

Termodinamički aspekti rada nuklearnih elektrana

Soldo, Ksenija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:338161>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ksenija Soldo

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ksenija Soldo

**TERMODINAMIČKI ASPEKTI RADA NUKLEARNIH
ELEKTRANA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Veljko Filipan
prof. dr. sc. Igor Sutlović
izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić
prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić

Zagreb, rujan 2021.

*Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Veljku Filipanu na susretljivosti od samog početka
te zanimljivoj temi predloženoj prema mojim interesima.*

*Posebno hvala mojoj obitelji, dečku i prijateljima na razumijevanju i podršci tijekom
preddiplomskog studija.*

Termodinamički aspekti rada nuklearnih elektrana

SAŽETAK

Energija je resurs koji utječe na svaki aspekt života i ključna je za opstanak modernog svijeta. Izvor energije u nuklearnim elektranama je toplina dobivena nuklearnom fisijom, dok je gorivo uran. U ovom radu opisan će se različite metode proizvodnje nuklearne energije te utjecaj nuklearnih elektrana na čovječanstvo i okoliš. Opisani su osnovni termodinamički procesi potrebni za razumijevanje energetske sustava nuklearnih elektrana. Analizom stvarnih tragičnih primjera poput Černobilske katastrofe lakše se razumiju rizici i opasnosti nuklearnih elektrana i radioaktivnog otpada kojeg proizvode.

Ključne riječi: nuklearne elektrane, nuklearni reaktor, termodinamički procesi, radioaktivni otpad

Thermodynamic Aspects Of Nuclear Power Plants

ABSTRACT

Energy is a resource that affects every aspect of life and is vital to the survival of the modern world. The source of energy in nuclear power plants is heat obtained by nuclear fission, while the fuel is uranium. This paper will describe different methods of nuclear energy production and the impact nuclear power plants have on humanity and the environment. It also covers the basic thermodynamic processes required for understanding nuclear reactor power systems. The analysis of real-life tragic examples such as the Chernobyl disaster makes it easier to understand the risks and dangers of nuclear power plants and the radioactive waste they create.

Key words: nuclear power plants, nuclear reactor, thermodynamic processes, radioactive waste

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. RAZVOJ NUKLEARNIH REAKTORA.....	2
2.1. Reaktori hlađeni vodom pod tlakom.....	2
2.2. Grafitom moderirani reaktori.....	2
2.3. Reaktori hlađeni kipućom vodom.....	3
2.4. Reaktori hlađeni teškom vodom.....	3
2.5. Reaktori hlađeni plinom.....	3
3. SIGURNOSNE MJERE U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA.....	4
4. TERMODINAMIČKI KRUŽNI PROCESI U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA...8	8
4.1. Osnovni principi termodinamičkih kružnih procesa.....	8
4.2. Toplinski procesi s vodenom parom.....	9
4.3. Rankineov kružni proces.....	11
4.4. Termodinamički procesi u različitim tipovima nuklearnih reaktora.....	14
5. RADIOAKTIVNI OTPAD.....	16
5.1. Skladištenje radioaktivnog otpada.....	17
6. NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO.....	19
7. NUKLEARNE I RADIJACIJSKE NESREĆE.....	21
7.1. Černobilska nesreća.....	22
8. ZAKLJUČAK.....	24
9. LITERATURA.....	25
ŽIVOTOPIS.....	26

1. UVOD

Nuklearne elektrane su vrsta termoelektrana kojima je izvor energije toplina dobivena fisijom nuklearnog goriva u nuklearnim reaktorima. Nuklearne elektrane danas imaju ključnu ulogu u pokrivanju svjetske potrebe za energijom, generirajući 19% ukupno proizvedene električne energije u svijetu (1). Time se izbjegava emisija oko 2,5 milijardi tona CO₂ čime se daje velik doprinos održivom načinu opskrbe električnom energijom.

Važnost nuklearne energije se može promatrati i s ekonomskog gledišta. Gradnja novih nuklearnih elektrana je relativno skupa, no troškovi goriva (uran), uključujući i odlaganje, su vrlo niski. Također, nuklearna energija nije pogođena promjenjivim cijenama goriva i jamči pouzdanu opskrbu.

Nuklearne elektrane funkcioniraju na isti način kao i elektrane na ugljen i plin, pretvaranjem topline u električnu energiju. Razlikuju se po tome što elektrane na fosilna goriva pokreću nafta ili ugljen, dok nuklearne elektrane koriste toplinu koja se oslobađa cijepanjem atomskih jezgri, odnosno nuklearnom fisijom. Otkriće fisije atoma urana stvorilo je temeljne fizikalne pretpostavke za rad nuklearnog reaktora. Na temelju tih spoznaja je Enrico Fermi, talijanski fizičar, ostvario prvu samoodržavajuću lančanu reakciju u nuklearnom reaktoru koji se sastojao od 6 tona prirodnog urana, 50 tona oksida prirodnog urana i 400 tona grafita (2).

Cilj ovog rada je prikazati specifičnost nuklearne elektrane kao energetskeg objekta, navesti najbitnije činjenice koje su dovele do razvoja nuklearnih reaktora te prikazati njihovu termodinamičku pozadinu rada.

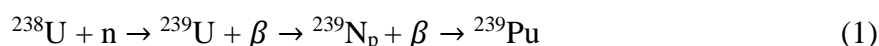
2. RAZVOJ NUKLEARNIH REAKTORA

2.1. Reaktori hlađeni vodom pod tlakom

Reaktor hlađen vodom pod tlakom ili *Pressurized Water Reactor* PWR predložen je 1940.-ih godina od strane reaktorskih fizičara Wignera i Weinberga. Takav reaktor radi sa slabo obogaćenim uranom hlađenim vodom pod tlakom. Zbog svoje kompaktnosti i stabilnosti prihvaćen je i kao reaktor za propulziju podmornica. Prototip nuklearnog agregata za pogon podmornica izradila je tvrtka Westinghouse 1953. godine, a prva nuklearna podmornica s tim reaktorom pod imenom Nautilus puštena je u more 1955. godine (2). Prva nuklearna elektrana s tlakovodnim reaktorom, NE Shippingport, izgrađena je u SAD-u 1956. godine. Tlakovodni reaktori su danas jedni od najrasprostranjenijih reaktora u svijetu. U bivšem Sovjetskom Savezu su za potrebe energetike razvijeni VVER reaktori (*Water-Water Energetic Reactor*) koji su hlađeni vodom pod tlakom.

2.2. Grafitom moderirani reaktori

Prvi nuklearni reaktor označen je kao CP-1 (Chicago Pile 1) jer je ustvari bio nakupina materijala nepravilnog oblika i zbog toga je nazvan gomila (eng. *pile*). Otkriveno je da su prirodni uran i grafit jedini materijali s kojima se kod prirodnog izotopnog sastava može ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija. Nakon CP-1, u SAD-u se gradi serija grafitnih reaktora kojima je isključiva namjena bila proizvodnja plutonija. Poslije Drugog svjetskog rata, gradnja grafitnih reaktora prenijela se iz SAD-a u Francusku i Englesku koji su također proizvodili plutonij za potrebe vojne industrije. Pretvorba uranova izotopa se odvijala prema jednadžbi



Posljednji korak u razvoju grafitnih reaktora su visokotemperaturni grafitni reaktori hlađeni plinom (*High Temperature Gas Reactor*, HTGR). HTGR reaktori sadrže keramičko nuklearno gorivo i helij kao rashladni fluid te su se paralelno razvijali u Europi i SAD-u. U Sovjetskom Savezu je razvijen i RBMK reaktor (rus. *reaktor bolshoy moshchnosti kanalnyy*) koji spada u grafitom moderirane reaktore.

2.3. Reaktori hlađeni kipućom vodom

Tijekom eksperimentiranja s prototipnim tlakovodnim reaktorom ispitane su i karakteristike reaktora s kipućom vodom u jezgri. Iako su se očekivale nestabilnosti u radu takvog reaktora zbog povratnog djelovanja parnih mjehurića, danas su kipući reaktori u pogonu u mnogim zemljama i zauzimaju drugo mjesto po rasprostranjenosti nakon tlakovodnih reaktora (2). Za razliku od tlakovodnih reaktora, kipući energetske reaktori (*Boiling Water Reactor*, BWR) nisu primjenjivi u propulziji nego samo u energetici.

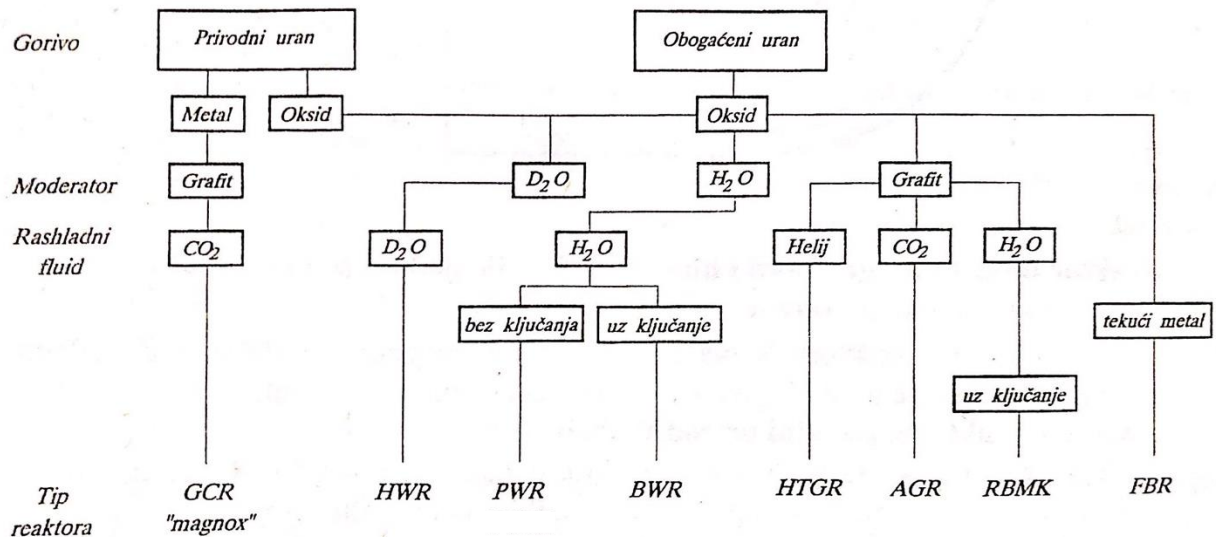
2.4. Reaktori hlađeni teškom vodom

Teškovodni reaktor ili HWMR (*Heavy Water Moderated Reactor*) reaktor je vrsta nuklearnog reaktora koji se moderira (usporavanje neutrona) i hladi teškom vodom. Teška voda je bolji moderator od lake, ali je taj način hlađenja skuplji. Voda u reaktoru ne vrije te se na ovaj način omogućuje korištenje neobogaćenog urana (3).

FBR reaktor (*Fast Breeder Reactor*) generira više fisijskog materijala nego što ga koristi, što je omogućeno korištenjem brzih neutrona.

2.5. Reaktori hlađeni plinom

Plinski reaktor ili GCR (*Gas Cooled Reactor*) reaktor kao moderator koristi grafit, a rashladno mu je sredstvo ugljikov dioksid ili helij. Plin zagrijava vodu koja se pretvara u paru i pokreće turbinu. Napredni reaktori hlađeni plinom AGR (*Advanced Gas Reactor*) bitno se razlikuju po izvedbi od prvih plinskih reaktora, a nastali su razvojem Magnox reaktora. Danas je u pogonu 7 naprednih plinom hlađenih reaktora i svi se nalaze u Velikoj Britaniji (4).



Slika 2.1. Pregled tipova nuklearnih energetske reaktora (2)

Nazivi reaktora:

GCR – reaktor hlađen plinom

HWR – reaktor hlađen teškom vodom

PWR – reaktor hlađen vodom pod tlakom

BWR – reaktor hlađen kipućom vodom

HTGR – visokotemperaturni plinom hlađeni reaktor

AGR – napredni plinom hlađeni reaktor

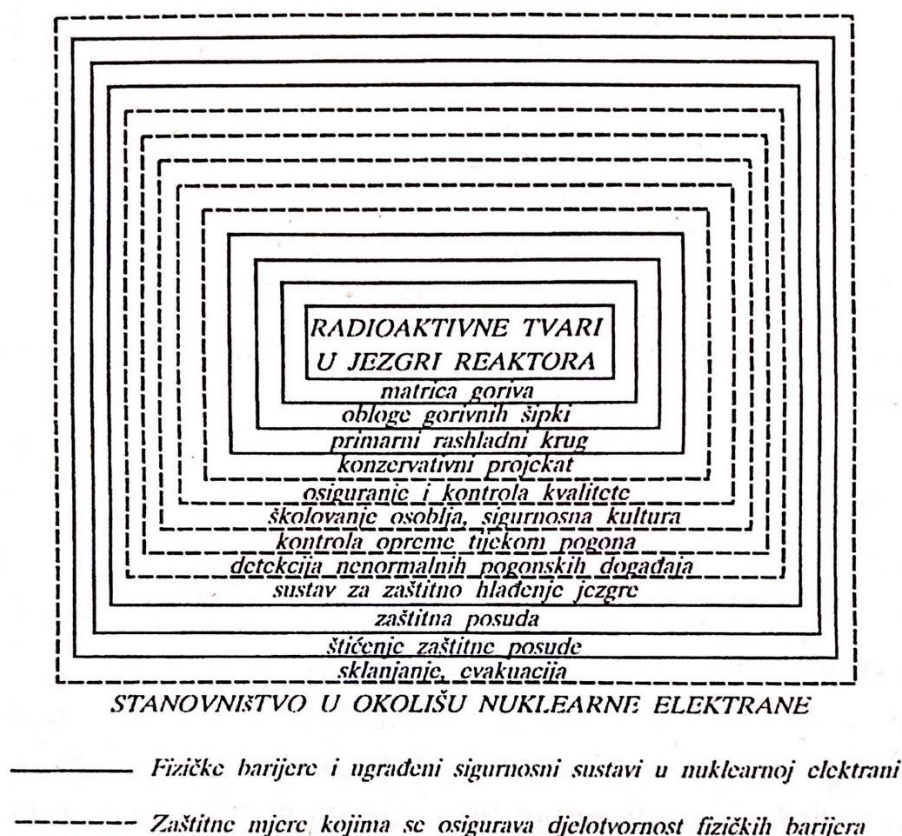
RBMK – grafitom moderirani reaktor velike snage

FBR – brzi oplodni reaktor

3. SIGURNOSNE MJERE U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

Svaki nuklearni reaktor u svojoj jezgri sadrži veliku količinu radioaktivnih tvari koje bi prodorom u okoliš ugrozile zdravlje okolnog stanovništva te stanje okoliša. Temelj projektiranja nuklearne elektrane sa stajališta sigurnosti je tzv. obrana po dubini. Obrana po dubini sastoji se od mnogih sistematskih mjera za očuvanje opreme i sustava nuklearne elektrane važnih za sigurnost i to tako da one djeluju serijski, jedna nakon druge. Time se postiže da izgubljenu funkciju jednog sustava važnog za sigurnost automatski preuzima drugi (2).

Obrana po dubini štiti stanovništvo nizom serijski postavljenih barijera. Barijere se opisuju kao stvarne fizičke barijere koje su ugrađene u elektranu te kao mjere koje se poduzimaju u nuklearnoj elektrani da bi se fizičke barijere zaštitile. Na slici 3.1. vidimo da postoje četiri fizičke barijere – matrica nuklearnog goriva, obloga gorivnog elementa, primarni rashladni krug te zaštitna posuda. Djelotvornost navedenih fizičkih barijera štite sustav za zaštitno hlađenje jezgre reaktora i sustav za šticeenje zaštitne posude.



Slika 3.1. Barijere između radioaktivnih tvari u jezgri reaktora i okolnog stanovništva (2)

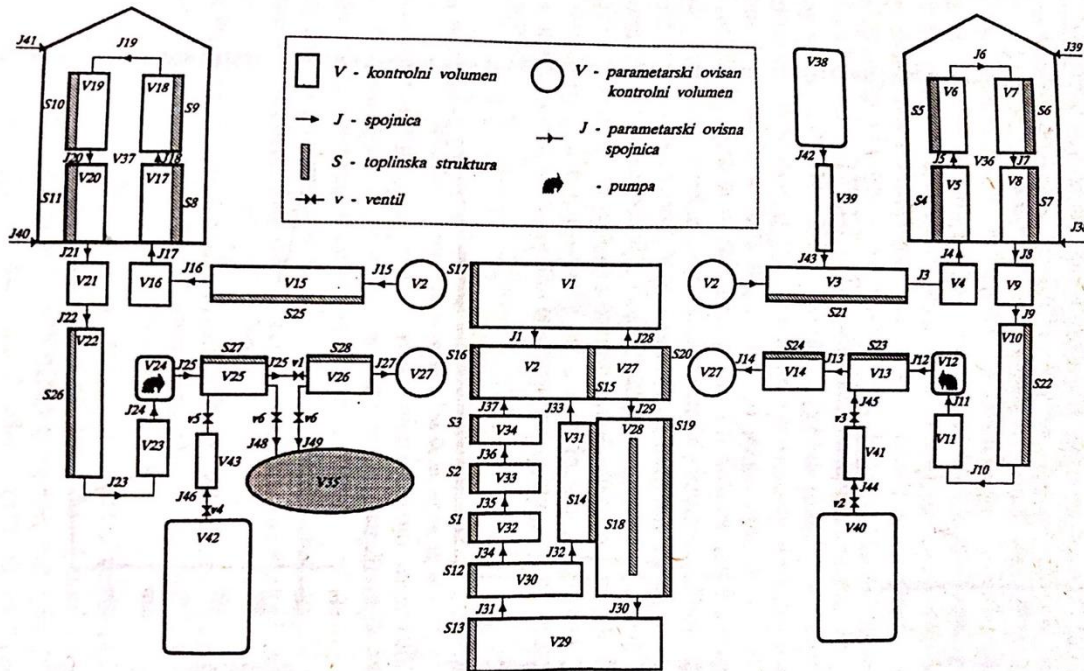
Sigurnost nuklearnih elektrana je međunarodna obaveza svake zemlje koja posjeduje takvu tehnologiju. U tu svrhu je Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) osnovala posebnu skupinu stručnjaka, nazvanu INSAG (*International Safety Advisory Group*). Ta je skupina već 1988. godine izradila dokument pod nazivom Osnovna sigurnosna načela za nuklearne elektrane, u kojem su postignuti međunarodni standardi sigurnosti (5). Prema Pravilniku o uvjetima nuklearne sigurnosti za davanje suglasnosti za gradnju nuklearnog postrojenja, projekt nuklearnog postrojenja potrebno je izgraditi sukladno sljedećim načelima:

1. načelo obrane po dubini;
2. načelo dodatnog kvara;
3. načelo neovisnosti;
4. načelo različitosti;
5. načelo redundancije;
6. siguran smjer greške;
7. načelo dokazanih komponenti;
8. načelo stupnjevanog pristupa. (6)

Iako se pri projektiranju i gradnji nuklearne elektrane poduzimaju mjere opreza protiv pojave kvarova na njezinoj opremi, mora se računati na mogućnost pojave kvarova tijekom pogona nuklearne elektrane. Radi ublažavanja posljedica određenih kvarova, potrebno je predvidjeti njihov utjecaj na postrojenje. Načelo dodatnog kvara znači pretpostavku sigurnosne analize, gdje se zajedno s analiziranim slučajem uzima dodatni jednostruki kvar najnepovoljniji za radiološku ili nuklearnu sigurnost. Također je važno poznavati i vjerojatnost nastanka najtežih kvarova. Prilikom puštanja nekog reaktora u pogon na propisanim razinama snage se ispituju karakteristike reaktora koje služe kao osnova za daljnje analize. Osnovna pomagala za provedbu sigurnosnih analiza nuklearnih postrojenja su njihovi modeli koji mogu biti fizički ili matematički. Fizički modeli su umanjeni dijelovi nuklearnih postrojenja u nekom mjerilu u kojima su gorivne šipke grijane električnom strujom. Modeli dopuštaju mjerenje parametara rashladnog fluida i temperaturu gorivnih šipki nakon određenih poremećaja. Matematički modeli se koriste za proračunavanje posljedica kvarova te se rezultati tih proračuna uključuju u njihove sigurnosne izvještaje (2).

Matematički model reaktora oblikuje se definiranjem tzv. kontrolnih volumena. U kontrolnim volumenima se svojstva fluida smatraju nepromjenjivim i jednakim odgovarajućim prosječnim vrijednostima unutar prostora. Što je odabrani broj kontrolnih volumena veći, proračun je točniji, ali je njegovo izvođenje teže. Proračunom se određuju masa, energija i količina gibanja u svakom kontrolnom volumenu i u svakom vremenskom intervalu. Toplinski kapaciteti cjevovoda i opreme uključuje se u matematički model preko tzv. toplinskih blokova, koji imaju isti toplinski kapacitet kao i komponenta opreme, tj. cjevovoda (4). Rješavanje sustava jednačbi koje su dobivene matematičkim modelom izvodi se kompleksnim računalnim programima. Neki od poznatijih računalnih programa koji su u širokoj upotrebi za analizu termalnih i hidrauličkih prilika u nuklearnim elektrana su RELAP

4, RELAP 5 i TRAC (razvijeni u SAD-u), CATHARE (razvijen u Francuskoj) te ALMOD i ATHLET (razvijeni u Njemačkoj) (2). Manji računalni programi razvijeni su za specifične proračune i mogu se povezati s nekim od navedenih velikih programa.



Slika 3.2. Raspodjela kontrolnih volumena u matematičkom modelu NE Krško (2)

Iz slike 3.2. se razabiru kontrolni volumeni, spojnice i toplinske strukture koji pripadaju reaktoru, cjevovodima i parogeneratorima. Ovakva raspodjela kontrolnih volumena primijenjena je za proračun posljedica velikog projektog kvara (velika LOCA; *Loss of Coolant Accident*) kod reaktorskog postrojenja NE Krško koji rezultira ispuštanjem primarnog fluida u zaštitni odjeljak. Lom primarnog cjevovoda simuliran je otvaranjem ventila v6 čime se primarni fluid ispušta u vanjski volumen V35 (2). Proračun je izveden pomoću programa RELAP 4 na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu. Programom je moguće pratiti sve faze kvara preko praćenja poremećaja do ostvarivanja novog stacionarnog stanja. Važan kriterij za uspješan proračun je pravilan odabir i dimenzioniranje kontrolnih volumena koji zamjenjuju određene volumene u realnom postrojenju. Ventilskim spojevima modelirani su svi ventili na uređaju i njima je moguće zatvaranje protoka, ispuštanje medija, povećanje otpora strujanja i skretanje medija. Toplinske strukture generiraju toplinu svojim toplinskim kapacitetom.

4. TERMODNAMIČKI KRUŽNI PROCESI U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

4.1. Osnovni principi termodinamičkih kružnih procesa

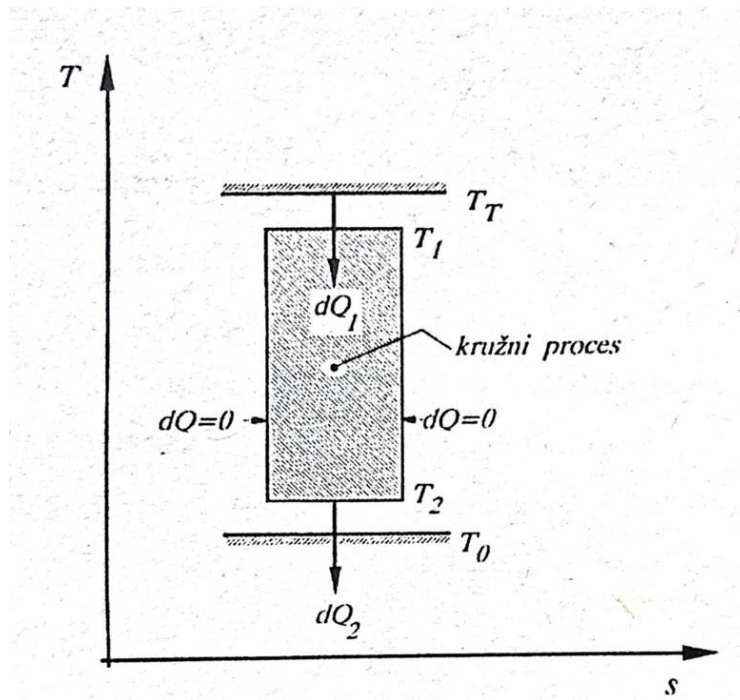
Toplinski kružni procesi, koji transformiraju toplinsku energiju rashladnog fluida reaktora u mehanički rad, u nuklearnim elektranama su u osnovi isti kao u termoelektranama. Radni fluid u oba slučaja je vodena para. U načelu se u elektranama kružni proces može izvesti i s plinom upotrebom plinskih turbina, no takvi su procesi rjeđi (2).

Prema drugom zakonu termodinamike uvjet za ostvarenje kružnog procesa u kojemu se toplinska energija pretvara u mehanički rad je postojanje toplog i hladnog toplinskog spremnika. Temperatura toplog spremnika kod nuklearnih elektrana je primarna strana parogeneratorskog, dok je temperatura hladnog spremnika u većini energetskih procesa temperatura okoline. Kod termoelektrana i nuklearnih elektrana to je temperatura kondenzatora parne turbine (2). Termodinamika opisuje dvije vrste procesa, povratne i nepovratne. Povratni procesi se vraćaju u početno stanje bez ikakve promjene u okolini te su to teorijski procesi bez trenja i konačne temperaturne razlike prema okolini.

Promjena stanja fluida koji u nekim okolnostima izmjenjuje toplinu s okolinom može se izraziti promjenom koja se naziva promjena entropije. Entropija je veličina stanja neke tvari promjena koja je razmjerna izmijenjenoj količini topline između tvari i okoline kod povratnog procesa na temperaturi T . Diferencijal toplinske energije dQ koji spremnik temperature T izmjenjuje s povrativim kružnim procesom može biti izražen kao

$$dQ = T ds \quad (2)$$

gdje je ds promjena entropije. Što je temperatura niža, predaju iste količine topline kružnom procesu prati veća promjena entropije. Odnos promjene temperature i entropije prikazuje se T - s dijagramom.



Slika 4.1.1. Kružni proces između dvaju toplinskih spremnika

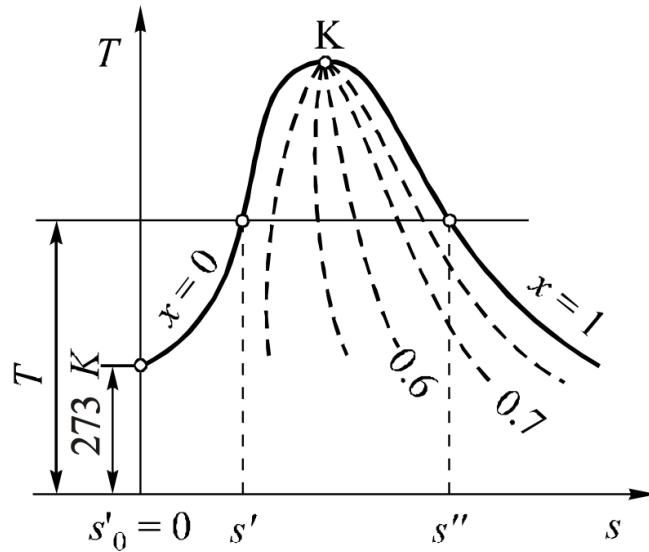
Na slici 4.1.1. prikazan je T-s dijagram kružnog procesa čija su najviša i najniža temperatura T_1 i T_2 i koji radi između toplog i hladnog toplinskog spremnika T_T i T_0 . Toplina se izmjenjuje s toplim i hladnim spremnikom po izotermi, a za vrijeme ekspanzije i kompresije radnog fluida nema izmjene topline s okolinom (adijabatska promjena stanja radnog fluida). Takav kružni proces se naziva Carnotov kružni proces. Ukupna promjena entropije bi se za takav proces mogla napisati:

$$ds = ds_T + ds_1 + ds_2 + ds_H = dQ_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_T} \right) + dQ_2 \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_2} \right) \quad (3)$$

Kod idealnog procesa pretvorbe toplinske energije u mehanički rad je ukupna promjena entropije sustava jednaka nuli.

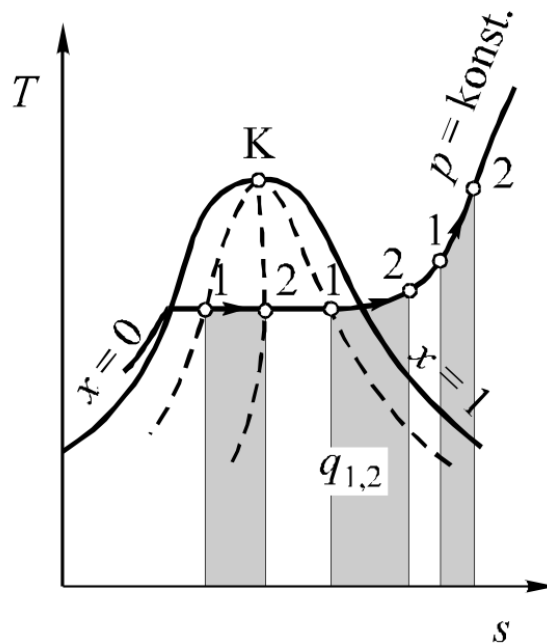
4.2. Toplinski procesi s vodenom parom

Toplinski procesi s vodenom parom su temelj zakonitosti pretvorbe toplinske energije u mehanički rad u većini termoenergetskih postrojenja, uključujući i nuklearne elektrane.



Slika 4.2.1. *T-s dijagram za vodenu paru s oznakama vlažnosti pare (7)*

T-s dijagram za vodenu paru sadrži zvonoliku krivulju koja s lijeve strane određuje granicu između tekućine i mokre pare te graničnu krivulju koja s desne strane odvaja mokru i pregrijanu paru. Krivulje se dodiruju u kritičnoj točki kod koje je stanje parne i tekuće faze identično. U energetskim se postrojenjima toplina radnom fluidu dovodi i od njega odvodi uglavnom uz konstantan tlak, tj. po izobari.



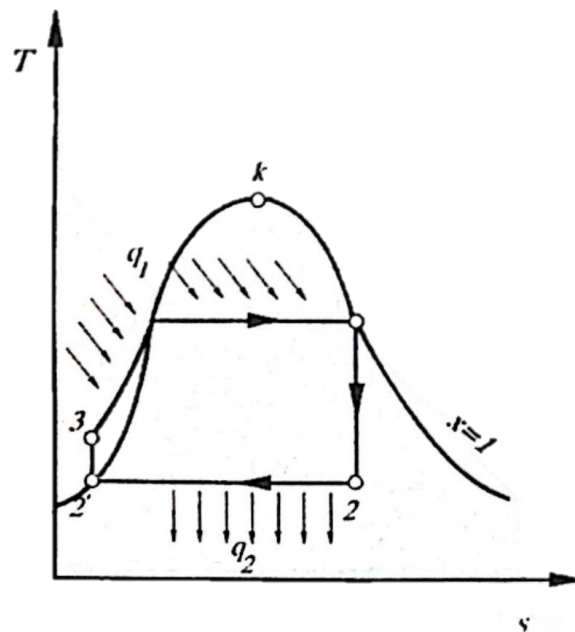
Slika 4.2.2. *Izobarna promjena stanja u T-s dijagramu za vodenu paru (7)*

Važno je spomenuti još jedan proces koji je gotovo neizbježan u promjenama stanja pare u energetske postrojenjima, a to je prigušenje pare. U procesu prigušenja nema izvršenog rada niti izmjenjene topline s okolinom, tj. provodi se uz

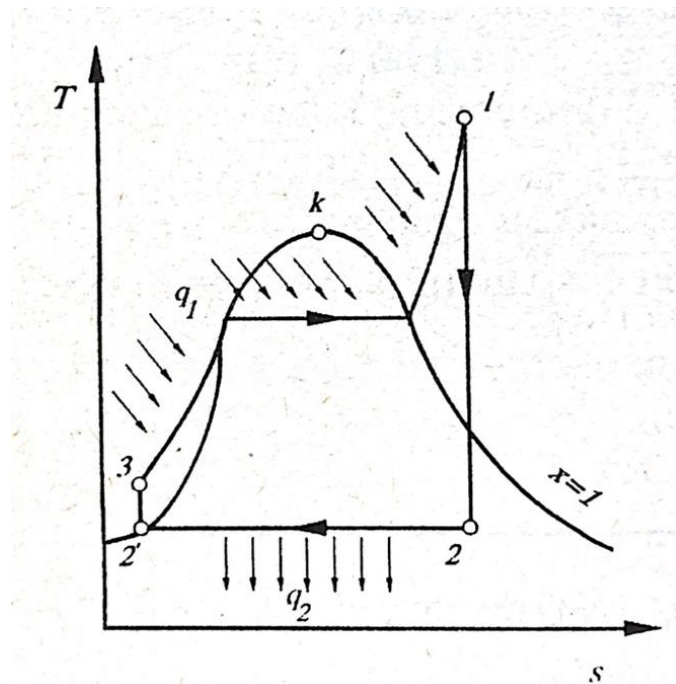
$$h = \text{konst.} \quad (4)$$

4.3. Rankineov kružni proces

Kružni procesi s vodenom parom, odnosno Rankineovi kružni procesi, ostvareni su u svim nuklearnim elektranama koje upotrebljavaju parne turbine. Razlikujemo dva tipa Rankineovih kružnih procesa – Rankineov proces sa zasićenom parom te Rankineov proces s pregrijanom parom. Proces sa zasićenom parom upotrebljava se u nuklearnim elektranama kojima su reaktori hlađeni običnom ili teškom vodom, a proces s pregrijanom parom primjenjuju nuklearne elektrane čiji su reaktori hlađeni plinom ili tekućim metalom (2).



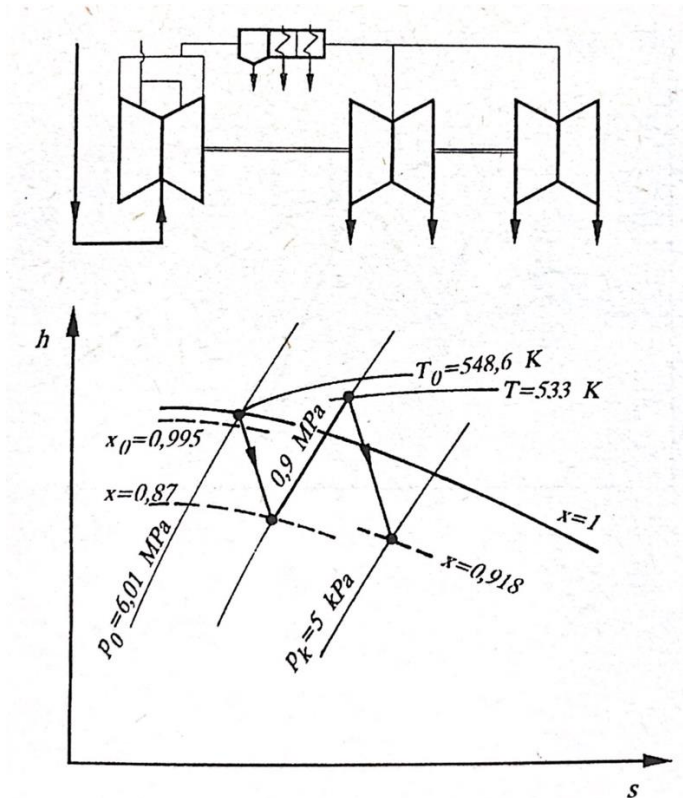
Slika 4.3.1. Rankineov kružni proces sa suhozasićenom parom u T-s dijagramu



Slika 4.3.2. Rankineov kružni proces s pregrijanom parom u T-s dijagramu

Rankineov kružni proces sastoji se od adijabatske ekspanzije pare u parnoj turbini, kondenzacije pare u kondenzatoru, adijabatskog tlačenja kondenzata pumpom i dijela u kojem radni fluid prima toplinu. Taj se dio sastoji od zagrijavanja kondenzata do temperature zasićenja, isparavanja vode na temperaturi zasićenja i pregrijavanja pare (kod procesa s pregrijanom parom).

Ekspanzija pare u turbini daje na kraju ekspanzije vlažnu paru, koja uzrokuje eroziju turbinskih lopatica i zbog toga se maseni udio vlage u pari ograničava na 10 do 15%. U većini slučajeva je potrebno vlagu iz pare odvajati prije završetka ekspanzije, a u nuklearnim elektranama s vodom hlađenim reaktorima se taj problem rješava podjelom turbine na visokotlačni i niskotlačni dio te ugradnjom separatora kapljica nakon visokotlačnog dijela turbine. Nakon ekspanzije u visokotlačnom dijelu turbine para se uvodi u separator vlage, a iz njega nakon odvajanja vodenih kapljica vraća u niskotlačni dio turbine (2). Još manja vlažnost pare postiže se ako dobivenu suhozasićenu paru pregrijemo koristeći se svježom parom kao ogrijevnom medijem. Nuklearna elektrana Krško primjenjuje jednostupnjevitu separaciju vlage i dvostupnjevito pregrijavanje pare.



Slika 4.3.3. Shema separatora vlage i pregrijača pare u NE Krško s prikazom procesa u h-s dijagramu (2)

Električna snaga nuklearne elektrane N_e može se dobiti iz izraza

$$N_e = N_t * \eta \quad (5)$$

gdje je N_t toplinska snaga reaktora (kW ili MW), a η ukupni stupanj iskorištenja elektrane.

Toplina oslobođena u reaktoru N_t u toplinskim jedinicama označava se kao Q_r (kJ/h), a računa se iz

$$Q_r = D_r * q_r \quad (6)$$

gdje je D_r masa rashladnog sredstva, a q_r jedinična toplina oslobođena u reaktoru (kJ/kg). U procesima s dva i tri optoka toplina oslobođena u reaktoru može se dobiti i iz izraza

$$Q_r = D_r * q_r = Q_{gp} = D * q_{qp} \quad (7)$$

gdje je Q_{gp} (kJ/h) toplina parogeneratora, a q_{gp} (kJ/kg) toplina koju prima djelatna tvar mase D u generatoru pare.

Toplina koja se mora odvesti iz kondenzatora dobiva se izrazom

$$Q_c = D * q_c \quad (8)$$

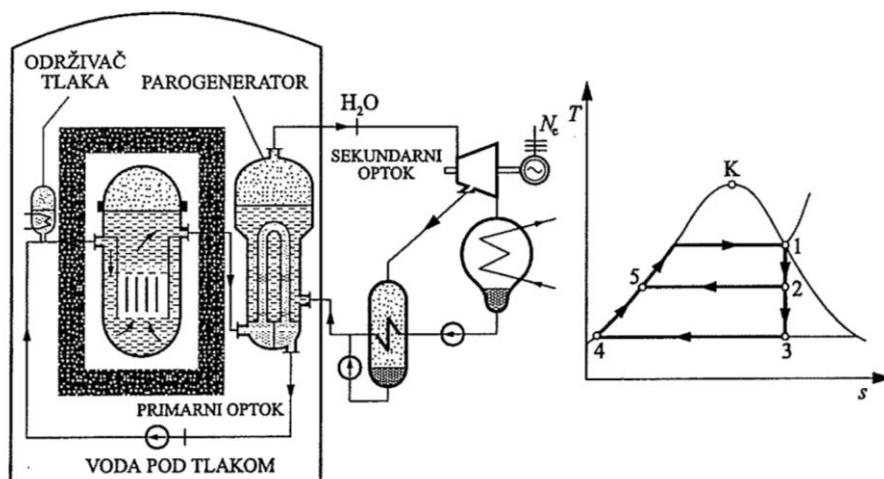
Termodinamički stupanj djelovanja Rankineova procesa računa se iz izraza

$$\eta_t = \frac{q_{gp} - q_c}{q_{gp}} = \frac{w_T}{q_{qp}} \quad (9)$$

gdje je w_T jedinični teorijski rad turbina.

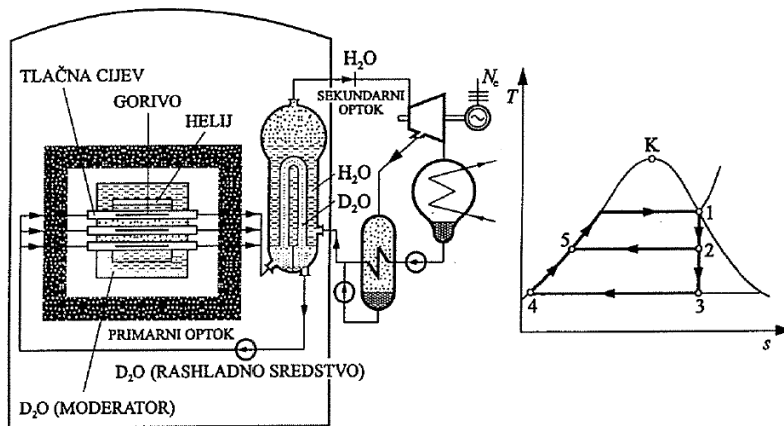
4.4. Termodinamički procesi u različitim tipovima nuklearnih reaktora

Osnovno svojstvo procesa u reaktoru hlađenim vodom pod tlakom je postojanje dvaju optoka. U primarnom optoku cirkulira voda pod tlakom, a u sekundarnom vodena para koja je proizvedena u generatoru pare. Kako bi se postigla visoka izlazna temperatura rashladne vode, sustav je pod tlakom oko 150 bar. Tlak se održava konstantnim pomoću održivača tlaka (8).



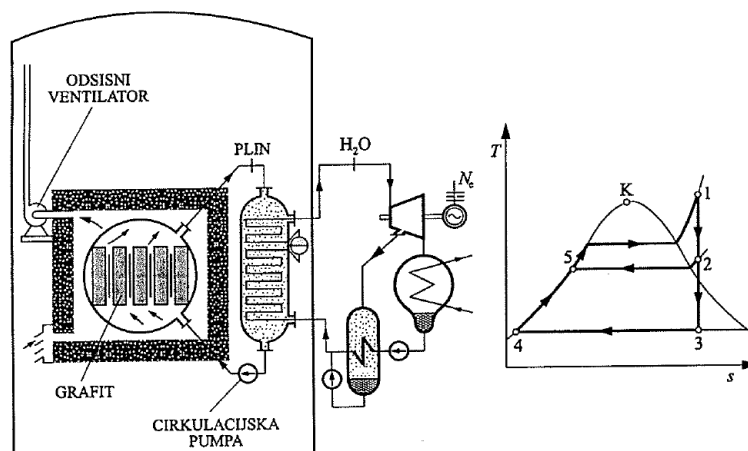
Slika 4.4.1. Shema reaktora hlađenog vodom pod tlakom i termodinamički proces

U reaktorima hlađenima teškom vodom gorivo je smješteno u horizontalnoj tlačnoj cijevi u kojoj je tlak oko 100 bar da bi se spriječilo isparavanje. Pogonska para se proizvodi u sekundarnom krugu kao i kod reaktora hlađenih vodom pod tlakom. Oko tlačne cijevi je moderator s temperaturom nižom od temperature rashladnog sredstva. Ovakva izvedba omogućuje punjenje gorivom u toku rada bez zaustavljanja pogona (8).



Slika 4.4.2. Shema reaktora hlađenog teškom vodom i termodinamički proces

U svim reaktorima hlađenim plinom moderator je grafit i elektrane rade s dva optoka. Ovakve elektrane mogu se razlikovati prema vrsti plina za hlađenje i gorivu. Prve elektrane ove vrste radile su s prirodnim plinom i CO_2 kao plinom za hlađenje, dok su se kasnije razvile i elektrane s nisko obogaćenim gorivom hlađene također s CO_2 . Nedostatak takvih reaktora je niska radna temperatura te se zato primjenjuju samo za proizvodnju električne energije i niskotemperaturne industrijske procese (8).



Slika 4.4.3. Shema reaktora hlađenog plinom i termodinamički proces

5. RADIOAKTIVNI OTPAD

Radioaktivni otpad iz postrojenja nuklearne energetike čine sve radioaktivne otpadne tvari koje nastaju u procesima nuklearnog gorivnog ciklusa i tijekom pogona nuklearnih elektrana. Radioaktivni otpad se prema Zakonu o zaštiti od ionizirajućeg zračenja (NN 53/91) dijeli u tri osnovne kategorije: niskoaktivni, srednjeaktivni i visokoaktivni otpad (2). Radioaktivni otpad u pogonima nuklearnih elektrana potječe iz dva osnovna izvora – aktivacija materijala u reaktoru i fisija.



Slika 5.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada (8)

Aktivacijski proizvodi nastaju aktivacijom neaktivnih izotopa željeza, nikla, bora i litija. Izotopi željeza i nikla dolaze do rashladnog fluida zbog korozije komponenata primarnog kruga, a litij se dodaje rashladnom fluidu za regulaciju pH.

Fisijski proizvodi uglavnom dospijevaju u rashladni krug reaktora zbog propuštanja obloga gorivnih šipki, a najveći udio radioaktivnog fisijskog otpada čine plemeniti plinovi, tricij i cezij.

Tablica 5.1. Fizikalne karakteristike aktivacijskih proizvoda (2)

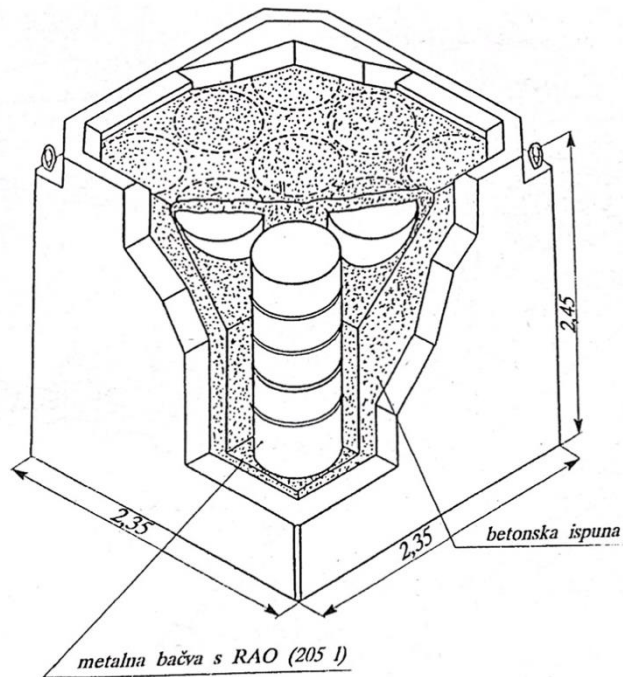
Radionuklid	Poluvrijeme raspada (god.)	Vrsta zračenja	Energija zračenja (MeV)
^3H	12,3	β	0,018
^{55}Fe	2,7	γ	0,006
^{60}Co	5,3	β	0,031
^{63}Ni	92,0	γ	0,087

5.1. Skladištenje radioaktivnog otpada

Osnovni problem pri skladištenju radioaktivnog otpada je dugoročna stabilnost skladišta radi onemogućenja kontakta radioaktivnog otpada s okolišom ili ljudima.

Primjenjuju se dva tipa skladištenja radioaktivnog otpada: plitko skladištenje (za niskoaktivni i srednjeaktivni otpad) te duboko skladištenje (za sve vrste radioaktivnog otpada) (2).

Kod plitkog skladištenja se radioaktivni otpad osigurava spremanjem bačvi s niskoaktivnim i srednjeaktivnim otpadom u armiranobetonske posude, a prostor između bačvi se ispunjava betonom čime se dobiva monolitni betonski blok. Blokovi se pokrivaju nepropusnim slojem gline i plastike da se onemogući ulaz podzemnih i oborinskih voda (4).



Slika 5.1.1. *Plitko odlaganje radioaktivnog otpada*

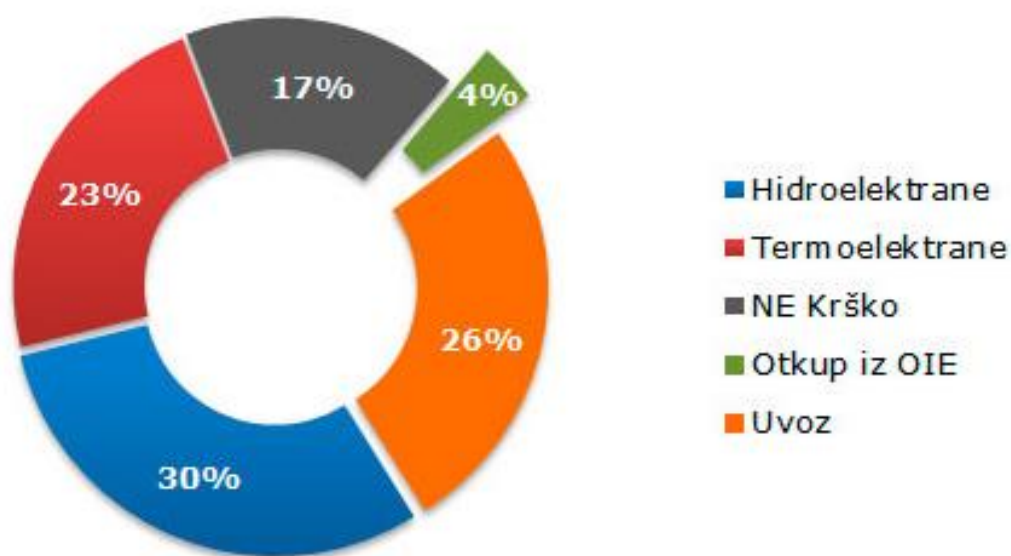
Duboko podzemno odlaganje radioaktivnog otpada se gradi na geološki stabilnim terenima s malom propusnošću za podzemne vode. Jedan od odličnih primjera skladištenja radioaktivnog otpada je skladište Forsmark u Švedskoj koje je iskopano u granitu 60 metara ispod dna mora. Predviđeno je za skladištenje niskoaktivnog i srednjeaktivnog otpada, a ima mogućnost skladištenja oko 60.000 m³ otpada uz mogućnost naknadnog proširenja (2).



Slika 5.1.2. *Prikaz skladišta radioaktivnog otpada u Forsmarku (9)*

6. NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO

Nuklearna elektrana Krško je nuklearna elektrana s tlakovodnim reaktorom čije su suvlasnice Republika Hrvatska i Republika Slovenija, svaka s udjelom od 50% te svaka dobiva 50% proizvedene energije. Snaga elektrane originalno je bila 632 MW, a nakon zamjene parogeneratora 2000. godine iznosi 696 MW. Prema podacima HEP grupe, energija iz NE Krško je 2020. godine iznosila 17% raspoložive energije u Hrvatskoj.



Slika 6.1. Struktura udjela pojedinih izvora električne energije (10)

Tablica 6.1. Izvori električne energije u 2020. godini (10)

Proizvodnja i nabava električne energije	GWh
Hidroelektrane	5.338
Termoelektrane	4.096
NE Krško	3.020
Otkup iz OIE	665
Uvoz	4.636
UKUPNO RASPOLOŽIVO	17.809

Nuklearna elektrana Krško u prosjeku godišnje proizvede 5,7 TWh električne energije, dok je količina dosada proizvedene električne energije 191 TWh. Svojom godišnjom proizvodnjom električne energije pokriva oko 20% potreba za električnom energijom u Sloveniji i 17% potreba u Hrvatskoj. Tip reaktora koji je u upotrebi je reaktor hlađen vodom pod tlakom i njegova toplinska snaga iznosi 1994 MW, dok je toplinsko iskorištenje 36%. Kao nuklearno gorivo koristi se izotop urana 235. Cjelokupna masa goriva sadrži 5% tog izotopa i 95% izotopa urana 238. Ukupna težina urana iznosi 49 tona. Kao rashladna tekućina koristi se voda pod tlakom od 15,41 MPa, a njen je volumen 197 m³. Temperatura vode na ulazu u reaktor je 287 °C, dok je temperatura na izlazu iz reaktora 324 °C (12).

Republika Hrvatska se, zajedno sa Republikom Slovenijom, potpisom Međudržavnog ugovora te prihvaćanjem svih međunarodnih konvencija, direktiva i sl. obvezala razgraditi NE Krško i zbrinuti istrošeno nuklearno gorivo i radioaktivni otpad nastao radom i razgradnjom elektrane. Međudržavni ugovor između dviju država potpisan je u prosincu 2001. godine, a potvrđen u Hrvatskom saboru u srpnju 2002. godine. Svaka od država potpisnica dužna je temeljem Međudržavnog ugovora zbrinuti polovicu pogonskog i dekomisijskog otpada iz Nuklearne elektrane Krško. Bez obzira o kojoj se lokaciji radi i načinu zbrinjavanja (skladište/odlagalište), predloženo rješenje mora biti tehnički i tehnološki prihvatljivo, sigurno i bez štetnih utjecaja na okoliš (11).

Republika Hrvatska planira izgradnju Centra za zbrinjavanje radioaktivnog otpada, u kojem će se zbrinjavati samo nisko i srednje radioaktivni otpad (NSRAO). Takvo skladište bilo bi površinski tip skladišta te ovakav način zbrinjavanja radioaktivnog otpada ni na koji način ne može ugroziti izvore pitke vode. Sav otpad bit će u krutom obliku, obrađen i stabiliziran. Slovenski koncept odlaganja NSRAO-a uključuje izgradnju silosa (plitko odlaganje), u aluvijalnu dolinu rijeke Save. Trenutno se planira jedan, za polovicu postojećeg nisko i srednje radioaktivnog otpada iz NE Krško (slovenski dio), te preostali dio slovenskog otpada koji će se odložiti nakon prestanka rada elektrane i dekomisije (11).

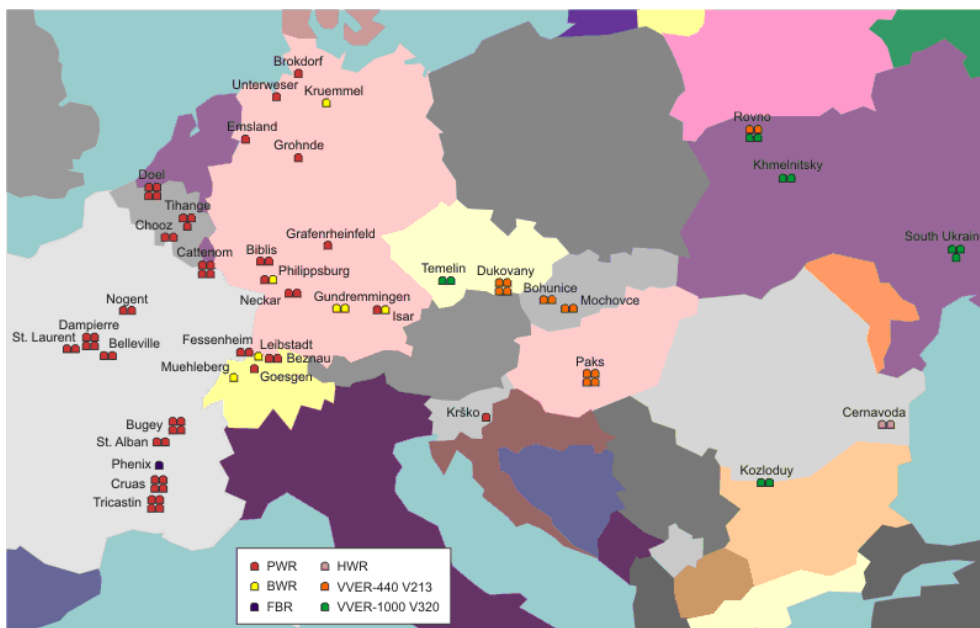
Radioaktivni otpad nastao zadnjih 60-ak godina se u Republici Hrvatskoj skladišti u dva interna skladišta – jedno u sklopu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada, a drugo u sklopu Instituta Ruđer Bošković. Oba skladišta su sanirana i zatvorena.

Državni zavod za nuklearnu sigurnost u Hrvatskoj ima 15 postaja za mjerenje radijacije, a one tri u blizini Slovenije nisu bilježile radiokativnost veću od prirodnih razina. Reaktor Nuklearne elektrane Krško isključen je 4. lipnja 2008. godine zbog curenja rashladnog fluida. Inspekcija je otkrila problem i ustanovila da je riječ o puštanju ventila koji je zatim promijenjen. Prema mjerenjima Zavoda za nuklearnu sigurnost dvaju država, manji kvar u elektrani ne znači nikakvu opasnost za ljude i okoliš. Hrvatski Zavod za nuklearnu sigurnost objasnio je da je riječ o kvaru koji se određuje kao nesvakidašnji događaj te se prema Međunarodnoj ljestvici za nuklearne nesreće (INES ljestvica) od sedam stupnjeva, određuje kao događaj razine 0 ili otklon. Također, nakon razornog potresa u Banovini 29.12.2020. provedena je detaljna inspekcija NE Krško te je utvrđeno da potres nije uzrokovao štetu na sustavu i opremi (12).

7. NUKLEARNE I RADIJACIJSKE NESREĆE

Nuklearnu i radijacijsku nesreću je definirala Međunarodna agencija za atomsku energiju kao događaj koji je doveo do značajnih posljedica za ljude, okoliš ili postrojenja. Primjeri uključuju smrtne posljedice za ljude, visoko otpuštanje radioaktivnosti u okoliš ili topljenje jezgre reaktora. Najvažniji primjer velike nuklearne nesreće je ona koja se dogodila u Černobilu 1986. godine kada je došlo do otpuštanja velike količine radijacije. Ozbiljne nuklearne nesreće uključuju nuklearnu katastrofu u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi (2011. g.), černobilsku katastrofu (1986. g.), nesreću na Three Mile Island (1979. g.) i SL-1 nesreću (1961.g.).

Na udaljenosti do 1.000 km od teritorija Republike Hrvatske, odnosno od njenih najvećih populacijskih centara (Zagreb, Osijek, Split i Rijeka) u pogonu se nalazi 40 nuklearnih elektrana (13).



Slika 7.1. Lokacije nuklearnih elektrana u blizini teritorija Hrvatske

7.1. Černobilska katastrofa

Černobilska nesreća smatra se najgorom nuklearnom nesrećom u povijesti. Neposredne eksplozije i izloženost velikom zračenju uzrokovala je smrti radnika i okolnog stanovništva, a smatra se da su najveći broj umrlih bili vatrogasci koji su došli na mjesto nesreće. Radioaktivnost oblaka koji se stvorio nesrećom bila je sto puta veća od one iz bombe koja je bačena na Hirošimu.

Černobilska katastrofa započela je kao sigurnosni test, a svrha testa bila je vidjeti što bi se dogodilo u slučaju iznenadnog nestanka struje. Prekid struje značio bi i prekid svih radnji u sustavu, uključujući kontrolne šipke i sustav za hlađenje. Sve nuklearne elektrane imale su pomoćne Diesel generatore koje bi stvorile struju u slučaju takvog događaja. No, bilo je važno znati koliko će vremena proći između zaustavljanja turbine i pokretanja generatora. Svi u Sovjetskom Savezu su smatrali kako je ovakav test neophodan te da ga je važno izvršiti i prije puštanja reaktora u rad. Glavni problem bio je da bi se jezgra reaktora mogla pregrijati od nekontrolirane fisije, što bi rezultiralo mogućom eksplozijom. U tom slučaju radioaktivni materijal bi otišao u atmosferu što bi rezultiralo velikim posljedicama (14).

26. travnja 1986. kombinacijom nesigurnog projektiranja nuklearnog reaktora te ljudskom pogreškom uzrokovana je eksplozija koja je uništila jedan od četiri reaktora. Prilikom izvođenja sigurnosnog testa nije ostavljen dovoljan broj kontrolnih šipki u četvrtom reaktoru što je postupno dovelo do opterećenja sustava te na kraju i do eksplozije.

Nakon Černobilske katastrofe, uočeno je mnogo opasnog radioaktivnog zračenja u zraku. Prije eksplozije četvrtog reaktora, unutar njegove jezgre nalazio se 190,3 tone radioaktivnog materijala. Nakon nesreće, otprilike 6,7 tona od tog materijala raspršilo se u okoliš što je uzrokovalo daljnje posljedice.



Slika 7.1.1. Zračni prikaz četvrtog reaktora nakon katastrofe (svibanj 1986. godine)

Iako je černobilska nesreća imala katastrofalne posljedice za okolno stanovništvo, treba istaknuti da reaktori u elektrani Černobil ne mogu biti mjerodavni za procjenu sigurnosti nuklearnih elektrana jer nisu građeni uz poštivanje opće prihvaćenih kriterija sigurnosti, a nisu ni podloga nuklearne energetike gotovo ni u jednoj zemlji. Rizik od pogona nuklearnih elektrana može se promatrati s obzirom na lakovodne reaktore jer su oni građeni po međunarodno prihvaćenim standardima sigurnosti i najviše ih ima u pogonu. Ukoliko bi se rizik od velikih kvarova u nuklearnim elektranama s lakovodnim reaktorima usporedio s rizikom velikih kvarova u konvencionalnoj energetici, prednost je neosporno na strani nuklearnih elektrana (2).

8. ZAKLJUČAK

Nuklearna energija predstavlja jedno od rješenja problema rastuće potrebe čovječanstva za električnom energijom. Prema podacima Svjetske nuklearne asocijacije oko 11% svjetske električne energije proizvodi oko 450 nuklearnih reaktora, a oko 60 reaktora je još u izradi. Trinaest zemalja u 2018. godini proizvelo je najmanje jednu četvrtinu električne energije iz nuklearnih kapaciteta.

Nuklearni reaktor je postrojenje u kojem se odvija nuklearna lančana reakcija, odnosno nuklearna fisija. Prvi nuklearni reaktor sagrađen je 1942. godine kada je Enrico Fermi, talijanski fizičar, ostvario prvu samoodržavajuću lančanu reakciju. Svrha nuklearnih reaktora u početku je bila proizvodnja plutonija za nuklearno oružje dok se danas koriste za proizvodnju električne energije.

Nuklearne reaktore možemo klasificirati na različite načine, a prema rashladnom sredstvu dijelimo ih na reaktore hlađene teškom vodom, reaktore hlađene vodom pod tlakom, reaktore hlađene kipućom vodom te reaktore hlađene plinom.

Nuklearne elektrane se od klasičnih razlikuju po tome što se kod nuklearnih toplina oslobađa procesom fisije u reaktoru, a kod klasičnih elektrana oslobađa se procesom izgaranja u kotlu. Termodinamički proces je u oba slučaja isti, Rankineov proces, i to najčešće sa suho zasićenom parom.

Glavni problem rada nuklearnih elektrana je nastajanje radioaktivnog otpada čije bi ispuštanje znatno ugrozilo stanovništvo i okoliš. Zato se pri projektiranju nuklearnih elektrana velika pozornost posvećuje njihovoj sigurnosti te postoji niz pravila i načela koja se moraju slijediti prilikom izgradnje. Nakon nesreće na reaktoru nuklearne elektrane Černobil u Ukrajini poboljšana je sigurnost nove generacije nuklearnih reaktora.

9. LITERATURA

1. Meiswinkel, Rudiger, Meyer, Julian i Schnell, Jurgen. *Design and Construction of Nuclear Power Plants*. Ernst & Sohn GmbH & Co, Berlin, 2013., str. 3-5.
2. Feretić, Danilo, Čavlina, Nikola i Nenad, Debrecin. *Nuklearne elektrane*. Školska knjiga, Zagreb, 1995.
3. http://www.nek.si/hr/o_nuklearnoj_tehnologiji/nuklearni_reaktor/tipovi_reaktora/ (pristup 25.8.2021.)
4. Feretić, Danilo. *Uvod u nuklearnu energetiku*. Školska knjiga, Zagreb, 2011.
5. <http://www.nemis.hr/index.php/sigurnost/sigurnost-nuklearnih-elektrana.html> (pristup 29.8.2021.)
6. *Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti*. s.l. : Narodne novine. NN141/13 .
7. Petric, Nedjeljka, Vojnović, Ivo and Martinac, Vanja. *Tehnička termodinamika*. Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2007.
8. Budin, Rajka i Mihelić-Bogdanić, Alka. *Osnove tehničke termodinamike*. Školska knjiga, Zagreb, 2001., str. 346-350.
9. <https://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/> (pristup 30.8.2021.)
10. <https://www.skb.com/skb-swedish-nuclear-fuel-and-waste-management-company/> (pristup 30.8.2021.)
11. <https://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385> (pristup 30.8.2021.)
12. <https://www.nek.si/hr/pogon/proizvodnja-i-odrzavanje#nuklearni-gorivni-ciklus> (pristup 6.9.2021.)
13. <https://fond-nek.hr/cesta-pitanja/> (pristup 30.8.2021.)
14. <https://www.gov.si/en/news/2020-12-30-krsko-npp-performed-inspection-after-the-29-12-2020-earthquake/> (pristup 30.8.2021.)
15. <https://civilna-zastita.gov.hr/podrucja-djelovanja/radioloska-i-nuklearna-sigurnost/izvanredni-radioloski-i-nuklearni-dogadjaj/nuklearne-elektrane/181> (pristup 30.8.2021.)
16. Bošnjaković, Matea. *Černobil prije i nakon katastrofe*. Odjel za fiziku, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku., 2016., str. 9.

ŽIVOTOPIS

Ksenija Soldo [REDACTED] je završila Osnovnu školu Dragutina Kušlana u Zagrebu. 2013. godine upisuje XVI. gimnaziju i po završetku srednjoškolskog obrazovanja, 2017. godine upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu. Studentsku praksu odradila je u društvu s ograničenom odgovornošću za istraživanje, razradu i proizvodnju ugljikovodika ED-INA d.o.o.