Tehno-ekonomska analiza novih tehnologija termoelektrana na ugljen

Bubić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:522388

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA NOVIH TEHNOLOGIJA TERMOELEKTRANA NA UGLJEN

Diplomski rad

Ivan Bubić

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD....1
1.1. Zadatak diplomskog rada....1
2. TERMOELEKTRANE I EKOLOGIJA UGLJENA....2
2.1. Ugljen i okoliš....4
2.2. Carnotov ciklus....11
2.3. Clasius-Rankinov ciklus....13
2.4. Povećanje stupnja djelovanja procesa (elektrane)....15
3. NOVE TEHNOLOGIJE TERMOELEKTRANA NA UGLJEN....20
3.1. Tehnologije pročišćavanja dimnih plinova....20
3.2. Tehnologije povećanja učinkovitosti postrojenja....23
3.2.1. Nadkritične tehnologije....24
3.2.2. Ultra nadkritične tehnologije....27
3.2.3. Napredna ultra nadkritična tehnologija....28
3.3. Povećanje snage konvencionalnih te na ugljen kombiniranim ciklusom....29
3.4. IGCC proces - kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja....32
4. CCS TEHNOLOGIJA....35
4.1. Prikupljanje ugljikovog dioksida....36
4.2. Transport ugljikovog dioksida....39
4.3. Pohranjivanje ugljikovog dioksida....40
4.4. Primjeri termoelektrana s CCS tehnologijom....43
5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA TERMOELEKTRANA NA UGLJEN....46
5.1. Podkritična termoelektrana na ugljen bez prikupljanja CO_2....46
5.2. Nadkritična termoelektrana na ugljen bez prikupljanja CO2....47
5.3. Ultra nadkritična termoelektrana na ugljen bez prikupljanja CO_2....49
5.4. Termoelektrana na ugljen s prikupljanjem CO_2....49
6. ZAKLJUČAK....52
LITERATURA....54
SAŽETAK....56
ŽIVOTOPIS....57

1. UVOD

U konvencionalne izvore energije ubrajaju se: ugljen, nafta, prirodni plin, nuklearna energija te hidroenergija. Ugljen se ponajviše koristi u proizvodnji električne energije. Tu zauzima udjel od 40% na svjetskoj razini i to je najveći izvor električne energije. Energenti u procesu pretvorbe kemijske energije u toplinsku energiju generiraju niz otpadnih tvari koje nepovoljno utječu na okoliš i u konačnici na čovjeka. Konvencionalne termoelektrane na ugljen koriste *stare* tehnologije koje puno više zagađuju okoliš od termoelektrana na ugljen koje koriste nove tehnologije. Nove tehnologije koriste manje ugljena, veća je učinkovitost, a emisije CO_2 mogu se reducirati preko 90%. Samim time, termoelektrane na ugljen bi puno manje zagađivale okoliš. Potrebno je izvršiti analizu isplativosti proizvodnje električne energije za različite tehnologije.

1.1. ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

U diplomskom radu potrebno je opisati nove tehnologije termoelektrana na ugljen i usporediti ih s konvencionalnim termoelektranama na ugljen. Osim teoretske usporedbe, potrebno je tehno-ekonomskom analizom usporediti stare i nove tehnologije.

2. TERMOELEKTRANE I EKOLOGIJA UGLJENA

Termoelektranama se nazivaju postrojenja u kojima se toplina pretvara u mehaničku energiju, a ova u električnu, bez obzira na to da li se koristi toplina dobivena izgaranjem fosilnih i drugih goriva, toplina geotermičkih izvora ili toplina dobivena nuklearnom fisijom. Termoelektrane se mogu podijeliti prema vrsti pogonskih strojeva, prema načinu korištenja pare, prema upotrijebljenom gorivu i prema načinu hlađenja kondenzatora.

Prema vrsti upotrijebljenih pogonskih strojeva, razlikuju se sljedeće termoelektrane:

- parne termoelektrane u kojima je pogonski stroj parna turbina; pri tome razlikujemo način predaje topline mediju (pari):
  - gorivo izgara u parnim kotlovima – konvencionalne parne termoelektrane na ugljen ili nekonvencionalne na čvrstu biomasu,
  - nuklearni reaktor (s izmjenjivačem topline ili bez njega preuzima ulogu parnog kotla) – nuklearne (parne) termoelektrane,
  - koristi se para iz zemlje termoelektrane ili posredno (preko izmjenjivača topline) – geotermalne (parne) termoelektrane,
  - koristi se koncentrirano Sunčevo zračenje preko visoko temperaturnih solarnih kolektora – Sunčane (parne) termoelektrane,
- termoelektrane s plinskim turbinama u kojima gorivo (obično prirodni plin) izgara u komori za izgaranje, a pogonski stroj je plinska turbina,
- termoelektrane s plinskim motorom (s unutarnjim izgaranjem) kao pogonskim strojem (gorivo prirodni plin ili bioplin)
- dizelske termoelektrane s dizelskim motorom (sa unutarnjim izgaranjem) kao pogonskim strojem (gorivo dizel ili biodizel).

Prema načinu korištenja pare, termoelektrane u kojima se kao pogonski stroj upotrebljavaju parne turbine, mogu se podijeliti na:

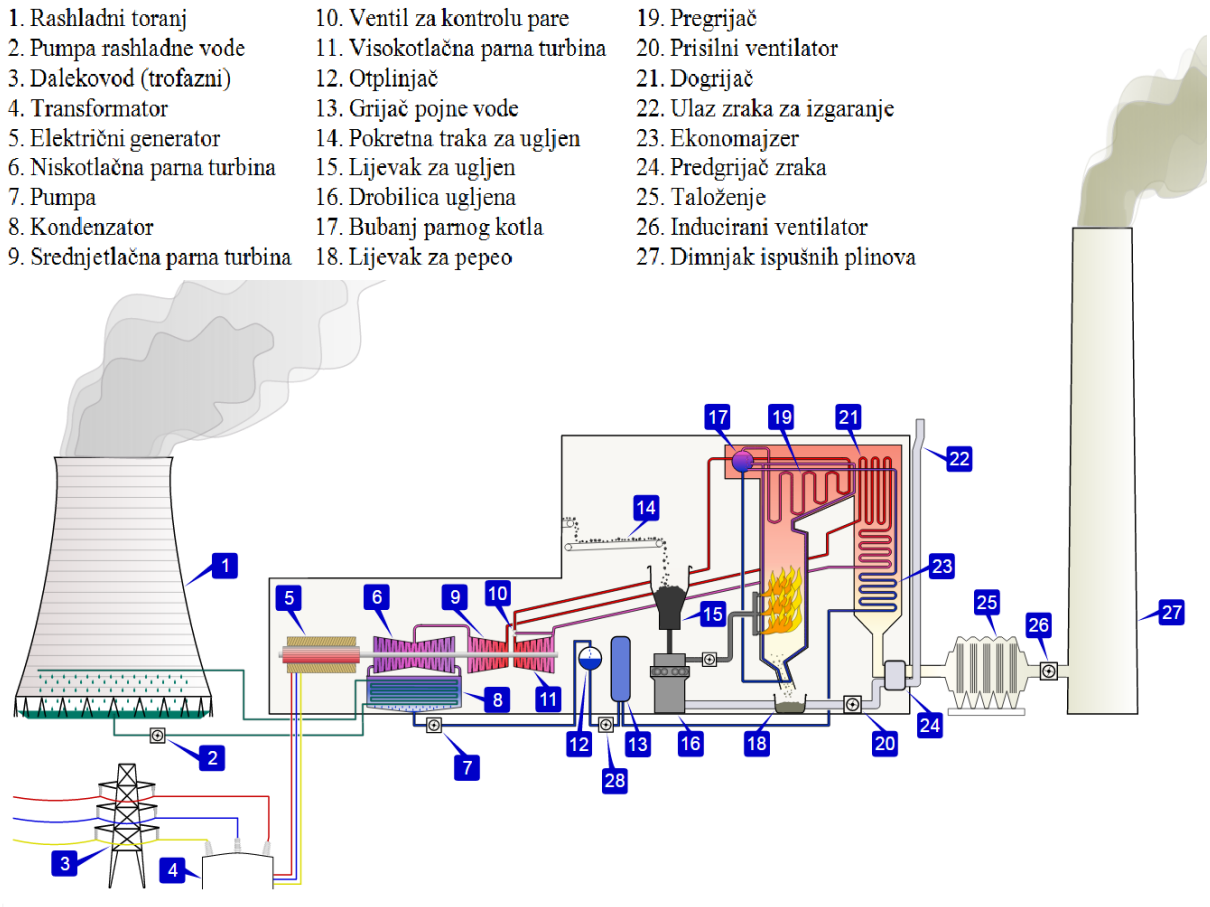
- kondenzacijske termoelektrane za proizvodnju samo električne energije,
- kogeneracijske termoelektrane (toplane i industrijske termoelektrane) za kombiniranu proizvodnju električne energije i pare koja se upotrebljava za tehnološke procese i grijanje (kombinirana proizvodnja el. energije i pare može se ostvariti i s plinskim turbinama) – engl. CHP (Combine Heat and Power).

Razlikuju se sljedeće termoelektrane prema upotrijebljenom gorivu:

- parnim termoelektranama mogu se koristiti čvrsta (ugljen, biomasa), tekuća (nafta, biogoriva) i plinovita goriva(prirodni plin, bioplin),
- u termoelektranama s plinskim turbinama mogu se koristiti tekuća i plinovita goriva,
- u dizelskim termoelektranama mogu se koristiti samo tekuća goriva (dizel i biodizel).

U kondenzatoru parne turbine, u hladionicima postrojenja s plinskim turbinama i dizelskim motorima razlikujemo sljedeće termoelektrane (podjela prema načinu hlađenja kondenzatora):

- termoelektrane s protočnim hlađenjem,
- termoelektrane s povratnim hlađenjem [1].



Slika 2.1. Osnovni prikaz termoelektrane [2]

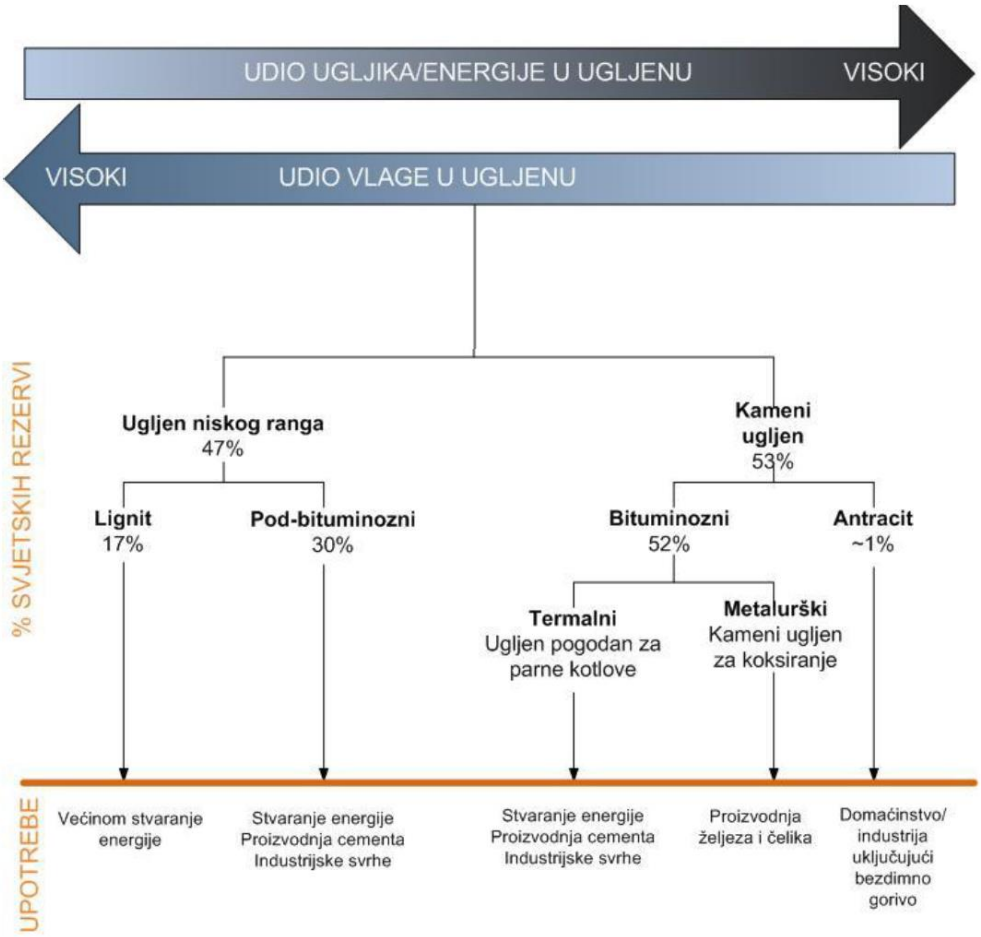
Bitni dijelovi termoelektrane su generator pare, turbina, generator električne energije i kondenzator, koji zajedno čine zatvorenu cjelinu u proizvodnji električne energije. Glavna svrha termoelektrane je proizvodnja pare koja pokreće lopatice turbine (mehanički rad), a zatim i

generator električne energije. Također, dobivena toplinska energija može koristiti i za potrebe grijanja. Termoenergetska postrojenja, zbog relativno niskog stupnja djelovanja, imaju i razmjerno visoke gubitke energije i visoke emisije štetnih plinova. Stoga se razvojem ultra nadkritičnih parametara (treće poglavlje) i tehnologijom prikupljanja i pohranjivanja CO_2 (četvrto poglavlje) nastoji povećati stupanj djelovanja termoelektrane, smanjiti gubitke i povećati ekološku prihvatljivost takvog načina proizvodnje električne energije. Unutar termoenergetskog postrojenja se odvija termodinamički ciklus, koji je konstruiran na način da se ostvari određen stupanj iskoristivosti termodinamičkog procesa, u skladu s mogućnostima tehnologije pretvorbe pojedinih oblika energije i troškovne isplativosti.

2.1. UGLJEN I OKOLIŠ

Ugljen je sedimentna stijena crne ili crno-smeđe boje. Njegovo stvaranje je započelo prije 360 milijuna godina. Nastao je raspadanjem biljnih tvari u močvarama u mirnim stajaćim vodama tijekom milijuna godina. Na početku se organska tvar taložila u mirnoj stajaćoj vodi i dolazilo je do truljenja zbog djelovanja kisika i aerobnih bakterija, a potom i raspadanja uslijed djelovanja anaerobnih bakterija. U toj fazi nastao je treset. Nakon toga je slijedilo pougljenjivanje bez prisustva kisika i mikroorganizama. Tijekom pougljenjivanja dolazi do obogaćivanja ugljikom, a osiromašenja dušikom i sumporom te dolazi do stvaranja metana i ugljik-dioksida. Pougljenjivanje se odvijalo pod utjecajem bioloških, fizikalno-kemijskih i geoloških činitelja poput povišenog tlaka i temperature, djelovanja mineralnih primjesa, kemijskog učinka plinova i količine vode. U toj fazi se treset pretvorio u lignit, a potom i u ostale vrste ugljena. Pri tome je kvaliteta ugljena određena temperaturom i tlakom te trajanjem formiranja ugljena.

Ugljen se većinom sastoji od ugljika, vodika i kisika, ali i od negorivih dijelova (dušika, vlage i pepela), koji mu smanjuju toplinsku vrijednost. Može sadržavati i sumpor, fosfat, kalcij, željezo te magnezij. Kameni ugljen je nastao prije otprilike 270 milijuna godina, a mrki i lignit prije otprilike 70 milijuna godina. To je temeljna podjela dok kameni ugljen dijelimo na antracit, mršavi ugljen, kovački ugljen, masni ugljen, plinski ugljen i plameni ugljen. Mrki i kameni ugljen se nazivaju bituminoznim ugljenom, a lignit smeđim. Bituminozni ugljen je tvrd i čvrst te često ima crnu boju. Zbog većeg udjela ugljika i manje vlage, ima veliku ogrjevnu moć. Oko 70 % energetskih postrojenja koriste kameni ugljen, dok ostali koriste smeđi ugljen i lignit [3]. Sve vrste ugljena prikazane su na slici 2.2.



Slika 2.2. Vrste ugljena [4]

Ugljen se ponajviše koristi u proizvodnji električne energije. Tu zauzima udjel od 40% na svjetskoj razini i to je najveći izvor električne energije. Energenti u procesu pretvorbe kemijske energije u toplinsku energiju generiraju niz otpadnih tvari koje nepovoljno utječu na **okoliš**. Otpadne tvari su, u slučaju termoelektrana na ugljen, kemijski spojevi koji nastaju kao proizvod oksidacije fosilnih goriva koje odnose dimni plinovi iz kotlova. Otpadne tvari se dijelom ispuštaju u okoliš (atmosferu i vodotoke), a dijelom pohranjuju kao kruti otpad. Kod današnjih elektrana koje koriste parni ciklus otpadna toplina je 60-65%, a kod elektrana s plinskim ciklusom je 45-50%. To je toplina koja je predana kondenzatoru turbine. Utjecaj elektrana na prirodnu sredinu nije ograničen samo na gradnju i pogone, nego uključuje i sve zahvate od dobave energenata do odlaganja otpada. Promjene u fizikalnim i kemijskim stanjima atmosfere koje izazivaju emisije iz elektrana su od suštinskog značaja za njihovo djelovanje i okoliš. Promjene rezultiraju većim ili manjim štetama u ekosustavu, uključujući i zdravstvene posljedice kod ljudi. Najveći proizvođač ugljena za 2015. godinu je Kina s 45,8% gledajući svjetsku proizvodnju [8]. Nakon Kine slijede

SAD s 10,5%, a nakon njih Indija, Australija, Indonezija, Rusija, Južna Afrika, Njemačka, Poljska i Kazahstan. Isto je prikazano u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Proizvodnja ugljena po državama 2015. godine

Država	Proizvodnja ugljena 2013. [Mt]	Proizvodnja ugljena 2014. [Mt]	Proizvodnja ugljena 2015. [Mt]	Postotak proizvodnje 2015.%]
Kina	3748,5	3640,2	3527,2	45,8%
SAD	903,7	918,2	812,8	10,5%
Indija	610,0	657,4	691,3	9,0%
Australija	458,4	488,8	508,7	6,6%
Indonezija	489,7	484,7	469,3	6,1%
Rusija	326,0	332,9	349,3	4,5%
Južna Afrika	256,3	260,5	252,1	3,3%
Njemačka	191,0	186,5	184,7	2,4%
Poljska	142,9	137,1	135,8	1,8%
Kazahstan	119,6	114,0	107,2	1,4%
Ostale države	728,5	709,2	570,5	7,4%
Svjetska proizvodnja	7974,6	7929,7	7708,7	100,0%

Po tablici 2.2. može se iščitati kako Kina i SAD troše najviše ugljena na svijetu, a nakon toga slijede Japan, Rusija, Južna Afrika, Južna Koreja i Njemačka. Očekuje se da će Kina i SAD trošiti najviše ugljena po glavi stanovnika, ali gledajući na svjetskoj razini, Kazahstan troši najviše tona ugljena godišnje po glavi stanovnika, čak 2,86 tona. Slijedi Australija s 2,77 tona ugljena po glavi stanovnika. Indija, čija potrošnja ugljena brzo raste, trenutno troši 0,42 tona ugljena po glavi stanovnika.

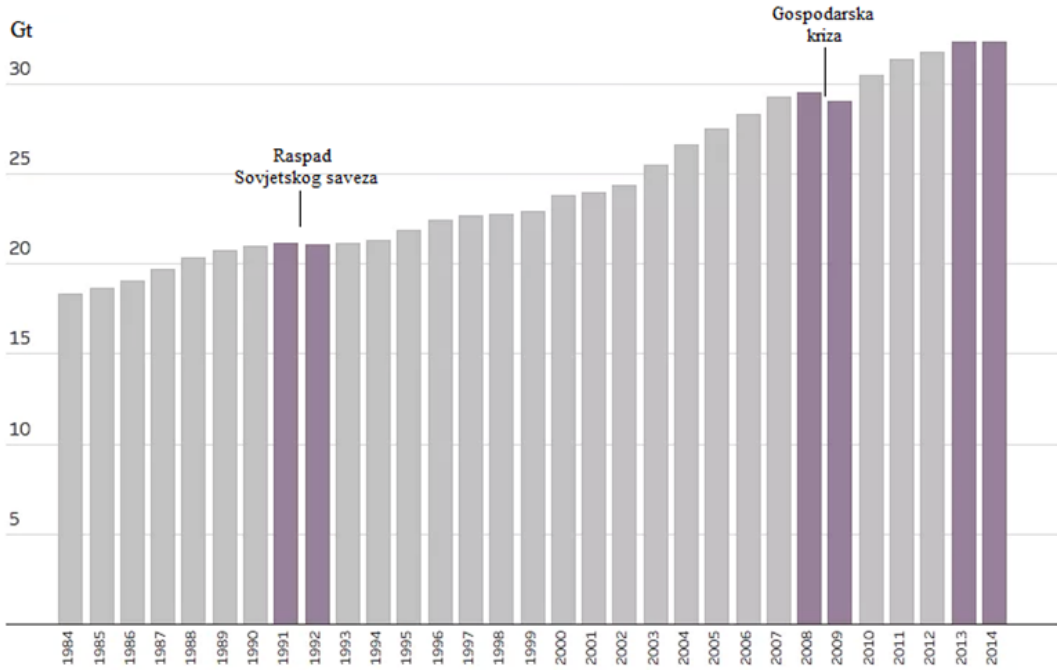
Tablica 2.2. Potrošnja ugljena po stanovniku 2015. godine [8]

	Broj stanovnika u mil.	Potrošnja ugljena po državama [Mt]	Potrošnja ugljena u tonama po stanovniku
Kazahstan	17,5	50,2	2,86
Australija	23,9	66,3	2,77
Tajvan	23,4	58,9	2,51
Južna Afrika	54,8	131,2	2,39
Južna Koreja	50,7	120,2	2,37
Mongolija	3,0	6,7	2,27
Češka	10,6	22,4	2,12
Kina	1371,2	2787,6	2,03
Poljska	38,5	75,3	1,96
Bosna i Hercegovina	3,8	7,1	1,87
SAD	321,7	522,8	1,63
Srbija	7,1	10,7	1,51
Njemačka	81,6	112,2	1,38
Bugarska	7,2	9,8	1,36
Hong Kong	7,3	9,8	1,35
Japan	126,9	169,4	1,33
Kosovo	1,8	2,2	1,20
Rusija	144,1	164,4	1,14
Izrael	8,3	9,0	1,09
Nizozemska	16,9	15,9	0,94
OECD Amerika	*496,7*	*577,3*	*1,16*
OECD Azija i Oc.	*214,3*	*367,0*	*1,71*
OECD Europa	*564,0*	*398,9*	*0,71*
Ukupno OECD	*1275,0*	*1343,2*	*1,05*
Ukupno ne-OECD	*6060,7*	*4096,3*	*0,68*
Svijet	**7334,7**	**5439,6**	**0,74**

Štetni nusproizvodi pretvorbi u fosilnim termoelektranama su sljedeći:

- prašina iz dima - krute čestice: osobito iz ugljena, sadrži radioaktivne tvari kao U, Th, Ra, K, Pb (rak pluća, bolesti srca i dišnih puteva),
- sumporni dioksid SO_2 : uzrokuje kisele kiše (zagađenje tla i voda) stvaranjem H_2SO_4 uz katalizator NO_2,
- dušični oksidi NO_x: pri izgaranju na visokim temperaturama, vode stvaranju ozona O_3 na razini tla - oštećuje pluća (djeca, stariji, astmatičari), istovremeno oštećuje ozon u stratosferi - ozonske rupe, u reakciji s amonijakom, vlagom i dr. vodi stvaranju dušične kiseline HNO_3 i s tim povezanih krutih čestica - zagađenje zraka,
- ugljikov monoksid CO: bez boje i mirisa, iznimno otrovan za ljude i životinje, rezultat nepotpunog izgaranja),
- ugljikovodici C_mH_n - isparljivi organski sastojci (VOC): obično podjela na metan CH_4 koji je iznimno učinkovit stakleнički plin i nemetanske (ostale) koje se (npr. benzen, toluen, ksilen) smatra kancerogenim (leukemija),
- ugljični dioksid CO_2: nije opasan po ljudsko zdravlje izravno, ali najvećim dijelom doprinosi efektu staklenika i globalnom zatopljenju [5].

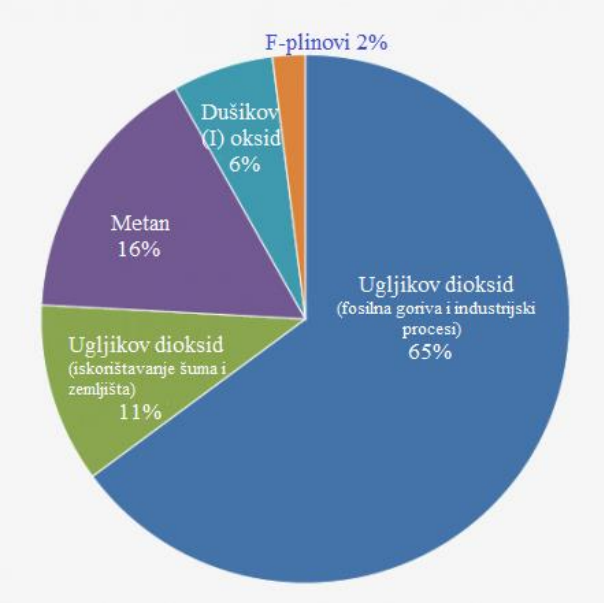
Efekt (učinak) staklenika je zagrijavanje Zemljine površine i donjih slojeva atmosfere selektivnim propuštanjem toplinskog zračenja. Atmosfera propušta Sunčevu svjetlost prema Zemlji, a dio te se reemitira u obliku dugovalnog toplinskog zračenja natrag u atmosferu. Najveći dio te energije apsorbira se u atmosferi molekulama vodene pare, ugljikovog dioksida i ostalih plinova te se reflektira nazad prema Zemlji. Dakle, CO_2 i vodena para ne propuštaju duge valove već ih vraćaju na zemlju. Time se zagrijavaju niži slojevi zraka. Prirodni efekt staklenika drži globalnu temperaturu Zemlje na +15°C. Bez stakleničkog efekta globalna temperatura iznosila bi -18°C. Zbog povećanog stvaranja CO_2, posljednjih stotinjak godina povećava se učinak staklenika te isto dovodi do globalnog zatopljenja, a samim time i klimatskih promjena. Klimatske promjene izazvane ovim plinovima odgovorne su za ekstremne vremenske prilike poput toplinskih udara, suša ili poplava. Na slici 2.3. prikazane su svjetske godišnje emisije CO_2 iskazane u milijardama tona [6].



Slika 2.3. Svjetske godišnje emisije CO_2 u milijardama tona [7]

Na globalnoj razini, ključni staklenički plinovi emitirani ljudskim aktivnostima su sljedeći, a prikazani su na slici 2.4.:

- Ugljikov dioksid CO_2 (76%) - Primjena fosilnih goriva primarni je izvor CO_2. CO_2 se može emitirati izravnim ljudskim utjecajima kao što su krčenje šuma, čišćenje zemljišta za poljoprivredu i degradacija tla. Isto tako, zemlja također može ukloniti CO_2 iz atmosfere pošumljavanjem, poboljšanjem tla i drugim aktivnostima.
- Metan CH_4 16%: Poljoprivredne aktivnosti, gospodarenje otpadom, potrošnja energije i spaljivanje biomase doprinose emisiji CH_4.
- Dušikov (I) oksid N_2O (6%): Poljoprivredne djelatnosti, kao što je uporaba gnojiva, primarni su izvor emisija N_2O.Izgaranje fosilnih goriva također stvara N_2O.
- Fluorirani plinovi (2%): Industrijski procesi, hlađenje i upotreba raznih potrošačkih proizvoda pridonose emisiji F-plinova, koji uključuju hidrofluorougljike (HFC), perfluorougljike (PFC) i sumporni heksafluorid (SF_6).

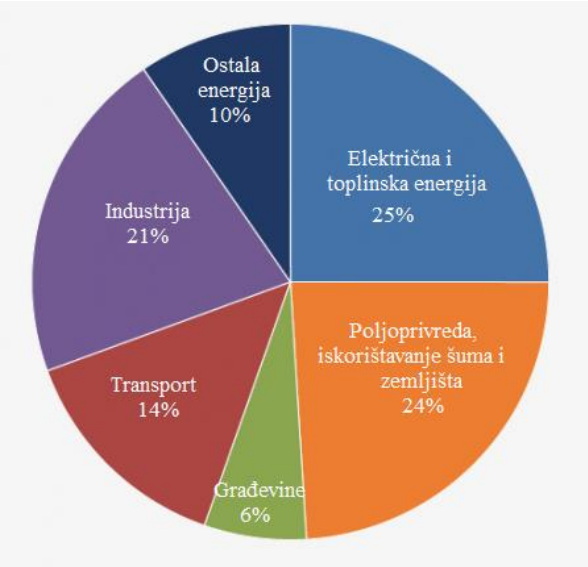


Slika 2.4. Globalne emisije stakleničkih plinova [9]

Globalne emisije stakleničkih plinova također se mogu podijeliti s gospodarskim aktivnostima koje vode do njihove proizvodnje (slika 2.5.):

- Proizvodnja električne i toplinske energije 25%: spaljivanje ugljena, prirodnog plina i ulja za električnu energiju i toplinu najveći je izvor globalnih emisija stakleničkih plinova.
- Industrija 21%: emisije stakleničkih plinova iz industrije prvenstveno uključuju fosilna goriva spaljena na licu mjesta u postrojenjima. Ovaj sektor također uključuje emisije iz kemijskih, metalurških i emisijama iz djelatnosti gospodarenja otpadom.
- Poljoprivreda, iskorištavanje šuma i zemljišta 24%: emisije stakleničkih plinova iz ovog sektora uglavnom dolaze iz poljoprivrede (uzgoj usjeva i stoke) i krčenja šuma. Ova procjena ne uključuje CO_2 koji ekosustavi uklanjaju iz atmosfere odvajanjem ugljika u biomasi, mrtvoj organskoj tvari i tlima, što je neutraliziralo oko 20% emisija iz ovog sektora.
- Transport 14%: emisije stakleničkih plinova iz ovog sektora prvenstveno uključuju fosilna goriva spaljena za cestovni, željeznički, zračni i pomorski promet. 95% svjetske transportne energije potječe iz goriva na bazi naftnih goriva, uglavnom benzina i dizela.
- Građevine 6%: emisije stakleničkih plinova iz ovog sektora proizlaze iz potrošnje el. energije na licu mjesta kao na primjer za potrebe kuhanja.

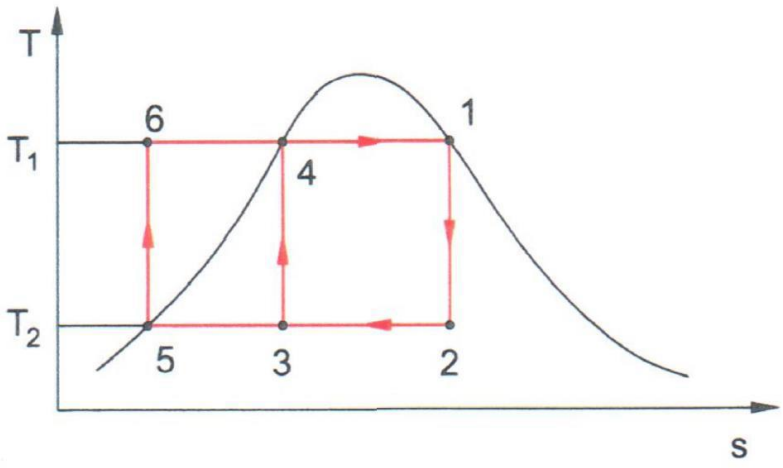
- Ostala energija 10%: ovaj izvor emisija stakleničkih plinova odnosi se na sve emisije iz sektora energije koje nisu izravno povezane s proizvodnjom električne energije ili topline, transportom goriva.



Slika 2.5. Globalne emisije po ekonomskom sektoru [9]

2.2. CARNOTOV CIKLUS

Carnotov kružni proces je idealizirani teorijski termodinamički izentropsko-izotermni proces u kojem se toplinska energija pretvara u mehanički rad.



Slika 2.6. Carnotov ciklus (T-s dijagram) [10]

Carnotovim kružnim procesom teorijski se može postići najviši termodinamički stupanj djelovanja, ukoliko bi temperatura radne tvari pri dovođenju topline bila jednaka temperaturi

ogrjevnog spremnika, a temperatura radne tvari pri odvođenju jednaka temperaturi rashladnog spremnika. Proces 1-2-3-4-1 nije ostvariv (slika 2.6), budući da kompresija jako vlažne pare u stanju zahtijeva kompresor, koji bi s obzirom na potrebnu veličinu i iznos investicijskih i pogonskih troškova imao vrijednost parne turbine. Također, ni proces 1-2-5-6-1 nije moguće ostvariti, zato što je nemoguće osigurati toplinu na beskonačnom tlaku pri konstantnoj temperaturi (od točke 6 do točke 4).

Termički stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa izvodi se tako što se polazi od 1. zakona termodinamike:

$$\Delta q = \Delta U + W. \qquad (2-1)$$

Jednadžba prikazuje da je količina topline Δq dovedene u proces jednaka radu W i promjeni unutarnje energije ΔU. Budući da je Carnotov proces kružni proces, promjena unutarnje energije je jednaka nuli, te slijedi:

$$\Delta q = W. \qquad (2-2)$$

Ukupno iskorištena toplina jednaka je razlici dovedene i odvedene topline:

$$Q = Q_{dov} - Q_{odv}. \qquad (2-3)$$

Odnosno, rad je jednak:

$$W = Q_{dov} - Q_{odv}. \qquad (2-4)$$

U konačnici, termički stupanj djelovanja jednak je omjeru dobivenog rada i dovedene topline:

$$\eta = \frac{W}{Q_{dov}} = 1 - \frac{Q_{odv}}{Q_{dov}} < 1. \qquad (2-5)$$

Omjeri dovedene i odvedene topline i pripadnih temperatura toplog i hladnog spremnika su jednaki (2. zakon termodinamike):

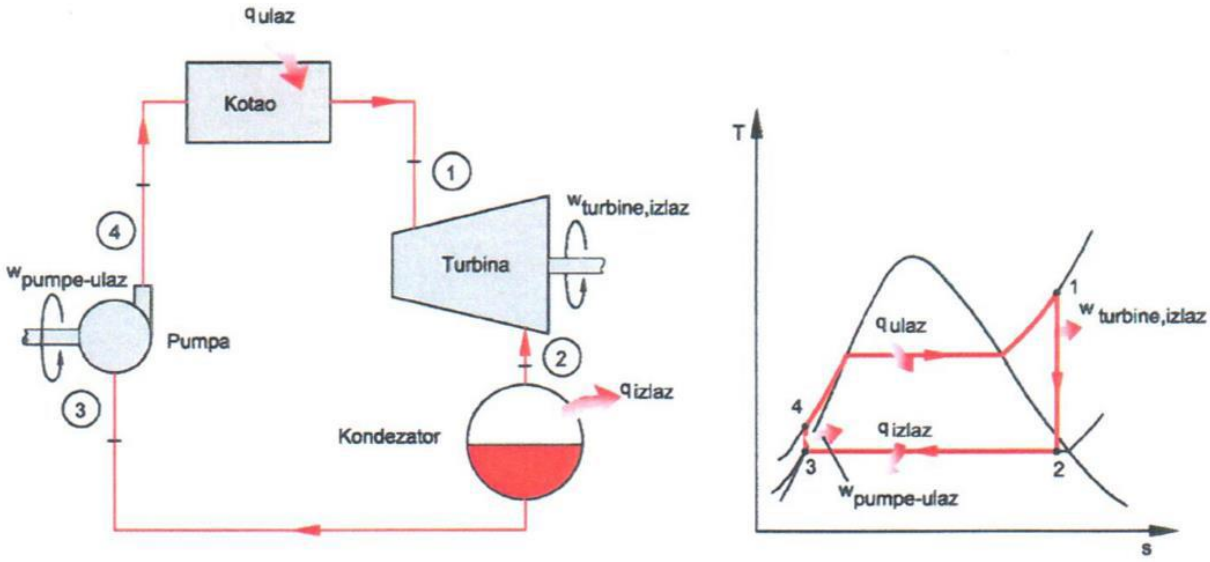
$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \qquad (2-6)$$

iz čega slijedi konačan oblik formule za izračun termičkog stupnja djelovanja:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1. \qquad (2-7)$$

2.3. CLAUSIUS-RANKINOV CIKLUS

Budući da je idealni Carnotov ciklus neostvariv u praksi, nastoji se projektirati ciklus koji će se barem djelomično približiti idealnom procesu. Clausius-Rankinov proces je reverzibilan termodinamički kružni proces, koji se odvija između dva toplinska spremnika, a radni medij se kroz niz termodinamičkih procesa „vraća“ u početno stanje.



Slika 2.7. Glavni elementi Clausius-Rankinova ciklusa [10]

Takav proces je moguće ostvariti u termoelektranama, budući da postoji razlika temperatura dimnih plinova kao posljedice izgaranja goriva i radnog medija na izvornoj strani (kotao) te temperature kondenzata radnog medija na predajnoj strani i rashladnog medija.

Glavni elementi Clausius-Rankinova ciklusa su turbina, kondenzator, pumpa i kotao, a shematska predodžba nalazi se na slici (2.7). Kako bi se ciklus započeo, u kotao je potrebno dovesti toplinu, koja se definira pomoću razlike entalpija:

$$Q_{kotla} = h_4 - h_1. \qquad (2-8)$$

Rad na izlazu iz turbine iznosi:

$$W_{turbine} = h_1 - h_2. \qquad (2-9)$$

Toplina koju je potrebno predati kondenzatoru iznosi:

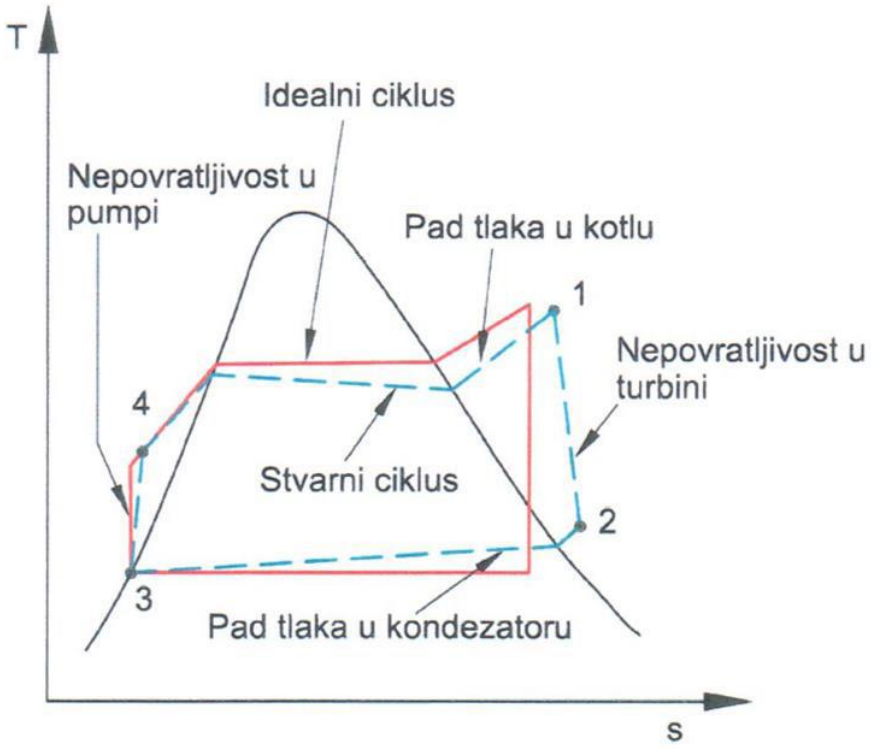
$$Q_{kondenzatora} = h_2 - h_3. \qquad (2-10)$$

Rad koji treba ostvariti pojna pumpa definira se kao razlika entalpija:

$$W_{pumpe} = h_4 - h_3. \qquad (2-11)$$

Konačno, termički stupanj djelovanja Clausius-Rankinova ciklusa jednak je omjeru dobivenog i uloženog, a iznosit će:

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_{kotla}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_4 - h_1}. \qquad (2-12)$$

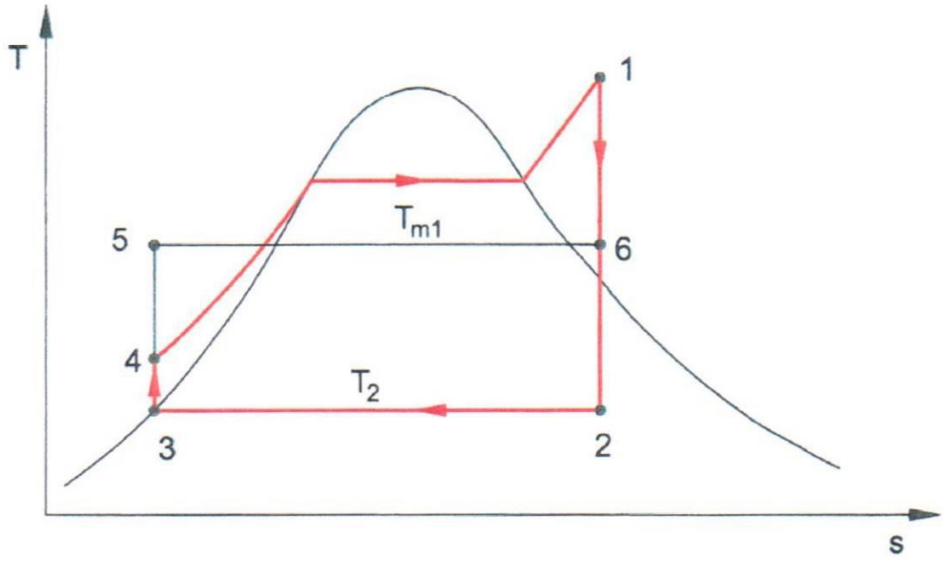


Slika 2.8. Usporedba idealnog i stvarnog Clausius-Rankinova ciklusa [10]

Zbog pojava kao što su nepovratljivost u pumpi i turbini, te padovi tlaka u kotlu i kondenzatoru, nije moguće postići idealni Clausius-Rankinov ciklus, a na slici (slika 2.8.) je predočena usporedba idealnog i stvarnog Clausius-Rankinova ciklusa.

Bitno je definirati i pojam srednje temperature Clausius-Rankinova ciklusa. Iz sljedeće formule i slike 2.9. uočljivo je kako će stupanj djelovanja biti veći što je niža temperatura T_2 na kojoj se dovodi toplina i što je viša srednja temperatura T_{m1}. Naravno, niža temperatura dovođenja topline, tj. tlak kondenzacije je ograničen temperaturom okoline. Prema tome, formula termičkog stupnja djelovanja poprima oblik:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_{m1}} < 1. \qquad (2-13)$$



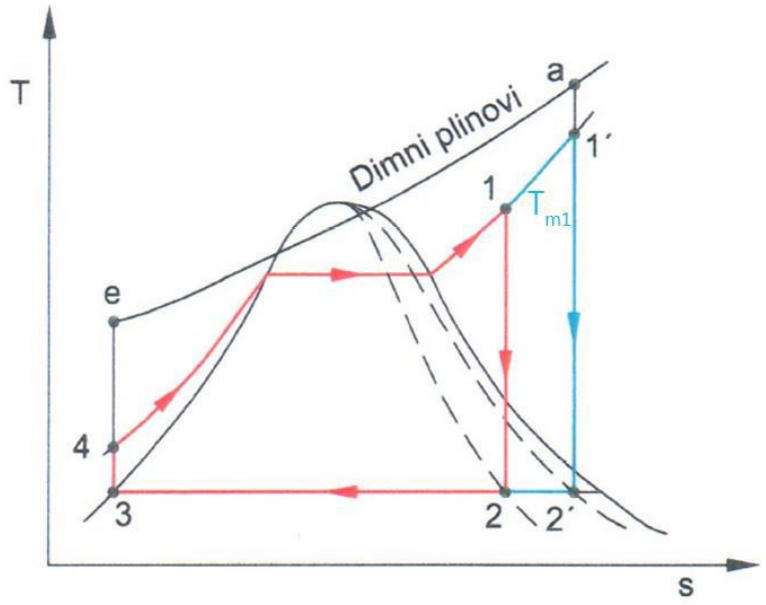
Slika 2.9. Srednja temperatura Clausius-Rankinova ciklusa (T-s dijagram)[10]

2.4. POVEĆANJE STUPNJA DJELOVANJA PROCESA (ELEKTRANE)

Bitan problem je kako povećati stupanj djelovanja termodinamičkog procesa, a samim time i stupanj učinkovitosti termoelektrane. Neki od načina su:

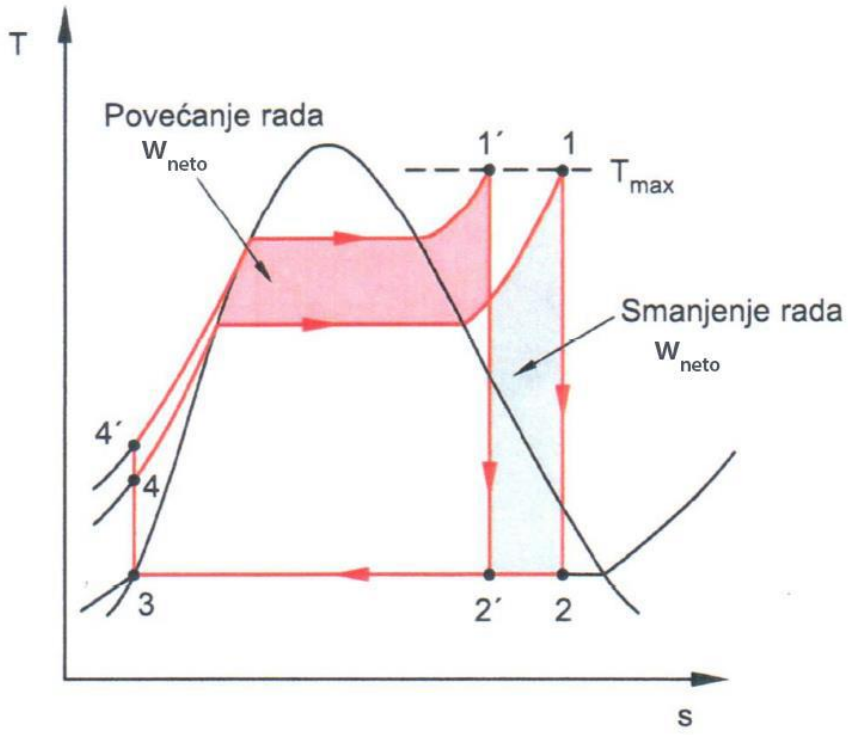
- povišenje temperature pregrijavanja pare,
- povišenje tlaka pregrijane pare,
- smanjenje tlaka u kondenzatoru,
- povišenje temperature pregrijane pare i
- međupregrijanje pare.

Povišenje temperature pregrijavanja pare imat će za posljedicu pomicanje desne točke procesa, iz 2 u 2' (slika 2.10.), kao i povišenje srednje temperature T_{m1}, što će pridonijeti smanjenju vlažnosti pare, a samim time i povećanju stupnja djelovanja procesa.



Slika 2.10. Povišenje temperature pregrijavanja pare (T-s dijagram) [10]

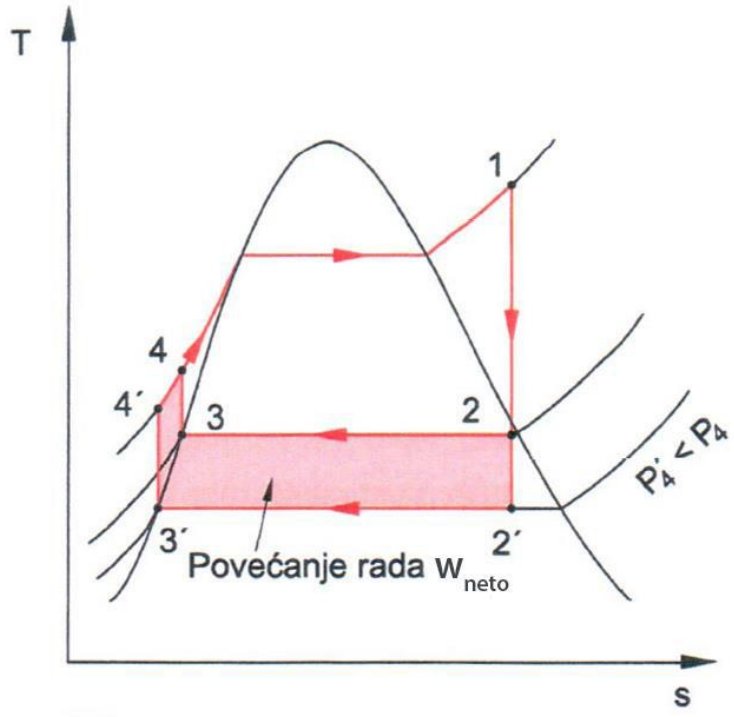
Povišenje tlaka pregrijane pare omogućit će povećanje tlaka u kotlu, što se može uočiti pri pomicanju točke 4 u točku 4' (slika 2.11.), ali će uzrokovati i smanjenje rada turbine, što je negativna strana ove mogućnosti povećanja stupnja djelovanja ciklusa.



Slika 2.11. Povišenje tlaka pregrijane pare (T-s dijagram) [10]

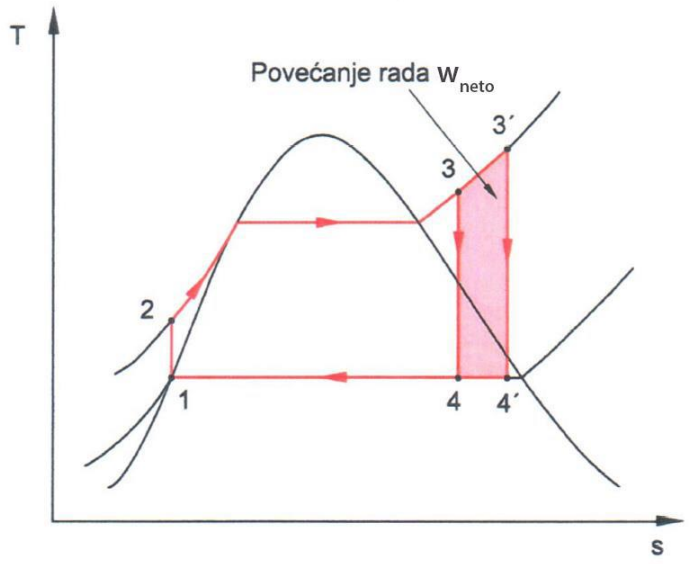
Razlog tome je što će se s višim tlakom povećati i vlažnost pare, što će imati velik utjecaj na rad turbine. Stoga je potrebno voditi računa o poštivanju propisa što se tiče temperature pregrijane pare na ulazu u turbinu, koja je određena karakteristikama turbine, odnosno konstrukcijom i korištenim materijalima u izradi, minimalnoj kvaliteti pare na izlazu iz turbine (zbog erozije lopatica turbine u ovisnosti o pari) te o temperaturi okoline, koja ima utjecaj na vakuum u kondenzatoru.

Smanjenje tlaka u kondenzatoru, odnosno povećanje vakuuma, pridonijet će, također, porastu stupnja djelovanja Clausius-Rankinova ciklusa, što se može uočiti pri pomicanju točaka donje strane ciklusa, iz točaka 2, 3 i 4 u točke 2', 3' i 4' (slika 2.12.). Naravno, i ova mogućnost povećanja stupnja djelovanja će ovisiti o temperaturi okoline.



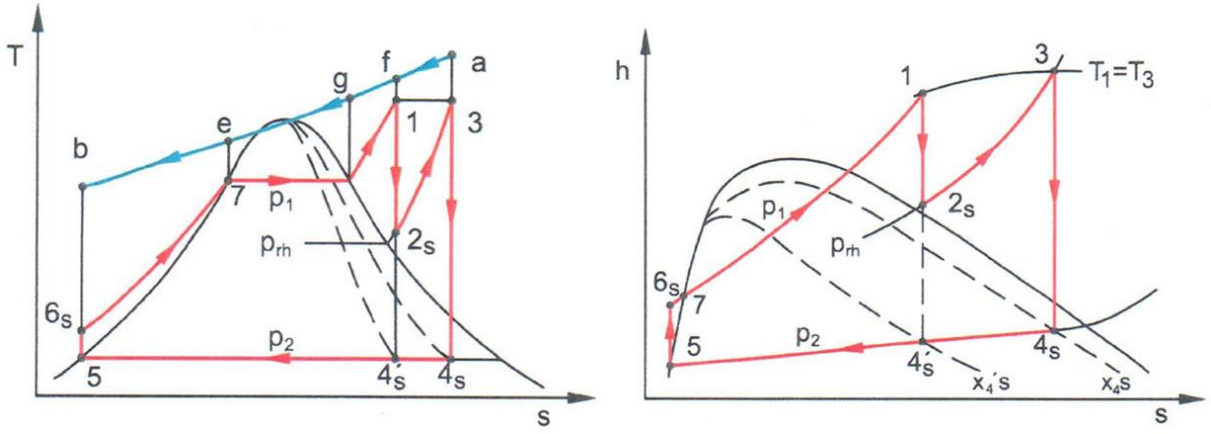
Slika 2.12.Smanjenje tlaka u kondenzatoru (T-s dijagram) [10]

Povišenje temperature pregrijane pare na izlazu iz pregrijača uzrokovat će povećanje stupnja djelovanja, što je uočljivo na slici (Slika 2.13). Desna strana ciklusa se pomiče iz točaka 3 i 4 u točke 3' i 4'.



Slika 2.13. Povišenje temperature pregrijane pare (T-s dijagram) [10]

Međupregrijanjem pare se postiže da para na izlazu iz kondenzatora postane zasićenija. S obzirom na nadogradnju osnovnog Clausius-Rankinova ciklusa, mijenjanju se i osnovne formule za toplinu, rad i stupanj djelovanja.



Slika 2.14. Međupregrijanje pare (T-s i h-s dijagram) [10]

Iz T-s i h-s dijagrama na slikama (slika 2.14.) uočljivo je kako je toplina dovedena u kotao jednaka:

$$Q_{kotla} = h_1 - h_{6s} + h_3 - h_{2s}. \qquad (2-14)$$

Rad na izlazu iz turbine iznosi:

$$W_{turbine} = h_1 - h_{2s} + h_3 - h_{4s}. \qquad (2-15)$$

Toplina koju je potrebno predati kondenzatoru iznosi:

$$Q_{kondenzatora} = h_{4s} - h_5. \quad (2-16)$$

Rad koji treba ostvariti pojna pumpa iznosi:

$$W_{pumpe} = h_{6s} - h_5. \quad (2-17)$$

Termički stupanj djelovanja Clausius-Rankinova ciklusa bit će jednak:

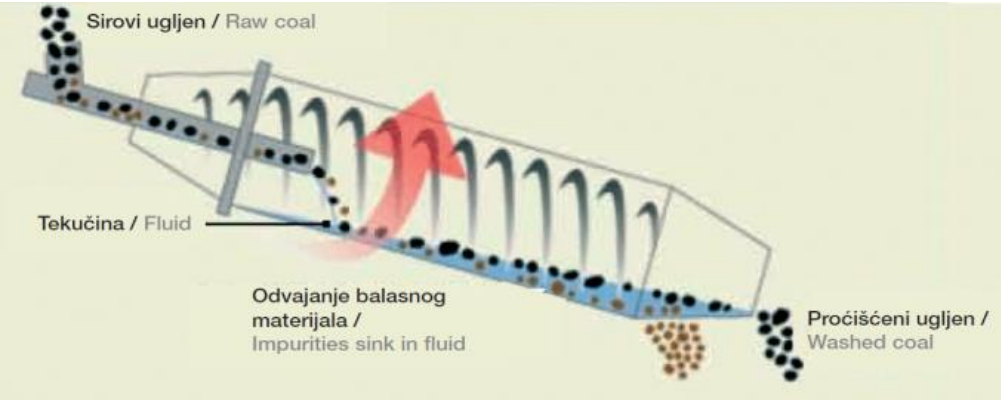
$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_{kotla}} = \frac{(h_1 - h_{2s} + h_3 - h_{4s}) - (h_{6s} - h_5)}{h_1 - h_{6s} + h_3 - h_{2s}}. \text{ [10]} \quad (2-18)$$

3. NOVE TEHNOLOGIJE TERMOELEKTRANA NA UGLJEN

U ovom poglavlju bit će pojašnjene konvencionalne i nekonvencionalne termoelektrane na ugljen. Konvencionalne termoelektrane imaju podkritične uvjete, a nekonvencionalne termoelektrane imaju nadkritične uvjete. Osnovna razlika u njima je ta da termoelektrane s novim tehnologijama, odnosno nadkritičnim uvjetima, manje zagađuju okoliš i imaju veću učinkovitost. Također, opisane su tehnologije unapređenja konvencionalnih elektrana, tehnologija integriranog rasplinjavanja u elektranama s kombiniranim ciklusom (IGCC) i tehnologije uklanjanja čestica (ispiranje ugljena, elektrostatski taložnici, vrećasti filteri, odsumporavanje i denitrifikacija dimnih plinova).

3.1. TEHNOLOGIJE PROČIŠĆAVANJA DIMNIH PLINOVA

Čišćenje ugljena ispiranjem već je uobičajena praksa u razvijenim zemljama, čime se smanjuju emisije pepela i SO_x, a povoljno djeluje i na proces izgaranja. Ugljen se transportira do termoelektrane zajedno s mineralnim sadržajem koji je nesagorljiv, a može sadržavati i štetne sastojke (poput žive). Jedna od tehnologija odvajanja štetnih sastojaka iz ugljena prikazana je na slici 3.1.

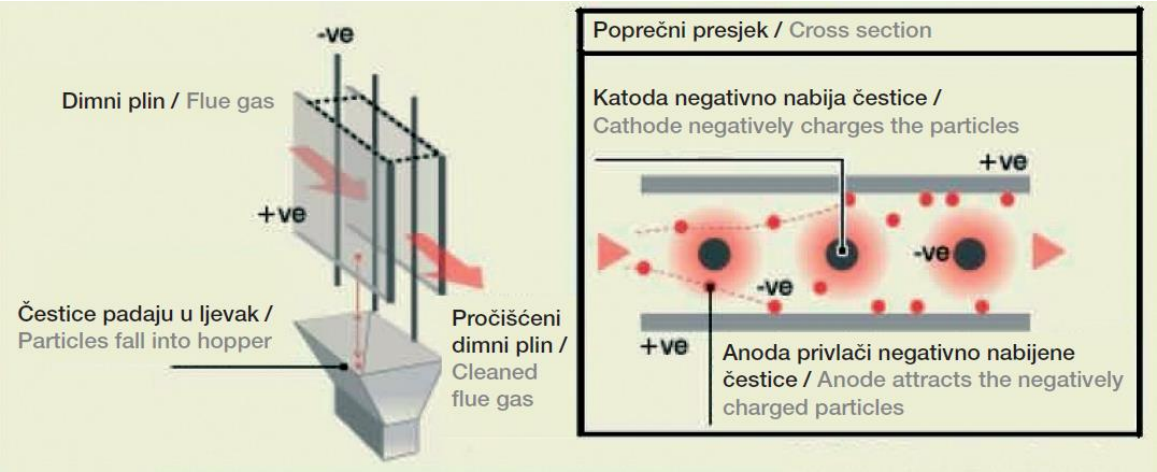


Slika 3.1. Ispiranje ugljena [11]

Ugljen se usitnjava i uvodi u spororotirajući bubanj u kojemu se nalazi tekućina veće gustoće, tako da ugljen pluta dok teži, mineralni materijal tone i sa dna se odvodi iz bubnja. Pročišćeni se ugljen zatim melje u finu prašinu pogodnu za izgaranje.

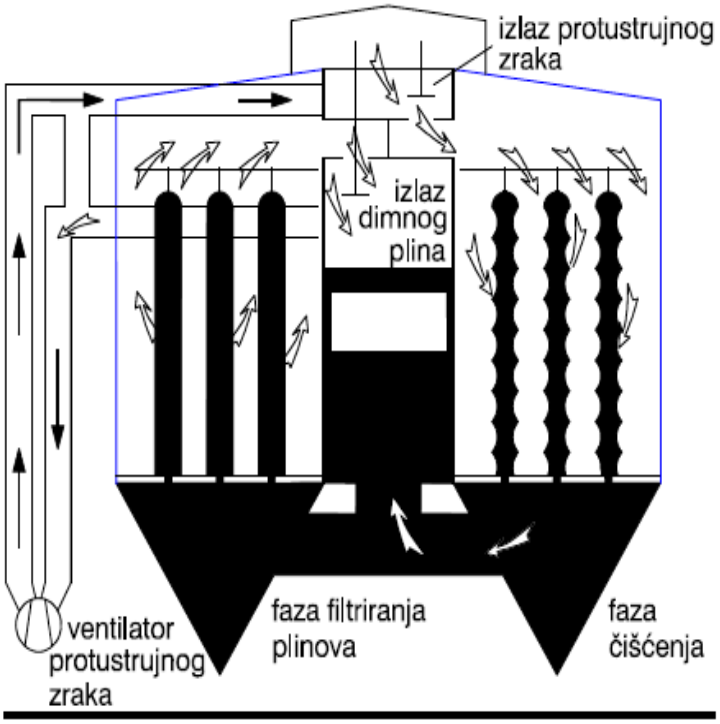
Korištenjem **elektrostatskih taložnika** ili filtara (slika 3.2.) može se iz dimnih plinova odstraniti do 99,7 % pepela. Osim letećeg pepela također se može smanjiti emisija opasnih tvari kao što su većina metala (osim žive). Ovo je postupak odvajanja krutih čestica nakon izgaranja. Rade na principu elektrostatskog polja u kojemu se čestice električki nabijaju i sakupljaju na anodi. Ova

tehnologija ne ovisi o kvalitetu ugljena i tipu ložišta, ali je jedino ograničenje mogu predstavljati raspoloživi prostor i financijska sredstva [11].



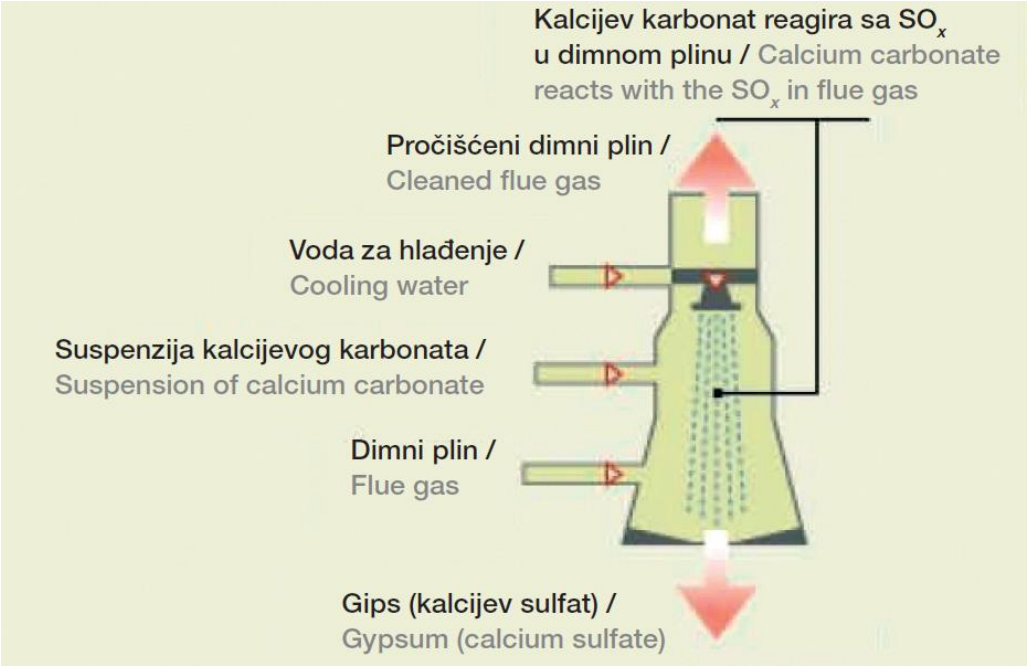
Slika 3.2. Princip rada elektrostatskog taložnika [11]

Osim elektrostatskih filtara koji su u najširoj uporabi, koriste se i **vrećasti filtri** (slika 3.3.). Učinkovitost je preko 99%, a uklanjaju se čestice u rasponu između 0,05 i 1,0 mikrometara. Glavna razlika između vrsta filtara je u izvedbi vreće za čišćenje [5].



Slika 3.3. Vrećasti filtar

Odsumporavanje dimnih plinova je metoda redukcije sumporovih oksida (SO_x). U ugljenu, sumpor može biti kemijski vezan ili ne mora biti (pirit). Pirit se može donekle ukloniti pranjem i čišćenjem ugljena. Sumporovi oksidi nastaju tijekom procesa izgaranja goriva koje sadrži sumpor. Za odstranjivanje sumporovih oksida u konvencionalnim se termoenergetskim postrojenjima najčešće koristi mokri postupak odsumporavanja (slika 3.4) kojim se iz dimnih plinova odstranjuje do 95 % SO_x. Vapnenac pomiješan s vodom raspršuje se na dimne plinove s vrha spremnika. Dimni plinovi reagiraju s raspršenom smjesom kalcijevog karbonata (vapnenac) i vode, pri čemu se stvara gips (kalcijev sulfat) koji se odstranjuje i koristi u građevnoj industriji. [11, 12]

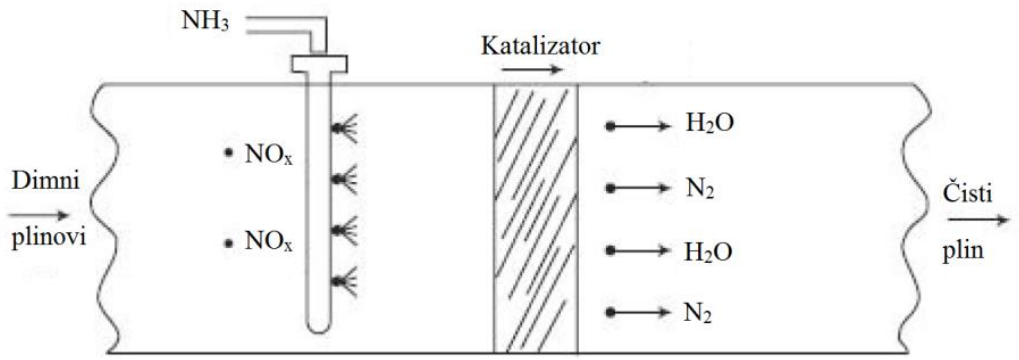


Slika 3.4. Odsumporavanje mokrim postupkom [11]

Stvaranje NO_x može se kontrolirati pravilnim projektiranjem kotlova, pravilnim postavljanjem plamenika, smanjenjem vršne temperature u zoni izgaranja, smanjenjem preostalog vremena zraka u vršnim zonama temperature, kontroliranjem brzine otpuštanja topline i recirkulacijom dimnih plinova. Formiranje NO_x može se smanjiti uporabom slabih NO_x plamenika i smanjenjem koncentracije O_2 u zoni izgaranja. Na taj način količina proizvedenog NO_x može se smanjiti na vrijednost manju od 300mg/m^3 (do 40 %).

Sekundarna mjera za reduciranje NO_x naziva se **denitrifikacija dimnih plinova**, a primjenjuje se iza zone izgaranja. Redukcijsko sredstvo, uglavnom amonijak, injektira se u kotao ispušnih plinova gdje vladaju temperature dimnih plinova od 850 °C do 900 °C. Time se postiže smanjenje emisije od oko 70 %. Proces se naziva selektivna nekatalitička redukcija (SNCR). Uvođenjem katalizatora ostvaruje se selektivna katalitička redukcija (SCR) kojom se može

ostvariti smanjenje emisije NO_x do 90 %. Tim je postupkom do sada stečeno i najveće iskustvo (slika 3.5). Dimni plinovi propuste se kroz katalizator, pri čemu NO_x reagira s otopinom amonijaka (NH_3).Katalizator je obično vanadij ili titanov oksid. [11, 12]



Slika 3.5. Denitrifikacija, selektivna katalitička redukcija NO_x [12]

3.2. TEHNOLOGIJE POVEĆANJA UČINKOVITOSTI POSTROJENJA

Današnje elektrane na ugljen predstavljaju u većini slučajeva konstrukcije stare 20 do 40 godina, s podkritičnim parametrima pare (530 - 540 °C i 140 - 180 bara), sa stupnjem učinkovitosti 36 - 38 %. Najnovije konstrukcije elektrana na ugljen s ultra nadkritičnim parametrima pare (> 600 °C i > 300 bara) predviđaju stupnjeve učinkovitosti veće od 50 %. Izbor tehnologije ima značajan i dugoročan utjecaj na učinkovitost i emisije termoelektrane. Važno je razumjeti međuodnos tih faktora, uspoređujući standardne i nove tehnologije koje su trenutno u pogonu ili razvoju.

Uvjeti u vodeno-parnom ciklusu, u slučaju kojih se voda pretvara u paru bez promjene specifičnog volumena, nazivaju se „kritični“ uvjeti. Isti su točno određeni i iznose 374,15 ℃ i 221,2 bar [10]. S obzirom na raspone tlakova i temperatura, razlikuju su podkritična, nadkritična, ultra nadkritična i napredna ultra nadkritična termoenergetska postrojenja. Primjenom suvremene tehnologije ultra nadkritičnih parametara pare, moguće je postići viši neto stupanj djelovanja elektrane, što će značiti veću konkurentnost i isplativost same elektrane, manju potrošnju goriva te samim time manju emisiju dimnih plinova. U tablici 3.1. zorno je prikazana usporedba starih i novih tehnologija termoelektrana na ugljen.

Tablica 3.1. Prikaz učinkovitosti i emisija CO_2 tehnologija TE na ugljen [13]

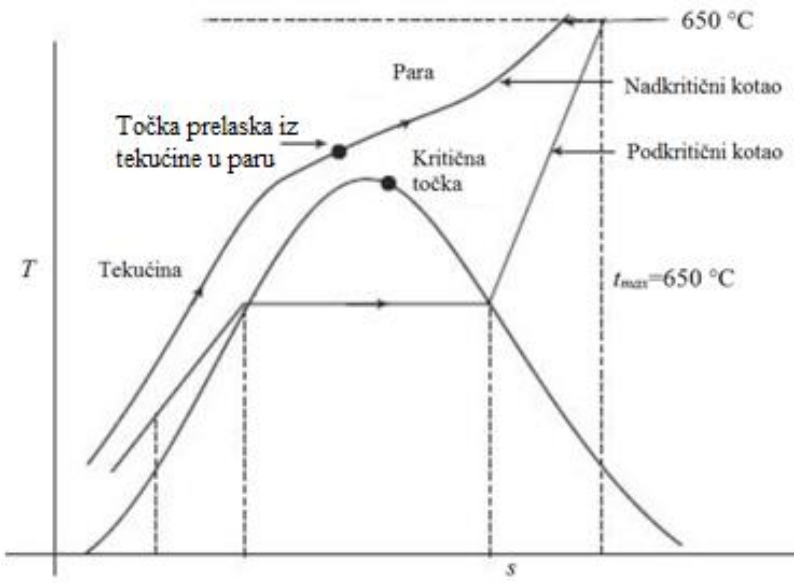
Karakteristike/TE	Podkritične	Nadkritične	Ultra nadkritične	Napredne ultra nadkritične/IGCC
Učinkovitost [%]	do 38	do 42	do 45	> 45
Tlak [bar]	100-220	221-255	256-350	> 350
Temperatura [°C]	do 540	540-580	580-620	> 700
Emisije CO_2 [g/kWh]	≥880	800-880	740-800	670-740
Potrošnja ugljena [g/kWh]	≥380	340-380	320-340	290-320

Konvencionalne ili podkritične tehnologije (engl. **subcritical technology**) termoelektrana na ugljen zasnovane su na PC tehnologiji (engl. Pulverised coal combustion), tj. na izgaranju ugljena u prahu. Ugljen u prahu ubrizgava se u kotao i spaljuje se kako bi se podigla para za ekspanziju u parnoj turbini. Voda teče kroz cijevi kotla te se dobiva para pod tlakom ispod kritičnog tlaka vode (221 bar) na temperaturi do 540 °C. Podkritične jedinice dizajnirane su za postizanje učinkovitosti do 38%.

3.2.1. NADKRITIČNE TEHNOLOGIJE

Nadkritične tehnologije (engl. **supercritical technology,** skraćeno **SC**) termoelektrana na ugljen mogu dosegnuti učinkovitost elektrane od 42% do 43%. Para je generirana na tlaku iznad kritične točke vode, do 255 bara. Veći troškovi nadkritične tehnologije su u velikoj mjeri zbog legura i tehnike zavarivanja potrebne za rad na višim tlakovima i temperaturama do 580 °C. Veći troškovi mogu se djelomično ili u potpunosti nadoknaditi uštedom goriva.

Postoji prijelazni dio na kojemu voda bljesne iz tekućine u paru. Iako je $v_t = v_p$ u vrijeme bljeska, koeficijent prijenosa topline vode u tekućoj fazi je veći od one u fazi pare ili $h_t > h_p$. Površine potrebne za određeni prijenos topline bile bi drugačije. Budući da je promjer cijevi isti prije i nakon prijelaza, duljina cijevi u dvije faze bit će drugačija za određenu količinu topline. Voda ulazi u kotao na jednom kraju niza paralelnih puteva i pojavljuje se na izlazu kao pregrijana para. Kretanje vode regulirano je pojnom pumpom kotla. Slika 3.6.pokazuje paru u podkritičnim i nadkritičnim kotlovima. Opći raspored superkritičnog kotla sličan je konvencionalnom kotlu.



Slika 3.6. T-s dijagram pare u podkritičnim i nadkritičnim kotlovima [12]

U konvencionalnom vertikalnom dizajnu zida kotla, uzlazne cijevi u središnjem dijelu izložene su najvišem toplinskom toku, a cijevi u kutu regije dobivaju manje topline. Temperatura pare u srednjim cijevima veća je nego one u kutu cijevi. Ova nejednaka temperaturna razlika može uzrokovati ozbiljne toplinske napore za cijevi. Da bi se to izbjeglo, za nadkritične kotlove dizajniran je zid sa spiralnom membranom. U spiralnom dizajnu, donji dio peći postavljen je u spiralni oblik, tako da para cirkulira u cijevima u kotlu kada putuje prema gore. Svaka cijev dio je sva četiri zida, tako da je temperaturna razlika između cijevi minimalna. Osim njih, koriste se i vertikalne rebraste cijevi.

Troškovi nadkritičnog kotla nekoliko posto su veći od podkritičnog kotla istoga kapaciteta, ali zbog povećane učinkovitosti elektrane troškovi turbogeneratora, kao i ostale komponente (kondenzator, rashladni tornjevi, grijač napojne vode itd.) su manji. Tu će biti manja potrošnja goriva za određeni kapacitet, a ukupni troškovi proizvodnje električne energije bit će manji za nadkritični ciklus s duplim pregrijavanjem.

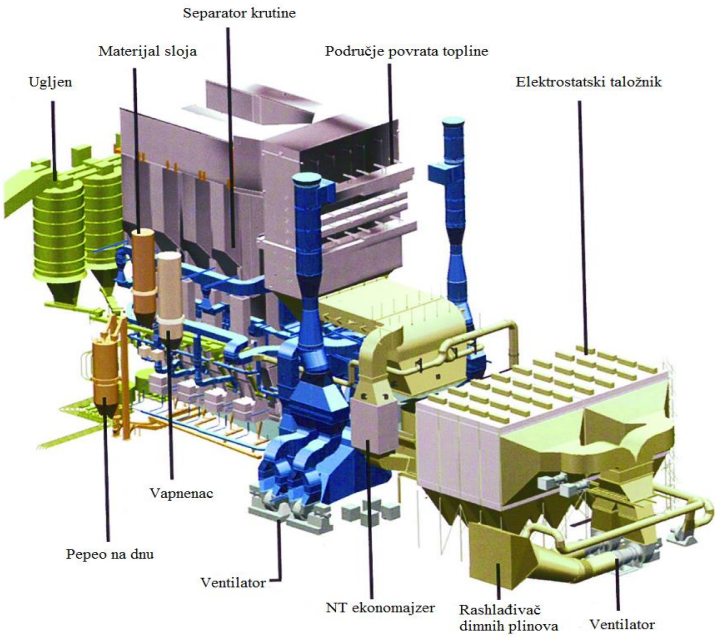
Osim ugljena u prahu (PC), za nadkritične kotlove može se koristiti tehnologija cirkuliranja u fluidiziranom sloju (engl. Circulating fluidized bed, skraćeno CFB). PC tehnologija u modi je više od 80 godina, a CFB tehnologija je koristi se zadnjih 30 godina, dok je CFB više komercijalizirana. PC tehnologija dobro je dokazana s veličinama od 1300 MW, a CFB u rasponu do 500 MW.Za razliku od konvencionalnih PC kotlova, koji spali masivni ugljen na visokoj temperaturi plamena pri temperaturama između 1200 i 1300 °C, CFB kotlovi nemaju plamenika i goriva su u komadima veličine oko 6 do 10 mm pomiješane s vapnencem te se spaljuju na nižim

temperaturama, od 815 do 900 °C. Zbog snažnog miješanja, dugog izgaranja i niske temperature procesa izgaranja, CFB može čisto sagorjeti bilo koji zapaljivi materijal, a uvelike nadmašuje ograničenja goriva PC izgaranja.

Nadkritične PC jedinice mogu se nositi s CO_2 i drugim emisijama samo u mjeri u kojoj je učinkovitost elektrane povećana, dok integracija nadkritične tehnologije kotla s CFB tehnologijom pruža najbolju kombinaciju značajki za učinkovitom jeftinom i ekološki prihvatljivom energijom. Emisije plinova dodatno su smanjene s poboljšanom učinkovitošću u pogledu nadkritičnih parametara.

Dizajni se nude uz jednu jedinicu od 800 MW veličine u nadkritičnim rasponu, a to je Benson dizajn glatkih vertikalnih cijevi za isparivače koji je razvio Siemens, Njemačka [12].

Primjer je **Lagisza termoelektrana** od 460 MW u Poljskoj koje je u pogonu od 2009. godine te je jedna od najvećih operativnih nadkritičnih elektrana s CFB kotlom. Prve podkritične jedinice izgrađene su 1960. godine, a uz novi CFB kotao trenutno rade pet konvencionalnih kotlova po 120 MW. CFB kotao ne zahtijeva skupe instalacije odsumporavanja i denitrifikacije dimnih plinova, jer se SO_2 i NO_x mogu ukloniti iz kotla unošenjem vapnenca. CFB kotao ima veću fleksibilnost goriva nego PC kotlovi. Kotao je prikazan na slici 3.7., a ugrađen je ciklon, odnosno separator čvrstih tvari. Ova jedinica generira 2,3 TWh električne energije godišnje. Prosječno godišnje opterećenje elektrane je 85% (392 MW). Karakteristike iste nalaze se u tablici 3.2.



Slika 3.7. Opći raspored kotla TE Lagisza [16]

Tablica 3.2. Karakteristike TE Lagisza [16]

Naziv TE	Łagisza
Lokacija	Będzin, Poljska
Snaga TE	460 MW
Investicija	594 milijuna $
Stupanj iskoristivosti	42%
Tehnologija TE	CFB
Protok pare	361 kg/s
Tlak pare na turbini	275 bara
Temperatura pare na turbini	560 °C
t dimnih pl. na izlazu iz kotla	130 °C
t dimnih pl. prije rashladn dimnjaka	85 °C
Emisije prašine	0,09 kg/MWh
Emisije SO_2	0,6 kg/MWh
Emisije NO_x	0,6 kg/MWh
Emisije CO_2	750 kg/MWh

3.2.2. ULTRA NADKRITIČNE TEHNOLOGIJE

Ultra nadkritične tehnologije (engl. **ultra supercritical technology,** skraćeno **USC**) termoelektrana na ugljen rade na još višim temperaturama i tlakovima. Termički stupanj djelovanja može dostići 45%. Trenutno ne postoji dogovorena definicija za granice temperature i tlaka ove tehnologije, ali možemo reći da temperatura ove tehnologije varira 590 - 700 °C, a tlak 256 - 350 bara.

Neki od poznatih svjetskih dobavljača SC i USC kotlova i turbina su: Alstom (Francuska), Mitsubishi (Japan), Hitachi (Japan), Toshiba (Japan), Ansaldo (Italija), Doosan (Južna Koreja), Siemens (Njemačka), GE (SAD), DIP (Kina) i Dengfong (Kina).

Termoelektrane s ultra superkritičnim parametrima omogućuju mnoga tehnička rješenja i implementacije sustava sa ciljem povećanja stupnja djelovanja same elektrane. Slijedi pregled mogućih rješenja [10]:

- Povišenje temperature napojne vode. Optimalna temperatura napojne vode za USC parametre pare, iznosa 300 bara/600 °C, je u rasponu 300 °C - 310 °C . Za usporedbu, temperatura napojne vode za potkritične parametre je u rasponu od 150 °C - 270 °C, što

predstavlja značajan skok temperature napojne vode, a samim time i povećanje učinkovitosti termoenergetskog postrojenja.

- Smanjenje tlaka kondenzacije. Bitnu će ulogu imati specifična lokacija na kojoj se planira izgraditi termoelektrana, odnosno temperaturni uvjeti koji će imati utjecaj na samu temperaturu u parnom ciklusu. Ugradnja visokotlačnog kondenzatora predstavlja jedno od mogućih rješenja, čime se ima utjecaj na smanjenje ukupnih gubitaka na ispustu parne turbine.
- Povećanje učinkovitosti kotla. Učinkovitost kotla, prije svega, ovisi o temperaturama dimnih plinova i samoj kvaliteti ugljena korištenog kao pogonsko gorivo. Temperature dimnih plinova potrebno je svesti na što niže vrijednosti, što će ovisiti o kvaliteti korištenog ugljena, tj. udjelu sumpora, koji određuje točku rošenja sumporne kiseline sadržane u dimnom plinu. Sustav za odsumporavanje dimnih plinova smanjit će temperature dimnih plinova do 100 °C i omogućiti uporabu dodatnih regenerativnih toplinskih procesa. Što se tiče kvalitete korištenog ugljena, današnje stanje tehnologije u konstruiranju kotlova dovedeno je do visokog postotka učinkovitosti, čak više od 95% pri donjoj ogrjevnoj vrijednosti ugljena.
- Povećanje učinkovitosti parne turbine. Dizajn lopatica je izrazito bitan i daljnjim razvojem tehnologije u izradi, povećanju izdržljivosti i proračunima dinamike fluida, postići će se povećanje mehaničke izdržljivosti i stupnja iskorištenja parne turbine.

3.2.3. NAPREDNA ULTRA NADKRITIČNA TEHNOLOGIJA

Napredna ultra nadkritična tehnolgija (engl. **advanced ultra supercritical technology**, skraćeno **A-USC**) termoelektrana na ugljen ima osnovne principe ultranadkritične tehnologije, a nastoji postići učinkovitost veću od 50%. Kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova i potrošnja goriva po jedinici snage, proizvođači pokušavaju povećati učinkovitost povećanjem temperature pare na sljedeći viši raspon. Zahtijeva korištenje materijala otpornog na uvjete pare 700 - 760 °C i tlakova preko 350 bara. Materijali u razvoju su legure na bazi nikla, a koštaju puno više od čeličnih materijala koji se koriste u prethodno opisanim tehnologijama. Razvoj super-legura i smanjenje njihove cijene glavni su izazovi za komercijalizaciju ove tehnologije. Od tih legura pravile bi se sljedeće komponente: ploče kotla, pregrijač, dogrijač, parovod, rotor turbine, kućišta, ventili i ostalo.

Problemi koji se postavljaju na karakteristike materijala su otpornost na puzanje, zavarljivost materijala, čvrstoća na toplinski zamor, otpornost na koroziju na strani dimnih plinova

i otpornost na oksidaciju na strani pare. Pritom se posebna pozornost treba obratiti na odabir materijala visokotlačnih cjevovoda pare, komora pare, pregrijačkih cijevi i cijevnih stijena ložišta kotla.

3.3. POVEĆANJE SNAGE KONVENCIONALNIH TE NA UGLJEN KOMBINIRANIM CIKLUSOM

Maksimalna temperatura pare u energetskom ciklusu ne prelazi 600 °C, iako temperatura pri dnu peći na ugljen iznosi 1300 °C. Dakle, postoji velika toplinska nepovrativost i smanjenje dostupnosti zbog prijenosa topline od plinova izgaranja do pare kroz tako veliku temperaturnu razliku. Postavljanjem termoelektrane visoke temperature kao dodatne jedinice do parne elektrane, može se postići veća učinkovitost pretvorbe energije iz goriva u električnu energiju, budući da kombinirana elektrana djeluje kroz veći temperaturni raspon.

Termoelektrane s plinskom turbinom često se koriste kao vršna postrojenja za određeno doba dana kada je potrošnja energije visoka, zbog visoke cijene goriva i brzog pokretanja/zaustavljanja elektrane. Velike parne termoelektrane, dizajnirane da zadovolje vršna opterećenja, radit će na neekonomično tijekom većeg dijela godine.

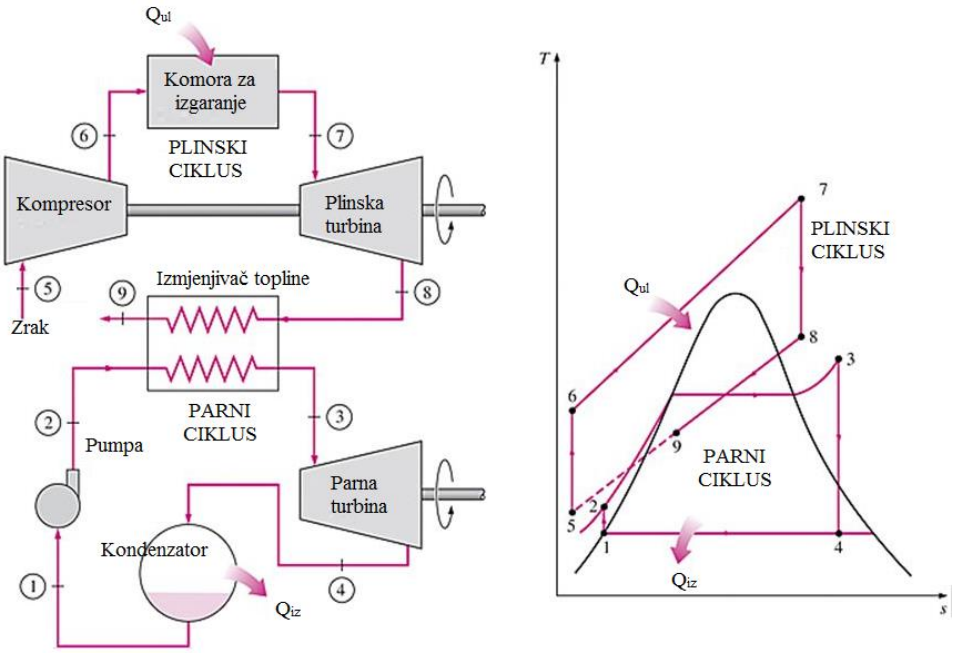
Da bi se prevladala niska učinkovitost ciklusa, plinska turbina može se koristiti u kombinaciji s parnom turbinom, nudeći korisne prednosti plinske turbine brzog pokretanja i zaustavljanja te dopuštanja fleksibilnog rada kombiniranog postrojenja preko širokog raspona opterećenja. Energija izlaznih plinova iz plinske turbine koristi se u parnom procesu kao grijanje vode i proizvodnja vodene pare za parnu turbinu. Kombinirane termoelektrane nazivamo CCGT termoelektranama (engl. **Combine Cycle Gas Turbine**).

Svjetska potražnja za termoelektrane s kombiniranim ciklusom dramatično raste, a neki stručnjaci prognoziraju eksplozivan rast u narednih deset godina. Ovo je danas najučinkovitiji sustav za generiranje električne energije. Zahvaljujući istraživanjima, tehnologija plinske turbine je značajno napredovala tijekom posljednja dva desetljeća. **Prednosti kombiniranih plinsko-parnih ciklusa** mogu se prikazati kako slijedi:

- visoka ukupna učinkovitost elektrane; može se postići preko 50%
- niski investicijski troškovi; zbog 2/3 proizvedene u plinskoj turbini i samo 1/3 proizvedene jednostavnom parnom turbinom, troškovi investicije su oko 30% manji od onih u konvencionalnim parnim TE
- potrebna je mala količina vode; količina rashladne vode koja je potrebna iznosi 40 do 50% koliko za parne TE

- jednostavna pogonska fleksibilnost; uključivanja i isključivanja postrojenja su brza, što također utječe na učinkovitost u pozitivnom smjeru (smanjenje početnih gubitaka)
- fazna instalacija; budući da plinska turbina može ići u pogon mnogo prije parnog postrojenja, moguća je instalacija u fazama. Plinski dio elektrane može proizvoditi energiju dok je parni dio u izgradnji. To omogućuje podešavanje rasta potražnje za energijom u mreži. Kasnije se može instalirati jedinica za rasplinjavanje ugljena ako je prevelik porast cijene nafte ili plina
- jednostavnost rada; TE kombiniranog ciklusa rade potpuno automatski pa je pogodno za upotrebu za manje iskusno osoblje
- niski utjecaj plina na okoliš; pogodne su za korištenje u gusto naseljenim područjima zbog visoke učinkovitosti i niske razine emisije onečišćujućih tvari. Niske razine NO_x, 40% manje CO_2 u usporedbi s postrojenjem na ugljen
- prednosti za kogeneraciju toplinske i električne energije; dobra termodinamička svojstva ovih TE vrlo su prikladna za kogeneraciju električne i toplinske energije.[12]

Na slici 3.8. shematski je prikazan plinski i parni toplinski ciklus u plinskoj turbini. Također, prikazane su faze termodinamičkog procesa: 1 - 2 pumpanje vode, 2 - 3 zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje vode u parnom kotlu, 3 - 4 ekspanzija pare u parnoj turbini, 4 - 1 kondenzacija pare u kondenzatoru parne turbine, 5 - 6 kompresija plina, 6 - 7 izgaranje u ložištu plinske turbine, 7 - 8 ekspanzija plina u plinskoj turbini, 8 - 9 hlađenje plina u parnom kotlu. [5]

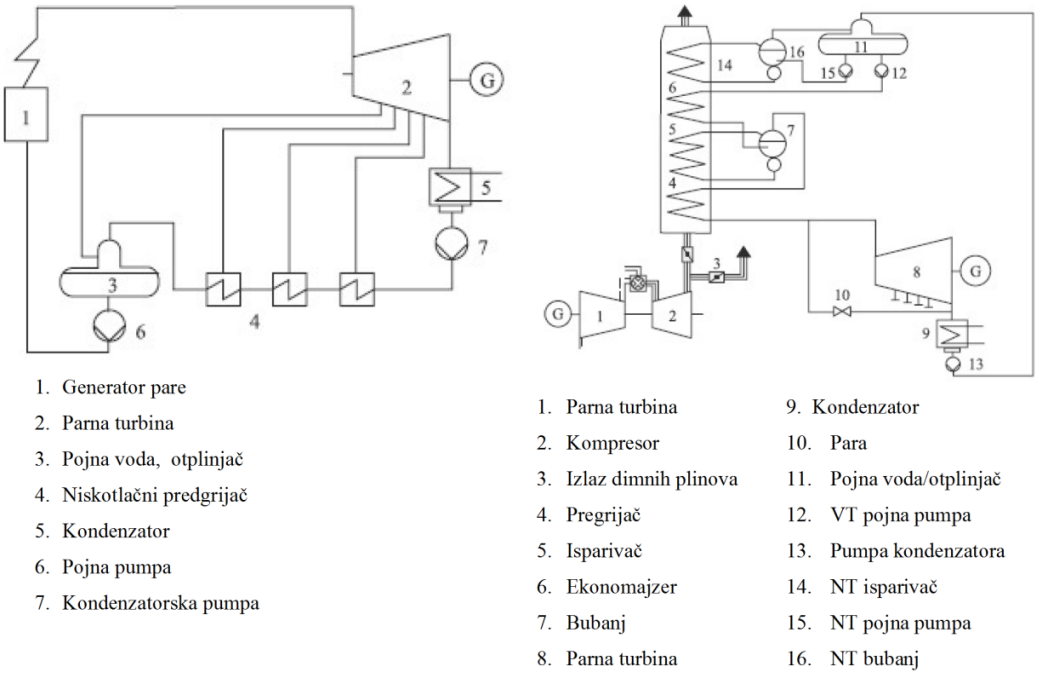


Slika 3.8. Shematski prikaz i T-s dijagram plinskog i parnog toplinskog ciklusa

Parni ciklus se može izvesti s jednim, dva ili tri tlaka pare. Kod većih snaga (preko 200 MW) u novije vrijeme je uobičajena izvedba s tri tlaka pare i zajedničkom osovinom za cijeli plinsko - parni blok. Kod nekih izvedbi generator se nalazi između plinske i parne turbine, a kod drugih je parna turbina između plinske turbine i generatora. Parna turbina se sastoji iz niskotlačnog i visokotlačnog dijela sa ili bez pregrijavanja pare između njih. Razlika učinkovitosti pretvorbe toplinske u električnu energiju u postrojenju s dva i tri tlaka pare je oko 1%. Postrojenje s tri tlaka pare ima veću prednost što je viša cijena prirodnog plina.

Kod podkritičnih ili konvencionalnih termoelektrana možemo povećati potencijal (engl. **re-powering**). Rezultat tog postupka je povećanje snage i prije svega povećanje učinkovitosti. Iako ne omogućuje ostvarivanje istih rezultata kakvi su mogući izgradnjom novih postrojenja, ipak omogućuje znatno približavanje takvim efektima, osobito zbog smanjena tzv. troškova promicatelja projekta, tj. investitora (cijena zemljišta, razvoja projekta, puštanja u pogon, financiranja i osiguranja). Zasniva se na **kombiniranom ciklusu**, tj. dodavanju plinske turbine uz rekuperaciju ispušnih plinova. Moguća su razna tehnološka rješenja:

- *re-powering* s predgrijanjem vode za napajanje ciklusa proizvodnje pare,
- *re-powering* s iskorištavanjem ispušnih plinova kao dodatka u procesu izgaranja u kotlu,
- *re-powering* s proizvodnjom pare za napajanje sustava pare [17].



1. Generator pare
2. Parna turbina
3. Pojna voda, otplinjač
4. Niskotlačni predgrijač
5. Kondenzator
6. Pojna pumpa
7. Kondenzatorska pumpa

1. Parna turbina
2. Kompresor
3. Izlaz dimnih plinova
4. Pregrijač
5. Isparivač
6. Ekonomajzer
7. Bubanj
8. Parna turbina
9. Kondenzator
10. Para
11. Pojna voda/otplinjač
12. VT pojna pumpa
13. Pumpa kondenzatora
14. NT isparivač
15. NT pojna pumpa
16. NT bubanj

Slika 3.9. Parna TE prije *re-powering* (lijevo) i kombinirani ciklus nakon *re-powering* (desno) [12]

Pretvorba starih elektrana u kombinirane termoelektrane zanimljiv je način kako nastaviti koristiti dijelove starijih parnih termoelektrana koje su postale neekonomične. U ovom postupku, kotlovi se zamjenjuju modernim plinskim turbinama i kotlovima otpadne topline. Parne turbine starih termoelektrana s relativno niskim ulaznim tlakom i temperaturom pare dobro su prilagođene za kombinirani rad ciklusa. Ove 20-25 godina stare parne turbine i dalje imaju znatan životni vijek, ali njihovi kotlovi više nisu spremni za daljnje korištenje.

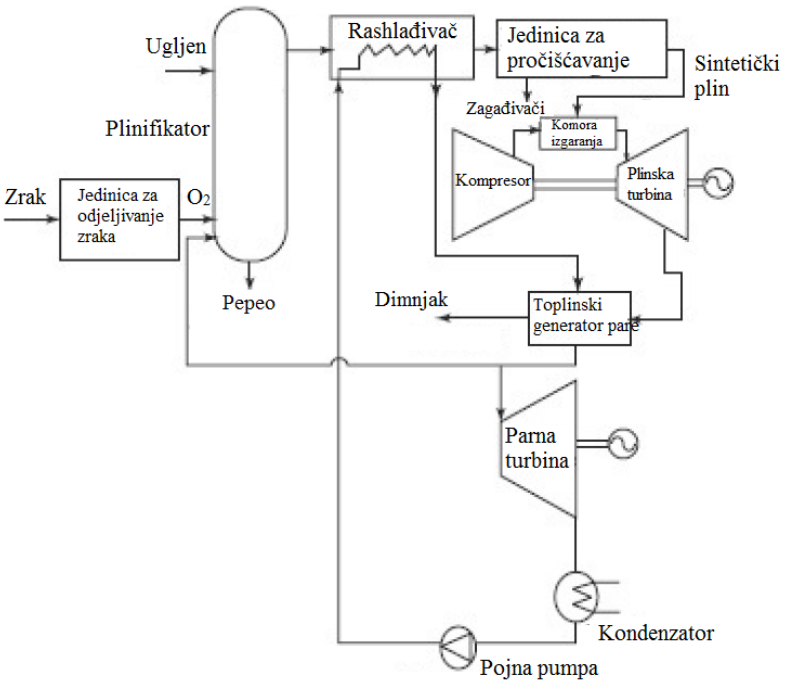
Na slici 3.9. su sheme konvencionalne parne termoelektrane prije i nakon povećanja snage, odnosno *re-powering*. Moguće je daljnje korištenje objekta (građevine), parne turbine i generatora, kondenzatora, glavnog sustava hlađenja, glavnog transformatora i visokonaponske opreme. Nije moguće daljnje korištenje kotla, cijevi, grijača napojne vode, pumpe za kondenzat, pumpe za kotao i opreme za nadzor. Ovakvom vrstom tehnologije postigla bi se znatna ušteda u potrošnji , a izlazna snaga postrojenja bila bi utrostručena. Isto je zorno prikazano u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Usporedba parne TE prije i nakon povećanja snage kombiniranim ciklusom TE [12]

	Prije *re-powering*	Nakon *re-powering*
Neto izlazna snaga TE	30,3 MW	102,2 MW
Izlazna snaga parne turbine	32,0 MW	35,0 MW
Izlazna snaga plinske turbine	-	68,4 MW
Ulazna toplina	107 MW	228 MW
Neto učinkovitost TE	28,3 %	44,8 %

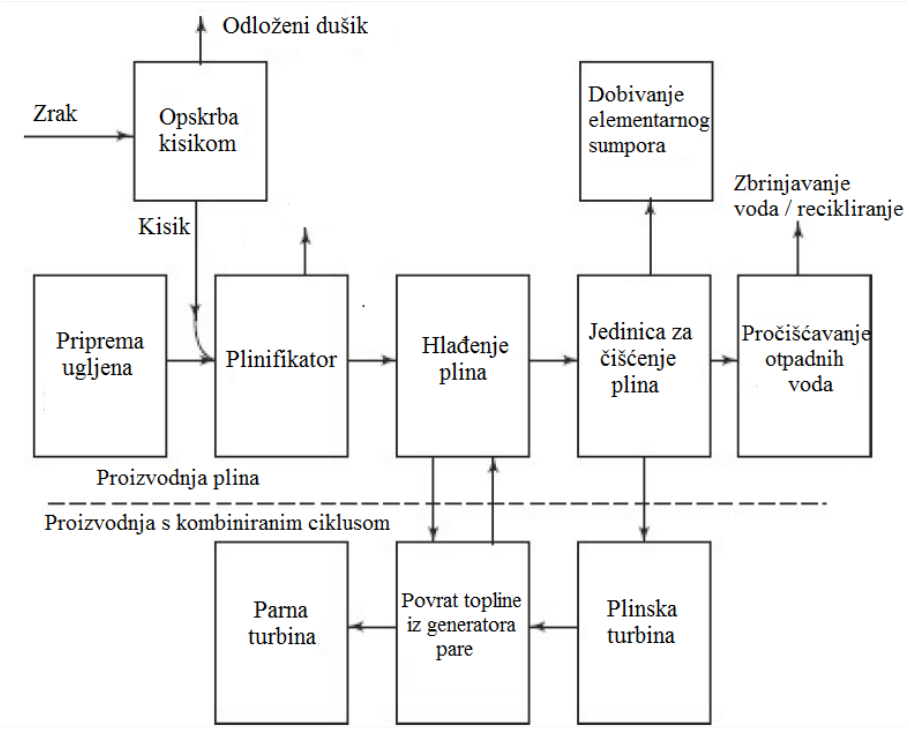
3.4. IGCC PROCES - KOMBINIRANI CIKLUS INTEGRIRANOG UPLINJAVANJA

IGCC proces (engl. **Integrated Gasification Combined Cycle**) je kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja. Ugljen se rasplinjava, bilo djelomično ili u cijelosti, a sintetički plin proizveden nakon čišćenja izgara u peći za izgaranje plinske turbine. Glavne karakteristike ciklusa prikazani su na slici 3.10. Ugljen i vapnenac pune se u posudu pod tlakom, a ugljen se rasplinjava dobivenim kisikom i parom. Pepeo i vapnenac čine rastaljenu šljaku koja se ispušta, a proizvedeni sintetički plin se hladi. Upotreba zraka umjesto kisika proizvodi plin niže kalorijske vrijednosti. Ispušni plinovi iz plinske turbine podižu paru u toplinskom generatoru pare.



Slika 3.10. Osnovna shema IGCC procesa

Izlazni sintetički plin tipičnog plinifikatora se hladi generiranjem pare visokog tlaka koja je naknadno ekspandirala u generatoru parne turbine za proizvodnju električne energije. Sintetički plin se zatim očisti od čestica filterima i / ili vodenim ispiranjem, nakon čega slijedi izmjena topline za hlađenje plina na temperaturu blisku temperaturi okoline (slika 3.11). Sumporni spojevi u plinu, prije svega H_2S i neki karbonil sulfidi (COS), se uklone, što se u konačnici pretvara u elementarni sumpor za prodaju. Očišćeno gorivo konačno je poslano u kombinirani ciklus gdje se spaljuje i ekspandira u plinskoj turbini za proizvodnju struje. Vrući ispušni plinovi iz plinske turbine također se koriste za stvaranje pare za proizvodnju električne energije.



Slika 3.11. Osnovno IGCC postrojenje

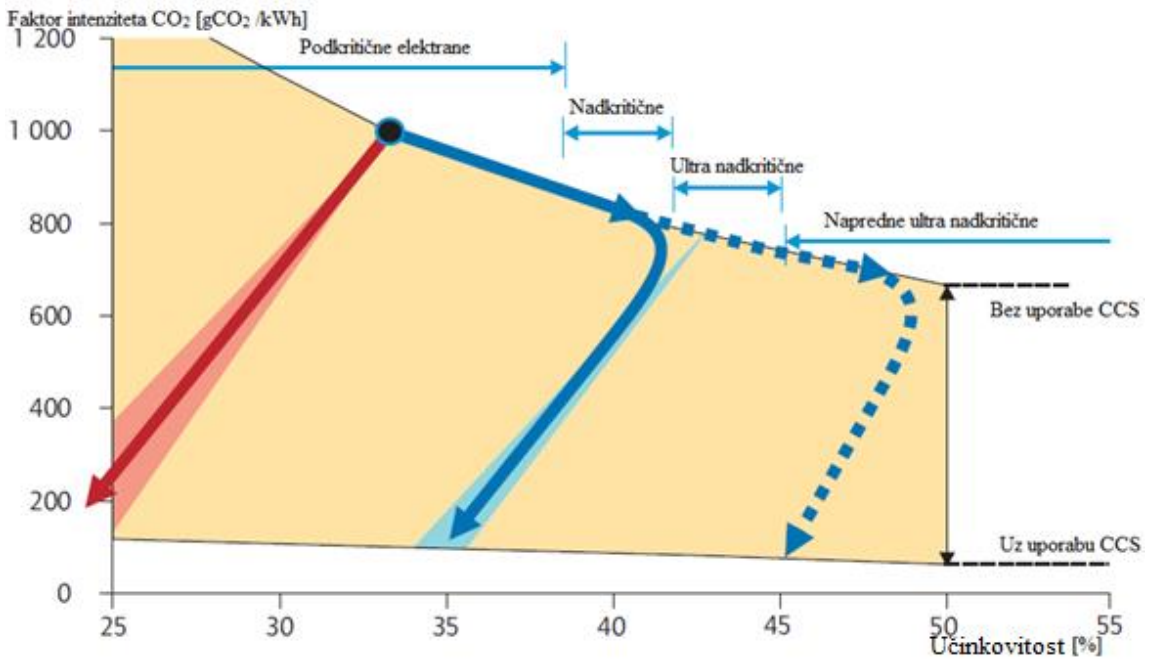
Tipična plinifikacijska elektrana sadrži sljedeće blokove:

1. Priprema ugljena za usklađivanje sa specifikacijama plinifikatora
2. Odvajanje zraka – za stvaranje 95% čistog kisika koji se pušta u plinifikator i za generiranje plinovitog dušika koji se pušta u plinsku turbinu
3. Plinifikacija ugljena- pretvaranje ugljena u plin djelomičnom oksidacijom.
4. Uklanjanje pepela i ostalih otpadnih čestica
5. Sintetički plin za hlađenje - za uklanjanje topline iz plina iz rasplinjača
6. Uklanjanje čestica iz plina
7. Uklanjanje plinova koji sadrže sumpor
8. Pretvaranje sumpora iz plinova u elementarni sumpor

Ispuh plinske turbine teče sukcesivno kroz pregrijač, dogrijač, kotao i ekonomajzer. Razvoj ove tehnologije, kao što je što ranije spomenuto, osigurava učinkovitu proizvodnju snage na način koji nije štetan za okoliš. Jedinstvena karakteristika IGCC postrojenja je njegova sposobnost da iskoristi prednosti izgradnje u fazama. Vršne turbine i/ili kombinirani ciklus postrojenja pogonjen prirodnim plinom mogu biti instalirane prve. Kasnije se može dodati plinifikacijska jedinica na ugljen za pokretanje kombiniranog ciklusa s plinskim ugljenim gorivom. Ona ima veću ukupnu učinkovitost i manje je štetna za okoliš [12].

4. CCS TEHNOLOGIJA

CCS (engl. **Carbon Capture and Storage**) u prijevodu znači prikupljanje i pohranjivanje ugljika. To je tehnologija koja može prikupiti i do 90% emisije ugljikovog dioksida (CO_2) nastalog zbog uporabe fosilnih goriva u proizvodnji električne energije i industrijskih procesa, sprečavajući ugljični dioksid od ulaska u atmosferu. Porast globalne temperature uzrokovan je učinkom staklenika za koji je najviše odgovoran CO_2 s udjelom od 55%. Razvitkom industrije udio CO_2 u atmosferi povećavao se s 280 ppmi (dijelova na milijun mola) na skoro 370 ppmi. Povećanjem CO_2 u atmosferi mogu nastati negativne i trajne posljedice za čovječanstvo, a za granicu toga smatra se iznos od 450 do 750 ppmi. Primjerice, kada se ne bi radilo na umanjenju udjela CO_2 u atmosferi, do 2100. godine isti bi iznosio 900 ppmi. Industrijski procesi kao što su proizvodnja željeza, cementa, papira i ostalih kemikalija proizvode 23% emisije ugljičnog dioksida. Loženje fosilnih goriva proizvodi više od 30% emisije ugljičnog dioksida. Najveći zagađivač je ugljen, a on čini 40% fosilnih goriva zbog svoje male cijene. CCS može imati jedinstvenu i ključnu ulogu u globalnoj tranziciji održivog gospodarstva s niskom razinom ugljika, kako u proizvodnji električne energije i industrije. To je tehnologija smanjenja emisije stakleničkih plinova. Međunarodna energetska agencija (IEA) 1991. godine kroz suradnju s 26 država i Europskom komisijom pokrenula je razvoj tehnologija za smanjenje učinka staklenika. Slika 4.1. prikazuje tehnologije elektrana na ugljen, opisane u prethodnom poglavlju, uz uporabu CCS tehnologije [14].

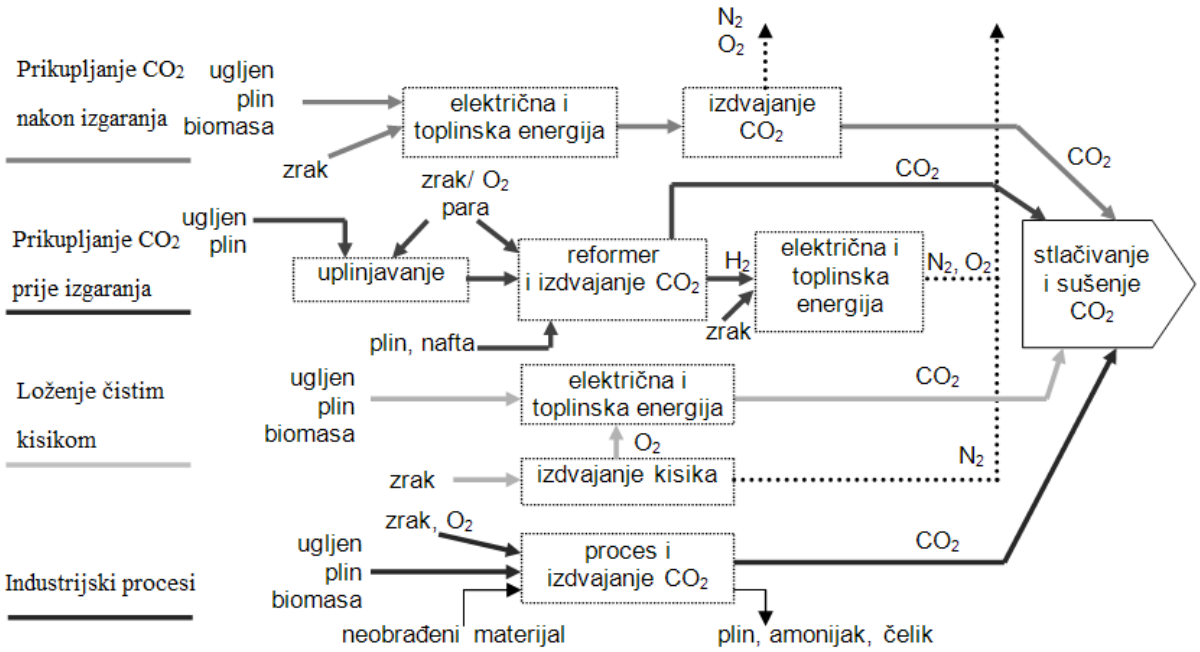


Slika 4.1. Smanjenje emisija CO_2 kod termoelektrana na ugljen uz CCS tehnologiju [15]

CCS lanac sastoji se od tri dijela; prikupljanje ugljičnog dioksida, transport ugljičnog dioksida i sigurno pohranjivanje emisija ugljičnog dioksida pod zemljom u iscrpljena naftna i plinska polja ili duboke slane vodonosnike. Prvo, tehnologija prikupljanja omogućuje odvajanje ugljičnog dioksida od plinova nastalih u proizvodnji električne energije i industrijskih procesa. Ugljični dioksid se zatim transportira cjevovodom ili brodom za sigurnu pohranu. Milijuni tona ugljičnog dioksida godišnje se prevoze cisternama, brodovima i cjevovodima u komercijalne svrhe. Ugljični dioksid se potom pohranjuje u pomno odabrane lokacije koje se obično nalaze nekoliko kilometara ispod Zemljine površine.

4.1. PRIKUPLJANJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Svrha prikupljanja ugljičnog dioksida je da se dobije čisti ugljični dioksid pod velikim tlakom koji se prevozi do skladišta i kasnije pohranjuje ispod Zemljine površine. Potrebno je dobiti čisti ugljični dioksid jer bi svi troškovi bili daleko skuplji da se prevozi i skladišti nekakvi plinovi s niskom koncentracijom CO_2. Postoje tri vrste prikupljanja CO_2, koji je nastao iz sagorijevanja fosilnog goriva (ugljen, prirodni plin ili nafte): prikupljanje prije izgaranja, prikupljanje nakon izgaranja i loženje čistim kisikom.



Slika 4.2. Procesi prikupljanja ugljičnog dioksida

Pojam **prikupljanja ugljikovog dioksida nakon izgaranja** (engl. post - combustion system) znači odvajanje CO_2 od ispušnih plinova poslije procesa izgaranja fosilnog goriva. Osnovni način

prikupljanja CO_2 iz ispušnih plinova je čišćenje aminovom otopinom s dodatnim desumporavanjem kako bi se izbjegla nečistoća ispušnih plinova. Idealni adsorbensi za prikupljanje CO_2 iz ispušnih plinova trebaju imati visoku sposobnost odabiranja CO_2 od ostalih ispušnih plinova, dugoročnu stabilnost pod raznim uvjetima rada te brzo širenje plina kroz adsorpcijski materijal.

Pojam **prikupljanja ugljikovog dioksida prije izgaranja** (engl. pre - combustion system) znači odvajanje CO_2 iz goriva prije procesa izgaranja. Jedna od glavnih prednosti ovoga procesa je visok stupanj CO_2 u dimnom toku što zahtjeva manju opremu i otapala s nižim energetskim zahtjevima. Ovaj postupak tipično obuhvaća prvi stupanj reakcije za proizvodnju smjese vodika i ugljikovog monoksida (sintetički plin) iz primarnog goriva. Dva glavna koraka su dodavanje pare (reakcija 1) ili kisika (reakcija 2) na primarnom gorivu. U kasnijem koraku, postupak se često naziva "djelomična oksidacija" kad se odnosi na plinovita i tekuća goriva i plinifikaciju kad se primjenjuje na kruto gorivo, ali principi su isti.

Dodavanje pare:

$$C_xH_y + xH_2O \leftrightarrow xCO + \left(x + \frac{y}{2}\right)H_2, \qquad (4-1)$$

djelomična oksidacija:

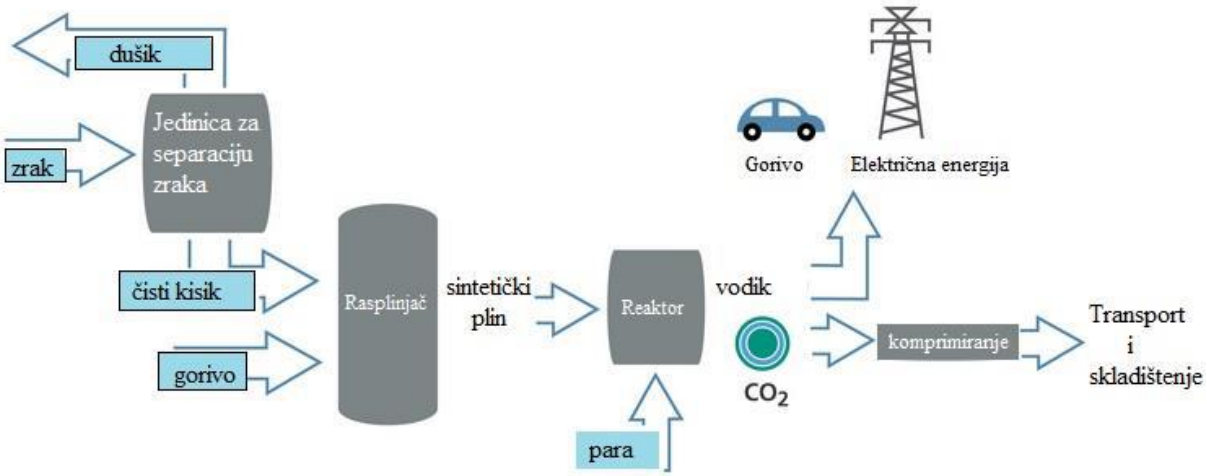
$$C_xH_y + \left(\frac{x}{2}\right)O_2 \leftrightarrow xCO + \left(\frac{y}{2}\right)H_2, \qquad (4-2)$$

ovaj proces prati sljedeća reakcija koja pretvara CO u CO_2 dodavanjem vodene pare:

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2. \qquad (4-3)$$

Konačno, CO_2 se ukloni iz smjese CO_2 i H_2. Koncentracija CO_2 prije koraka razdvajanja može biti u rasponu od 15-60% (suhe tvari), a ukupni tlak tipično je od 2 do 7 MPa. Odvojeni CO_2 tada je dostupan za pohranu.

Čvrsti adsorbensi, membrane materijala i tekući apsorberi trenutno se istražuju kako bi se upotrebljavali za prikupljanje CO_2 prije izgaranja. Sustav za prikupljanje CO_2 prije izgaranja temelji se na otapalima za apsorbiranje CO_2.Odvajanje membranama iznimno je zadovoljavajući proces jer je visoki tlak mješavine plinova prije izgaranja izvrstan pokretač membrane za odvajanje CO_2 i H_2.

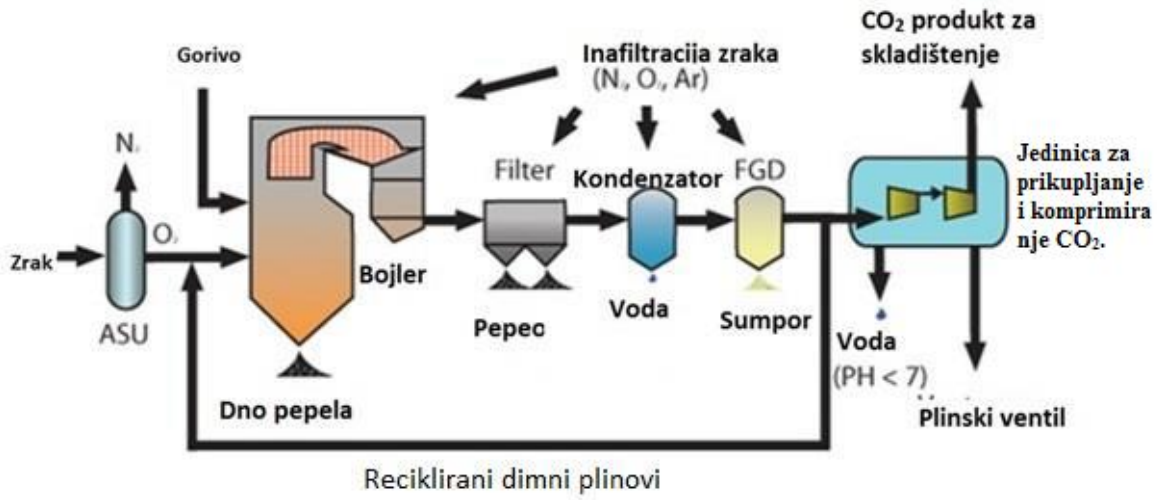


Slika 4.3. Proces prikupljanja CO_2 prije izgaranja [18]

Pojam **prikupljanja ugljikovog dioksida loženjem čistim kisikom** (engl. oxy-fuel system) označava korištenje kisika umjesto zraka za izgaranje fosilnog goriva gdje se u ispušnim plinovima uglavnom nalazi CO_2 i vodena para. Gledajući s aspekta volumena, CO_2 u ispušnim plinovima ima udio od 80%. Nakon toga vodena para se uklanja rashlađivanjem i komprimiranjem plina, odnosno kondenzacijom. Važno je razlikovati dvije vrste sustava loženjem čistim kisikom; parni kotao kgdje se gorivo loži čistim kisikom i ciklus izgaranja na bazi plinske turbine. Prva vrsta je u neposrednoj blizini demonstracije na komercijalnoj razini, dok je drugi još uvijek u fazi projektiranja.

Pozitivna strana ovog procesa je to što ispušni plin sadrži samo CO_2 i vodenu paru, stoga je krajnji korak dobivanja CO_2 pojednostavljen jer je samo potrebna kondenzacija pare. Negativna strana procesa je veliki trošak opreme i cijena električne energije potrebne za dobivanje kisika u prvom koraku. Do sada, ovaj proces implementiran je u elektranama male snage (do 30 MW).

Prvi korak jest odvajanje kisika iz suhog zraka postupkom destilacije. Kisik kao ulazni plin razrijeđen je s CO_2 ispušnog plina do tlaka od 0,21 bar kako bi se kontroliralo izgaranje te kako bi se umanjile nečistoće plina NO_x koje nastaju loženjem ugljena čistim kisikom. Proces prikupljanja ugljikovog dioksida loženjem čistim kisikom prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.4. Proces prikupljanja ugljikovog dioksida loženjem čistim kisikom [19]

4.2. TRANSPORT UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Ugljikov dioksid može se prevesti u tri stanja: plinovitom, tekućem i krutom stanju. U praksi za prijevoz plinova i tekućeg ugljikovog dioksida koriste se spremnici, cjevovodi i brodovi. Plin koji je po tlaku sličan atmosferskom tlaku zauzima veliki obujam za koji je potreban veliki obujam. Plin zauzima manji obujam ukoliko je komprimiran pa se tako transportira cjevovodom. Volumen se može još više smanjiti procesom kondenzacije i skrućivanja. Proces kondenzacije oduvijek se koristi za transport prirodnog i naftnog plina. Isto se može koristiti kao transport tekućeg CO_2. Za proces skrućivanja potrebno je puno više energije te isto nije isplativo. U transportu CO_2 cjevovodima obujam je automatski smanjen pri povišenom tlaku kao u plinovodima, gdje su tlakovi do 80 MPa.

Kako bi se smanjile klimatske promjene CO_2 će se morati transportirati do mjesta odlaganja, a isto će zahtijevati veliku mrežu cjevovoda. Materijali cjevovoda mogu biti izloženi koroziji zbog prisustva sumporne kiseline. Uklanjanje sumporne kiseline izaziva dodatne troškove kako bi se pročistio CO_2, a potrebno je ispitati karakteristike kvalitetnog cjevovoda CO_2. Najkvalitetnija opcija za materijal cjevovoda bila bi legura nehrđajućeg čelika, ali ta opcija nije ekonomična. Osim odabira materijala, pri izradi cjevovoda također je potrebno obratiti pozornost na dimenzioniranje i pritiske na cjevovod, dizajn svih dijelova cjevovoda, topografiju cijelog puta gdje ide cjevovod, uključujući sve vrste prepreka i vrsta tla, infrastrukturu gradova i sela kroz koje cjevovod prolazi. Duplo veća cijena transporta CO_2 bila bi ukoliko se isti prevozi cestovnim ili željezničkim putem.

Nakon osiguranog projekta te riješenih pravnih, odnosno zakonskih propisa za građenje

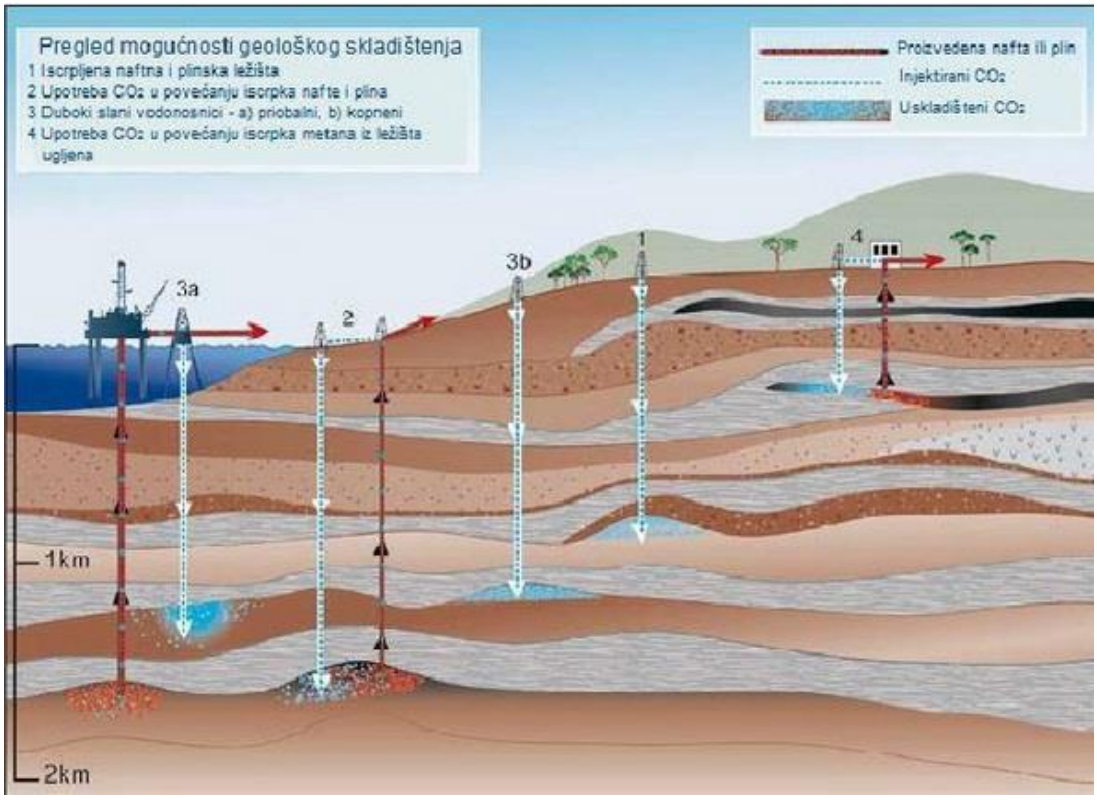
cjevovoda, konstrukcija **kopnenih cjevovoda** može krenuti. CO_2 cjevovodi mogu se graditi na isti način kao i cjevovodi ugljikovodika. Cijev se zavari i zamota te spusti u rov. Zatim se vrše ispitivanja, a nakon njih rov se zatrpava te se vegetacija obnavlja. Najviše vremena oduzima građenje cjevovoda na područjima grada i rijeka. **Podvodni cjevovodi** grade se uz pomoć teretnih brodova, a polažu se na dubinama do 2,2 km.

Transport brodovima može biti dosta značajan, jer se mnoga spremišta ispod Zemljine površine ne nalaze u bliskoj udaljenosti od izvora CO_2. Troškovi prijevoza brodom skoro su jednaki transportu podmorskim cjevovodima, a prijevoz kopnenim cjevovodima duplo je jeftiniji. Transport CO_2 brodovima sličan je kao transport tekućeg naftnog plina. Ukoliko se isporuka vrši na kopnu, CO_2se iskrcava u spremnike, a ako se isporuka vrši na moru, spremnici se prebacuju na platformu ili izravno u sustav za skladištenje. Za spremnike transporta CO_2preporučuju se hladnjaci na kojima bi CO_2bio u tekućem stanju, a temperatura spremnika iznosila bi -52 ºC pod tlakom od 7 bar.

4.3. POHRANJIVANJE UGLJIKOVOG DIOKSIDA

Za pohranjivanje ili skladištenje CO_2realna opcija je pohrana ispod Zemljine površine, a proces pohranjivanja CO_2mora biti siguran, trajan, ne previše skup te sposoban za se široku uporabu. Trenutno se razvijaju sljedeće opcije pohranjivanja CO_2: povećanje iscrpka nafte, prirodnog plina i metana utiskivanjem CO_2 u ležišta istih, pohranjivanje u već iscrpljenim ležištima nafte ili prirodnog plina te spremanje u dubokim naslagama stijena koja sadrže vodu visokog saliniteta tj. u vodonosnicima.

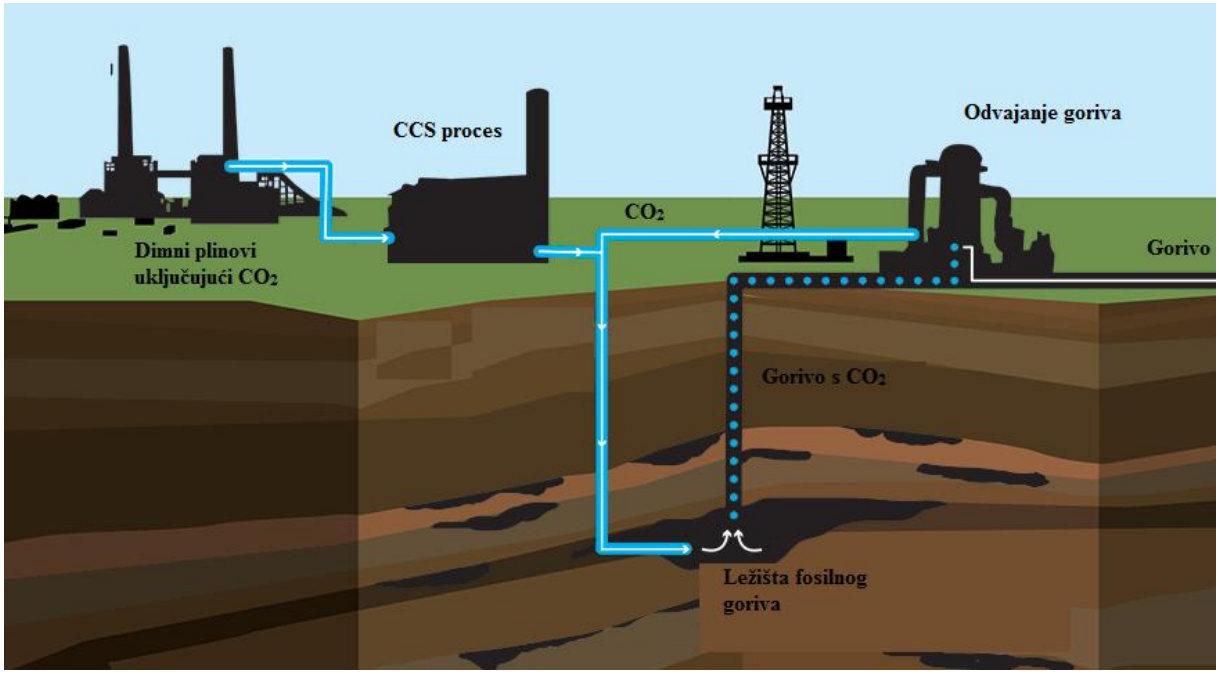
Geološko pohranjivanje CO_2 označava injektiranje istoga u duboke formacije stijena ispod Zemljine površine na kopnu ili na moru. Prva takva pohrana izvršena je u Sjedinjenim Američkim Državama početkom 70-ih godina prošlog stoljeća. Komprimirani ugljični dioksid ubrizgava se u gustom tekućem stanju. Do sada su ubrizgane velike količine nepoželjnih kemikalija i otpada industrije ispod Zemljine površine, a u većini zemalja isto je propisano zakonskim regulativama. Ugljični dioksid do sada je ubrizgavan u malim količinama, a isto će se morati povećati zbog velikih ispušnih plinova nastalih loženjem fosilnih goriva u termoelektranama. Mjesta za pohranjivanje koji se nalaze duboko ispod zemlje moraju biti gustih nakupina naslaga i velike propusnosti stijena sa slanim formacijama.



Slika 4.5. Geološko pohranjivanje CO_2 [20]

Pohranjivanje CO_2 u iscrpljenim ležištima nafte i prirodnog plina koristi se dugi niz godina u kombinaciji s otrovnim ispušnim plinovima, mješavinom ugljikovog dioksida i sumporovodika. Na ovaj način može se pohranjivati ugljikov dioksid u već iskorištena ležišta nafte i prirodnog plina. Potrebne su bušotine gdje se postojeće infrastrukture mogu iskoristiti te se samim time smanjuju troškovi. Negativna strana ovoga procesa je nemogućnost postizanja izvornog tlaka ležišta.

Pohranjivanje CO_2 povećanjem iscrpka nafte i prirodnog plina obavlja se utiskivanjem CO2 u ležišta kako je prikazano na slici 4.5. Isto se koristi za povećanje iscrpka nafte, a ne za trajno pohranjivanje CO_2. Oko 30% nalazišta ovaj pristup već koristi, a oko 70% nalazišta nafte utiskuje ostale ispušne plinove. Ovaj proces nije obećavajući za pohranjivanje CO_2 jer je svrha istoga prvenstveno dolazak do nafte, a korištenjem ovog procesa ležišta goriva se mogu iskoristiti do 50% više no uobičajenom tehnologijom iscrpa nafte. Utiskivanje ispušnih plinova smatra se drugom metodom povećanja iscrpka nafte, a isto povećava tlak u ležištu koje omogućava istiskivanje nafte i protok prema bušotinama.



Slika 4.6. Pohranjivanje CO2 povećanjem iscrpka nafte i prirodnog plina[20]

Oceani pokrivaju 71% Zemljine površine te je prosječna dubina 3,8 km. Ugljikov dioksid otopiv je u vodi, a povećanje CO_2 u zraku proporcionalno je povećavanju CO_2 u oceanima. Oceani sadrže 40000 Gt ugljikovog dioksida što opravdava razlog kako su **oceani** najbolja mjesta **za pohranjivanje CO_2**. Do sada je ispušteno 500 Gt u oceanima od ukupno 1300 Gt ljudskih emisija nastalog CO_2. Ugljikov dioksid pojavljuje se u plinovitom i tekućem stanju, ovisno o tlaku i dubini oceana. Ukoliko se isti utiskuje na dubinama do 500 m, na kojima je tlak 50 bar, CO_2 u stanju tekućine bi se pretvorio u plinovito stanje te izašao na površinu. Ukoliko se radi o dubinama od 500 m do 3000 m, CO_2 bi se također pretvorio u plinovito stanje jer je gustoća CO_2 na tim dubinama manja od gustoće vode. Iz toga razloga utiskivanje CO_2 u stanju tekućine potrebno je izvršiti pomoću difuzora pri velikom tlaku kako bi se kapi CO_2 rastopile dok dođu do površine oceana. Proces pohranjivanja na ovoj dubini vrši se pomoću cijevi pričvršćenih na brod. Druga vrsta procesa je za dubine veće od 3000 m. U tom slučaju CO_2 ostaje tekućina i kreće se prema dnu zbog veće gustoće od morske vode. Nastaju jezera CO_2. Pretpostavka je kako bi se tako odgodilo otapanje CO_2 u oceanima i zraku za tisuću godina. Pohranjivanje u oceanima može naštetiti morskim organizmima, a smrtnost istih može se očekivati u blizini utiskivanja. Količina utiskivanja može biti određena dopuštenom promjenom pH vrijednosti morske vode.

4.4. PRIMJERI TERMOELEKTRANA S CCS TEHNOLOGIJOM

U ovom potpoglavlju odabrana su dva primjera termoelektrana na ugljen s CCS tehnologijom koji su prikazani na slikama 4.7 i 4.8, a u tablici 4.1. zorno su prikazane karakteristike istih.

Tablica 4.1. Odabrani primjeri termoelektrana na ugljen s CCS tehnologijom

	Primjer 1	Primjer 2
Naziv	Petra Nova	Kemper County
Lokacija	Teksas, SAD	Mississippi, SAD
Snaga termoelektrane	240 MW	582 MW
Sirovina	ugljen	ugljen i prirodni plin
Tehnologija TE	PCB	IGCC
Kapacitet pohrane CO_2	1,4 Mt/god	3 Mt/god
Tip prikupljanja CO_2	nakon izgaranja	prije izgaranja
Nova elektrana / nadogradnja	nadogradnja	nova
Tip transporta	cjevovod (na kopnu)	cjevovod (na kopnu)
Transportni put	132 km	98 km
Pohranjivanje	u iscrpke nafte	u iscrpke nafte
Investicija	1 milijarda $	6,7 milijardi $ (elektrana + CCS)

Najveći projekt CCS tehnologije na svijetu je u sklopu velike termoelektrane na ugljen W.A Parish Generating Station u blizini Houstona (Teksas), a projekt se naziva **Petra Nova**. Postrojenje će biti u stanju prikupiti i pohraniti 1,4 milijuna tona CO_2 godišnje ili 5000 tona dnevno, što je ekvivalent emisijama 350.000 automobila. Računa se da će iz ispušnih plinova moći izdvojiti 90% emisija CO_2, sitnih čestica, sumpora i dušikovih oksida. Plinovi se pohranjuju u iscrpno naftno polje u Teksasu. Procjenjuje se da se na taj način iz tog naftnog polja može iscrpiti 60 milijuna barela nafte, a prihod od toga služit će za troškove CCS tehnologije. Iz toga razloga nije se povećavala cijena električke energije. Vrijednost ovog projekta je milijardu američkih dolara. Tehnologiju je razvila tvrtka Mitsubishi Heavy Industries iz Japana. [10]



Slika 4.7. Projekt Petra Nova

Jedna od najskupljih elektrana ikad izgrađenih je Kemper County projekt IGCC termoelektrane na ugljen i prirodni plin. Radi se o novoj termoelektrani s CCS tehnologijom, a sveukupni trošak elektrane je 6,7 milijardi američkih dolara, dok je prvotno trebala iznositi 2,88 milijardi američkih dolara. Nalazi se u Mississippiju (SAD). Godine 2010. počela je s izgradnjom, a u srpnju 2016. dio elektrane pušten je u rad, dok CCS tehnologija još uvijek nije puštena u rad. Bazirana je na čistom ugljenu te proizvodi sintetički plin pomoću dva plinifikatora. Dakle, ova vrsta termoelektrane prikuplja CO_2 prije izgaranja. Postrojenje će biti u stanju prikupiti i pohraniti 3 milijuna tona CO_2 godišnje. Isti će se prenositi cjevovodom dugim 98 km u iscrpke nafte. Samim utiskivanjem povećat će se iscrpak nafte, kao u Petra Nova, Teksas. [12]



Slika 4.8. Projekt Kemper County

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA NOVIH TEHNOLOGIJA

5.1. PODKRITIČNA TERMOELEKTRANA NA UGLJEN BEZ PRIKUPLJANJA CO_2

Termoelektrana na ugljen bez zbrinjavanja CO_2 unutar elektrane izgrađena je s 40 MW instaliranom snagom, a prema njezinoj ukupnoj mogućoj proizvodnji odnosno njezinoj efektivnoj snazi od 38% (kako je prethodno u radu navedeno) ona daje maksimalnu električnu energiju od 15,2 MW što je parametar za izračun novčanog tijeka i kumulativnog povrata investicije. Prema tome, elektrana godišnje može proizvesti 131,328 GWh energije.

Investicijski troškovi (I_t) su glavni rashodi u procesu izgradnje elektrane u odnosu na instaliranu snagu postrojenja. To su troškovi koji izravno i neizravno utječu na izgradnju i puštanje u pogon postrojenja, ili komponente troškova koje su nastale od strane operatera prije ili tijekom procesa izgradnje. U investicijske troškove uključena je cijena inženjeringa, nabave i izgradnje (EPC = *engineering, procurement and construction*). Također su uključeni i troškovi spajanja postrojenja sa infrastrukturom struje, vode i goriva. Troškovi izgradnje elektrana obično su karakterizirani specifičnim investicijama I_{spec} [n.j./kW] po jedinici instalirane snage. Troškovi investicija stoga iznose:

$$I = I_{spec} * P_{inst} \qquad (5-1)$$

gdje je P_{inst} nazivna snaga elektrane [21].

U ovom slučaju, ukupna instalirana snaga termoelektrane na ugljen je 40 MW dok je cijena izgradnje po kilovat-satu 2264 $/kWh. Uvrštavanjem u prethodnu jednadžbu dobivaju se investicijski troškovi od 90,56 milijuna dolara ili 76,94 milijuna eura. Troškovi održavanja se zanemaruju kao i troškovi dekomisije. Trošak zbrinjavanja CO_2 godišnje iznosi 960.000 dolara što se dobiva prosječnom cijenom od 30 $/kW. Cijena ugljena na godišnjoj razini iznosi 3,6 milijuna dolara što odgovara prosječnoj cijeni ugljena od 90 $/kW [22].

Cijena električne energije uzeta je s internetskih stranica HEP-a na dan 23.8.2017. te je izvršena konverzija u eure [27]. Konverzija dolara u eure, također je izvršena na dan 23.8.2017. godine prema tečaju na internetskoj stranici Hrvatske narodne banke [23].

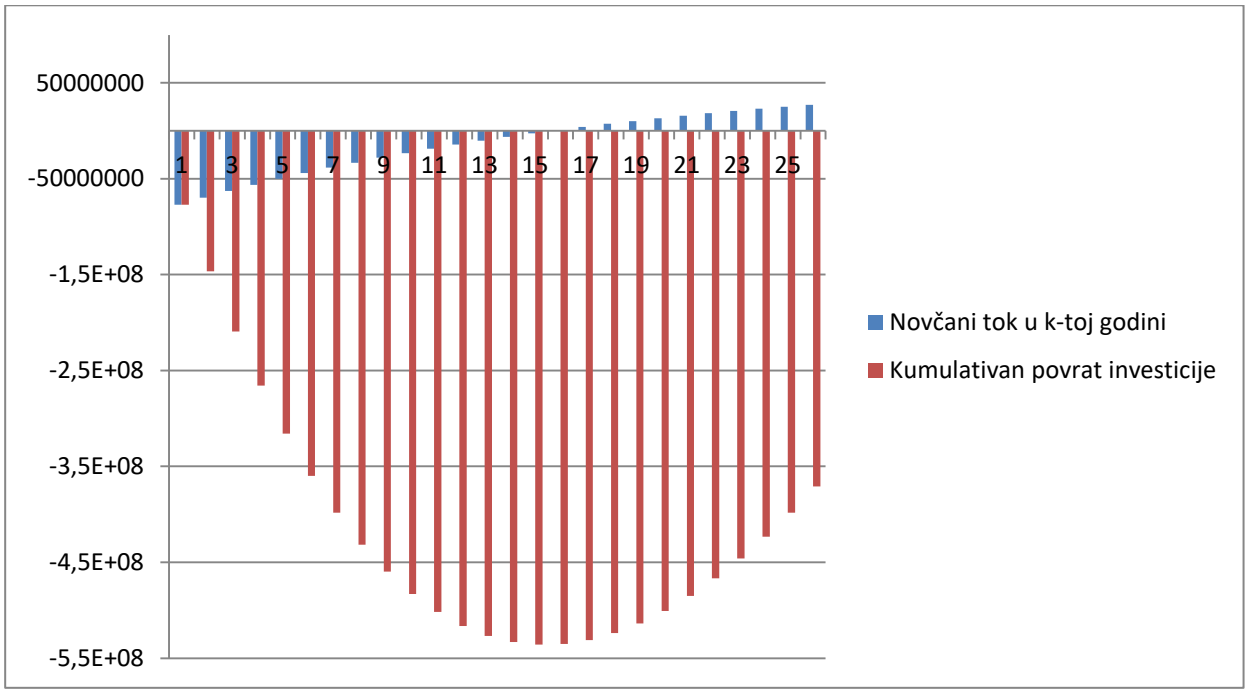
Slijedi prikaz analize s uključenim mogućim variranjem cijene ugljena i zbrinjavanja CO_2 u budućnosti. Za maksimalnu proizvodnju električne energije godišnje potrebno je 184615,38 tona ugljena ili 0,185 milijuna tona. Prema podatcima IEA organizacije projekcije cijene ugljena na tržištu u budućnosti kreću se prema tablici 5.1.

Tablica 5.1. Projekcije cijene ugljena od 2020. do 2060. godine [24]

Period	2020.	2030.	2040.	2050.	2060.
Cijena [$/t]	66	63	54	52	51
Cijena [€/t]	56,1	53,55	45,9	44,2	43,35

Pretpostavka je da termoelektrana godišnje proizvede 6000 t emisije CO_2, a projekcije cijene CO_2 u budućnosti za termoelektranu bez CCS tehnologije iznose 35 €/t. Dakle, troškovi iznose 210 000 €/god. Godišnja potrošnja ugljena za 40 MW termoelektranu pretpostavlja se da je 2000 t, [25]. Dakle, godišnja cijena ugljena mijenja se prema gore navedenim cijenama u tablici 1. Na grafikonu 5.1. prikazan je novčani tijek i kumulativni povrat investicije uz diskontnu stopu od 5%.

Grafikon 5.1. Novčani tijek i kumulativni povrat investicije za podkritičnu termoelektranu na ugljen bez CCS tehnologije od 40 MW s predviđanjima cijena i diskontnom stopom od 5 %

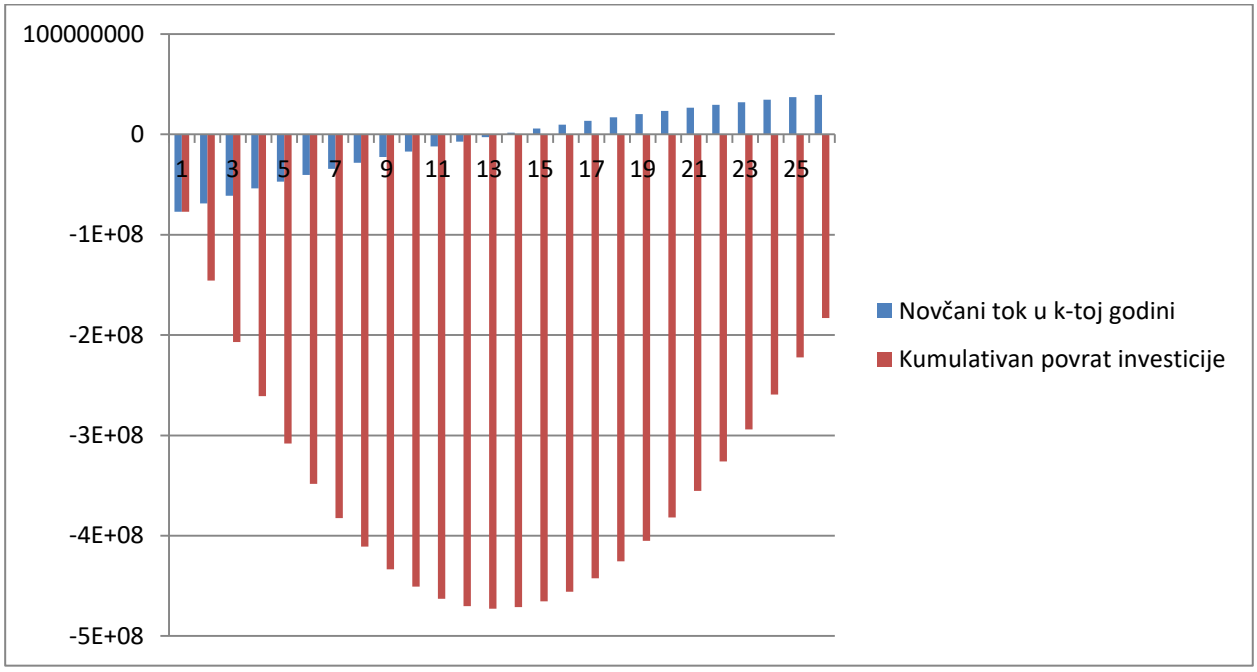


Iz grafikona 5.1. vidi se da je novčani tijek nakon 16 godina pozitivan. Za pretpostaviti je da je valni oblik vršnim vrijednostima svake godina zapravo Gaussova razdioba, pa je razvidno da će i s desne strane razdioba biti jednaka ili približno jednaka lijevoj. Za pretpostaviti je da bi kumulativni povrat investicije bio moguć nakon 30 do 35 godina.

5.2. NADKRITIČNA TERMOELEKTRANA NA UGLJEN BEZ CCS TEHNOLOGIJE

Na grafikonu 5.2. prikazan je novčani tijek i kumulativi povrat investicije za nadkritičnu termoelektranu 40 MW u periodu od 25 godina uz diskontnu stopu od 5 %. U odnosu na prethodni slučaj, ovdje je razvidno da kumulativni povrat investicije nije ostvaren niti nakon 25 godina što je rezultat većega ili sporijega padanja kumulativnoga povrata investicije s desne strane Gaussove razdiobe. Usprkos tome što ova elektrana ima veći stupanj djelovanja, a samim time i manje potrošnje ugljena te stvaranje manje količine CO_2. U obzir su uzete pretpostavke organizacije IEA za kretanje cijena ugljena i CO_2 na tržištu u budućnosti. Iskoristivost i potrošnja ugljena te stvaranje količine CO_2 uzete su iz teorijske analize u radu. U ovom slučaju nakon 26 godina puno je manji kumulativni povrat investicije negoli u prethodnom primjeru što je temelj veće korisnosti djelovanja.

Grafikon 5.2. Novčani tijek i kumulativni povrat investicije za nadkritičnu termoelektranu na ugljen bez CCS od 40 MW s predviđanjima cijena uz diskontnu stopu od 5 %

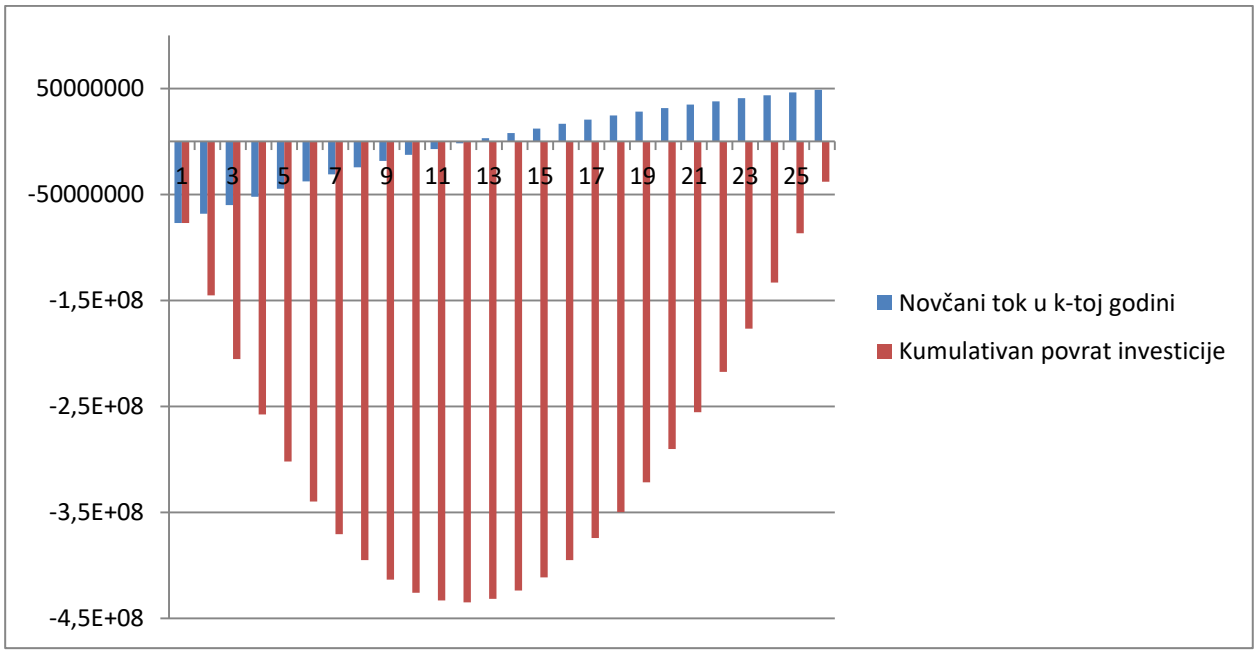


Može se uočiti da kumulativni povrat investicije ima manje vršne vrijednosti nego li u prethodnom primjeru, pa je samim time i period povrata investicije kraći. Dobit koja se ostvaruje nakon manje od 30 godina, a nakon toga je gotovo dvostruka u odnosu na prošli primjer. Time je pokazan utjecaj korisnosti elektrane te stvaranje CO_2 kao i količina potrebnog ugljena.

5.3. ULTRA NADKRITIČNA TERMOELEKTRANA NA UGLJEN BEZ CCS TEHNOLOGIJE

U okviru ove analize uzeta je korisnost ultra nadkritične termoelektrane od 45% te potrebna količina ugljena i količina stvorenog CO_2 bez hvatanja CO_2. Na grafikonu 5.3. prikazan je novčani tok i kumulativni povrat investicije u periodu od 25 godina za ultra nadkritičnu termoelektranu bez prikupljanja CO_2 s nazivnom snagom od 40 MW uz diskontnu stopu od 5 %.

Grafikon 5.3. Novčani tijek i kumulativni povrat investicije za ultra nadkritičnu termoelektranu na ugljen bez CCS od 40 MW s predviđanjima cijena uz diskontnu stopu od 5 %



Na grafikonu se može vidjeti kumulativni povrat investicije koji se pretvara u dobit nakon 25 godina, što je u odnosu na prethodne primjere približno i do 10 godina razlike, a dobit u 26 godini od početka investicije iznosi nešto više od 44 milijuna eura godišnje. U nastavku je prikazana analiza termoelektrane s prikupljanjem i skladištenjem CO_2.

5.4. TERMOELEKTRANA NA UGLJEN UZ CCS TEHNOLOGIJU

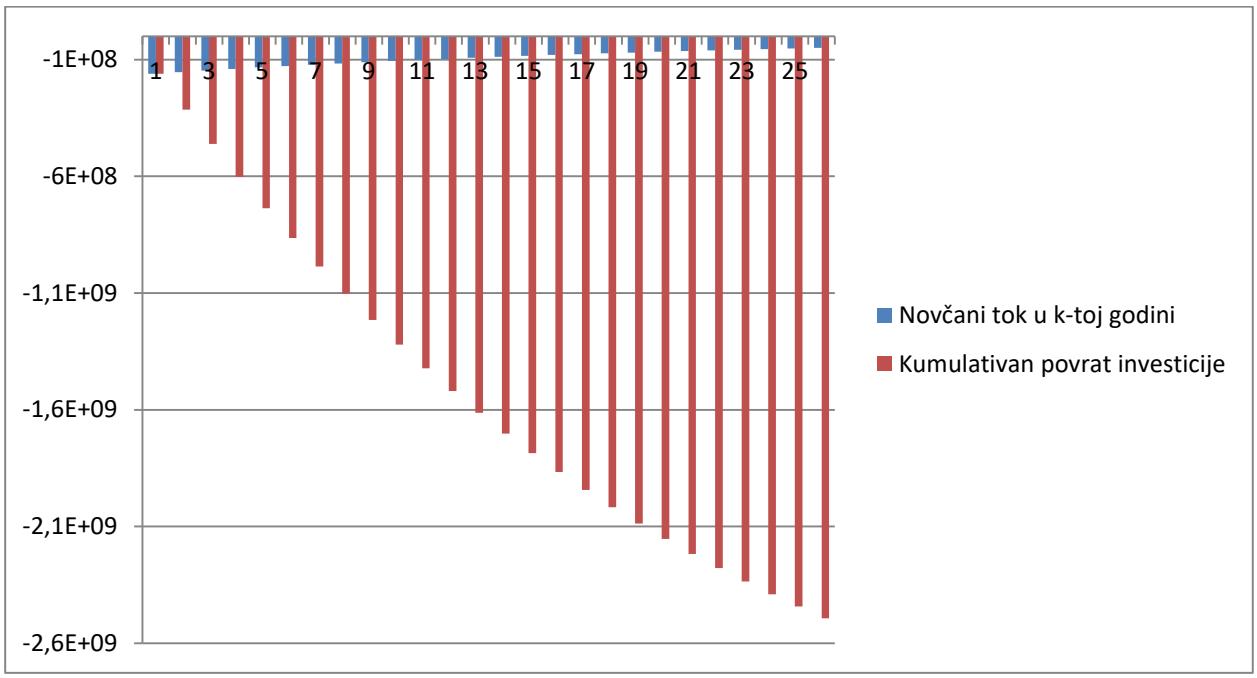
Troškovi investicije u ovom slučaju su nešto veći jer se cijena izgradnje kreće se od 3223 do 6248 $/kW. S obzirom na ukupnu instaliranu snagu i prosječnu cijenu troškova po kilovat-satu od 4735,5 $/kW, a što je 4025,17 €/kW. Dakle, ukupni trošak investicije termoelektrane od 40 MW s prikupljanjem CO_2 iznosi 161 milijun eura što je za oko 75% više od investicije bez tehnologije prikupljanja CO_2. Korisnost termoelektrane s CCS tehnologijom je 34%, a trošak pohranjivanja, čuvanja i transporta je zapravo dobit za poduzeće i to uzevši 90% u obzir prikupljenog CO_2, dok je preostalih 10% neuhvaćeno i za to se plaća naknada koja je u proračun uvrštena kao odbitak.

Projekcije cijene prikupljanja CO_2 u 2030. godini, prema IEA organizaciji iznose 25-50 $/t, što je 31,875 €/t (u obzir uzeta prosječna cijena od 31,75 $/t). U tu cijenu nisu uključeni troškovi transporta, a prema projekcijama oni će 2030. godine iznositi 1-5 $/t CO_2 za udaljenosti do 100 km te 15-25 $/t CO_2 za udaljenosti do 5000 km. Troškovi pohrane CO_2 predviđaju se do 1-2$/t (1,275 €/t), [26]. Dakle, ako se uzmu u obzir navedeni troškovi, a za transport prosječna cijena od 15 $/t (12,75 €/t), dobiva se ukupna cijena za prikupljanje, skladištenje i transport CO_2 od 45,775 €/t CO_2.

Nadogradnja sustava za prikupljanje umanjit će učinkovitost termoelektrane za 9 do 12 postotnih točaka (smanjenje ukupnog stupnja pretvorbe s 45% na 33-36%), a još više ukoliko elektrana nije „capture ready“. Današnje raspoložive procjene pokazuju da bi troškovi hvatanja za nadogradnju „capture ready“ mogli biti u rasponu od 33 do 38 €/t izbjegnutog CO_2, što je u biti 5-10%, [25].

Na grafikonu 5.4. prikazan je novčani tijek i kumulativan povrat investicije u periodu od 25 godina termoelektrane 40 MW s CCS tehnologijom uz diskontnu stopu od 5 %. Razvidno je da novčani tijek ne prelazi u pozitivu niti nakon 25 godine što je nešto kasnije u odnosu na prethodne primjere, no kumulativni povrat investicije nije ni unutar 25 godina, tek se može nazirati da je u 25. godini vršna vrijednost s obzirom na Gaussovu razdiobu. Prema tome, dalo bi se predvidjeti da će kumulativni povrati investicije biti nakon približno 50 godina. Razlog tomu je uvelike smanjenje učinkovitosti same elektrane, ali isto tako i početna investicija koja ja značajno viša u odnosu na termoelektrane koje nemaju implementiranu tehnologiju prikupljanja CO_2.

Grafikon 5.4. Novčani tijek i kumulativni povrat investicije za termoelektranu na ugljen s CCS tehnologijom od 40 MW s predviđanjima cijena uz diskontnu stopu od 5 %



Ovdje je upitna investicija ove vrste termoelektrane jer u njezinom životnom vijeku ne ostvaruje povrat investicije. Vidi se da je vršna vrijednost kumulativnog povrata investicije negdje u 25. godini od izgradnje, dok su prethodne opcije tada već imale zabilježen povrat investicije. Iako CCS tehnologija prikuplja 90% CO_2, onih preostalih 10% mora se platiti pa je i to još dodatan trošak, mada ima značajno manju proizvodnju CO_2 u odnosu na prethodne primjere termoelektrana. Uz prikazana predviđanja kretanja cijene ugljena i CO_2 na tržištu ne može se reći da će značajno utjecati na povrat investicije, a očigledno je kako ultra nadkritična termoelektrana, uz svoj najveći postotak korisnosti, ima najmanji period povrata investicije.

6. ZAKLJUČAK

Ugljen zauzima udjel od 40% na svjetskoj razini i to je najveći izvor električne energije. Otpadne tvari su, u slučaju termoelektrana na ugljen, kemijski spojevi koji nastaju kao proizvod oksidacije fosilnih goriva koje odnose dimni plinovi iz kotlova. Otpadne tvari se dijelom ispuštaju u okoliš (atmosferu i vodotoke), a dijelom pohranjuju kao kruti otpad. Promjene u fizikalnim i kemijskim stanjima atmosfere koje izazivaju emisije iz elektrana su od suštinskog značaja za njihovo djelovanje i okoliš. Promjene rezultiraju većim ili manjim štetama u ekosustavu, uključujući i zdravstvene posljedice kod ljudi. Zbog povećanog stvaranja CO2, posljednjih stotinjak godina povećava se učinak staklenika te isto dovodi do globalnog zatopljenja, a samim time i klimatskih promjena (toplinski udari, suše, poplave).

Osnovni zadatak ovoga rada bio je prikazati parametre novih tehnologija termoelektrana na ugljen te kroz tehno-ekonomsku analizu prikazati proračun isplativosti starih i novih tehnologija u odnosu na ekologiju uz moguće scenarije kretanja cijene ugljena i CO_2. Izbor tehnologije ima značajan i dugoročan utjecaj na učinkovitost i emisije termoelektrane.

Današnje elektrane na ugljen predstavljaju u većini slučajeva konstrukcije stare 20 do 40 godina, s podkritičnim parametrima pare (530 - 540 °C i 140 - 180 bara), sa stupnjem učinkovitosti 36 - 38 %. Emisije CO_2 su veće od 880 g/kWh. Najnovije konstrukcije elektrana na ugljen s ultra nadkritičnim parametrima pare (> 600 °C i > 300 bara) predviđaju stupnjeve učinkovitosti veće od 50 %, dok su emisije ispod 750 g/kWh. Termoelektrane na ugljen s novim tehnologijama imaju veću učinkovitost, zahtjevaju manje ugljena, a emisije su puno manje. Samim time, manje zagađuju okoliš. Uz tehnologiju prikupljanja i skladištenja CO_2, ugljikov dioksid može se reducirati do 90%.

U tehno-ekonomskoj analizi razmatrana je termoelektrana na ugljen snage 40 MW za četiri različita primjera: termoelektrana s podkritičnim parametrima, nadkritičnim parametrima i ultra nadkritičnim parametrima bez tehnologije prikupljanja i pohranjivanja CO_2 te jedan primjer termoelektrane na ugljen uz tehnologiju prikupljanja i pohranjivanja CO_2. Podaci o očekivanim cijenama ugljena kroz narednih 40 godina te cijene emisije CO_2 uzeti su sa stranica Međunarodne energetske agencije (IEA). Uzeta je diskontna stopa u iznosu od 5%.

Kumulativni povrat investicije za termoelekranu s podkritičnim parametrima je nakon 35 godina. Dobit za nadkritičnu termoelektranu na ugljen ostvaruje se nakon manje od 30 godina, a nakon toga je gotovo dvostruka u odnosu na podkritične parametre. Kumulativni povrat investicije za ultra nadkritične paramtere pretvara se u dobit nakon 25 godina, a dobit u 26. godini od početka investicije iznosi nešto više od 44 milijuna eura godišnje. Kumulativni povrati investicije za

termoelektranu na ugljen, koja uključuje CCS tehnologiju, je nakon približno 50 godina. Budući da je životni vijek termoelektrane na ugljen 40 godina, dolazimo do zaključka da ovaj slučaj nije isplativ. Gledajući s ekološke strane, zadnji slučaj najmanje zagađuje okoliš stoga se dolazi do pitanja može li novac i plaćanja emisije CO_2 nadoknaditi štetu načinjenu s ekološkog aspekta.

LITERATURA

[1] L. Jozsa, Energetski procesi i elektrane, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2005.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_power_station, pristup ostvaren 15.02.2017.

[3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Ugljen, pristup ostvaren 17.02.2017.

[4] The coal resource, World Coal Institute, 2005. godina

[5] D. Feretić, Ž. Tomšić, D. Škanata, N. Čavlina, D. Subašić, Elektrane i okoliš, Element, Zagreb, 2000.

[6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%C4%8Dki_efekt, pristup ostvaren 19.02.2017.

[7] Međunarodna energetska agencija (https://www.iea.org/), pristup ostvaren 21.02.2017.

[8]https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyCoalTrends.pdf, pristup ostvaren 30.08.2017

[9] https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data#Reference 1, pristup ostvaren dana 24.02.2017.

[10] A. Visković, D. Hladki, Ultra superkritični parametri termoelektrana loženih ugljenom s primjenom na TE Plomin C-500, Graphis d.o.o. Zagreb, 2010.

[11] Ž. Bogdan, S. Živković, A., Dokmanović, V. Merić, Tehnologije čistog ugljena (hrcak.srce.hr/file/26086), pristup ostvaren 05.03.2017.

[12] P.K. Nag, Power Plant Engineering, Indija, 2014.

[13] http://cornerstonemag.net/the-lagisza-power-plant-the-worlds-first-supercritical-cfb/, pristup ostvaren 15.03.2017.

[14] B. Loš, Tehnologija hvatanja i spremanja ugljikovog dioksida (hrcak.srce.hr/file/63326), pristup ostvaren 17.03.2017.

[15] Technology Roadmap, High-Efficiency, Low-Emissions, Coal-Fired Power Generation, IEA, 2013.

[16] Lagisza (www.ecofys.com), pristup ostvaren 10.03.2017

[17] D. Šljivac, Elektrane, predavanja, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2015.

[18] http://www.solutionsstarthere.ca/33.asp, pristup ostvaren 12.03.2017

[19]http://www.nrcan.gc.ca/energy/coal/carbon-capture-storage/4307,pristupostvaren 12.03.2017

[20] https://www.mhi.com/discover/earth/technology/ccs.html, pristup ostvaren 12.03.2017

[21] D. Šljivac, Ekonomika proizvodnje električne energije, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2009.

[22] IEA, Projected costs of generating electricity, 2015 edition

[23] https://www.hnb.hr/temeljne-funkcije/monetarna-politika/tecajna-lista/tecajna-lista, pristup ostvaren 23.8.2017.

[24] https://www.iea.org/etp/etpmodel/assumptions/, pristup ostvaren 24.08.2017.

[25] CEE bankwatch network: Troškovi emisija ugljika planiranih termoelektrana na ugalj na Zapadnom Balkanu i rizik od nastanka nasukanih sredstava, 2017. https://bankwatch.org/sites/default/files/briefing-Balkans-CO2-29Mar2017-bih.pdf, pristup ostvaren 25.8.2017.

[26] IEA: Overview. PROSPECTS FOR CO2 CAPTURE AND STORAGE. http://www.iea.org/textbase/npsum/ccsSUM.pdf, pristup ostvaren 24.8.2017.

[27] http://hepi.hep.hr/cjenik, pristup ostvaren 23.8.2017.

SAŽETAK

Diplomski rad pod nazivom „Tehno-ekonomska analiza novih tehnologija termoelektrana na ugljen“ podijeljen je na teorijski i praktični dio. U teorijskom dijelu upoznaje se s novim tehnologijama i uspoređuje se sa starim tehnologijama. Praktični dio je proračun isplativosti proizvodnje električne energije za četiri različita primjera u budućnosti.

Ključne riječi:

termoelektrana, ugljen, efekt staklenika, tehnologije čistog ugljena, odsumporavanje, denitrifikacija, podkritična tehnologija, nadkritična tehnologija, ultra nadkritična tehnologija, napredna ultra nadkritična tehnologija, ugljen u prahu, tehnologija cirkuliranja u fluidiziranom sloju, kombinirane termoelektrane, kombinirani ciklus integriranog uplinjavanja, prikupljanje i skladištenje ugljika, prikupljanje ugljikovog dioksida nakon izgaranja, prikupljanje ugljikovog dioksida prije izgaranja, prikupljanje ugljikovog dioksida loženjem čistim kisikom.

SUMMARY

The final thesis titled "Technical and economic analysis of new technologies coal power plants" has theoretical and the pratical part. The theoretical part is consisted of new technologies and the differences between old and new technologies. The practical part is estimate of electricity generation profitability for four different cases.

Keywords:

thermal powerplant, coal, green house effect, clean coal technology, desulfurization, reduction of nitrogen oxides, subcritical technology, supercritical technology, ultra supercritical technology, advanced ultra supercritical technology, pulverised coal, circulating fluidized bed, combine cycle gas turbine, integrated gasification combined cycle, carbon capture and storage, post - combustion system, pre - combustion system, oxy-fuel system.

ŽIVOTOPIS

Ivan Bubić rođen je u Slavonskom brodu 8. ožujka 1991. godine. Živi u Slavonskom Brodu gdje je pohađao osnovnu školu. Godine 2005. upisuje Klasičnu gimnaziju fra Marijana Lanosovića s pravom javnosti u Slavonskom Brodu.

Nakon srednjoškolskog obrazovanja, 2009. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera. Na drugoj godini studiranja opredjeljuje se za smjer elektroenergetiku. Godine 2013. završava preddiplomski studij i upisuje diplomski studij Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku. Naredne četiri godine radi za Hrvatski Telekom. U srpnju 2017. godine seli se u Zagreb te počinje raditi za firmu Integracija od-do.