. Kina se pokazuje opredijeljenom za IGCC s preko 180 predloženih projekata, temeljenih na kineskoj tehnologiji. Međutim, nejasno je koliko će se od tih projekata uvrstiti u proces faze izgradnje, posebice jer se upotreba ugljena u Kini usporava. Podrške vlade u Europi i SAD-u su u velikoj mjeri prestale, a privatni ulagači su zabrinuti zbog uočenog rizika.[15]

Trenutno je dizajnirano pet glavnih IGCC elektrana na bazi ugljena. To su, u Europi: Buggenum, u vlasništvu NUON-a (250MWe), koja se nalazi u Nizozemskoj i čija je učinkovitost 43%, zatim u Španjolskoj, Puertollano, čiji je vlasnik Elcogas (300MWe) i njena učinkovitost je 45%. U SAD-u također postoje dvije IGCC elektrane, Polk elektrana u vlasništvu Tampa Electric (250 MWe) i postrojenje Wabash River u Indiani (260 MWe). Ove četiri elektrane izgrađene su 1990-ih. Peta elektrana je Nakoso u Japanu čija je izgradnja započela 2007. godine.[15] [26]

Emisije SO<sub>2</sub> iz IGCC postrojenja su vrlo male, u elektrani Buggenum minimalna razina smanjenja SO<sub>2</sub> iznosi 97,85% sa sadržajem sumpora u ugljenu od 1,5%. Očekivana vrijednost za

Puertollano je bila  $25 \text{ mg/m}^3$ , ali su postignuti rezultati bolji, te vrijednost  $\text{SO}_2$  iznosi  $7,5 \text{ mg/m}^3$ . Emisije  $\text{NO}_x$  su također male, u Puertollanu svega  $75 \text{ mg/m}^3$ . Emisije prašine su uglavnom manje od  $1 \text{ mg/m}^3$ , a razlog tomu je gorivo koje mora biti detaljno očišćeno kako bi se spriječilo taloženje i korozija na turbinama između plinifikacije (30%), čišćenja (15%), parne turbine, plinske turbine i generatora pare za povrat topline što se jednim imenom naziva „ power island “ (40 %) i jedinice za odvajanje zraka (15%). Podaci o kapitalnim troškovima pokazali su da je prosječan raspon troškova Wabash, Polk i Buggenum elektrana od 1680 do 1750 dolara/kWe.[26]

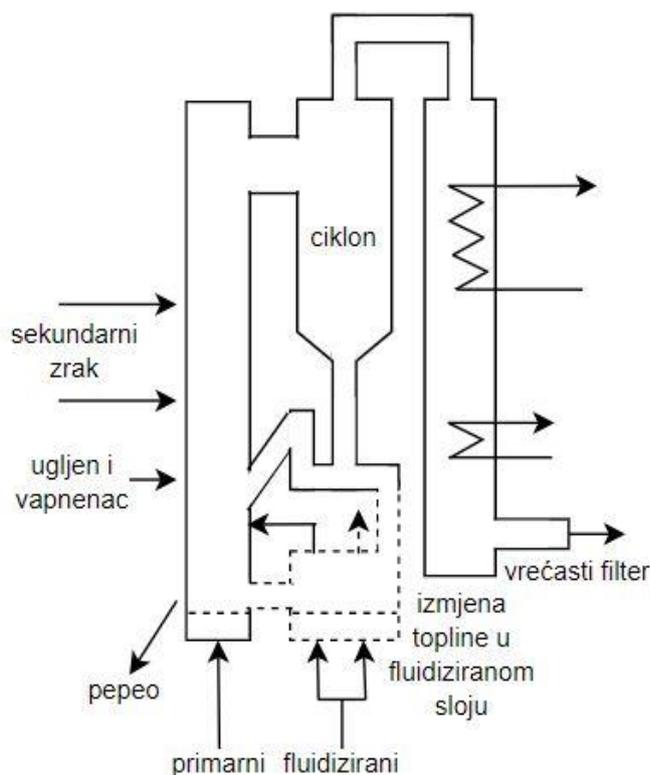
Mnogo je barijera koje usporavaju i sprečavaju potpunu primjenu ove tehnologije, a kao glavne navode se kapitalni i operativni troškovi, te pouzdanost i mala dostupnost zbog složenih procesa koji su uključeni.

### 3.2.2.2. Izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (CFBC)

Prijelazom s klasičnog načina izgaranja ugljena na izgaranje ugljena u fluidiziranom sloju ostvaruje se manja potrošnja goriva, a samim time i manja emisija onečišćujućih tvari. FBC (engl. *Fluidised Bed Combustion*, skraćeno FBC) se uobičajeno koristi kao efikasan način izgaranja nekonvencionalnih krutih goriva koja je teško ili nemoguće upotrebljavati u PCC jedinicama. Ova tehnologija je u primjeni tek zadnjih 30 godina te omogućava stvaranje homogenijih uslova izgaranja te smanjenje udjela ugljikovog monoksida, sumporovih i dušikovih oksida u dimnim plinovima.[27] [28]

Postoje dva osnovna oblika koja se koriste u FBC – postrojenjima, ovisno o brzini plina.

Izgaranje u mjehuričastom fluidiziranom sloju (engl. *Bubbling Fluidised Bed Combustion* - BFBC) primjenjivo je samo za manje kotlove do 20 – 25 MWe koji se obično koriste za industrijsku proizvodnju. Primarni zrak upuhuje se na dnu kotla, kroz distribucijsku ploču koja se nalazi ispod sloja pijeska. Temperatura sloja održava se između 800 i 900 °C, promjer zrnaca pijeska je obično 1 mm dok brzina plina fluidizacije je između 1 i 2,5 m/s. Sekundarni zrak upuhuje se kroz otvore smješten u gornjem dijelu kotla.[27][25]

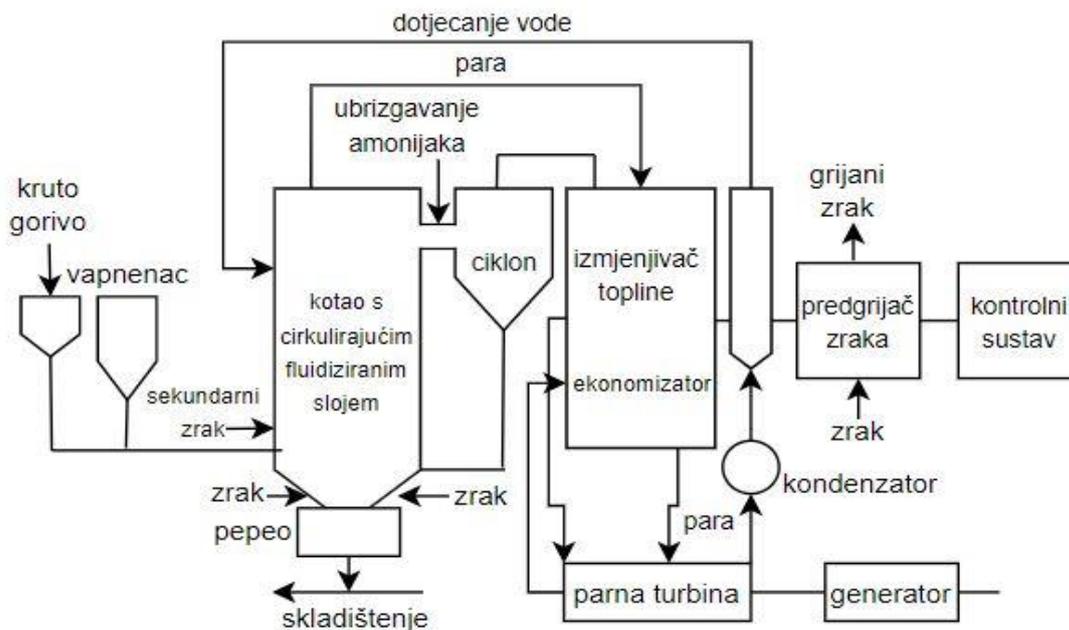


**Slika 3.10.** Kotao s izgaranjem u cirkulirajućem fluidiziranom sloju [28]

Izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (engl. *Circulating Fluidised Bed Combustion* – CFBC) je takva tehnologija u kojoj se zrnca pijeska podižu i zajedno s dimnim plinovima distribuiraju do separatora (najčešće ciklona) gdje se odvajaju i vraćaju u sloj (Slika 3.10.).[27]

Brzina primarnog zraka je od 5 do 10 m/s i promjer zrnca pijeska je od 0,2 do 0,4. To je zapravo vrsta toplinske petlje kroz koju čestice goriva mogu proći 10-50 puta sve dok se ne postigne potpuno izgaranje. [27]

Na slici 3.11. je prikazan primjer moderne elektrane koja koristi CFBC. Gorivo i vapnenac dovode se u kotao za izgaranje, dok se zrak (primarni i sekundarni) upuhuje da se smjesa fluidizira. Fluidizirana smjesa sagorijeva na relativno niskoj temperaturi i proizvodi toplinu. Niska temperatura sprječava stvaranje  $\text{NO}_x$  dok vapnenac apsorbira  $\text{SO}_2$  koji je nastao tijekom izgaranja. Trenutno je stanje tehnologije takvo da u CFBC kotlu više od 95% sumpora se može ukloniti upotrebom injekcije sorbensa. Toplina nastala izgaranjem zagrijava vodu u cijevima pretvarajući ju u visokoenergetsku paru koja se koristi za pogon parne turbine. Vrući dimni plin koji izlazi iz ciklona prolazi kroz pregrijač i ekonomizator, gdje se većina preostale topline ekstrahira. Ohlađeni plin prolazi kroz grijač prije nego uđe u elektrostatski taložnik gdje se uklanjaju sitne čestice. [29]



**Slika 3.11.** CFBC Postrojenje za proizvodnju električne energije [29]

Glavna prednost CFBC u odnosu na PCC ložišta je njihova sposobnost da rade s različitim vrstama i kvalitetama goriva. Ugljen s visokim sadržajem pepela predstavlja manji problem za kotlove u CFBC peći nego za PCC kotlove, zato što niska temperatura izgaranja sprečava taljenje pepela i stvaranje šljake na komponentama kotla.[25]

Iako povećava efikasnost izgaranja, zbog dodatne potrošnje električne energije za pogon ventilatora zraka te visokih kapitalnih troškova ova tehnologija još uvijek nije u potpunosti usvojena. Neki od primjera elektrana s razvijenom CFBC tehnologijom su Ahlstrom (165 MW) u Point Aconi, Kanada 1993 g. ( prva korisna CFBC u Sjevernoj Americi), Alstomova (250MW) u Garanneu, Francuska, 1995 g., Foster Wheeler (460 MW), Lagisza u Poljskoj.[27][28]

CFBC postrojenja imaju učinak izgaranja preko 99% (učinkovitost izgaranja je sposobnost peći da sagori ugljik), dok se učinkovitost za CFBC kotlove kreće od 75% do 92%. Nekoliko je čimbenika koji utječu na učinkovitost kotla, a jedan od glavnih je visok udio vlage u gorivima koja izgaraju.[29]

U usporedbi s PCC postrojenjima, iako svi koriste Rankineov parni ciklus, glavna razlika je u parametrima pare. Sve CFBC jedinice koje trenutno rade, osim Lagisza, imaju podkritične uvjete pare. Prva nadkritična CFBC jedinica puštena je u rad 2009. godine u postrojenju u Lagiszu

(Poljska). SC CFBC jedinica ima kapacitet od 460 MWe i izgara tvrdi ugljen. Operacija u prvoj godina bila je uspješna i postrojenje je ostvarilo neto učinkovitost od 43,3%. [29]

Nakon uspješnog rada prve komercijalne CFBC jedinice koja je započela 1979. u Finskoj, broj instalacija se naglo povećao u posljednjim desetljećima. CFBC tehnologija je pronašla primjenu u mnogim industrijskim procesima, neprestane su inovacije i napredak ove tehnologije, te je ona još uvijek u razvoju.

### 3.2.3. Nulta emisija

CCT tehnologije do sredine 1990-ih bile su najvećim dijelom usmjerene na prve tri razine tehnologija prikazane na slici 3.7. Nakon potpisivanja Kyoto protokola 1977. godine pozornost se skreće sa kontrole emisija čestica, sumporovih i dušičnih oksida te žive, na iskorištavanja i skladištenja ugljikovog dioksida. Cilj CCT projekata su tehnologije čije su emisije gotovo jednake nuli i čiji je fokus dekarbonizacija izgaranja ugljena.[5]

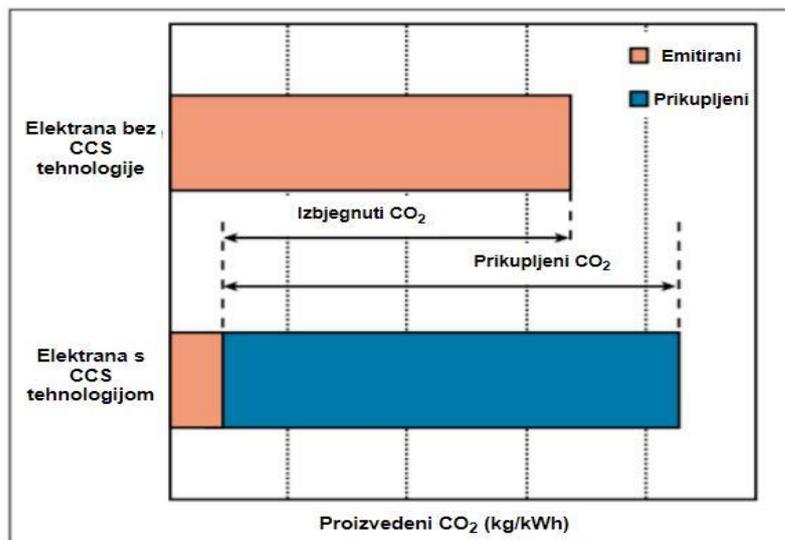
### 3.3. Hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (CCS)

Hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida (engl. *Carbon Capture and Storage*, skraćeno CCS) je tehnologija koja znatno smanjuje emisije stakleničkih plinova od kontinuirane uporabe fosilnih goriva i ključni je dio prelaska na budućnost proizvodnje energije s gotovo nultom emisijom CO<sub>2</sub>. Smanjenje emisija CO<sub>2</sub> u atmosferi ovom tehnologijom ovisi o udjelu uhvaćenog CO<sub>2</sub>. Trenutno dostupne CCS tehnologije, uzimajući u obzir sigurno skladištenje CO<sub>2</sub>, uspijevaju smanjiti emisije CO<sub>2</sub> za oko 80-90% u odnosu na elektrane koje nemaju ugrađen CCS sustav.[30]

Prema [30] predviđa se da su globalne godišnje emisije CO<sub>2</sub> od 29 do 44 Gt u 2020. godini, te da će u 2050. godini biti od 23 do 84 GtCO<sub>2</sub> godišnje. Potencijal hvatanja CO<sub>2</sub> procjenjuje se na godišnjih od 2,6 do 4,9 GtCO<sub>2</sub> do 2020. godine (što je 9-12% emisija u 2020.) i od 4,7 do 37,5 GtCO<sub>2</sub> do 2050. godine (što je 21-45% emisija u 2050.)

Međutim, sustavi za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida zahtijevaju značajne količine energije za njihov rad (10-40% više u odnosu na elektrane bez CCS sustava), od čega većina energije otpada na kompresiju i hvatanje. Veća količina energije znači i veću potrošnju goriva za proizvodnju svakog kWh električne energije (oko 24-40% više goriva u odnosu na elektrane bez CCS sustava) te povećanje emisija CO<sub>2</sub> i krutog otpada u okoliš. Slika 3.12. prikazuje povećanu emisiju CO<sub>2</sub> u elektranama koje su opremljene CCS tehnologijom u odnosu na one bez CCS tehnologije, te udio prikupljenog CO<sub>2</sub>. Povećana proizvodnja CO<sub>2</sub> rezultira gubitkom

učinkovitosti elektrane, a dodavanje ove tehnologije povećava trošak proizvodnje električne energije za čak 40-85%. [30]



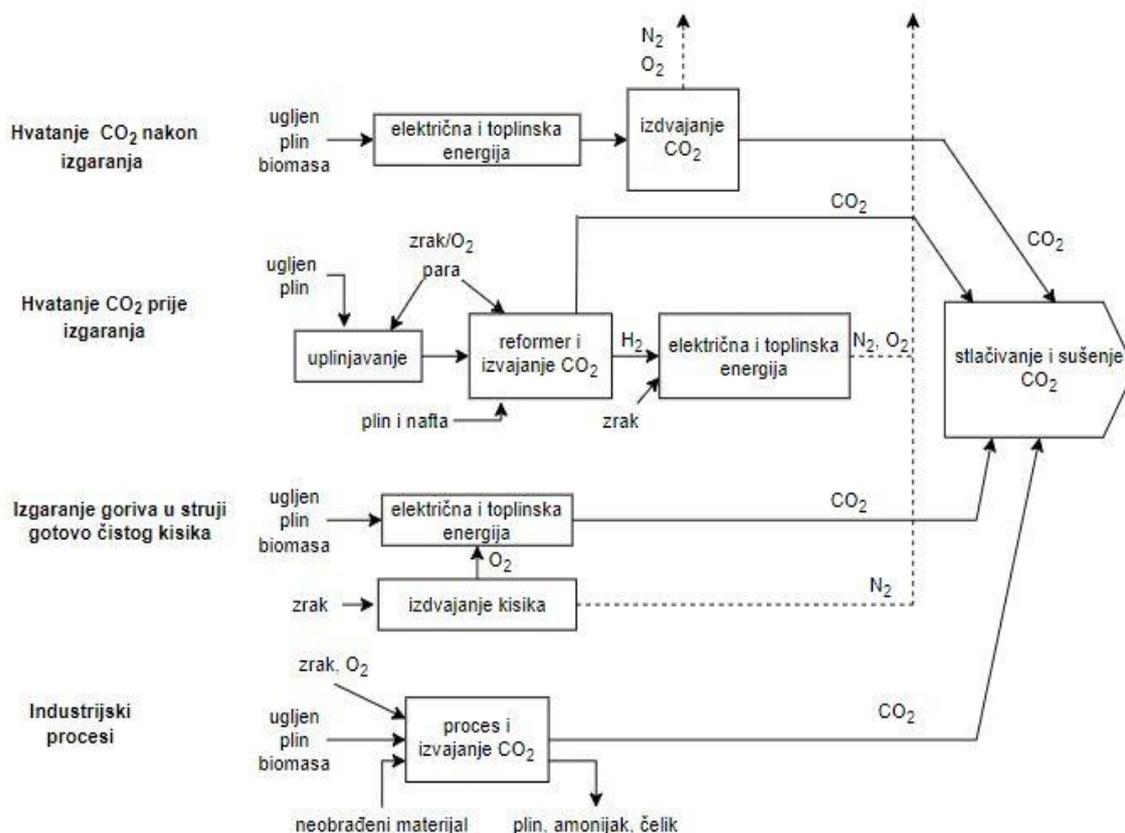
**Slika 3.12.** Povećana emisija  $\text{CO}_2$  u elektranama s CCS sustavom [30]

CCS postupak se sastoji od tri glavna koraka, prikupljanje ugljikovog dioksida, njegovog transporta do mjesta skladištenja i dugotrajne izolacije od atmosfere u geološkim formacijama.

### 3.3.1. Prikupljanje ugljikovog dioksida

Emisije ugljikovog dioksida uglavnom nastaju izgaranjem fosilnih goriva i biomase u industrijskom, građevinskom, transportnom i proizvodnom sektoru energije. Osim toga nastaju iz izvora koji ne izgaraju, kao što su industrijski procesi, koji uključuju preradu prirodnog plina, proizvodnju vodika, kemikalija u tekućem stanju, čelika i cementa.

Četiri su osnovna sustava za hvatanje  $\text{CO}_2$ , hvatanje nakon izgaranja (engl. *Post-combustion capture*), hvatanje prije izgaranja (engl. *Pre-combustion capture*), hvatanje ugljikovog dioksida pri izgaranju u struji gotovo čistog kisika (engl. *Oxy-fuel combustion capture*) i hvatanje iz industrijskih procesnih tokova. (Slika 3.13.)

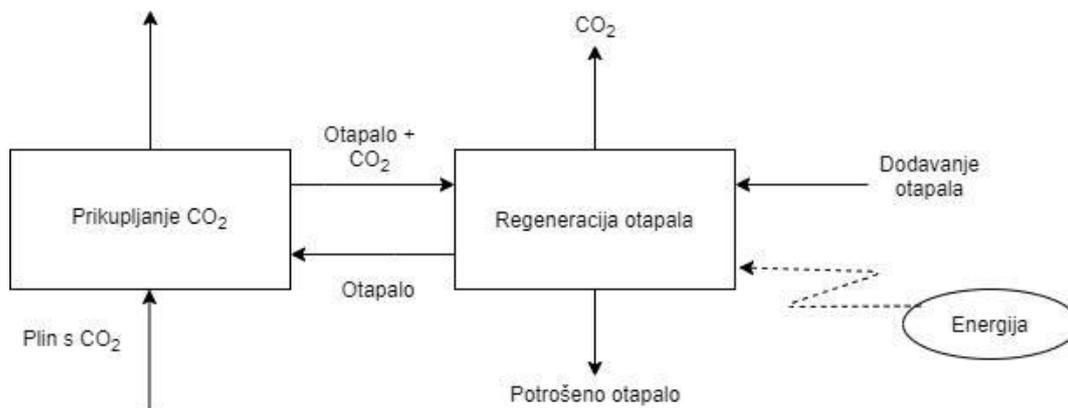


Slika 3.13. Sustav hvatanja CO<sub>2</sub> [30]

**Prikupljanje ugljikovog dioksida iz industrijskih procesnih tokova** podrazumijeva pročišćavanje prirodnog plina i proizvodnju sintetičkog plina koji sadrži vodik za proizvodnju alkohola i amonijaka. CO<sub>2</sub> se iz industrijskih procesa, koji su izvor CO<sub>2</sub>, kao što su proizvodnja cementa i čelika, te fermentacijski postupci za hranu i piće može uhvatiti korištenjem tehnika koje se uobičajeno koriste za hvatanje CO<sub>2</sub> prije i nakon izgaranja, te za izgaranje u čistom kisiku. [30]

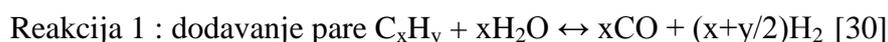
**Prikupljanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja** je odvajanje ugljikovog dioksida od dimnih plinova, koji su nastali izgaranjem fosilnih goriva i biomase. Umjesto da se ispuštaju izravno u atmosferu, dimni plinovi prolaze kroz opremu koja odvaja većinu CO<sub>2</sub>. Nakon čega se CO<sub>2</sub> odvodi u jedinicu za stlačivanje i sušenje, kako bi se dobio relativno čist i suh CO<sub>2</sub> za transport i pohranjivanje, a ostatak dimnog plina se izbacuje u atmosferu. U ovakvim sustavima odvijaju se apsorpcijski procesi temeljeni na kemijskim otapalima. Odvajanje se postiže dovođenjem plina koji sadrži CO<sub>2</sub> u bliski kontakt s tekućim upijajućim ili čvrstim otapalom koje može uhvatiti CO<sub>2</sub>. Na slici 3.14. prikazana je opća shema, otapalo s uhvaćenim CO<sub>2</sub> je transportirano do druge posude, gdje se CO<sub>2</sub> oslobađa nakon zagrijavanja (regeneracije), pada tlaka ili bilo koje

druge promjene. Otapalo se nakon regeneracije vraća nazad da sakupi još CO<sub>2</sub> u kružnom procesu.[30][31]



Slika 3.14. Separacija s otapalom, [30]

**Prikupljanje ugljikovog dioksida prije izgaranja** obično uključuje reakciju primarnog goriva s kisikom i zrakom i/ili parom stvarajući sintetički plin, koji se uglavnom sastoji od ugljikovog monoksida i vodika. Ugljikov monoksid reagira s parom u katalitičkom reaktoru da bi se dobio CO<sub>2</sub> i vodik. CO<sub>2</sub> se zatim odvoji od plinske smjese, obično fizičkim ili kemijskim postupkom apsorpcije, što rezultira gorivom koje je bogato vodikom i koje se može koristiti u mnogim primjenama, kao što su kotlovi, peći, plinske turbine i gorive ćelije. Dakle dva su glavna koraka, dodavanje pare (Reakcija 1) ili dodavanje kisika (Reakcija 2) na primarno gorivo. Posljednji postupak se često naziva "djelomična oksidacija" kada se primjenjuje na plinovita i tekuća goriva i plinifikacija kada se primjenjuje na kruto gorivo, ali načela su ista. [30][31]



Nakon toga slijedi reakcija za pretvaranje CO u CO<sub>2</sub> dodavanjem pare (reakcija izmjene topline)  $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$  [30]

Konačno, CO<sub>2</sub> se uklanja iz smjese CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>. Koncentracija CO<sub>2</sub> prije razdvajanja CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> može biti u rasponu od 15-60% (suha osnova) i ukupni tlak je obično 2-7 MPa. Odvojeni CO<sub>2</sub> je tada dostupan za skladištenje.[30]

**Prikupljanje ugljikovog dioksida pri izgaranju u struji čistog kisika** je mogućnost izdvajanja CO<sub>2</sub> iz dimnih plinova nakon izgaranja fosilnih goriva s gotovo čistim kisikom umjesto s zrakom. To je postupak koji eliminira dušik iz izgaranja dimnih plinova spaljivanjem goriva u

čistom kisiku ili mješavini gotovo čistog kisika i dimnih plinova bogatih s CO<sub>2</sub>. Nastali dimni plin iz kotla sadrži uglavnom vodenu paru i CO<sub>2</sub> što olakšava njegovo izdvajanje. Nakon hlađenja, zbog kondenzacije vodene pare, sadrži oko 80 - 90 % CO<sub>2</sub>, što ovisi o korištenom gorivu. Dalje se izravno može voditi na stlačivanje i sušenje, nakon čega se transportira na skladištenje. Ako gorivo izgara u čistom kisiku, temperatura izgaranja je pretjerano visoka (oko 3500 °C). Međutim postrojenja za proizvodnju pare kao što su PCC kotlovi zahtijevaju niže temperature izgaranja. Kako bi se to ublažilo, dimni plinovi koji su bogati s CO<sub>2</sub> se recikliraju. Prilikom sagorijevanja goriva s mješavinom gotovo čistog kisika i recikliranih dimnih plinova ili pare bogate CO<sub>2</sub> snižava se temperatura izgaranja, te ti dodaci kisiku zamjenjuju dušik. Iako su elementi ove tehnologije primjenjivi u uporabi za taljenje aluminija, željeza, čelika i stakla, za hvatanje CO<sub>2</sub> ona još uvijek nije na komercijalnoj razini. [20]

### **3.3.2. Transport ugljikovog dioksida**

Ugljikov dioksid može se transportirati u tri stanja, kao plin, tekućina i kruta tvar. Plinoviti i tekući CO<sub>2</sub> obično se dopremaju spremnicima, cjevovodima i brodovima. [30]

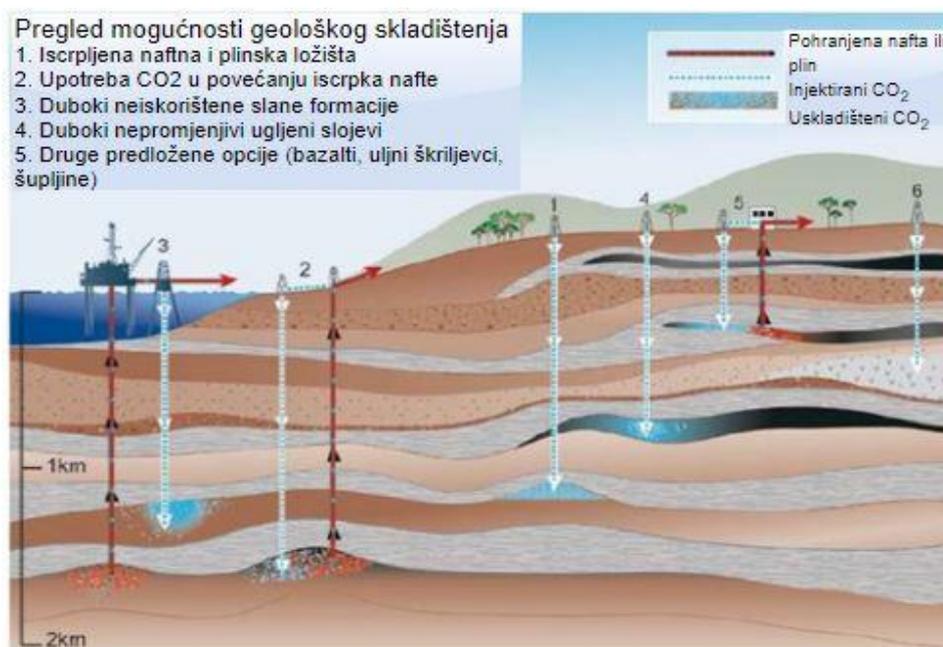
Cjevovodi su najzastupljenije sredstvo za prijevoz CO<sub>2</sub> i to je tehnologija koja je zrela za tržište. Prijevoz brodovima se također odvija, ali u puno manjem opsegu.

Zbog velikog obujma plina pod atmosferskim tlakom, veličine ovih objekata su vrlo velike. Kako bi se smanjio volumen plina, on se komprimira i takav se najčešće prenosi cjevovodima. Volumen se još može smanjiti ukapljivanjem i očvršćivanjem. Ukapljivanje je osnova za prijevoz plina brodovima, dok očvršćivanje zahtjeva više energije i nije ekonomski isplativo. [30]

### **3.3.3. Skladištenje ugljikovog dioksida**

Ugljikov dioksid može se pohraniti na dva glavna načina, u dubokim geološkim formacijama i duboko u oceanu. Geološke formacije trenutno su najzastupljeniji oblik pohranjivanja CO<sub>2</sub>.

**Za geološku pohranu CO<sub>2</sub>** prikladna mjesta su naftna i osiromašena plinska polja, duboki slojevi ugljena i duboke slane formacije. Podzemna geološka pohrana moguća je na kopnu kao i u priobalnim mjestima kojima se pristupa cjevovodima s obale ili s priobalnih platformi (Slika 3.15.). [30]



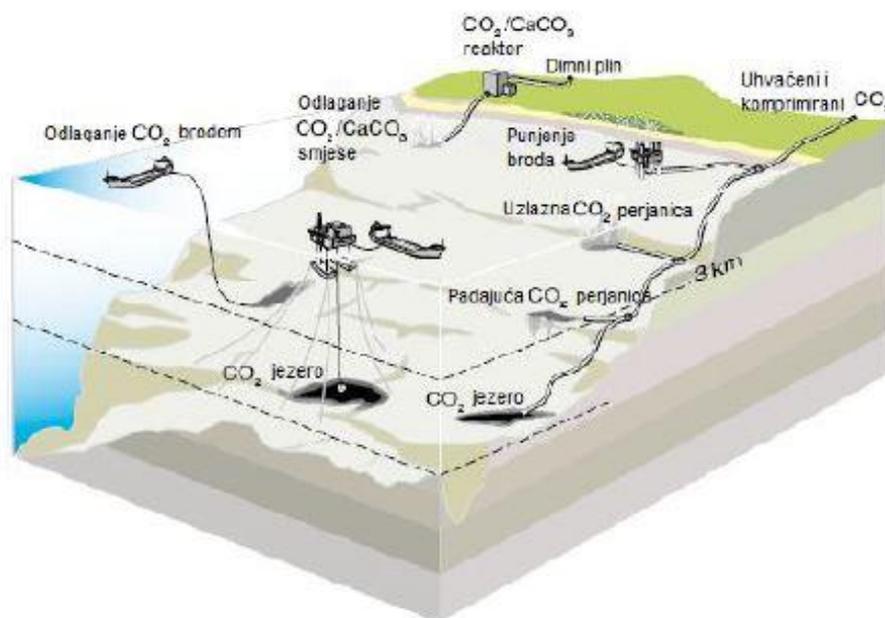
**Slika 3.15.** *Mogućnosti skladištenja CO<sub>2</sub> u dubokim geološkim formacijama [30]*

Za geološku pohranu, CO<sub>2</sub> se prvo mora stlačiti, obično do stanja guste tekućine poznate pod nazivom „nadkritični CO<sub>2</sub>“. Ovisno o brzini porasta temperature s dubinom (geotermalni gradijent) gustoća CO<sub>2</sub> se povećava s dubinom. Očekivana minimalna dubina je 800 m, gdje su temperatura i tlak okoline dovoljno visoki da bi se CO<sub>2</sub> održao u tekućem ili nadkritičnom stanju. Nadkritični CO<sub>2</sub> se potom izravno ubrizgava u sedimentne stijene. Razni fizički, npr. nepropusne pokrovne stijene, i geofizički mehanizmi za hvatanje sprječavaju uskladišteni CO<sub>2</sub> da migrira iz akumulacijskog spremnika. Ovaj postupak provodi se već dugi niz godina posebno u procesu poboljšanog iskorištavanja nafte, skraćeno EOR (engl. *Enhanced Oil Recovery*). Glavni nedostatak primjene ovog načina skladištenja je njegova ograničenost kapaciteta.[32][33]

Neiskorišteni ugljeni slojevi, odnosno ugljen koji se nalazi preduboko i težak je za rudnike, koristi se za skladištenje CO<sub>2</sub>. Ako je taj ugljen dovoljno propustan CO<sub>2</sub> se adsorbira u njega, a u procesu apsorpcije oslobađa metan koji se dalje može koristiti (poboljšani metan iz ugljenog dna, skraćeno ECMB, engl. *Enhanced Coal Bed Methane*).[33]

Još jedan način skladištenja CO<sub>2</sub> je duboko u stijenama koje stvaraju visoko koncentrirani slani sloj. Njihova glavna prednost je potencijalni kapacitet skladištenja. Naime slani sloj koji stvaraju, prisutan je u stijenskim porama i zajedno djeluju poput ogromne spužve. Očekuje se da ovim metodama skladištenja CO<sub>2</sub> može biti zarobljen milijunima godina, zadržavajući 99% ubrizganog CO<sub>2</sub> tijekom 1000 godina.[33]

Drugi način **skladištenja CO<sub>2</sub> je duboko u oceanima**, međutim ova metoda ima loš utjecaj na okoliš. Slika 3.16. prikazuje različite tehnologije koje su previđene da omoguće skladištenje CO<sub>2</sub> u oceanu. One uključuju pohranu relativno čistog CO<sub>2</sub> koji je uhvaćen i stlačen. CO<sub>2</sub> transportira se brodovima ili duboko morskim cijevima, nakon čega se izravno ubrizgava u ocean i deponira do morskog dna, gdje se taloži. Ova metoda pohranjivanja duboko u ocean, izolirala bi većinu CO<sub>2</sub> od atmosfere nekoliko stoljeća, ali uzimajući u obzir duži vremenski period koncentracije CO<sub>2</sub> u oceanu i atmosferi gotovo da bi se izjednačile. [30]



**Slika 3.16.** Metode skladištenja CO<sub>2</sub> u oceanu [30]

Unošenje CO<sub>2</sub> u ocean dovelo je do poremećaja kemijskog okoliša prvenstveno u površinskim vodama, te njegove velike koncentracije ubijaju oceanske organizme. CO<sub>2</sub> reagirajući s vodom, stvara ugljičnu kiselinu, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> koja povećava kiselost oceanske vode. Učinkovitost ove tehnologije ovisi o tom koliko dugo će CO<sub>2</sub> ostati izoliran, a njegov utjecaj na atmosferu je neizbježan.[30]

CCS je ključna tehnologija za ispunjavanje zahtjeva iz Pariškog sporazuma, da se globalno zagrijavanje ograniči na manje od 2 °C. Međutim, trenutno razvijena tehnologija je skupa.

Primjena ove tehnologije uvelike ovisi o troškovima i ekološkim problemima u kojim se nalazi zemlja. U većini CCS sustava, troškovi hvatanja ugljikovog dioksida čine najveću komponentu troškova, od 15 do 75 \$/tCO<sub>2</sub>, na transport otpada od 1 do 8 \$/tCO<sub>2</sub> i na geološko skladištenje od 0,5 do 8 \$/tCO<sub>2</sub>, dok je skladištenje duboko u oceanima puno skuplje, od 5 do 30 \$/tCO<sub>2</sub>. [30]

#### 4. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA TERMOELEKTRANA S CCS TEHNOLOGIJOM

U ovom postupku analize cilj je na osnovi izračuna i dobivenih numeričkih rezultata odrediti da li dodavanje CCS sustava u termoelektrane donosi više koristi ili gubitaka.

Procjena isplativosti izgradnje elektrane bazira se na srednjoj aktualiziranoj cijeni proizvedenog kWh (n.j.) koja se računa pomoću metode ekvivalentne sadašnje vrijednosti. [34]

$$c = LCOE = \frac{\sum_{k=-j}^n I_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TP_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TG_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TE_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TD_k \cdot (1+i)^{-k}}{\sum_{k=1}^n W_k \cdot (1+i)^{-k}}$$

Gdje je:  $c$  – srednja aktualizirana cijena proizvedenog kWh (n.j.),

$LCOE$  – engl. *Levelized Cost Of Electricity* – aktualizirani trošak

$I_k$  – investicija (troškovi izgradnje) izvršena u  $k$ -toj godini (n.j.),

$TP_k$  – troškovi pogona (rada i održavanja), u  $k$ -toj godini (n.j.),

$TG_k$  – nabavni troškovi za gorivo u  $k$ -toj godini (n.j.),

$TE_k$  – (eksterni) troškovi emisije ( $CO_2$ ) u  $k$ -toj godini (n.j.),

$TD_k$  – troškovi dekomisije postrojenja u  $k$ -toj godini (n.j.),

$W_k$  – energija proizvedena u  $k$ -toj godini (kWh),

$i$  – diskontna stopa

$j$  – godine protekle između početka davanja i puštanja postrojenja u pogon,

$n$  – životni vijek. [34]

Ovakav pristup omogućava usporedbu tehnologije koja se proučava ( termoelektrane s ugrađenom CCS tehnologijom) s referentnom tehnologijom (termoelektrane bez CSS tehnologije).

Agencija za nuklearnu energiju (engl. *Nuclear Energy Agency*, skraćeno NEA) i Međunarodna energetska agencija (engl. *International Energy Agency*, skraćeno IEA) izradili su osmi izvještaj u nizu u kojem su prikazani troškovi proizvodnje električne energije. Izdanje je iz 2015. godine (izvještaj iz 2020. godine još uvijek nije dostupan) i temelji se na analizi podataka za 181 postrojenje.[35]

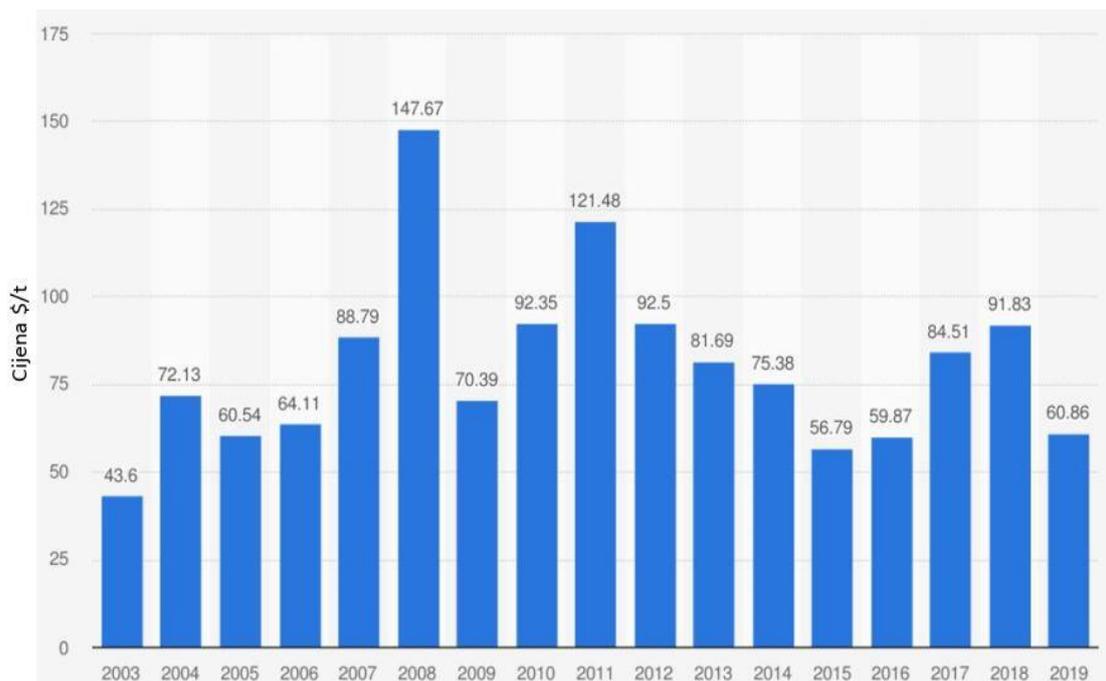
Osnovni tehnički i ekonomski parametri koji su uzeti u proračunu :

- diskontne stope: 7% i 10%,
- očekivani ekonomski životni vijek elektrane na ugljen: 40 godina,
- prosječno opterećenje temeljnih elektrana: 85%,
- eksterni (vanjski) troškovi vezani uz emisije  $CO_2$ : 30 \$/t. [35]

#### 4.1. Termoelektrane na ugljen bez sustava za prikupljanje CO<sub>2</sub>

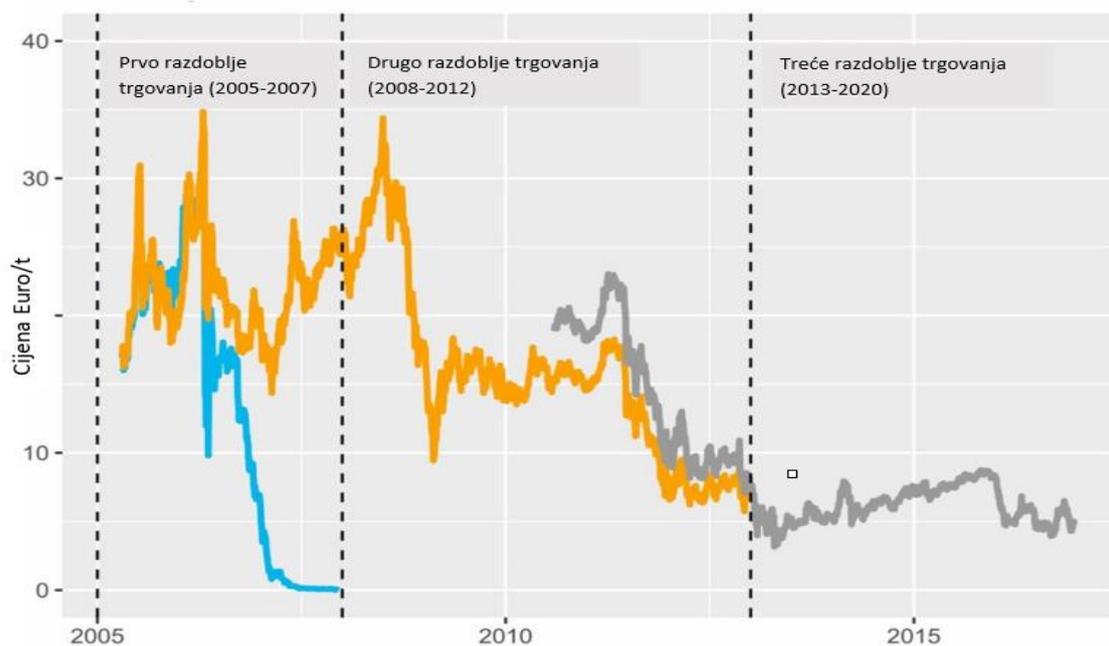
Za procjenu isplativosti izgradnje elektrane u obzir su uzeta dva slučaja: različite cijene ugljena i različite cijene emisija CO<sub>2</sub>. U ovom slučaju proračun je izveden za termoelektranu na ugljen bez CCS tehnologije čija je instalirana snaga 772 MWe, to je prosječna snaga termoelektrana prema [35]. Za referentni slučaj, s kojim će biti uspoređeni svi ostali slučajevi, uzet je faktor iskorištenja vršne snage 85% [35], što znači da elektrana godišnje može proizvesti 5 748 312 MWh energije. Ovaj podatak predstavlja  $W_k$  u LCOE formuli. Zbog dostupnosti podataka umjesto investicijskih troškova ( $I_k$ ) za proračun LCOE uzeti su konstrukcijski (overnight) troškovi. To su troškovi koji uključuju izravne troškove gradnje i troškove prije gradnje, kao npr. licenciranje mjesta, neizravne troškove kao što su administrativni troškovi, te troškove zbog nepredviđenih okolnosti.[35] Od investicijskih troškova se razlikuju samo po tom što ne obuhvaćaju kamatnu stopu tijekom izgradnje. Prosječan konstrukcijski trošak za termoelektranu na ugljen je 2264 \$/kWe [35], što je ukupno za ovu termoelektranu 1,74 milijarde \$. Troškovi rada i održavanja (Q&M) podijeljeni su na fiksne i varijabilne troškove. Fiksni troškovi iznose 34 542 \$/MWe, a varijabilni 3,4 \$/MWh. [35] Ukupni troškovi rada i održavanja mogu se prikazati kao njihov zbroj, te iznose 8,039 \$/MWh. Troškovi dekomisije postrojenja (uključuju uklanjanje objekta i raščišćavanje prostora) iznose 5% konstrukcijskih troškova [35], što je 0,38 \$/MWh.

Slika 4.1. prikazuje cijene ugljena u dolarima po toni od 2003. do 2019. godine. Vidljivo je da cijena ugljena stalno varira, 2008. godine iznosila je čak 147,67 \$/t za vrijeme krize. Međutim svijet se oporavio, ali na snagu stupaju obnovljivi izvori i ulaganja u tehnologije čistog ugljena, zbog čega nije realno očekivati da će ugljen više ikada postići tu cijenu. Zato su za usporedbu povrata kumulativne investicije uzete tri razine cijena ugljena promatrajući zadnjih 10 godina, koje predstavljaju minimalnu, maksimalnu i srednju vrijednost i gdje svaka od njih zahtjeva posebnu analizu. Za referentni scenarij pretpostavljeno je da je to 75\$/t. Energetska vrijednost ugljena iznosi 25 MJ/kg [36], učinkovitost pretvorbe goriva u električnu energiju za promatranu termoelektranu iznosi 45% [35]. Uzimajući u obzir ta dva podatka za proizvodnju jednog MWh potrebno je 0,32 tone ugljena ili izraženo u dolarima 24 \$/MWh.



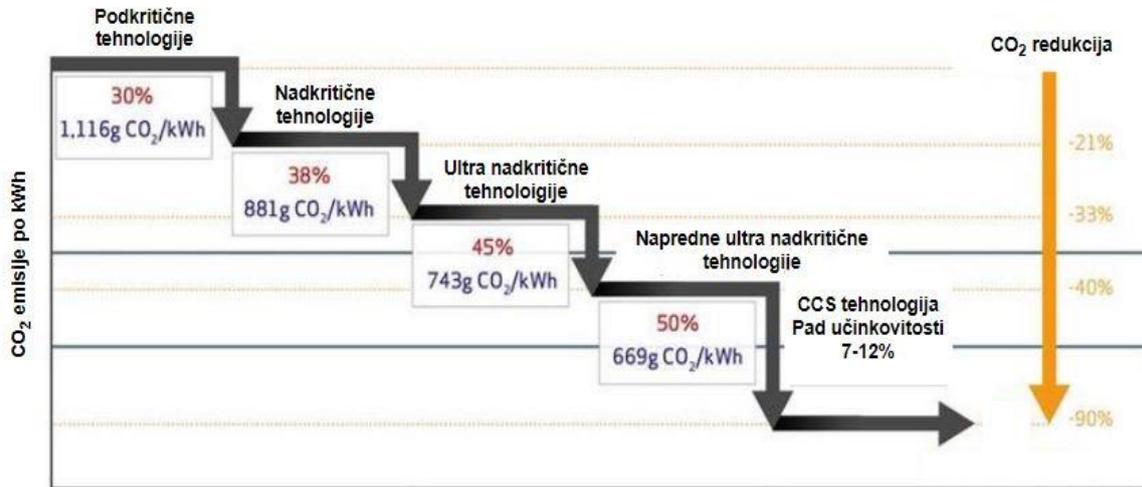
**Slika 4.1.** Cijena ugljena u sjeverozapadnoj Europi od 2003 do 2019 u dolarima po toni [37]

Za proračun LCOE osim cijene goriva (ugljena) bitna je i cijena emisija CO<sub>2</sub>. Iz Slike 4.2. se može vidjeti da kao i cijena ugljena, cijena emisija CO<sub>2</sub> varira iz godine u godinu. Slika 4.2. prikazuje cijenu emisija CO<sub>2</sub> u eurima po toni, pa zbog razloga stalnih varijacija za usporedbu povrata kumulativne investicije su uzete tri razine cijena, od kojih je za referentni scenarij uzeto 30 dolara po toni emitiranog ekvivalentna CO<sub>2</sub>. [35]



**Slika 4.2.** Cijena CO<sub>2</sub> u eurima po toni od 2005 do 2016 [38]

Emisije CO<sub>2</sub> prema [39] iznose 743 g/kWh što se može vidjeti i iz slike 4.3. Uzimajući u obzir da je jedna tona emisija CO<sub>2</sub> 30\$, dobije se da cijena emitiranog ekvivalentna CO<sub>2</sub> iznosi 22,29 \$/MWh.



Slika 4.3. Emisije CO<sub>2</sub> [39]

Uvrštavanjem svih podataka u LCOE formulu za različite diskontne stope dobiva se cijena proizvodnje energije po 1 MWh. Rezultati su vidljivi u tablici 4.1.

Tablica 4.1. LCOE za dvije različite diskontne stope

Pregled podataka za termoelektranu na ugljen (referentni podatci)		
Instalirana snaga [MW]		772
Konstruktivski troškovi [\$ /kW]		2264
Troškovi održavanja i pogona [\$ /MWh]		8,039
Troškovi goriva [\$ /MWh]		24
Vanjski troškovi (emisije CO <sub>2</sub> ) [\$ /MWh]		22,29
Troškovi dekomisije [\$ /MWh]		0,38
Učinkovitost pretvorbe goriva u električnu energiju [%]		45
Faktor iskorištenja vršne snage [%]		85
Očekivani životni vijek [god]		40
Trajanje izgradnje i puštanje u pogon [god]		4
LCOE [\$ /MWh]	Diskontna stopa 7%	77,516
	Diskontna stopa 10%	85,802

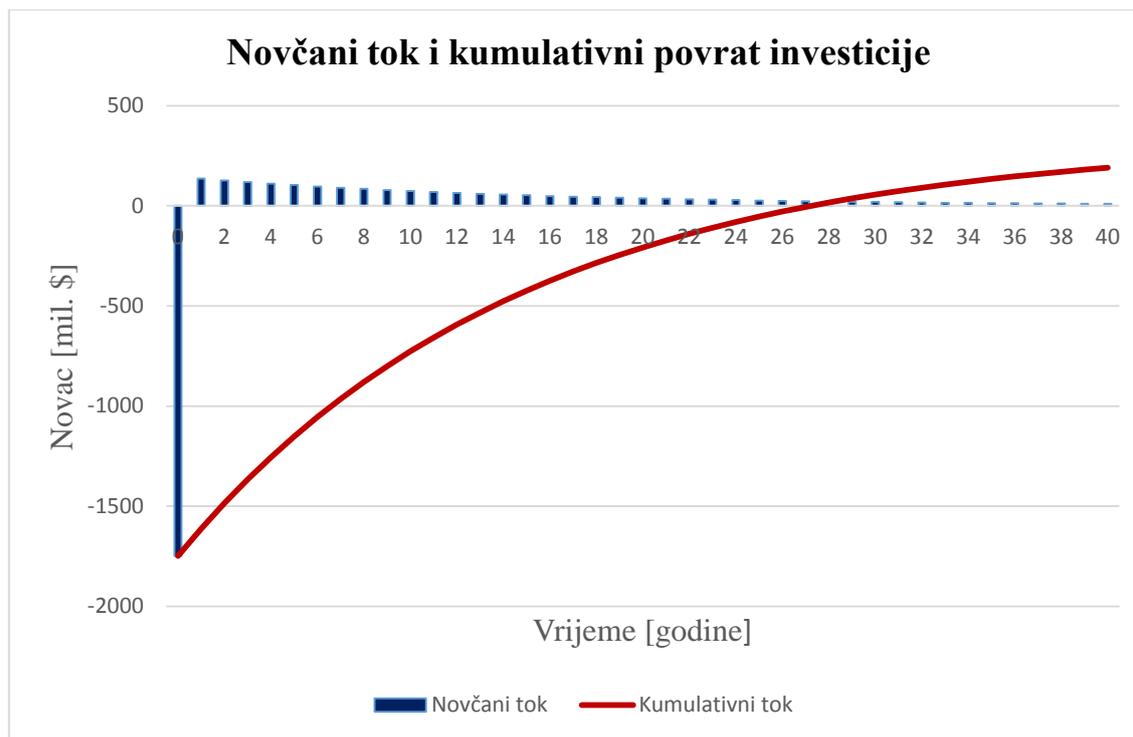
LCOE predstavlja troškove proizvodnje energije (rashodi), međutim drugi važan aspekt koji se mora uzeti u obzir jesu prihodi energetske tvrtke za pokrivanje njihovih troškova ulaganja. Prihodi predstavljaju dobit od prodaje električne energije. Tržište nije uvijek spremno financirati ulaganja, a cijene nisu uvijek dovoljne za pokrivanje troškova. Zato je važno istražiti cijene energije u odnosu na ulaganja, posebno u odnosu na LCOE koji obuhvaća sve kapitalne i operativne troškove tijekom životnog vijeka elektrane.

Cijena otkupa električne energije uzeta je s HEP-ovih stranica (Slika 4.4.). Ona iznosi 0,52 kn/kWh i odgovara cijeni plavog tarifnog modela za kategoriju kućanstvo. Pretpostavlja se da će cijena električne energije biti konstantna tijekom cijelog životnog vijeka elektrane. Za konverziju kuna u dolare korišten je kalkulator Hrvatske poštanske banke. Godišnji prihodi od prodaje električne energije iznose 459,86 milijuna dolara.

Kategorija		Tarifni model	Tarifni element					
			Radna energija			Radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za opskrbu
			JT	VT	NT			
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/kvarh]	[kn/mj]
Tarifne stavke								
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,46 (0,52)	-	-	-	-	7,40 (8,36)
		Bijeli	-	0,49 (0,55)	0,24 (0,27)	-	-	7,40 (8,36)
		Crveni	-	0,49 (0,55)	0,24 (0,27)	-	-	7,40 (8,36)
		Crni	0,19 (0,21)	-	-	-	-	0,40 (0,45)

**Slika 4.4.** Iznos tarifnih stavki za opskrbu kupaca kategorije kućanstvo [40]

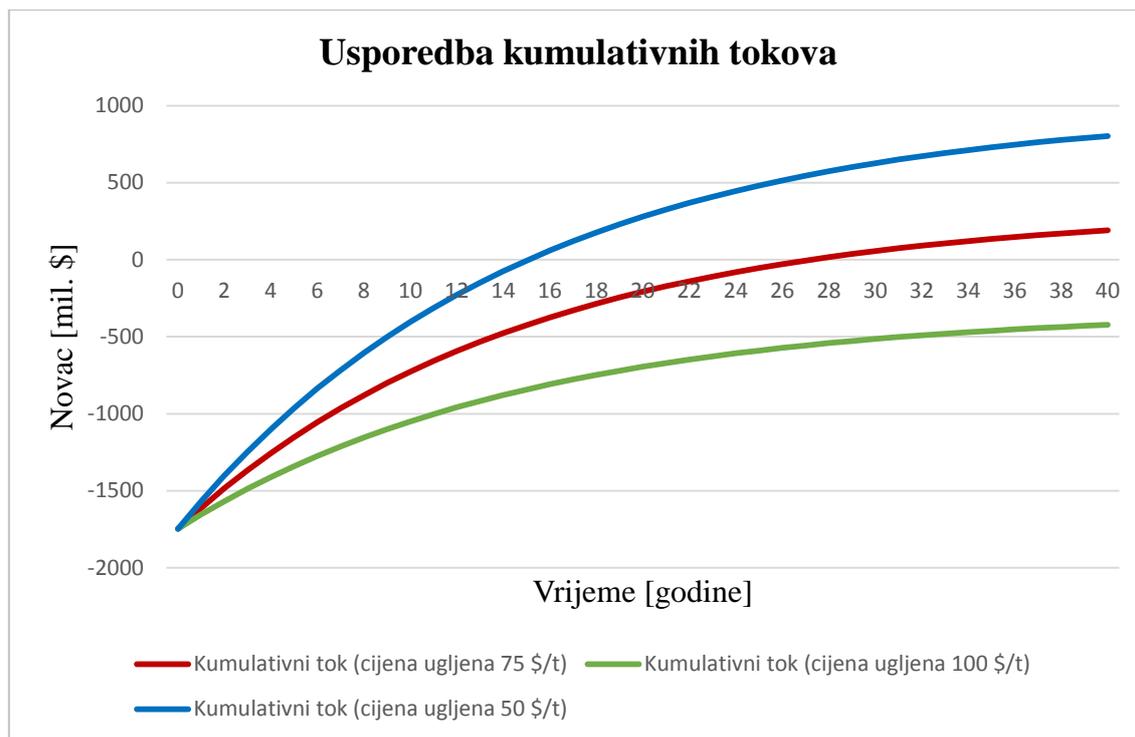
Za računanje povrata kumulativne investicije najprije nam treba godišnji novčani tok uz određenu diskontnu stopu. Odabrana diskontna stopa za sve slučajeve po kojima je rađeno je 7%. Novčani tok dobijemo kao razliku prihoda i rashoda. Slijede prikazani rezultati izračuna novčanog i kumulativnog toka. Slika 4.5. prikazuje referentni slučaj u kojem je cijena ugljena 75 \$/t i cijena emisija CO<sub>2</sub> 30 \$/t.



**Slika 4.5.** Kumulativni povrat investicije za referentni slučaj ( cijena ugljena 75 \$/t i cijena emisija CO<sub>2</sub> 30 \$/t)

Iz Slike 4.5. vidljivo je da je za referentni slučaj novčani tok negativan samo u nultoj godini (odnosno nulta godina predstavlja godine izgradnje termoelektrane, što je u ovom slučaju 4 godine) zbog konstrukcijskih troškova. Kumulativni povrat investicije moguć je nakon 28 godina, a izračunato je da je ukupna dobit nakon 40 godina rada elektrane 190,36 milijuna dolara.

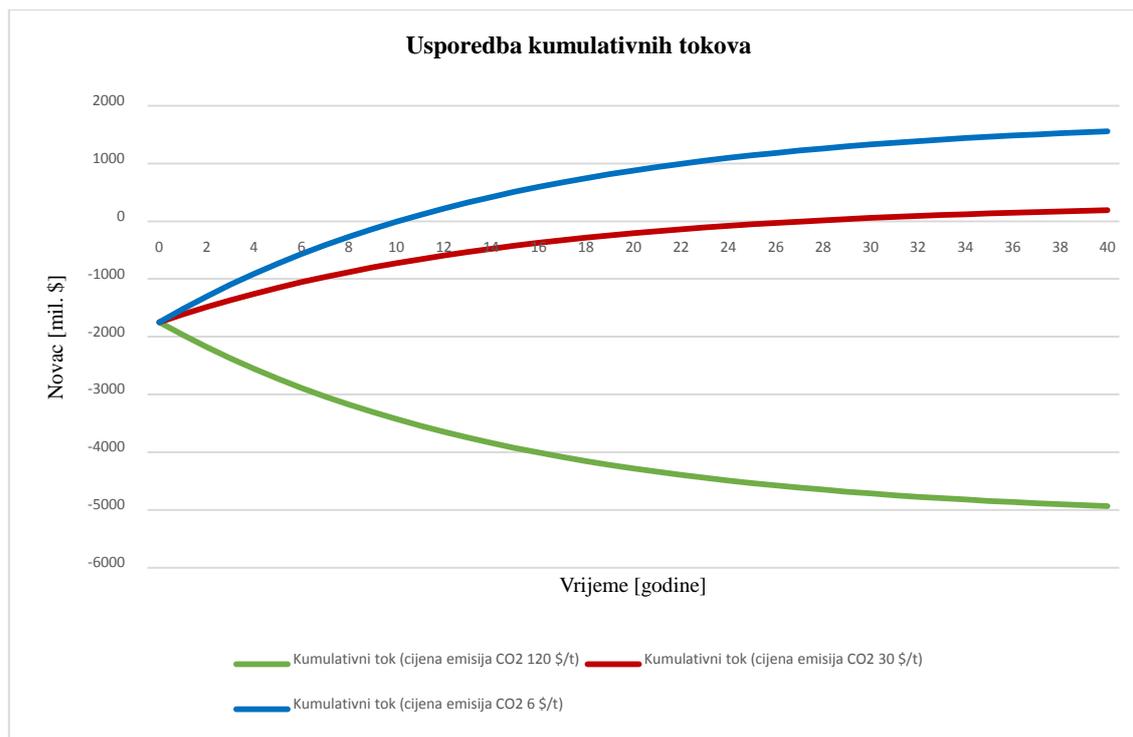
Kao što je već navedeno u radu, cijene ugljena stalno variraju, pa za usporedbu kumulativnih tokova korištene su tri vrijednosti cijena ugljena, referentna vrijednost 75 \$/t, minimalna vrijednost 50 \$/t i maksimalna vrijednost 100 \$/t. Slika 4.6. prikazuje usporedbe kumulativnih tokova za različite cijene ugljena.



**Slika 4.6.** Usporedba kumulativnih tokova za različite cijene ugljena

Iz Slike 4.6. je vidljivo da za referentni slučaj (75 \$/t) kumulativni povrat investicije je moguć nakon 28 godina. Za cijenu ugljena od 50 \$/t isplativost termoelektrane je već nakon 15 godina i ukupna dobit nakon 40 godina je 803, 44 milijuna dolara. Dok za cijenu ugljena od 100 \$/t elektrana svoju isplativost ne dostiže za vrijeme svog životnog vijeka i gubitci za tih 40 godina iznose 422, 71 milijuna dolara.

Kao što varira cijena ugljena isto tako varira i cijena emisija CO<sub>2</sub>. Po slici 4.2. pretpostavljeno je da je minimalna cijena 6 \$/t, referentna cijena prema [35] je 30 \$/t i maksimalna predviđena cijena u budućnosti je prema [41] 120 \$/t. Slika 4.7. prikazuje usporedbu kumulativnih tokova za različite cijene emisija CO<sub>2</sub>.



**Slika 4.7.** Usporedba kumulativnih tokova za različite cijene emisija CO<sub>2</sub>

Iz slike je vidljivo da za referentni slučaj (30 \$/t) kumulativni povrat investicije je moguć nakon 28 godina. Za cijenu emisija CO<sub>2</sub> od 6 \$/t isplativost termoelektrane je nakon 11 godina i ukupna dobit nakon 40 godina je 1,56 milijardi dolara. Dok za cijenu emisija CO<sub>2</sub> od 120 \$/t elektrana svoju isplativost ne dostiže za vrijeme životnog vijeka i ukupni gubici su 4,93 milijarde dolara.

## 4.2. Termoelektrane na ugljen sa sustavom za prikupljanje CO<sub>2</sub>

Kako bi utvrdili da li je dodavanje CCS tehnologije u termoelektrane isplativo ponovno računamo aktualizirani trošak za termoelektranu koja ima istu instaliranu snagu kao i termoelektrana bez CCS tehnologije, isti faktor iskorištenja vršne snage te isti životni vijek. Troškovi održavanja i pogona, troškovi goriva, troškovi emisija CO<sub>2</sub>, troškovi dekomisije i konstrukcijski troškovi se razlikuju za termoelektranu s CCS tehnologijom u odnosu na termoelektranu bez te tehnologije.

Učinkovitost pretvorbe goriva u električnu energiju za termoelektrane s CCS tehnologijom je u prosjeku za 7% niža nego bez te tehnologije, i kreće se od 30% do 39%. U ovom slučaju uzeto je da je toplinska učinkovitost 38%. [42] Konstrukcijski troškovi su u rasponu od 3223\$/kWe do 5811 \$/kWe, a medijan iznosi 3851 \$/kWe [42], što je ukupno 2,97 milijardi \$, odnosno čak

70% više nego bez CCS tehnologije. Emisije CO<sub>2</sub> za termoelektrane bez CCS sustava iznosile su 743 g/kWh, CCS tehnologija može reducirati 90% tih emisija. [42] Iz toga slijedi da je za ovaj slučaj uzeto da emisije iznose 74,3 gCO<sub>2</sub>/kWh. Kako ovaj proračun vrijedi za referentne vrijednosti, cijena CO<sub>2</sub> po toni je 30 \$, odnosno 2,229 \$/MWh. Troškovi dekomisije kao i u slučaju bez CCS tehnologije iznose 5% konstrukcijskih troškova [35], što je 0,646 \$/MWh. Troškovi pogona i održavanja su nešto veći zbog transporta i pohranjivanja ugljikovog dioksida, te prema podacima iz [42] oni iznose 12,701 \$/MWh. Toplinska učinkovitost termoelektrane s CCS tehnologijom je manja, pa za proizvodnju iste količine energije kao termoelektrana bez CCS tehnologije, treba veću količinu goriva. Uzimajući u obzir učinkovitost od 38% i energetska vrijednost ugljena od 25 MJ/kg ovakva termoelektrana treba 0,389 tona ugljena za proizvodnju jednog MWh, pa trošak goriva iznosi 29,175 \$/MWh.

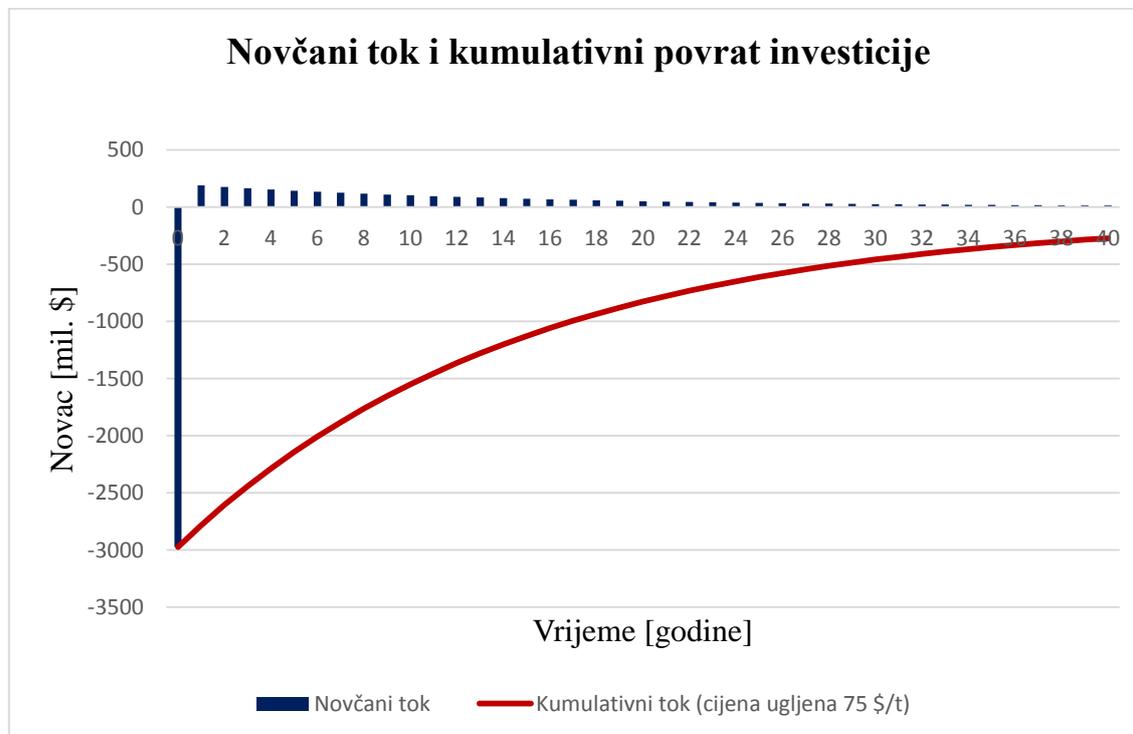
**Tablica 4.2.** LCOE za dvije različite diskontne stope

Pregled podataka za termoelektranu na ugljen s CCS tehnologijom (referentni podatci)		
Instalirana snaga [MW]		772
Konstrukcijski troškovi [\$/kW]		3851
Troškovi održavanja i pogona [\$/MWh]		12,701
Troškovi goriva [\$/MWh]		29,175
Vanjski troškovi (emisije CO <sub>2</sub> ) [\$/MWh]		2,229
Troškovi dekomisije [\$/MWh]		0,646
Učinkovitost pretvorbe goriva u električnu energiju [%]		38
Faktor iskorištenja vršne snage [%]		85
Očekivani životni vijek [god]		40
Trajanje izgradnje i puštanje u pogon [god]		4
LCOE [\$/MWh]	Diskontna stopa 7%	83,545
	Diskontna stopa 10%	97,639

Usporedbom dobivenih rezultata za termoelektranu na ugljen bez sustava za prikupljanje i skladištenje ugljikovog dioksida i rezultata za termoelektranu s CCS sustavom možemo procijeniti da li je dodavanje CCS tehnologije isplativo ili ne. Najprije smo za termoelektranu bez CCS sustava dobili da za proizvodnju jednog MWh energije po diskontnoj stopi od 7% treba 77,516 \$, dok za termoelektranu s CCS sustavom po istoj diskontnoj stopi treba 83,545 \$ za jedan MWh. Ako promotrimo i drugu diskontnu stopu, čiji izbor uglavnom ovisi o gospodarskoj situaciji, vidimo da manji LCOE odgovara termoelektranama bez CCS sustava. Manji LCOE

znači veću isplativost. Da se zaključiti da za slučaj u kojem su uzeti referentni podaci tehnologija proizvodnje električne energije s CCS sustavom nije isplativa.

Kumulativni povrat investicije i novčani tok za termoelektranu s CCS sustavom prikazani su na slici 4.8.

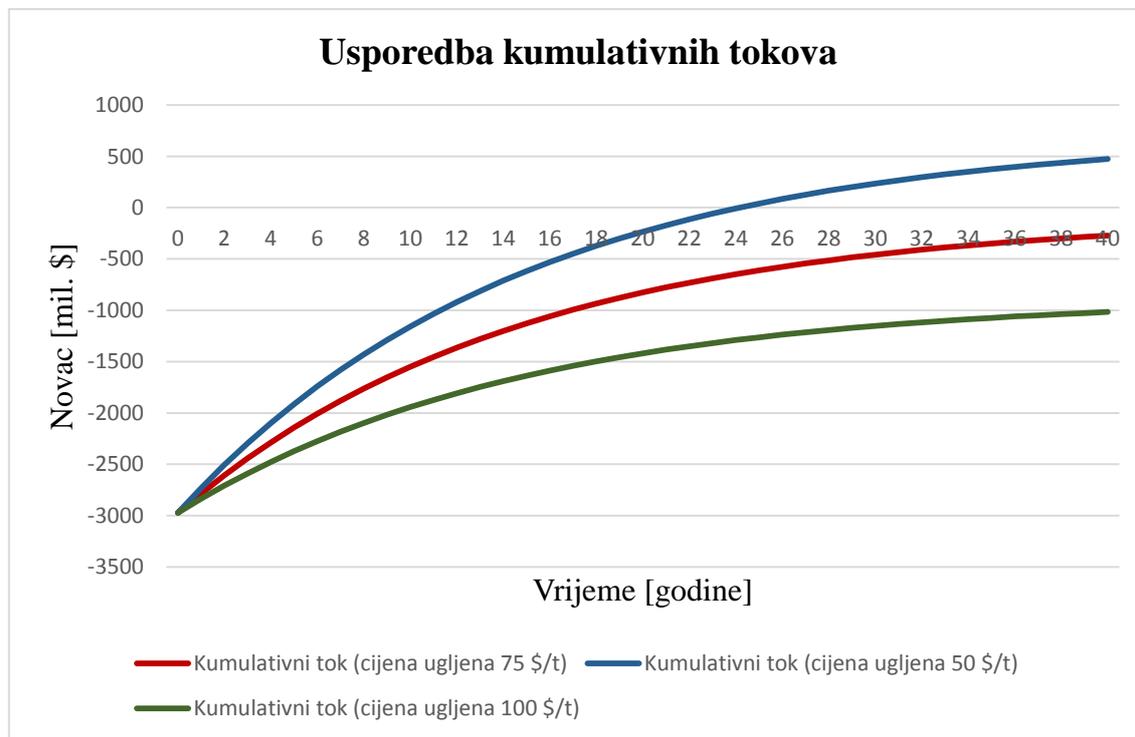


**Slika 4.8.** Kumulativni povrat investicije za referentni slučaj s CCS tehnologijom (cijena ugljena 75 \$/t i cijena emisija CO<sub>2</sub> 30 \$/t)

Iz slike 4.8. vidljivo je da je za termoelektranu opremljenu s CCS tehnologijom, gdje su u obzir uzeti podaci iz referentnog slučaja, povrat investicije nije ostvariv tijekom životnog vijeka. Razlog tomu su veliki početna ulaganja, odnosno konstrukcijski troškovi, te manja toplinska učinkovitost zbog koje je potrebna veća količina goriva, a samim tim je i trošak goriva veći. Pa je investiranje u ovakve elektrane upitno. Što je dokaz da dodavanje CCS tehnologije u termoelektrane nije isplativo. Ukupni gubitci su 271,671 milijun dolara.

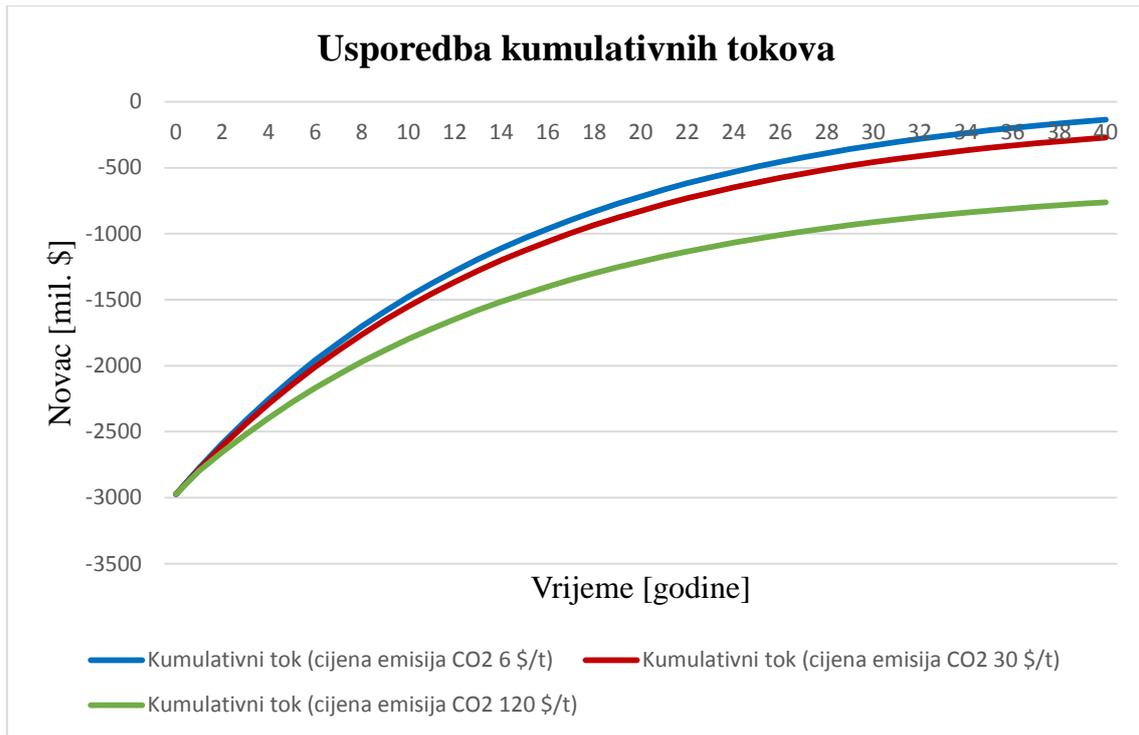
Kumulativni tok za različite cijene ugljena prikazan je na slici 4.9. Za cijenu ugljena od 100 \$/t i 75 \$/t elektrana ne dostiže svoju isplativost. U slučaju kada je cijena ugljena 100 \$/t gubitci su 1,02 milijardi dolara. Za cijenu ugljena od 50 \$/t kumulativni povrat investicije moguć je nakon 25 godina i ukupna dobit nakon 40 godina rada elektrane je 473,59 milijuna dolara. Uspoređujući dobivene rezultate s termoelektranom bez CCS sustava, ni u jednom od ova tri slučaja za različite cijene ugljena nije isplativo koristiti ovu tehnologiju. Što je i teorijski

pokrijepljeno time da za termoelektrane s ovom tehnologijom troškovi goriva su veći pa samim time i gubitci.



**Slika 4.9.** Usporedba kumulativnih tokova za različite cijene ugljena

Povrat investicije u slučaju različitih cijena emisija CO<sub>2</sub> za termoelektranu s CCS tehnologijom prikazan je na slici 4.10. Ni za jednu cijenu od analiziranih povrat investicije nije ostvariv. Gubitci kada je cijena emisija CO<sub>2</sub> 6 \$/t iznose 135,01 milijun dolara, dok za cijenu od 120 \$/t iznose 761,89 milijuna dolara. Uspoređujući ove gubitke s gubicima koji nastaju kod termoelektrana bez CCS tehnologije dolazimo do zaključka da za male cijene emisija CO<sub>2</sub> veću isplativost imaju termoelektrane bez CCS sustava. Međutim, za veće cijene emisija CO<sub>2</sub>, kako se predviđa da će biti u budućnosti, isplativije rješenje su termoelektrane s CCS tehnologijom. Nijedna elektrana, bila s CCS sustavom ili bez njega, ne ostvaruje kumulativni povrat investicije za vrijeme svog životnog vijeka u slučaju kada su cijene emisija CO<sub>2</sub> izrazito velike (120 \$/t). Ali termoelektrana s CCS sustavom ima manje gubitke (761,81 milijun dolara) od termoelektrane bez CCS sustava (4,93 milijarde dolara). Stoga, u budućnosti se s obzirom na isplativost ove tehnologije može očekivati njena veća zastupljenost.



**Slika 4.10.** Usporedba kumulativnih tokova za različite cijene emisija CO<sub>2</sub>

## 5. ZAKLJUČAK

Iako je ugljen fosilno gorivo čiji se resursi ne obnavljaju, smatra se da će imati glavnu ulogu u proizvodnji energije u bliskoj budućnosti. Emisije stakleničkih plinova koje nastaju kao posljedica izgaranja ugljena razlog su sve veće potrebe za primjenom tehnologija čistog ugljena i pročišćavanja dimnih plinova. Univerzalni je cilj proizvodnja energije uz niske emisije i visoku učinkovitost, a svaka od tehnologija koje su obrađene u ovom radu ispunjava te uvjete. Te tehnologije su još uvijek u fazi razvoja i izrade, te još uvijek nisu primjenjive u mjeri u kojoj bi trebale biti. Pretpostavlja se da će tehnologije kombiniranog ciklusa integriranog uplinjavanja, izgaranja u cirkulirajućem fluidiziranom sloju te hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida biti među najvažnijim tehnologijama čistog ugljena u budućnosti.

Temeljni zadatak ovog rada je tehno-ekonomska analiza termoelektrana sa i bez sustava za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida. Na temelju prikupljenih podataka analizirana je isplativost ulaganja u termoelektrane sa sustavima hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida, kao i za sustave bez te tehnologije. Isplativost proizvodnje električne energije prikazana je kroz kumulativni povrat investicije i novčanog toka, gdje su u obzir uzeti svi troškovi i prihodi kroz čitav životni vijek elektrane. Prihode je predstavljala dobit od prodaje električne energije, dok su troškovi ovisili o mnogo faktora, među kojima su glavnu ulogu imali trošak goriva i trošak emitiranog ekvivalentna ugljikovog dioksida.

Trošak za proizvodnju električne energije izračunava se preko formule za LCOE, odnosno to je aktualizirani trošak koji se računa za određenu diskontnu stopu, u ovom slučaju odabrane su diskontne stope su 7% i 10%. Cilj računanja LCOE je rezultat koji predstavlja cijenu proizvodnje električne energije po jednom MWh. Za prvi slučaj, termoelektranu bez sustava za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida, dobivena je cijena od 77,516 \$/MWh uz diskontnu stopu od 7%, dok je za drugi slučaj, termoelektrana s CCS tehnologijom, dobivena cijena 83,545 \$/MWh uz istu diskontnu stopu. Analizirajući te podatke da se zaključiti da ulaganje u CCS tehnologiju nije isplativo. Dodatak CCS tehnologije smanjuje učinkovitost elektrane za najmanje 7% , što znači veću potrošnju goriva, te povećava konstrukcijske troškove za 70%. Zato troškovi hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida znatno povećavaju trošak za proizvodnju električne energije.

Nakon računanja LCOE slijedi prikaz kumulativnog povrata investicije. U radu je analizirano više scenarija, a svi su se uspoređivali s referentnim. Mijenjale su se cijene ugljena i cijene emisija ugljikovog dioksida. Nakon analize utvrđeno je da je za termoelektranu bez CCS sustava povrat investicije moguć nakon 28 godina, a termoelektrana s CCS sustavom ne ostvaruje svoju

isplativost tijekom životnog vijeka, čime je potvrđeno da CCS tehnologiju nije isplativo ugrađivati. Jedini slučaj u kojem je CCS tehnologija isplativa jest za iznimno velike cijene ugljikovog dioksida koje se predviđaju u budućnosti. I u tom slučaju ona ne ostvaruje povrat investicije za vrijeme životnog vijeka, ali su gubitci puno manji nego za termoelektranu u koju nije ugrađen taj sustav.

Dakle, iako su elektrane s CCS sustavom ekološki prihvatljivije, trenutno su ekonomski neisplative. Njihova isplativost regulirana je cijenama ugljikovog dioksida i spremnosti ljudi na novčana ulaganja za očuvanje okoliša.

---

**LITERATURA**

- [1] Neveščanin, J.: Suvremena energetska politika i proizvodnja električne energije, Energetika, Gospodarstvo, Ekologija, 1999., str. 44.
- [2] Molak, B.: Stanje i perspektive energetike u svijetu (I dio), Energetika, Gospodarstvo, Ekologija, 1997., str. 71.
- [3] Lekić, Ž., Lekić, A.: Energija - Značaj i globalizacija <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=224971> (18.5.2020.)
- [4] Višković, A., Saftić, B., Živković, S.A.: Ugljen: sigurna energija, Zagreb: Graphis d.o.o., 2011., str. 20.
- [5] IEA, Clean Coal Technologies, Accelerating Commercial and Policy Drivers for Deployment, 2008., str. 5-28.
- [6] UNICEF, Ugljen (Coal), <http://www.izvorienergije.com/ugljen.html> (18.05.2020.)
- [7] Oil and clean energy transitions, <https://www.iea.org/reports/oil-2020> (18.5.2020.)
- [8] Termoelektrane, <https://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/1560> (20.05.2020.)
- [9] Sobota, I., Bedeković, G., Ćurković, D.: Usklađivanje termoenergetskih postrojenja sa zahtjevima direktive o industrijskim emisijama, str. 133-146.
- [10] Singh, G.: Environmental Aspects of Coal Combustion Residues from Thermal Power Plants, str. 155-156.
- [11] Environmental health & engineering (EH&E) : Emissions of hazardous air pollutants from coal-fired power plants. EH&E Report 17505., 2011., str. 39.
- [12] Clean Air Task Force , Cradle to Grave: The Environmental Impacts from Coal, 77 Summer Street, Boston, MA 02110 June, 2001, str. 1.
- [13] Jadrić, D., Vrkljan, M.: Klasični izvori energije – anakronizam suvremenog doba, str.86-92
- [14] Ministarstvo zaštite, okoliša i prirode <http://klima.mzoip.hr/default.aspx?id=43> (21.05.2020)

- 
- [15] IEA, Sloss, L.: Technology readiness of advanced coal-based power generation systems, 2019. str.12-59.
- [16] Bogdan, Ž., Živković, S., Dokmanović, A., Merić, V.: Tehnologije čistog ugljena u strategiji razvoja elektroenergetskog sustava, 2007., str. 411 – 412.
- [17] IEA, Nalbandian, H.: Air pollution control technologies and their interactions, CCC/92, 2004., str. 5 - 23
- [18] Lecomte, T., Ferrería de la Fuente, J.F. i dr.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU
- [19] IEA, Mitchell, C S.: Hot gas cleanup of sulphur, nitrogen, minor and trace elements CCC/12, 1998., str. 48-49.
- [20] IEA, Adams, D.: Flue gas treatment for CO<sub>2</sub> capture, CCC/169, 2010.,str. 18 - 21.
- [21] Radić, M., Petković, D.: Elektrostatički filteri, 2014. str. 8-39.
- [22] IEA, Nicol, K.: Recent developments in particulate control, CCC/218, 2013., str. 11-12.
- [23] Loš, B.: Tehnologije hvatanja i spremanja ugljikovog dioksida u elektroenergetskom sektoru – pregled relevantnog stanja, Zagreb, str. 112 – 113. str.
- [24] Comparison of ammonia and monoethanolamine solvents to reduce CO greenhouse gas emissions <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.906.7447&rep=rep1&type=pdf> (21.05.2020)
- [25] IEA, Dong, N. S:Utilisation of low rank coals, CCC/182, 2011, str. 7 - 24
- [26] IEA, Kessel, J.:Clean coal technologies for a carbon-constrained world, CCC/123A, 2007., str. 9 -10.
- [27] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M.: Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu, Zagreb, 2009., str. 19 - 18.
- [28] IEA, Lockwood, T.: Techno-economic analysis of PC versus CFB combustion technology, CCC/226, 2013., str. 5 - 17.

- 
- [29] IEA, Zhu, Q.: Developmenta in circulating fluidised bed combustion, CC/219, 2013, str.5-10
- [30] IPCC, Metz. B., Davidson, O i dr.: Carbon dioxide capture and storage, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf) (20.05.2020)
- [31] IPCC, Carbon dioxide transport, injection and geological storage, 2006., str 5.6.
- [32] CO<sub>2</sub> storage technologies, <https://www.ctc-n.org/technologies/co2-storage-technologies> (10.08.2020)
- [33] How can CO<sub>2</sub> be stored <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/climateChange/CCS/howCanCo2BeStored.html> (10.08.2020)
- [34] D. Šljivac, Elektrane, predavanja, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2019/2020.
- [35] IEA, NEA, Projected Cost of Generating Electricity, 2015 Edition
- [36] Heat values of various fuels, <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx> (02.09.2020.)
- [37] N. Sönnichsen, Coal price – Northwest Europe marker price 2003-2019, <https://www.statista.com/statistics/383500/northwest-europe-coal-marker-price/> (02.09.2020)
- [38] PNAS, The European Union Emissions Trading System reduced CO<sub>2</sub> emissions despite low prices, <https://www.pnas.org/content/117/16/8804> (02.09.2020.)
- [39] Coal & electricity, <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity> (03.09.2020.)
- [40] Tarifne stavke (cijene), <http://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547> (03.09.2020.)
- [41] Synapse Energy Economics, Luckov, P., Stanton, E., i drugi: 2015 Carbon Dioxide Price Forecast
- [42] IEA, NEA, Projected Cost of Generating Electricity, 2010 Edition

[43] Crippa, M., Oreggioni, G., i dr: Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries, 2019 report, [https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet2019/Fossil\\_CO2andGHG\\_emissions\\_of\\_all\\_world\\_countries\\_booklet\\_2019report.pdf](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet2019/Fossil_CO2andGHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2019report.pdf) (15.09.2020.)

**SAŽETAK**

Nove tehnologije zaštite okoliša u elektranama su tehnologije čiji je globalni cilj smanjenje emisija stakleničkih plinova, te učinkovitija i čišća proizvodnja energije. Takve tehnologije još uvijek nisu u potpunosti razvijene, te u usporedbi s termoelektranama koje nisu opremljene tim tehnologijama znatno su skuplje i neisplativije. Jedna od takvih tehnologija, koja je obrađena u ovom radu je tehnologija hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida. Cilj ovog rada je ispitati utjecaj dodavanja ove tehnologije na izlaznu cijenu proizvodnje električne energije. U tu svrhu izvršen je proračun aktualiziranog troška, odnosno LCOE, te je grafički prikazan kumulativni povrat investicije za termoelektrane sa i bez sustava za hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida.

**Ključne riječi:** tehnologija hvatanja i skladištenja ugljikovog dioksida, električna energija, isplativost, LCOE, ugljen, ugljikov dioksid, termoelektrana

**ABSTRACT**

New environmental technologies in power plants are technologies whose global goal is reduction of greenhouse gas emissions and more efficient and cleaner production of energy. These kind of technologies are still not entirely developed and, in comparison with thermal power plants that are not equipped with these technologies, they are much more expensive and unprofitable. One of these technologies which was the theme of this final paper is the carbon dioxide capture and storage technology. The goal of this final paper was to examine the impact of adding this technology to output cost of production of electrical energy. For that purpose an actual cost of calculation was performed, ie LCOE, and the cumulative return on investment for power plants with and without a carbon dioxide capture and storage system was graphically shown.

**Keywords:** carbon dioxide capture and storage technology electrical energy, cost-effectiveness, LCOE, coal, carbon dioxide, thermal power plant