

Primjena termodinamike u radu nuklearnih elektrana

Ledinski, Eva

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:149:242063>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Eva Ledinski

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Eva Ledinski

Predala je izrađen završni rad dana: 26. lipnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 1. srpnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

KEMIJSKO INŽENJERSTVO

Eva Ledinski

**PRIMJENA TERMODINAMIKE U RADU NUKLEARNIH
ELEKTRANA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. doc. dr. sc. Iva Movre Šapić
2. prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić
3. izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula

Zagreb, lipanj 2024.

SAŽETAK

Nuklearne elektrane su složeni sustavi koji zahtijevaju visoke sigurnosne standarde radi sprječavanja katastrofalnih nesreća i zaštite okoliša. Proizvodnja radioaktivnog otpada tijekom rada nuklearnih elektrana te potencijalne prijetnje uzrokovane ljudskim greškama ili prirodnim katastrofama predstavljaju operativne rizike. Kontinuirane analize i istraživanja za identifikaciju potencijalnih prijetnji su nužne za unaprjeđenje sigurnosnih mjera. Upravljanje radioaktivnim otpadom zahtijeva odgovarajuće metode zbrinjavanja kako bi se minimalizirali negativni utjecaji na okoliš i ljudsko zdravlje. Kroz kontinuirano istraživanje i razvoj, nuklearne elektrane mogu postati još pouzdaniji i održiviji izvor električne energije u budućnosti.

KLJUČNE RIJEČI: nuklearna elektrana, radioaktivni otpad, termodinamički procesi

ABSTRACT

Nuclear power plants are complex systems that require high safety standards to prevent catastrophic accidents and protect the environment. The production of radioactive waste during their operation and the potential threats posed by human error or natural disasters present operational risks. Ongoing analysis and research are essential for identifying potential threats and enhancing safety measures. Managing radioactive waste demands appropriate disposal methods to minimize negative impacts on the environment and human health. Through continuous research and development, nuclear power plants can evolve into even more reliable and sustainable sources of electricity in the future.

KEYWORDS: nuclear power plant, radioactive waste, thermodynamic processes

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TERMODINAMIČKI PROCESI U RADU NUKLEARNIH ELEKTRANA	3
2.1. Termodinamički temeljni procesi	3
2.2. Proces u nuklearnim reaktorima	6
2.3. Analiza termodinamičkog procesa u nuklearnim elektranama	10
3. NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO	12
3.1. Uranij i njegova upotreba	12
3.2. Nuklearni gorivni krug	13
3.3. Princip rada Nuklearne elektrane Krško	15
4. SIGURNOST NUKLEARNIH ELEKTRANA	16
4.1. Procjena sigurnosti nuklearnih elektrana u svijetu	16
4.2. Nuklearne i radijacijske nesreće	18
4.3. Napredne tehnologije za budućnost nuklearnih elektrana	20
5. KLASIFIKACIJA I ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	22
6. ZAKLJUČAK	24
7. POPIS SIMBOLA	25
8. LITERATURA	26

1. UVOD

Nuklearna energija koja se oslobađa tijekom nuklearnih reakcija ima ključnu ulogu u suvremenoj proizvodnji električne energije. Može nastati spajanjem lakih jezgara u procesu fuzije ili raspadom teških jezgara u procesu fisije. Iako se fuzija, primjerice spajanje jezgara deuterija i tricija smatra energetske potencijalom budućnosti, trenutno se u nuklearnim elektranama koristi fisija, gdje se toplina oslobađa raspadom urana – 235.

Nuklearni reaktori dijele se prema vrsti reakcije i načinu usporavanja neutrona. Termički reaktori koriste moderatore za usporavanje neutrona, dok brzi reaktori ne trebaju moderatore jer koriste brze neutrone za lančanu reakciju. Ključne komponente nuklearnih reaktora su gorivo, moderator, rashladno sredstvo i zaštitni sustavi s posebnom pažnjom na sigurnosti i smanjenju radioaktivnog onečišćenja. Upravljanje toplinom u reaktorima odvija se putem rashladnih sredstva kao što su voda, teška voda, plinovi i tekući metali, što omogućuje učinkovito uklanjanje topline i održavanje stabilnih uvjeta rada reaktora. [1]

Tablica 1. Osnovna svojstva reaktora prema gorivu, moderatoru i rashladnom sredstvu [1]

energija neutrona	gorivno, obogaćenje	moderator	rashladno sredstvo	naziv reaktora	kratica
termički	UO ₂ , lagano	laka voda	H ₂ O	hlađen vrelom vodom	BWR
	UO ₂ , lagano	laka voda	H ₂ O	hlađen pod tlakom	PWR
	UO ₂ prirodno	teška voda	D ₂ O	hlađen teškom vodom	HWR
	UO ₂ , prirodno, obogaćeno	grafit	plin	hlađen plinom	GCR
brzi	Pu ²³⁹ O ₂ + U ²³⁸ O ₂	nema	Na	hlađen tekućim natrijem	LMFBR

Proces fuzije uključuje spajanje lakih atomskih jezgara kako bi se formirale teže jezgre, čime se oslobađa ogromna količina energije. Najpoznatije fuzijske reakcije uključuju jezgre deuterija i tricija, izotopa vodika, koje se spajaju uz oslobađanje velike količine energije. Ovaj proces oponaša reakcije koje se odvijaju u suncu i drugim zvijezdama čineći ga potencijalno neiscrpnim izvorom energije. Iako su teoretske procjene energetske učinkovitosti fuzije

izuzetno obećavajuće, praktična primjena ostaje izazov zbog visokih temperatura i tlaka potrebnih za održavanje stabilne reakcije.

Fisija, s druge strane, uključuje raspadanje teških jezgara, poput urana – 235, pri čemu se jezgra dijeli na dvije ili više manjih jezgara, uz oslobađanje znatne količine energije. Fisijski reaktori koji se trenutno široko koriste u nuklearnim elektranama, zamjenjuju klasične kotlove reaktorima gdje se toplina dobiva fisijom. Ovaj proces učinkovitiji je u smislu energetske gustoće u usporedbi s fosilnim gorivima, omogućujući proizvodnju velikih količina energije iz relativno male količine goriva. Nuklearne elektrane koriste tu toplinu za proizvodnju pare koja pokreće turbine i generatore, stvarajući električnu energiju.

Jedna od ključnih razlika između nuklearnih i konvencionalnih elektrana je u primarnom izvoru topline. Klasične elektrane sagorijavaju fosilna goriva, a nuklearne elektrane koriste toplinu iz fisijskih reakcija. Nuklearna postrojenja također imaju niže ulazne temperature pare u turbine što utječe na termodinamičku učinkovitost. Na primjer, nuklearna elektrana ima učinkovitost od 33 % što je niže od 40 % kod klasičnih elektrana. [1]

2. TERMODINAMIČKI PROCESI U RADU NUKLEARNIH ELEKTRANA

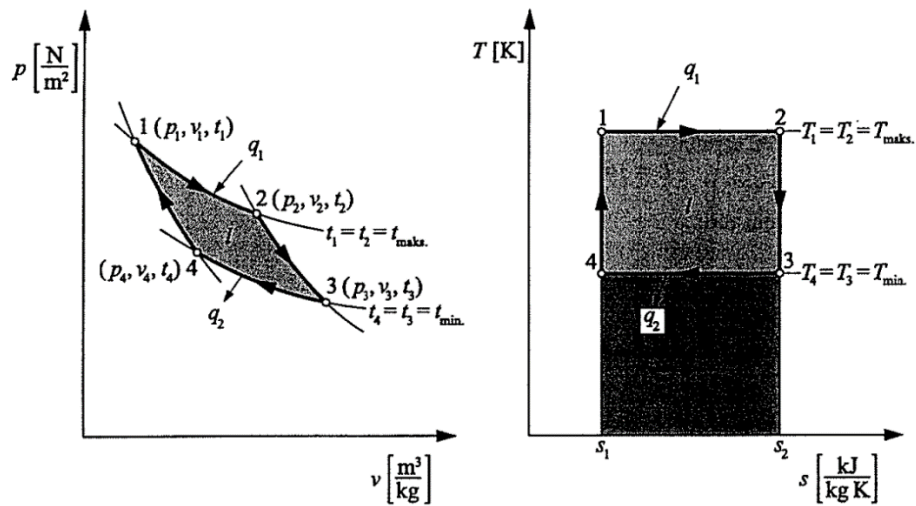
2.1. Termodinamički temeljni procesi

U današnjem vremenu, nuklearne elektrane su jedan od glavnih izvora električne energije koji uspješno zadovoljava rastuće energetske zahtjeve diljem svijeta. Osim svoje primarne uloge u opskrbi električnom energijom, ove elektrane su složeni sustav utemeljen na temeljnim principima termodinamike. Ovaj rad detaljno analizira termodinamičke procese ključne za rad nuklearnih elektrana, od početnog Carnotovog procesa do Clausius - Rankineovog procesa.

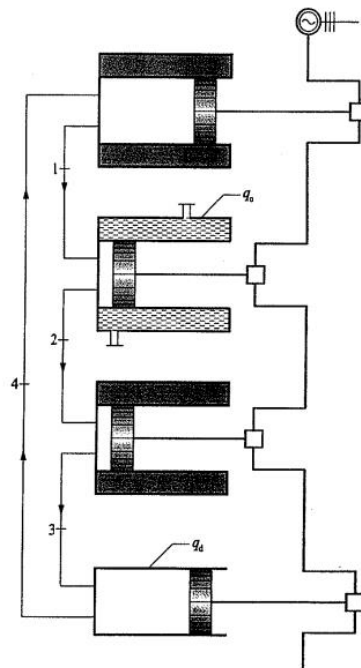
Carnotov proces, nazvan prema francuskom fizičaru i inženjeru Sadiju Carnotu, predstavlja ključan aspekt u proučavanju termodinamičkih procesa koji su osnova operacija nuklearnih elektrana. Sadi Carnot postavio je teoretsku podlogu za istraživanje kružnih, ravnotežnih, povratljivih procesa proučavajući termodinamičke procese u parnim strojevima. Njegova analiza ukazala je na postojanje termodinamičkog procesa koji ostvaruje najveći stupanj iskorištenja energije. Za postizanje povrativog procesa, dovod i odvod topline se moraju događati pri stalnoj temperaturi. U svim ostalim slučajevima temperatura radnog medija će biti niža od temperature izvora topline, što rezultira neravnotežnim procesom. No, samo s dvije izoterme nije moguće postići kružni proces. Kako bi se radni medij ravnotežno ohladio s više na nižu temperaturu, potrebno je provesti adijabatsku ekspanziju. Prijenos topline radnog medija prema hladnom izvoru također je izoterman, dok se proces povećanja temperature radnog medija provodi adijabatskom kompresijom. Carnot je predložio takav proces rada toplinskih strojeva koji nikada nije ostvaren u praksi, ali koristi se za teorijske analize pružajući uvid u osnovne principe pretvorbe toplinske energije u mehaničku energiju.

Desnokretni kružni Carnotov proces sastoji se od četiri povratna procesa koji se odvijaju u cilindrima. U početnom stanju 1, radnom mediju se dovodi toplina q_1 , što uzrokuje izotermnu ekspanziju od točke 1 do točke 2. Tijekom ovog procesa dobiva se rad na račun topline dovedene iz toplinskog spremnika. Slijedi adijabatska ekspanzija od točke 2 do točke 3, bez dovoda topline, pri čemu se snižavaju temperatura i tlak. Rad se pritom dobiva iz unutarnje energije. Od točke 3 do točke 4, odvija se izotermna kompresija, pri čemu se toplina q_2 dovodi i troši se rad. Na kraju, adijabatska kompresija vraća radni medij u početno stanje, povećavajući njegovu unutarnju energiju i kao rezultat dolazi do ponovnog postizanja početne temperature. Ukupan rad Carnotova procesa predstavlja zbroj rada dobivenog i utrošenog u pojedinim

procesima, a prikazan je na $p - v$ dijagramu kao površina omeđena točkama 1, 2, 3 i 4. Na $T-s$ dijagramu dovedena toplina q_1 prikazana je površinom između točaka 1, 2 i x - osi. [1]



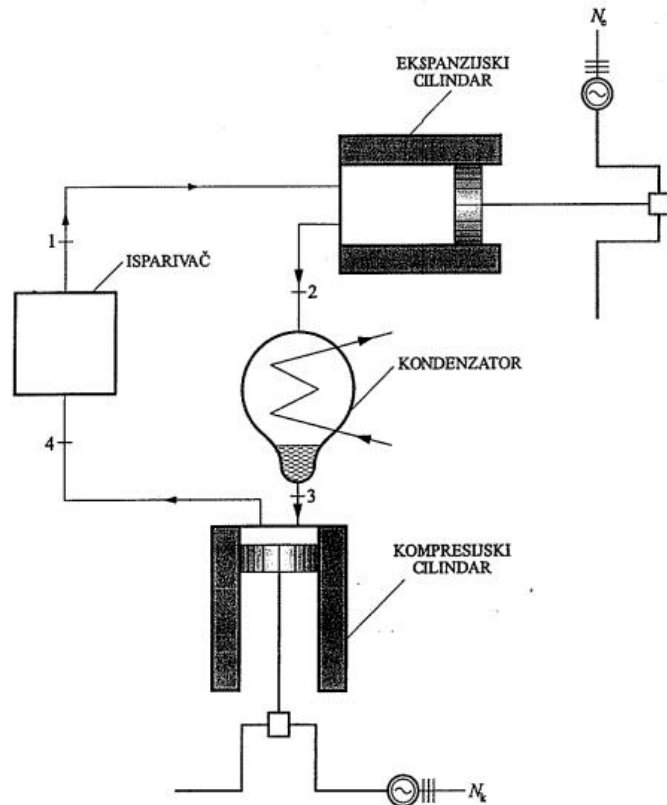
Slika 1. Prikaz teoretskog desnokretnog Carnotovog procesa u $p - v$ i $T - s$ dijagramima [1]



Slika 2. Shema zamišljenog stroja s Carnotovim procesom u pregrijanom području [1]

Carnotov proces u mokrom području predstavlja prilagodbu Carnotovog procesa u kojemu je radni medij imao svojstva idealnog plina, za rad sa smjesom pare i tekućine. U tom

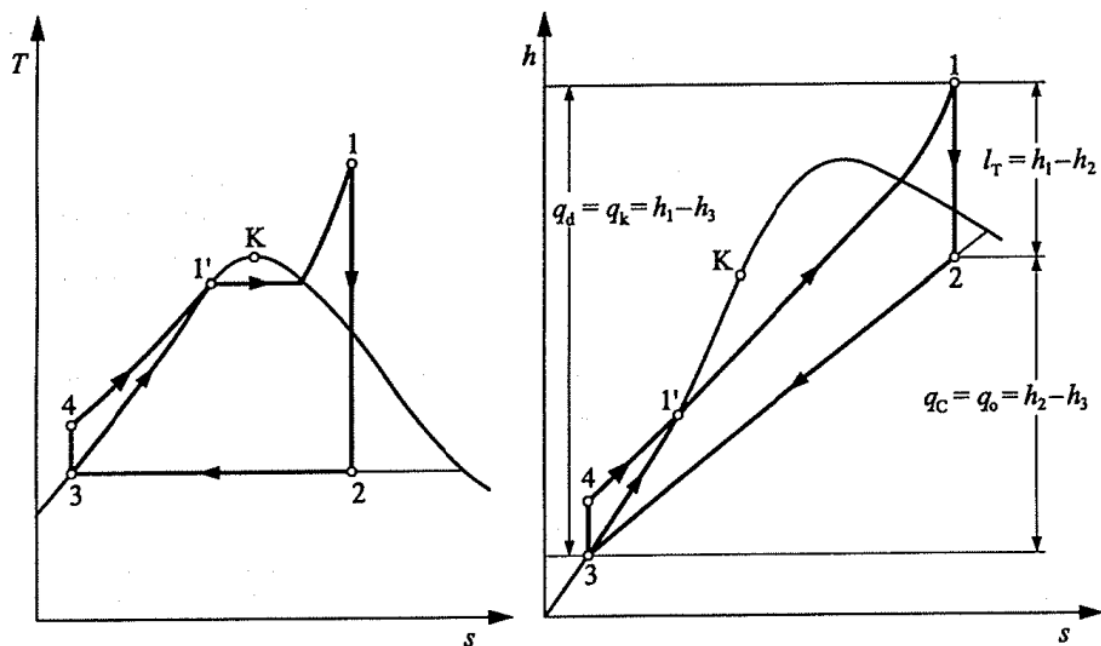
slučaju Carnotov proces i dalje se sastoji od dvije izoterme i dvije adijabate. U mokrom području, temperatura zasićenja pare ovisi o tlaku pa su izotermne promjene istovremeno i izobarne. Na maksimalnoj temperaturi dolazi do isparavanja, dok se na minimalnoj temperaturi odvija kondenzacija. Adijabatska ekspanzija se odvija od maksimalne do minimalne temperature i tlaka, dok se kompresija odvija u obrnutom smjeru. Idealizirano postrojenje u mokrom području razlikuje se od onog s idealnim plinom jer je izotermni kompresijski cilindar zamijenjen kondenzatorom, a ekspanzijski cilindar isparivačem. [1]



Slika 3. Shema idealiziranog uređaja s Carnotovim procesom u mokrom području [1]

Unaprijeđenjem Carnotova procesa dolazi do razvoja Clausius - Rankineovog procesa, koji je osnova za funkcioniranje većine nuklearnih elektrana. Iako Carnotov proces ima visoki termodinamički stupanj učinkovitosti, praktična primjena susreće se s brojnim izazovima. Jedan od njih je nepotpuna kondenzacija koja ne dostiže stanje vrele kapljevine, što je teško postići. Ovaj nedostatak uzrokuje poteškoću u procesu kompresije mokre pare s velikim specifičnim volumenom do vrele kapljevine s malim specifičnim volumenom. Osim toga, Carnotov proces ne može postići temperaturu višu od kritične temperature vode, što znači da

ne može proizvesti pregrijanu paru. Ovi nedostaci su riješeni predloženim Rankineovim procesom, koji se često koristi umjesto Carnotovog procesa. U Rankineovom procesu, kondenzacija ide sve do stanja vrele kapljevine (stanje 3) pa se umjesto velikog kompresora koristi pumpa malih dimenzija i visoke učinkovitosti za dovod vode u kotao. Iako postoji mogućnost korištenja suho zasićene pare, uglavnom se preferira pregrijana para kako bi se povećala srednja temperatura dovoda topline i termodinamički stupanj učinkovitosti. Termodinamički stupanj učinkovitosti Rankineovog procesa niži je od Carnotovog procesa jer se toplina ne predaje pri maksimalnoj temperaturi, već se zagrijavanje odvija od stanja 4 do 1' prikazano na slici 4. [1]



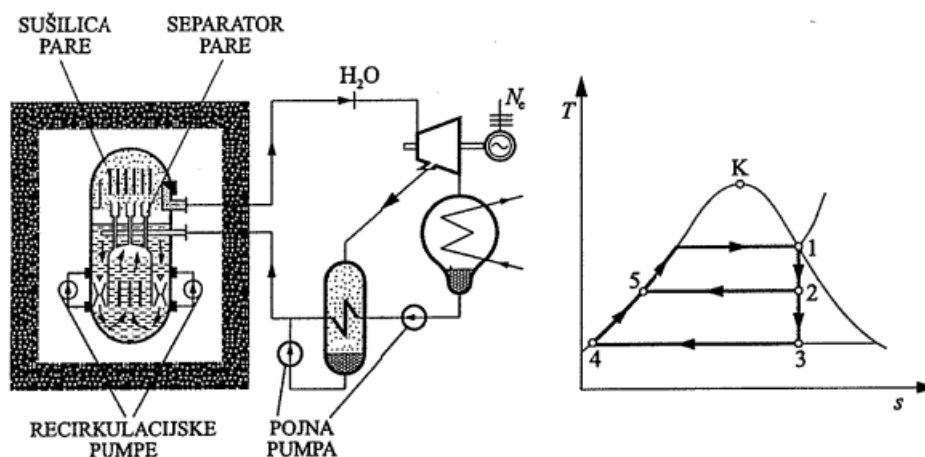
Slika 4. Pojednostavljeni Rankineov proces [1]

2.2. Procesi u nuklearnim reaktorima

Nuklearne elektrane razlikuju se od klasičnih jer se toplina stvara u fisijskom reaktoru umjesto u kotlu. Toplina se može prenijeti radnoj tvari (vodi) direktno u aktivnoj zoni reaktora (BWR) ili pomoću rashladnog sredstva (PWR, HWR, GCR, LMFBR). Rashladno sredstvo odvodi toplinu iz reaktora do izmjenjivača topline ili generatora pare, gdje se toplina prenosi

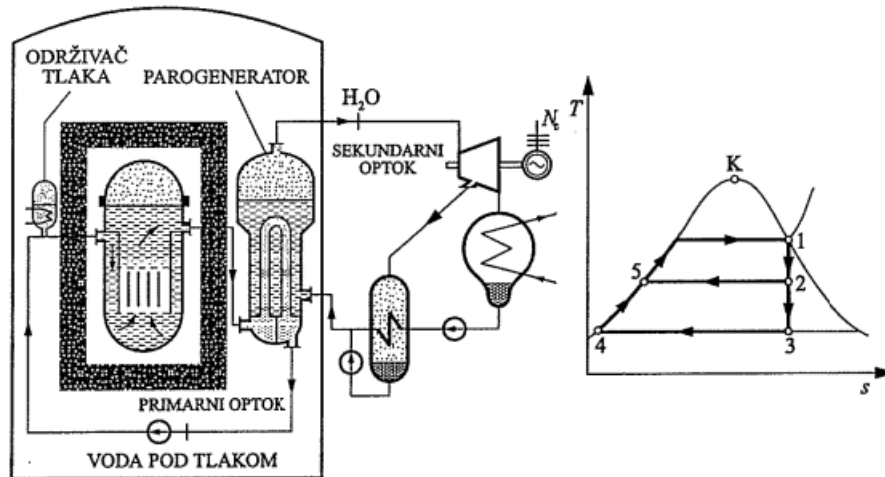
na radnu tvar. Proces može uključivati jedan (BWR), dva (PWR, HWR, GCR) ili tri optoka (LMFBR).

U lakovodnim elektranama (BWR) s jednim optokom, reaktor zamjenjuje kotao pa se para proizvodi u reaktoru i direktno odvodi u turbinu. Koriste vrelu vodu kao rashladno sredstvo, s obogaćenim gorivom, s lakom vodom kao moderatorom. Kondenzat se vraća u reaktor pomoću pumpe. Zbog isparavanja, na vrhu reaktora nalaze se separatori i sušilice pare, dok se na dnu nalaze recirkulacijske pumpe koje poboljšavaju prijenos topline. Stijenke tlačne posude su tanke jer je radni tlak nizak. Jedan optok povećava potencijalnu opasnost od radioaktivnog onečišćenja turbinskog dijela. [1]



Slika 5. Shema i termodinamički proces u lakovodnoj elektrani s vrelom vodom [1]

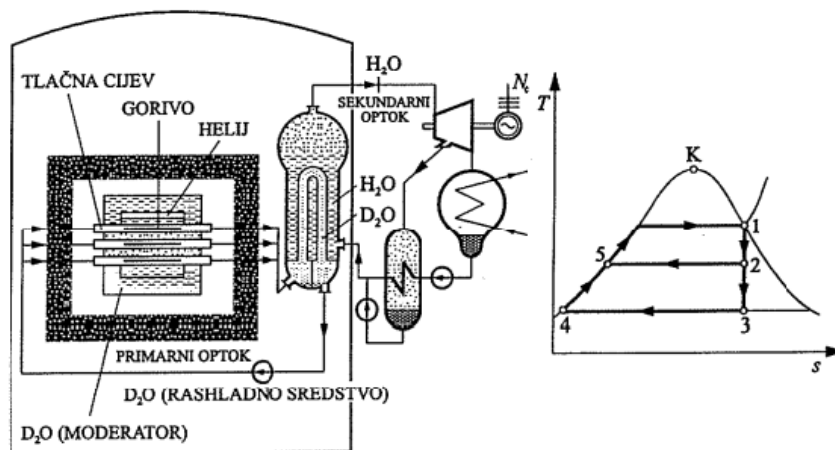
Lakovodne elektrane (PWR) koriste vodu pod tlakom kao rashladno sredstvo s obogaćenim gorivom i lakom vodom kao moderatorom. Njihova ključna karakteristika je postojanje dvaju optoka. U primarnom optoku cirkulira voda pod visokim tlakom, dok u sekundarnom krugu cirkulira vodena para proizvedena u generatoru pare. Da bi rashladna voda imala visoku izlaznu temperaturu sustva drži se pod tlakom oko 150 bar što sprječava isparavanje. Tlak u primarnom optoku održava se konstantnim pomoću posude za održavanje tlaka. Posuda je djelomično ispunjena vodom i zagrijava se električnim grijačima, što osigurava stabilan tlak. Zbog visokog tlaka, stijenke tlačne posude moraju biti deblje kako bi izdržale opterećenje. Onečišćenje je umanjeno budući da reaktor nije direktno povezan s turbinom. [1]



Slika 6. Shema i termodinamički proces lakovodne elektrane s vodom pod tlakom (PWR)

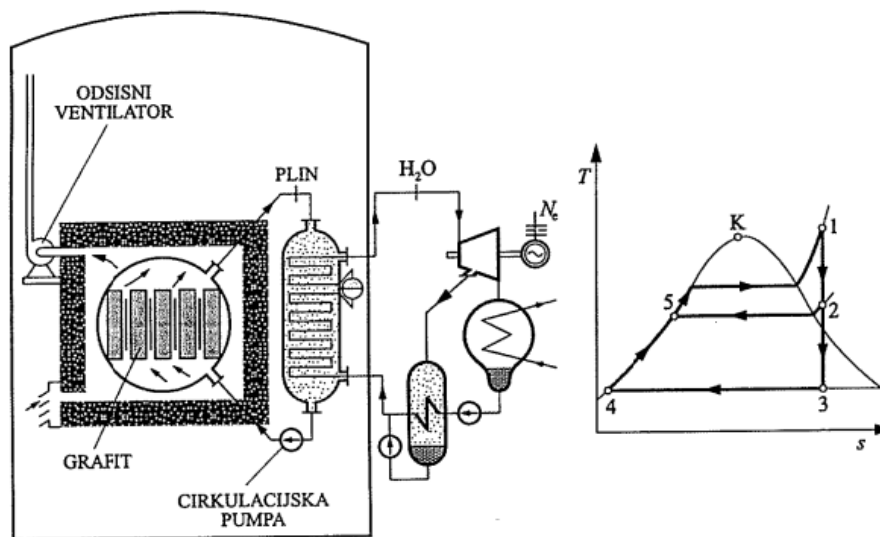
[1]

Teškovodni reaktori (HWR) koriste tešku vodu kao rashladno sredstvo i moderator te prirodni tj. neobogaćeni uran. Gorivo se smješta u horizontalne tlačne cijevi pod tlakom od otprilike 100 bara kako bi se spriječilo isparavanje, a okružuje ih moderator s nižom temperaturom od rashladnog sredstva. Razina moderatora regulira se promjenom tlaka helija unutar moderatora, omogućujući punjenje gorivom tijekom rada bez zaustavljanja pogona. [1]



Slika 7. Shema i termodinamički proces u elektrani s teškovodnim reaktorom (HWR) [1]

U svim reaktorima hlađenim plinom (GCR) grafit se koristi kao moderator. Elektrane obično imaju dva optoka i razlikuju se prema vrsti plina za hlađenje i gorivu. Prve elektrane ovog tipa koristile su prirodno gorivo i ugljikov dioksid za prijenos topline. Kasnije su se razvile elektrane s nisko obogaćenim gorivom koje su hlađene s ugljikovim dioksidom poznate kao AGR (Advanced Gas Cooled Reactor). Glavni nedostatak takvih reaktora je veličina, kao i relativno niska radna temperatura. Iako je radna temperatura u ovim postrojenjima viša od onih u reaktorima hlađenim vodom, još uvijek je preniska za potrebe visokotemperaturnih industrijskih procesa. Stoga se takvi reaktori primjenjuju samo za proizvodnju električne energije i niskotemperaturne industrijske procese. Daljnji razvoj ovih reaktora pokazao je da se primjenom helija i korištenjem obogaćenog goriva mogu postići temperature od 900 do 1000 °C, zbog niske kemijske inertnosti helija i fizikalnih svojstva jezgre reaktora. U takvim postrojenjima poznatim kao HTGCR (High Temperature Gas Cooled Reactor) proizvodi se visokotemperaturna toplinska energija potrebna za kemijske i metalurške procese, kao i za proizvodnju vodika i sintetičkih goriva iz ugljena. [1]



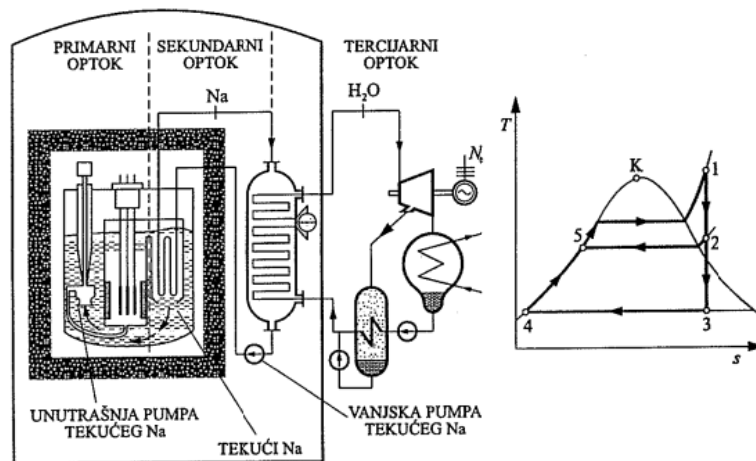
Slika 8. Shema i termodinamički proces u lakovodnoj elektrani s reaktorom hlađenim plinom (GCR) [1]

Reaktor s tekućim metalom i brzim neutronima poznat kao Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR) koristi jako obogaćeno gorivo bez upotrebe moderatora, dok se za hlađenje koristi tekući metal, najčešće natrij. Ovi reaktori rade s tri optoka koji omogućavaju djelotvoran prijenos topline i sigurnost u radu.

Prvi krug sadrži aktivni natrij koji cirkulira unutar reaktorske posude i direktno preuzima toplinu generiranu u reaktorskoj jezgri. Drugi krug uključuje neaktivni natrij koji preuzima toplinu iz primarnog kruga i prenosi ju dalje. U trećem krugu toplina se prenosi iz sekundarnog kruga u generator pare, gdje se proizvodi para koja pokreće turbine.

Tekući natrij kao rashladno sredstvo nudi niz prednosti, uključujući visoku efikasnost prijenosa topline, širok raspon radnih temperatura te nisku točku taljenja i visoku točku vrelišta. Ovi faktori omogućuju stabilan rad unutar širokog temperaturnog raspona samo uz neznatno viši radni tlak od okolnog tlaka što smanjuje zahtjeve debljine stijekne reaktorske posude.

Unatoč učinkovitom prijenosu topline, reaktorska posuda mora biti veća kako bi smjestila izmjenjivače topline unutar nje. Također, s obzirom da je natrij u krutom agregatnom stanju na sobnoj temperaturi potrebno je dodatno zagrijavanje prije puštanja reaktora u rad. Dvostruki sustav cirkulacije natrija (aktivnog i neaktivnog) osigurava da radioaktivni natrij ne dođe u kontakt s vodom, smanjujući rizik od kemijskih reakcija i onečišćenja. [1]



Slika 9. Shema i termodinamički proces u elektrani s oplodnim reaktorom hlađenim tekućim natrijem (LMFBR) [1]

2.3. Analiza termodinamičkog procesa u nuklearnim elektranama

U nuklearnim elektranama ključnu ulogu u pretvaranju toplinske energije u električnu imaju termodinamički procesi čija je detaljna analiza bitna za osiguranje sigurnosti nuklearnih postrojenja. Proces fisije unutar reaktora generira toplinu, a za pretvaranje te topline u električnu energiju najčešće se koristi Clausius – Rankineov proces, pri čemu se često koristi suho zasićena para na ulazu u turbinu. U elektranama koje koriste pregrijanu paru poput

LMFBR i visokotemperaturnih reaktora tipa GCR termodinamički procesi su drugačije optimizirani radi postizanja veće efikasnosti.

Teorijska snaga N_t iz Rankineovog procesa može se računati iz:

$$N_t = \frac{D \cdot l_T}{3600} [kW]$$

$$N_t = N_T \cdot \eta_T$$

gdje je N_T toplinska snaga reaktora.

Električna snaga nuklearne elektrane N_e može se zapisati:

$$N_e = \frac{N_t \cdot \eta}{\eta_T} [kW_e]$$

iz čega slijedi ukupni stupanj iskorištenja elektrane:

$$\eta = \frac{N_e}{N_T}$$

Ukupni stupanj iskorištenja može se računati ovisno o broju optoka. Toplina koja se oslobađa u reaktoru naziva se toplinska snaga reaktora, a označava se kao N_T (kW) ili u toplinskim jedinicama kao Q_r (kJ/h). Ta se toplina računa kao:

$$Q_r = D_r \cdot q_r$$

gdje je D_r masa rashladnog sredstva, a u elektranama s jednim optokom ujedno i masa djelatne tvari u turbogeneratorskom dijelu.

U procesima s dva ili više optoka toplina oslobođena u reaktoru predaje se vodi u generatoru pare pa uz zanemarene gubitke vrijedi:

$$Q_r = D_r \cdot q_r = Q_{gp} = D \cdot q_{gp}$$

Toplina koja se mora odvesti iz kondenzatora:

$$Q_c = D \cdot q_c \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

Termodinamički stupanj djelovanja Rankineova procesa:

$$\eta_t = \frac{q_{gp} - q_c}{q_{gp}} [1]$$

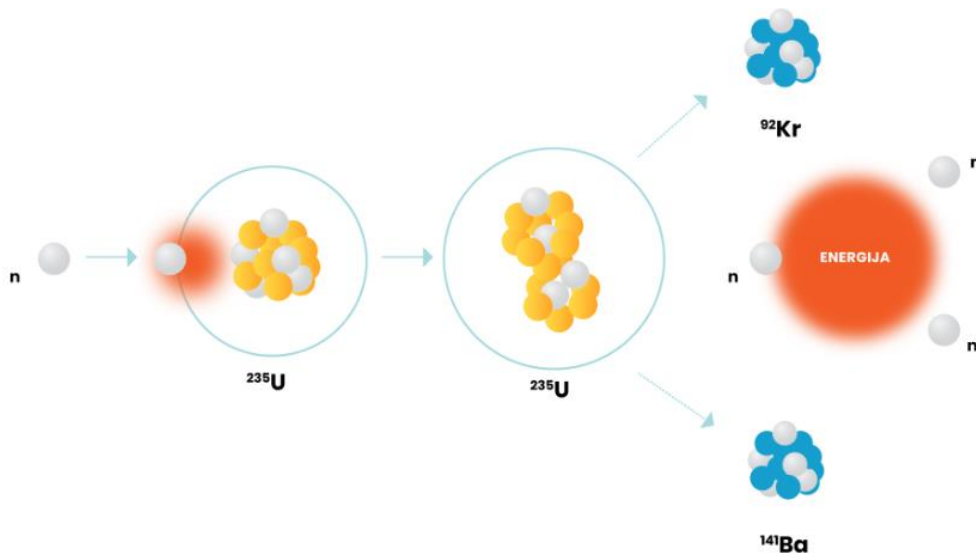
3. NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO

3.1. Uranij i njegova upotreba

Uranij je kemijski element prisutan u Zemljinoj kori od nastanka našeg planeta. Prosječna koncentracija uranija iznosi oko 2 grama po toni stijena, iako se može postići u različitim mineralnih oblicima, od kojih su najvažniji uraninit i karnotit. Osim u kopnenim izvorima, uranij se u malim količinama može pronaći i u morskoj vodi. Prirodno je radioaktivan element koji se s vremenom raspada, emitirajući energiju koja doprinosi ukupnoj geotermalnoj energiji našeg planeta. Ovaj proces raspadanja traje milijardama godina, usporedivo s dobi Zemlje, što omogućuje njegovu prisutnost u zemljinoj kori i danas. Najzastupljeniji izotopi uranija u prirodi su uranij 238 koji čini 99,29 % prirodnog uranija i uranij 235 koji čini samo 0,71 %, ali je ključan za nuklearnu energiju.

Uranij je poznat kao jedan od najtežih prirodnih elemenata s gustoćom koja je 18,7 puta veća od gustoće vode. Njegovo ključno svojstvo je sposobnost cijepanja neutronima, proces je poznat kao nuklearna fisija. To je fizikalni proces u kojem jezgra teškog elementa poput uranija apsorbira neutron i cijepa se na dvije lakše jezgre, pri čemu se oslobađa velika količina energije prema jednadžbi $E = m \cdot c^2$ koju je formulirao Albert Einstein. Ovaj proces, otkriven slučajno 1938. godine, oslobađa oko 200 MeV energije po cijepanju jednog atoma uranija što je ekvivalentno energiji sadržanoj u šest prikolica plina u samo jednoj uranijevoj tableti veličine 1 cm.

Nuklearna fisija odvija se unutar jezgre reaktora nuklearne elektrane, gdje se provodi kontrolirana lančana reakcija cijepanja uranija. Uranij 235 je jedini prirodni izotop koji se može cijepati na termičke neutrone, dok su drugi elementi poput plutonija umjetno proizvedeni. Kada neutron pogodi jezgru uranija 235, jezgra se cijepa na dvije manje jezgre, pri čemu se oslobađa velika količina energije u obliku topline, dva do tri nova neutrona i gama - zrake. Ova oslobođena energija koristi se za zagrijavanje vode koja cirkulira kroz reaktor stvarajući paru koja pokreće turbine za proizvodnju električne energije. [2]



Slika 10. Nuklearna fisija [2]

3.2. Nuklearni gorivni krug

Nuklearna elektrana Krško (NEK) koristi uranijevo gorivo koje prolazi kroz nekoliko ključnih faza prije nego što se koristi za proizvodnju električne energije. Ovaj proces uključuje rudarenje i preradu uranijeve rude, obogaćivanje uranija, izradu gorivih elemenata, korištenje goriva u reaktoru te skladištenje istrošenog goriva. Takav složeni ciklus omogućava učinkovitu upotrebu i sigurno odlaganje nuklearnog goriva, osiguravajući dugoročni rad nuklearnih elektrana.

Prvi korak započinje rudarenjem uranijeve rude iz zemljine kore. Nakon što se ruda izvadi, ona se temeljito čisti i melje. Uranijevi minerali se zatim otapaju u kiselinskim ili bazičnim otopinama kako bi se dobio pročišćeni koncentrat uranijevog oksida. Ovaj koncentrat predstavlja vrlo čist prirodni uranij s udjelom od oko 0,71 % izotopa uranija 235. Budući da većina nuklearnih reaktora zahtijeva uranij 235 obogaćen na 1 do 5 % te slijedi korak obogaćivanja.

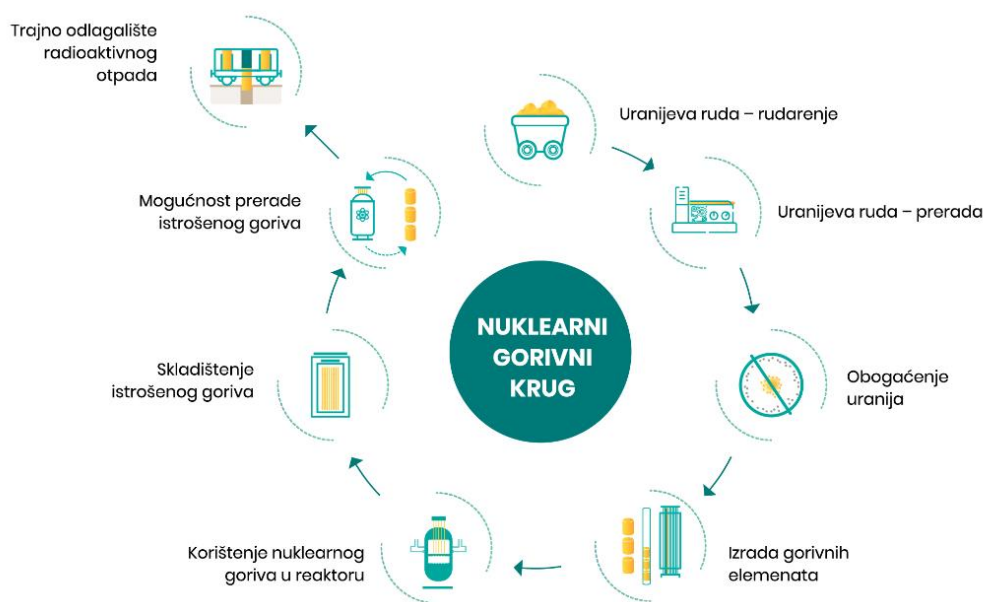
Obogaćivanje uranija uključuje povećanje udjela izotopa uranija 235 odvajanjem uranija 238. Najčešći način za postizanje toga je kroz plinske centrifuge, gdje se uranijev heksafluorid, doveden u plinovito stanje, separira na temelju mase izotopa. Teže molekule uranija 238 migriraju prema vanjskom rubu centrifuge, dok se lakši uranij 235 zadržava u središtu. Ovaj proces omogućuje odvajanje uranija 235, čime se povećava njegov udio u smjesi, što nazivamo

obogaćivanjem. U slučaju NEK – a, obogaćeni uranij dobavlja kompanija URENCO, dok gorivne elemente izrađuje Westinghouse.

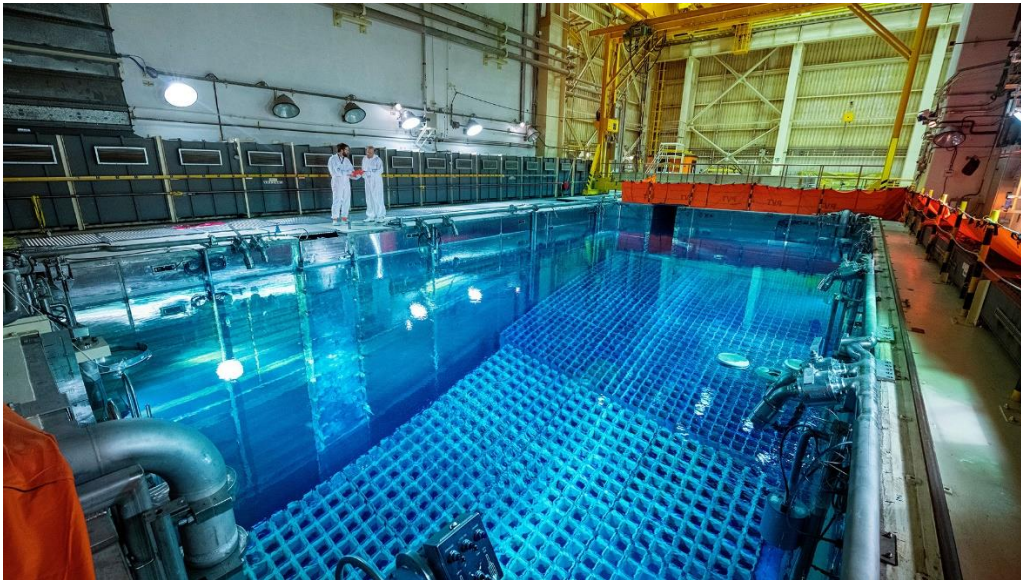
Svježe gorivo, prije nego što se unese u reaktor, nije radioaktivno, što omogućuje jednostavno rukovanje. Reaktorska jezgra u NEK-u sastoji se od 121 gorivnog elementa, od kojih je obično 56 novih, dok su ostali iz prethodnog ciklusa. Kada se pokrene lančana reakcija cijepanja uranija, gorivo postaje vrlo radioaktivno i počinje proizvoditi ogromnu količinu toplinske energije. Ova toplina se prenosi kroz primarnu rashladnu vodu koja cirkulira unutar reaktora, a zatim se prenosi u sekundarni krug gdje se koristi za proizvodnju pare i električne energije.

Nakon što se gorivo iscrpi i više nije učinkovito za proizvodnju energije, uklanja se iz jezgre reaktora i pohranjuje u bazenu za istrošeno gorivo. Ovaj bazen omogućuje adekvatno hlađenje goriva tijekom otprilike pet godina. Nakon tog perioda, istrošeno gorivo može se premjestiti u suho skladište, gdje se pohranjuje u posebno izrađene nepropusne spremnike koji osiguravaju kontinuirano hlađenje i zadržavanje radioaktivnog zračenja. Istrošeno gorivo također može biti reciklirano za ponovno korištenje. U tom procesu, uranij i plutonij se izdvajaju i mogu se koristiti za proizvodnju novog nuklearnog goriva. Ako se istrošeno gorivo ne preradi, postaje visokoradioaktivni otpad i odlaže se u nepropusnim spremnicima za trajno skladištenje.

[3]



Slika 11. Prikaz nuklearnog gorivnog kruga [3]



Slika 12. Bazen za istrošeno gorivo [3]

3.3. Princip rada Nuklearne elektrane Krško

U svijetu raste potreba za održivim izvorima energije te nuklearne elektrane postaju ključni element u proizvodnji električne energije u cijelom svijetu. Analizom na primjeru Nuklearne elektrane Krško (NEK) u Sloveniji dobit će se uvid u proces rada nuklearnih elektrana.

Nuklearna elektrana Krško djeluje na sličan način kao klasična termoelektrana, ali umjesto fosilnih goriva koristi toplinu koja se oslobađa cijepanjem jezgara uranija u reaktoru. Reaktorska zgrada sadrži reaktorsku posudu s gorivnim elementima kroz koju cirkulira pročišćena voda pod tlakom. Ta voda odvodi toplinu do parogeneratora gdje se para generira. Para pokreće turbine, a turbine električne generatore. Reaktorska posuda je zatvorena tijekom rada, a zamjena goriva zahtijeva zaustavljanje rada elektrane, što označava kraj 18-mjesečnog gorivnog ciklusa. Tehnološki dio elektrane podijeljen je u tri termodinamička sustava, a to su primarni, sekundarni i tercijarni, međusobno povezanih kroz koje cirkulira voda.

U primarnom krugu, toplina proizvedena u reaktorskoj jezgri zagrijava vodu koja cirkulira unutar tog kruga. Preko primarnih cijevi, toplina vode prenosi se u parogenerator gdje prelazi na vodu sekundarnog kruga. Sekundarni krug započinje generiranjem pare na sekundarnoj strani parogeneratora. Generirana para pokreće turbine, koje pokreću generatore, pretvarajući pokret u električnu energiju koja se šalje u elektroenergetsku mrežu. U

kondenzatoru ispod niskotlačne turbine, para se kondenzira natrag u vodu. Voda se potom kroz više toplinskih izmjenjivača i crpki vraća u parogenerator. Tercijarni krug služi za odvođenje topline u okolinu koja se ne može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Crpke guraju vodu iz rijeke Save kroz kondenzator, gdje se toplina iz pare prenosi u rijeku. Nakon toga, voda se vraća u Savu. [4]

4. SIGURNOST NUKLEARNIH ELEKTRANA

Nuklearne elektrane proizvode radioaktivni otpad tijekom svog rada, a njihov operativni rizik uključuje potencijalne nesreće izazvane ljudskim greškama ili prirodnim katastrofama. Zbog velike količine radioaktivnosti prisutne u jezgri reaktora, sigurnosni standardi za nuklearne elektrane daleko su stroži, nego za ostale elektrane. Ove mjere su neophodne kako bi se spriječile katastrofalne nesreće i zaštitila okolina.

Neophodno je kontinuirano provoditi analize i istraživanja kako bi se identificirali potencijalni rizici i unaprijedile sigurnosne mjere. Ove analize ne samo da pružaju uvid u trenutno stanje sigurnosti nuklearnih elektrana, već također omogućuju predviđanje budućih prijetnji i prilagodbu sustava sigurnosti kako bi se na vrijeme odgovorilo na promjene okoline. U svijetu se provode brojna istraživanja koja se bave različitim aspektima sigurnosti nuklearnih elektrana, uključujući analize klimatskih promjena, ekstremnih vremenskih uvjeta i razvojem inovativnih tehnologija za poboljšanje sustava sigurnosti. To za cilj ima osigurati da nuklearne elektrane ostanu pouzdan izvor energije uz minimalan rizik za ljudske živote i okoliš. [5]

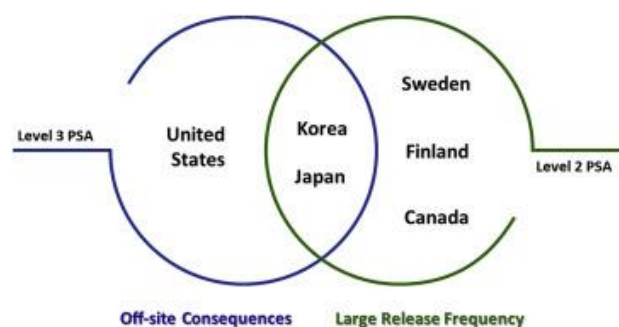
4.1. Procjena sigurnosti nuklearnih elektrana u svijetu

Sigurnosni ciljevi nuklearnih elektrana određuju razinu sigurnosti koju elektrana mora održavati. Sigurnosni ciljevi su ključni čimbenici pri izradi nacionalne politike o nuklearnoj sigurnosti, a različite zemlje imaju različite sigurnosne ciljeve u svojim politikama. Kvantitativni sigurnosni ciljevi za nuklearne elektrane u Koreji formalno su definirani 2016. godine. Osobito nakon nesreće u Fukushimi, postupno je rasla zabrinutost javnosti zbog rizika koji proizlaze iz više jedinica nuklearnih elektrana na istoj lokaciji.

Sigurnosni ciljevi predstavljani su hijerarhijskim strukturama koje uključuju visoko kvalitetne sigurnosne ciljeve, srednje razine kvantitativnih sigurnosnih ciljeva i niske razine pomoćnih kriterija. U Koreji, sigurnosni ciljevi imaju hijerarhijsku strukturu kako je preporučeno od strane međunarodne zajednice. Visoke kvalitativne sigurnosne ciljeve definira Zakon o nuklearnoj sigurnosti. Srednje razine kvantitativnih sigurnosnih ciljeva sastoje se od dva kvantitativna zdravstvena cilja (Quantitative Health Objectives) i jednog kriterija za veliku stopu ispuštanja (Large Early Release Frequency). Niske razine pomoćnih kriterija definirane su u regulatornim smjernicama kao ciljevi izvedbe i uključuju kriterije za učestalost oštećenja jezgre (Core Damage Frequency) i učestalost rane velike emisije (LERF).

Kvantitativni sigurnosni ciljevi definirani su u smislu posljedica izvan postrojenja (što odgovara razini 3 PSA) u nekim zemljama, dok u drugim zemljama ti ciljevi uključuju učestalost radioaktivnog ispuštanja (što odgovara razini 2 PSA). U Koreji su kvantitativni sigurnosni ciljevi definirani u smislu posljedica izvan postrojenja i učestalosti ispuštanja. Stoga sigurnosni ciljevi odgovaraju razinama 3 i 2 PSA.

Analizom sigurnosnih ciljeva onih zemalja koje primjenjuju LRF kriterij, primjećuje se da je svrha LRF kriterija ograničiti onečišćenje zemljišta i posljedice vezane za ograničenje korištenja zemljišta, a ne ograničiti rane rizike od smrtnosti uslijed radioaktivnog ispuštanja. Sigurnosni ciljevi imaju ključnu ulogu u oblikovanju nacionalne politike o nuklearnoj sigurnosti. Pažljiv pristup uz značajan pregled i istraživanje sigurnosnih ciljeva potreban je kako bi se osiguralo da su u skladu s nacionalnom politikom kompatibilni s međunarodnim standardima te usklađeni s ciljevima postavljenim od strane drugih zemalja. [6]



Slika 13. Kvantitativni ciljevi sigurnosti u različitim zemljama [6]

Istraživan je utjecaj vremena i razine mora na sigurnost nuklearnih elektrana u Finskoj. Poseban fokus stavljen je na procjenu rizika od poplava na lokacijama finskih nuklearnih elektrana temeljeno na istraživanjima dugoročnih promjena i varijacijama razine mora što je dovelo do poboljšane zaštite od izuzetno visoke razine mora. Prognoze klimatskih promjena pokazale su da bi se entalpije zraka mogle povećati za 13 – 17 % do 2100. godine. Međutim, nije bilo jasnih projekcija budućih trendova za vjerojatnost pojave ledenih kiša tijekom cijele godine. Pregled različitih pojedinačnih i kombiniranih vremenskih događaja i utjecaj razine mora koji bi mogli utjecati na normalno funkcioniranje nuklearnih elektrana istaknuo je potrebu za proširenjem budućih istraživanja. Posebna pažnja posvećena je različitim aspektima nesigurnosti, pri čemu je zaključeno da što je vremenski događaj ekstremniji to je veća nesigurnost u vjerojatnosti pojavljivanja. [7]

4.2. Nuklearne i radijacijske nesreće

Černobilska nuklearna elektrana smještena oko 130 km sjeverno od Kijeva u Ukrajini i oko 20 km južno od granice s Bjelorusijom sastojala se od četiri reaktora. U vrijeme nesreće dva dodatna reaktora bila su u fazi izgradnje. Elektrana je bila opremljena s umjetnim jezerom od 22 kvadratna kilometra koje je služilo kao izvor rashladne vode i koje se nalazilo jugoistočno od elektrane. Ovo područje karakterizira gusta šuma i relativno niska naseljenost. Pripjat, tada novi grad udaljen oko 3 km od reaktora imao je 49 000 stanovnika. Černobil s oko 12 500 stanovnika, nalazio se 15 km od elektrane.

Reaktori u Černobilu koristili su se isključivo u bivšem Sovjetskom Savezu i imali su značajno niži sigurnosni standard u usporedbi s reaktorima u zapadnim zemljama. Prilikom fisije radioaktivnih izotopa urana ili plutonija, koje su koristili kao nuklearno gorivo, nastaje gama zračenje koje može prodjeti u tkiva i oštetiti stanice i njihov DNK te dovesti do razvoja raka.

Dana 25. travnja 1986. godine, posada reaktora 4 u Černobilu provodila je test s nižom snagom i slučajno deaktivirala sigurnosne sustave dok je reaktor bio u nestabilnom stanju. Uz to, napravili su šest kritičnih ljudskih grešaka što je zajedno s nedostacima reaktora dovelo do katastrofe. Interakcija vrlo vrućeg goriva s rashladnom vodom uzrokovala je fragmentaciju goriva i brzu proizvodnju pare što je rezultiralo povećanjem tlaka, eksplozijama i oslobađanjem

fisijskih produkata u atmosferu. Procijenjeno je da je izbačeno oko 300 tona od ukupno 1200 tona grafita iz reaktora izazivajući niz požara i značajno ispuštanje radioaktivnosti u okoliš. [8]



Slika 14. Nuklearna katastrofa u Černobilu [9]

Prirodne katastrofe su neizbježan dio ljudske povijesti kao što je japanski potres i tsunamij koji se dogodio 11. ožujka 2011. godine. Ovaj potres koji je u povijesti ušao kao jedan od najsnažnijih ikad zabilježenih, ne samo da je izazvao ogromne štete u regiji već je doveo do jedne od najtežih nuklearnih katastrofa u povijesti, koja je pogodila nuklearnu elektranu Fukushima Daiichi. Epicentar potresa nalazio se 130 kilometara od obale grada Sendai na istočnoj obali otoka Honshu. Potres je uzrokovao značajan pomak morskog dna, dug 650 kilometara pri čemu se dno pomaknulo horizontalno 10 – 20 metara, a Japan nekoliko metara prema istoku i spustio obalu za pola metra. Tsunami koji je uslijedio i prekrilo 560 kvadratnih kilometara, uzrokujući smrt oko 19 500 ljudi i veliku štetu obalnim područjima, uključujući luke i gradove s preko milijun zgrada potpuno ili djelomično uništenih.

Nuklearna elektrana Fukushima Daiichi, zajedno s još tri nuklearne elektane u regiji, upravljala je s ukupno jedanaest reaktora kada je potres pogodio. Svi reaktori su se automatski isključili odmah nakon potresa. Inspekcije su pokazale da nije bilo značajne štete

na reaktorima od samog potresa već tsunami koji je uslijedio nakon poplavo je nuklearnu elektranu i onemogućio rad 12 od 13 rezervnih generatora i izmjenjivača topline. Tri reaktora izgubila su napajanje što je rezultiralo gubitkom sposobnosti hlađenja reaktora i cirkulacije vode što je uzrokovalo pregrijavanje. Unatoč naporima stotina Tepco zaposlenika i podršci vatrogasnih i vojnih snaga, situacija je postala teška zbog radioaktivnog onečišćenja.

Tijekom nekoliko tjedana nakon katastrofe radilo se na obnavljanju sustava za dovođenje topline i rješavanju problema pregrijanih bazena za istrošeno gorivo. Ovaj događaj dokazao je kako složeni sustavi mogu biti ranjivi na kombinirane učinke ekstremnih događaja te je naglasio potrebu za kontinuiranim unaprjeđenjem sigurnosnih protokola i kriznih planova. Katastrofa u Fukushimi ostaje ključan trenutak u povijesti nuklearne elektrane s posljedicama na globalnu politiku i tehnologiju nuklearne sigurnosti. [10]

4.3. Napredne tehnologije za budućnost nuklearnih elektrana

S povećanjem potrebe za održivim i sigurnim energetske rješenjima, kombinacija različitih izvora energije postaje sve relevantnija. Nuklearne elektrane imaju ključnu ulogu u globalnoj proizvodnji električne energije zbog svoje sposobnosti da osiguraju kontinuirani tok energije s niskim emisijama stakleničkih plinova. Međutim, sigurnosni izazovi, pogotovo oni povezani s nepredviđenim događajima poput prirodnih katastrofa zahtijevaju dodatne mjere sigurnosti. S druge strane, solarna energija kao obnovljiv izvor energije nudi mnoge prednosti, uključujući smanjenje upotrebe fosilnih goriva i minimalan utjecaj na okoliš.

Integracija solarne energije s nuklearnim elektranama može predstavljati inovativno rješenje koje kombinira prednosti oba sustava. Hibridni sustavi koji koriste solarnu i nuklearnu energiju mogu pružiti poboljšanje sigurnosne mjere i dodatne izvore prihoda čime se povećava ukupna učinkovitost i pouzdanost energetske sustava.

Istražuje se koncept hibridnog korištenja solarne i nuklearne energije s fokusom na solarnu elektranu snage 100 kW povezanu na mrežu koja može pružiti rezervnu snagu za istraživački reaktor u Teheranu. Analiziraju se ekonomski i sigurnosni aspekti ovog pristupa kao i njegova potencijalna uloga u prevenciji katastrofa sličnih onoj koja se dogodila u nuklearnoj elektrani Fukuschima Daiichi 2011. godine.

Korištenjem solarne elektrane za pružanje hitnog opterećenja za nuklearni reaktor (pumpe za hlađenje), posljedice ove nesreće mogle su biti lakše kontrolirane. Stoga, za povećanje sigurnosti nuklearnih elektrana, preporučuje se korištenje solarne elektrane kao hibridne nuklearno solarne energije. Tijekom dana, korištenjem izravne sunčeve svjetlosti, moguće je podržati hitna opterećenja reaktora. U oblačnim danima i noću, baterije održavaju opskrbu hitnih opterećenja poput pumpi za hlađenje. [11]

5. KLASIFIKACIJA I ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Nuklearne elektrane imaju ključnu ulogu u proizvodnji električne energije, ali s ovim izvorom energije dolaze i specifični izazovi, posebno sa zbrinjavanjem radioaktivnog otpada. Otpad se dijeli prema sadržaju radionuklida i vremenu poluraspada, što određuje način njegovog zbrinjavanja i sigurnosne mjere koje treba poduzeti. Vrlo niski radioaktivni otpad (VNRAO) sadrži zanemarivu specifičnu aktivnost i može se zbrinjavati kao standardni komunalni otpad jer nije opasan za okoliš i zdravlje ljudi. Nisko radioaktivni otpad (NRAO) obuhvaća radionuklide s kratkim vremenom poluraspada i niskom specifičnom aktivnošću te se odlaže u površinskim odlagalištima. Srednje radioaktivni otpad (SRAO) uključuje radionuklide s kratkim ili dugim vremenom poluraspada. Otpad s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskim odlagalištima. Visoko radioaktivni otpad sadrži visok udio radionuklida, uključujući fisijske produkte te se zbog svoje dugotrajne radioaktivnosti skladišti u dubokim podzemnim odlagalištima. [12]



Slika 15. Klasifikacija radioaktivnog otpada [12]

Pri proizvodnji električne energije u nuklearnim elektranama nastaje niskoradioaktivni i srednjoradioaktivni otpad (NSRAO). U nuklearnoj elektrani Krško (NEK), odgovornost za upravljanje ovim otpadom shvaća se vrlo ozbiljno pridržavajući se najviših svjetskih standarda. Svi NSRAO materijali skladište se u privremenom skladištu unutar elektrane.

NSRAO obuhvaća niz materijala koji su postali radioaktivni nakon upotrebe u radiološki kontroliranim područjima. To uključuje dotrajalu zaštitnu opremu, prerađeni tekući otpad poput filtera i smola te materijale koji se koriste pri održavanju opreme unutar elektrane. Ovi materijali moraju se pažljivo skladištiti. Svake godine, NEK sladišti oko 30 kubnih metara NSRAO-a. Od početka rada elektrane 1981. godine, ukupni volumen NSRAO-a iznosi 2488 kubnih metara. Kako bi se smanjila količina otpada i olakšalo skladištenje, provode se različite metode smanjenja volumena, uključujući sortiranje, koncentraciju, taljenje i spaljivanje. Ove postupke, poput spaljivanja otpada u inozemstvu, omogućuju smanjenje volumena otpada i do 20 puta, što značajno doprinosi učinkovitom upravljanju otpadom.

Osim izazova povezanih s radioaktivnim otpadom, nuklearna elektrana nudi značajne ekološke prednosti. Nuklearne elektrane, za razliku od postrojenja koja koriste fosilna goriva, ne emitiraju ugljikov dioksid tijekom proizvodnje električne energije. Ovo značajno smanjuje ugljikov dioksid na globalnoj razini. Na europskoj razini, korištenje nuklearne energije doprinosi smanjenu emisiju ugljikovog dioksida za oko 800 milijuna tona godišnje. Uz minimalne emisije stakleničkih plinova, nuklearna energija ima relativno nizak utjecaj na okoliš u usporedbi s drugim izvorima energije. [13]



Slika 15. Odlagalište otpada [12]

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su termodinamički procesi ključni za proizvodnju i distribuciju energije u nuklearnim elektranama. Ti procesi su neophodni kako za sigurnost elektrane tako i za izbjegavanje katastrofalnih nesreća. Kroz razumijevanje i primjenu procesa fisije, nuklearne elektrane su uspješno integrirane u energetske sustav mnogih zemalja pružajući stabilnu i pouzdanu opskrbu električnom energijom. Zbog visokog energetskog potencijala nuklearnog goriva, nuklearne elektrane mogu proizvesti veliku količinu energije uz relativno malu količinu goriva. Ova visoka učinkovitost, zajedno s niskim emisijama stakleničkih plinova, čini nuklearnu energiju značajnim doprinosom u borbi protiv klimatskih promjena.

Sigurnost nuklearnih elektrana je prioritet u njihovom radu. S obzirom na katastrofalne posljedice nuklearnih nesreća, sve operacije unutar nuklearnih postrojenja moraju biti izvedene uz stroge sigurnosne protokole i stalni nadzor. Održavanje i modernizacija sustava sigurnosti, zajedno s obukom zaposlenika, ključni su za sprječavanje nesreća i smanjenje rizika ljudskih grešaka. Napredna tehnologija i stalna istraživanja usmjerena su na dodatno poboljšanje sigurnosnih mjera i otpornosti postrojenja na vanjske čimbenike.

Pravilno zbrinjavanje radioaktivnog otpada predstavlja presudan aspekt rada nuklearnih elektrana. Radioaktivan otpad mora biti sigurno skladišten kako bi se spriječio bilo kakav negativan utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi. Postoje standardi za skladištenje i konačno odlaganje otpada. Kontinuirana istraživanja i razvoj novih tehnologija za zbrinjavanje otpada bitni su kako bi se osigurala sigurnost sadašnjih i budućih generacija. Budućnost nuklearne energije nalazi se u razvoju novih tehnologija koje će povećati učinkovitost i sigurnost nuklearnih elektrana. S kontinuiranim napretkom u istraživanju i tehnologiji, nuklearne elektrane mogu postati još pouzadniji izvor energije.

7. POPIS SIMBOLA

D – masa djelatne tvari (radnog medija)

D_r – masa rashladnog medija za hlađenje reaktora

I_T – jedinični povratljivi rad turbine

N_T – teorijska snaga

N_e – električna snaga

q_r – jedinična toplina oslobođena u reaktoru

q_{gp} – toplina generatora pare u nuklearnom postrojenju

q_c – toplina kondenzacije

Q_r – oslobođena toplina u reaktoru

η – ukupni stupanj djelovanja

η_T – stupanj djelovanja turbine

η_t – termodinamički stupanj djelovanja

8. LITERATURA

- [1] Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., Osnove tehničke termodinamike. Školska knjiga, 2001., str. 44-47, 179-187, 297-301, 341-355
- [2] <https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-energiji/uranijska-fisija>
- [3] <https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-energiji/od-uranijske-do-nuklearnog-goriva>
- [4] <https://www.nek.si/hr/kako-djeluje-nek#tercijarni-krug>
- [5] <https://www.nemis.hr>
- [6] Suk Kim, J., Cheol Kim, M., Consistency issues in quantitative safety goals of nuclear power plants in Korea, Nucl. Eng. Technol., 51 (2019), 1758-1764
- [7] Jylhä, K., Kämäräinen, M., Fortelius, C., Gregow, H., Helander, J., Hyvärinen, O., Johansson, M., Karppinen, A., Korpinen, A., Kouznetsov, R., Kurzeneva, E., Leijala, U., Mäkelä, A., Pellikka, H., Saku, S., Sandberg, J., Sofiev, M., Vajda, A., Venäläinen, A., Vira, J., Recent meteorological and marine studies to support nuclear power plant safety in Finland, Energy, 165 (2018) 1102-1118
- [8] <https://www.zzjzdnz.hr>
- [9] <https://narod.hr>
- [10] <https://world-nuclear.org>
- [11] Chabook, M., Tashakor, S., Design of emergency solar energy system adjacent the nuclear power plant to prevent nuclear accidents and increase safety, Nucl Anal., 3 (2024)
- [12] <https://www.radioaktivniotpad.org>
- [13] <https://www.nek.si/hr/pogon/okolis#zbrinjavanje-otpada>