

Примљено: 29.06.2010			
Орг.јед.	Број	Прилог	Вредности
73	6/2-351	1	2010

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
MAŠINSKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U NIŠU**

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu br. 612-325-5/2010 od 22.06.2010. god. imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Mirjane Laković dipl. maš. inž. pod nazivom:

**ENERGETSKA EFIKASNOST POVRATNO I PROTOČNO
HLAĐENOG PARNOG BLOKA U ZAVISNOSTI OD PARAMETARA
ATMOSFERSKOG VAZDUHA**

Nakon pregleda doktorske disertacije članovi Komisije podnose sledeći:

I Z V E Š T A J

Doktorska disertacija kandidata mr Mirjane Laković dipl. maš. ing. izložena je na 234 strane formata B5. Celokupna materija dokorskog rada sistematizovana je u 10 poglavlja, uključujući uvod i zaključak. Naslovi poglavlja su sledeći:

1. UVOD
2. TEORIJSKE OSNOVE KONDENZACIJE VODENE PARE
3. KONDENZACIONO POSTROJENJE TERMOELEKTRANE
4. POVRATNI SISTEM HLAĐENJA VLAŽNIM RASHLADNIM TORNJEVIMA
5. PONAŠANJE POJEDINIH KOMPONENTI PRI PROMENLJIVIM USLOVIMA
6. ENERGETSKA EFIKASNOST PARNOG BLOKA SA PROTOČNIM HLAĐENJEM U LETNJEM I ZIMSKOM REŽIMU RADA
7. ENERGETSKA EFIKASNOST PARNOG BLOKA SA POVRATNIM HLAĐENJEM U LETNJEM I ZIMSKOM REŽIMU RADA
8. VERIFIKACIJA PRIMENJENOG MODELA I REZULTATA PRORAČUNA
9. ZAVRŠNA RAZMATRANJA
10. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano 107 numerisanih grafičkih priloga. Doktorska disertacija sadrži četiri strane sadržaja, a na kraju rada 30 priloga i spisak korišćene literature sa 130 bibliografskih jedinica.

U **prvom poglavlju** koje ima uvodni karakter dat je predmet istraživanja doktorske disertacije i sadašnje stanje problema energetske efikasnosti konvencionalnih termoelektrana, a vezano za sistem rashladne vode kondenzatora postrojenja. Takođe, dat je cilj istraživanja kao i organizacija doktorske disertacije.

U **drugom poglavlju** razmatrane su teorijske osnove procesa kondenzacije vodene pare na horizontalnim cevima. Kako se kod savremenih kondenzatora za kondenzaciju vodene pare najčešće javlja filmska kondenzacija, u ovom poglavlju je data pregled osnovnih teorija filmske kondenzacije, sa posebnim osvrtom na opravdanost uvođenja pojedinih uprošćenja kao što su zanemarivanje konvektivnog prenosa toplote i sila inercije u sloju kondenzata, zavisnost termofizičkih svojstava kondenzata od temperature kao i uticaj pseudolaminarnog strujanja kondenzata. Takođe je razmatran i proces kondenzacije vodene pare na horizontalnom snopu cevi i u prisustvu nekondenzujućih gasova, budući da su ovi fenomeni upravo neophodni za proračun i simulaciju rada velikih kondenzatora realnih parnih termoenergetskih postrojenja.

U **trećem poglavlju** razmatrani su pojedini elementi kondenzacionog postrojenja konvencionalne kondenzacione termoelektrane. Najpre je pažnja posvećena konstrukciji i izvođenju kondenzatora kao osnovnog elementa kondenzacionog postrojenja. Takođe su opisani različiti tipovi sistema rashladne vode kondenzatora: sistem protočnog hlađenja i sistemi povratnog hlađenja sa veštačkim rashladnim jezerima i različitim tipovima rashladnih tornjeva. Dat je opis i kondenzatnih pumpi kao elementa kondenzacionog postrojenja i različitih tipova sistema za odsisavanje nekondenzujućih gasova iz kondenzatora. Na kraju ovog poglavlja dat je sveobuhvatan pregled primenjenih sistema hlađenja u savremenom svetu.

U **četvrtom poglavlju** detaljnije je obrađen povratni sistem hlađenja termoenergetskih postrojenja sa vlažnim rashladnim tornjevima. Data je podela vlažnih rashladnih tornjeva i osnovne karakteristike rada tornjeva primenjivanih na parnim blokovima velike snage, i to vlažnih rashladnih tornjeva sa prirodnom i sa prinudnom promajom. Opisani su i prikazani osnovni elementi vlažnih rashladnih tornjeva. Kako se kod vlažnih rashladnih tornjeva primenjuju i filmska i kapljičasta ispuna, dat je sažet pregled osnovnih karakteristika prenosa toplote i materije za oba tipa ispuna. Proračun količine predate toplote i isparene tečnosti, kao i proračun rashladnih tornjeva po Merkelovoj grafoanalitičkoj metodi je prikazan u nastavku ovog poglavlja, kao i preoračun otpora vazduha u tornju i prikaz i definicija širine i visine zone hlađenja vode u vlažnom rashladnom tornju.

Kako svi prethodno razmatrani elementi značajno utiču na energetska efikasnost rada kondenzacione termoelektrane, u **petom poglavlju** razmatrano je ponašanje pojedinih komponenti termoenergetskog postrojenja pri promenljivim uslovima rada. Posebna pažnja je posvećena stepenu korisnosti postrojenja kao pokazatelja njegove energetske efikasnosti. U tom smislu objašnjen je uticaj osnovnih termodinamičkih parametara ciklusa na ekonomičnost rada termoenergetskih postrojenja, i to uticaj početnih i krajnjih parametara, kao

i uticaj uslova rada kondenzatora. Na kraju ovog poglavlja je dat opis i definicija vodenog bilansa postrojenja, kao i ekološke norme i standardi za očuvanje temperaturnog režima reka i jezera u slučaju korišćenja protočnog sistema hlađenja.

U **šestom poglavlju** razmatrana je energetska efikasnost parnog bloka sa protočnim sistemom hlađenja u letnjem i zimskom režimu rada. Izabrano referentno postrojenje TE "Kostolac B" je detaljno opisano, sa svim tehničkim i pogonskim podacima neophodnim za proračun, simulaciju i analizu rada postrojenja. Takođe su detaljno obrađeni i opisani meteorološki i hidrološki uslovi područja u kome je navedeno referentno postrojenje izgrađeno, ali je urađena i šira analiza hidroloških podataka, kako bi kasnija analiza dobijenih rezultata bila primenljiva i za ostala postrojenja u našem regionu. Ovi podaci su dalje korišćeni u proračunu. Urađen je matematički model referentnog postrojenja na osnovu bilansnih jednačina, sa posebnim osvrtom na model prenosa toplote u kondenzatoru, pri čemu je korišćena Bermanova metoda za određivanje koeficijenta prolaza toplote u kondenzatoru. Za proračun veličina stanja vodene pare korišćen je IAPWS-IF97 metod, čiji je sažet prikaz dat u radu, sa smernicama ka korišćenim referencama za detaljne definicije pojedinih veličina. Takođe su objašnjena sva ograničenja koja su uvedena u procesu simulacije rada postrojenja pri promenljivim uslovima. Ova ograničenja su uvedena kako bi se što jasnije prikazao uticaj pojedinih uticajnih veličina na ponašanje celog sistema. Na osnovu matematičkog modela urađen je softver za simulaciju rada postrojenja u VBA programskom jeziku, na Microsoft Excel programskoj platformi i u ovom poglavlju je dat sažet opis softvera i njegovog načina rada. U nastavku su prikazani i detaljno analizirani rezultati dobijeni simulacijom. S obzirom na temu disertacije, puna pažnja je posvećena hladnom kraju postrojenja i njegovom uticaju na snagu, specifičnu potrošnju toplote i stepen korisnosti postrojenja. Najpre je razmatran uticaj temperature i protoka rashladne vode kondenzatora na intenzitet prenosa toplote u kondenzatoru referentnog postrojenja, koeficijent prolaza toplote, pritisak kondenzacije, toplotni kapacitet i parno opterećenje kondenzatora. Takođe su date zavisnosti snage i specifične potrošnje toplote od pritiska kondenzacije, protoka i temperature rashladne vode. Konačno, data je zavisnost stepena korisnosti postrojenja od temperature rashladne vode, kao i zavisnost temperature vode na izlazu iz kondenzatora u zavisnosti od temperature rashladne vode na ulazu u kondenzator.

U **sedmom poglavlju** razmatrana je energetska efikasnost parnog bloka sa povratnim sistemom hlađenja sa vlažnim rashladnim tornjevima u zavisnosti od parametara atmosferskog vazduha u letnjem i zimskom režimu rada. Kao referentno postrojenje izabran je blok A5 TE "Kolubara A" snage 110 MW, i dat je detaljan opis postrojenja sa svim neophodnim tehničkim i pogonskim parametrima, pri čemu je posebna pažnja posvećena rashladnom sistemu sa vlažnim rashladnim tornjevima sa prinudnom promajom koje ovo postrojenje koristi za hlađenje. Klimatski parametri područja u kome se postrojenje nalazi su sistematizovani, obrađeni i predstavljeni u radu. Urađen je matematički model i ovog referentnog postrojenja, sa posebno posvećenom pažnjom matematičkom modelu prenosa toplote i mase u rashladnim tornjevima, uključujući model proračuna parametara atmosferskog vazduha i koeficijenta razmene mase. Korišćen je grafoanalitički metod proračuna razmene toplote i materije, pri čemu je za proračun entalpije zasićenog vazduha korišćena parabolična zavisnost entalpije od temperature, a koeficijente je autor odredila tako da se dobije minimalno odstupanje ovako dobijene vrednosti od vrednosti dobijene iz

psihrometrijskog dijagrama odnosno proračunom koji uzima u obzir i temperaturu, relativnu vlažnost i parcijalni pritisak pare. Na osnovu matematičkog modela urađen je softver za simulaciju rada ovog referentnog postrojenja, takođe u VBA programskom jeziku i na Microoft Excel programskoj platformi. Dat je detaljan prikaz i analiza dobijenih rezultata. Najpre je razmatran uticaj temperature i relativne vlažnosti atmosferskog vazduha na širinu zone hlađenja u rashladnim tornjevima referentnog postrojenja, i dobijena je zavisnost temperature ohlađene vode od ovih parametara. Da bi se realno prikazao uticaj promene parametara atmosferskog vazduha na širinu zone hlađenja, obrađeni su i uključeni u proračun meteorološki podaci sa automatske meteorološke merne stanice "Kolubara A" za slučajno izabran letnji i slučajno izabran prolećni dan. Na osnovu ovih podataka dobijena je dnevna promena temperature ohlađene vode u rashladnom tornju referentnog postrojenja. Takođe je razmatran i uticaj hidrauličkog opterećenja ispušne na širinu zone hlađenja vode, pa je dobijena promena temperature ohlađene vode u zavisnosti od parametara atmosferskog vazduha i za različito hidrauličko opterećenje za slučajno izabran letnji dan. Na osnovu promene temperature ohlađene vode, odnosno temperature rashladne vode kondenzatora, dobijena je zavisnost koeficijenta prolaza toplote u kondenzatoru referentnog postrojenja, kao i karakteristika kondenzatora. Zatim je dobijena zavisnost temperature vode na ulazu i izlazu iz kondenzatora za svaki sat izabranog letnjeg dana tj. za izmerene parametre atmosferskog vazduha. Na osnovu ovih podataka dobijena je dnevna promena pritiska kondenzacije za prosečan letnji dan usled promene parametara atmosferskog vazduha. Takođe je izvršena sistematizacija meteoroloških podataka na godišnjem nivou i dobijena godišnja promena temperature vode ohlađene u rashladnom tornju i pritiska kondenzacije u kondenzatoru referentnog postrojenja. Zatim su date zavisnosti toplotnog kapaciteta i parnog opterećenja kondenzatora u zavisnosti od pritiska kondenzacije i temperature rashladne vode, kao i promena snage i specifične toplote usled promene temperature rashladne vode i protoka pare kroz kondenzator. Na osnovu meteoroloških podataka dobijena je i dnevna promena specifične potrošnje toplote postrojenja. Na kraju ovog poglavlja prikazana je i analizirana dnevna promena stepena korisnosti bloka A5 TE "Kolubara A" usled promene parametara atmosferskog vazduha za jedan prosečan letnji dan.

Verifikacija primenjenog modela i dobijenih rezultata prikazana je u *osmom poglavlju* disertacije. Budući da je u radu razmatrano više kombinacija uticajnih parametara, dodatno je izveden proračun karakteristike kondenzatora koji daje zavisnost toplotnog kapaciteta kondenzatora i pritiska kondenzacije, za različite vrednosti protoka i temperature rashladne vode. Kako se problem razmatran u ovom radu odnosi na sve elektrane, u proračun je uključen i kondenzator termoelektrane „Nikola Tesla B” sa izvršenim izmenama dimenzija i uslova rada ovog kondenzatora, i dobijeni rezultati su upoređeni sa karakteristikom dobijenom od proizvođača i sa rezultatima drugih autora. Kako su sve provere pokazale izuzetno slaganje sa pogonskim merenjima i rezultatima drugih autora za različite termoelektrane, može se smatrati da je ovakav proračun tačan i primenljiv uz izvesne modifikacije za svako termoenergetsko parno postrojenje. Rezultati zapremisnog koeficijenta prelaza mase u rashladnim tornjevima i temperature ohlađene vode upoređeni su sa podacima dobijenim iz literature, i evidentno je da je dobijena ista tendencija promene ovih veličina. Dodatno, iz literature su za eksperimentalni rashladni toranj preuzete i unete u proračun izmerene vrednosti temperature i relativne vlažnosti

atmosferskog vazduha, protoka vode i vazduha, temperature vode na ulazu u eksperimentalni rashladni toranj, takođe sa unešenim specifičnim geometrijskim veličinama eksperimentalnog tornja. Vrednosti temperature ohlađene vode dobijene numeričkom simulacijom upoređene su sa izmerenim vrednostima, i ustanovljeno je da su odtupanja zanemarljivo mala, te da je metod i način proračuna, kao i softver za automatizaciju proračuna tačan i primenljiv za sve rashladne tornjeve, sa odgovarajućom modifikacijom vezanom za geometriju tornja i karakteristiku ispune.

U *devetom poglavlju* je dato završno razmatranje napred izloženih rezultata, sa posebnim obraćanjem pažnje i na konkretne probleme u eksploataciji za oba referentna postrojenja i mogućnost i načine njihovog prevazilaženja, ali i globalno razmatranje problema uticaja parametara atmosferskog vazduha za protočno i povratno hlađene parne blokove. Takođe je dato poređenje stepena korisnosti kao pokazatelja energetske efikasnosti protočno i povratno hlađenog parnog bloka na godišnjem nivou.

U *zaključku* ove disertacije, jasno i sažeto je izložena problematika kojom se disertacija bavi, mogućnosti za povećanje energetske efikasnosti termoenergetskih parnih postrojenja, kako pri projektovanju, tako i u eksploataciji istih, a takođe su dati i jasno definisani pravci daljeg istraživanja u ovoj oblasti.

ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu pregleda doktorskog rada i analize ostvarenih rezultata, članovi Komisije konstatuju sledeće:

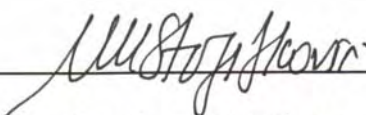
- ❖ Podneti rad u potpunosti odgovara temi prihvaćenoj od strane Naučno-nastavnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu,
- ❖ Kandidat je ovladao potrebnim znanjima za istraživanje energetske efikasnosti termoenergetskih postrojenja, što ga verifikuje u kompetentnog istraživača u ovoj oblasti,
- ❖ Kandidat je ispoljio potrebnu samostalnost i inventivnost u naučno istraživačkom radu,
- ❖ Kandidat je došao do rezultata koji predstavljaju doprinos dosadašnjim istraživanjima energetske efikasnosti termoenergetskih postrojenja. Izvršena je sveobuhvatna analiza ponašanja postrojenja sa protočnim i povratnim sistemima hlađenja pri različitim parametrima atmosferskog vazduha.
- ❖ Originalni rezultati doktorske disertacije su verifikovani i kroz publikovanje radova u časopisima iz uže naučne oblasti kojoj pripada predložena tema doktorske disertacije,
- ❖ Rad je tehnički korektno i kvalitetno urađen

Na osnovu svega napred izloženog, Komisija je mišljenja da rad kandidata predstavlja u celini originalan i značajan doprinos u izučavanju problematike energetske efikasnosti termoenergetskih postrojenja. Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Mašinskog fakulteta u Nišu da se rad kandidata **mr Mirjane Laković** dipl.maš.inž. pod nazivom

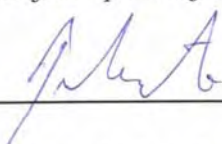
„ENERGETSKA EFIKASNOST POVRATNO I PROTOČNO HLAĐENOG PARNOG BLOKA U ZAVISNOSTI OD PARAMETARA ATMOSFERSKOG VAZDUHA“

prihvati kao doktorska disertacija i kandidat pozove na usmenu javnu odbranu.

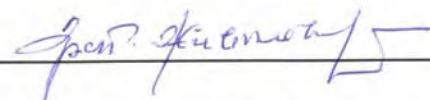
ČLANOVI KOMISIJE :



dr Mladen Stojiljković, red. prof. Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast - Teorijski i primenjeni procesi prenosa toplote i materije)



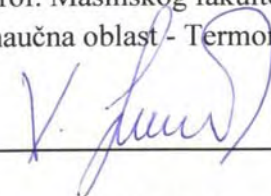
dr Dušan Golubović, red. prof. Mašinskog fakulteta Univerziteta u Istočnom Sarajevu
(uža naučna oblast - Hidrotermika i termoenergetika)



dr Dragoljub Živković, red. prof. Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast - Teorijski i primenjeni procesi prenosa toplote i materije)



dr Miloš Banjac, van. prof. Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
(uža naučna oblast - Termomehanika)



dr Velimir Stefanović, van. prof. Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast - Teorijski i primenjeni procesi prenosa toplote i materije)

U Nišu, Istočnom Sarajevu i Beogradu, 2010. god.

Prilog 1. Osnovni biografski podaci kandidata

Mr Mirjana Laković, rođena je 30.07.1975. god. u Nišu, Srbija. Sada živi u Nišu.

Mr Mirjana Laković završila je osnovnu školu "Učitelj Tasa" u Nišu, a gimnaziju "Bora Stanković", takođe u Nišu. Odmah po završetku srednje škole upisuje se na Mašinski fakultet u Nišu – smer termoeenergetika, na kome je diplomirala 2000. godine sa ocenom 10. Prosečna ocena u toku studija bila je 9,68. Poslediplomske studije upisala je na Mašinskom fakultetu – smer Termoeenergetika u Nišu školske 1999/2000. godine. Magistarski rad pod nazivom «*Uticao uslova rada hladnog kraja na energetska efikasnost parnog mono bloka*» odbranila je u septembru 2005. godine, pod mentorstvom profesora Dragoljuba Živkovića.

Za asistenta pripravnika na Mašinskom fakultetu u Nišu izabrana je 2000. godine. Kao asistent i asistent-pripravnik izvodila je vežbe iz sledećih predmeta: Termodinamika, Toplotna postrojenja, Pogonski materijali, Grejanje i toplifikacija, Osnovi grejne tehnike, Osnovi gasne tehnike, Primenjena termodinamika i mehanika fluida, Snabdevanje toplotom i gasom.

Objavila je (kao autor ili koautor) oko trideset naučno-stručnih radova, učestvovala je u realizaciji više naučno-istraživačkih i stručnih projekata koji su realizovani na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu.

Prilog 2. Objavljeni naučni radovi u vezi sa doktorskom disertacijom kandidata

1. **Lakovic M.**, Mitrovic D., Stojiljkovic M., " COAL-FIRED POWER PLANT POWER OUTPUT VARIATION DUE TO LOCAL WEATHER CONDITIONS", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, accepted 21.05.2010., manuscript ID UESO-2010-0173, <http://mc.manuscriptcentral.com/ueso#refX>
2. D. Mitrović, D. Živković, S. Laković, **M. Laković**: ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A 348.5 MW STEAM POWER PLANT, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 32: 11,2010, pp. 1016 - 1027, DOI: 10.1080/15567030903097012
3. **Mirjana S. Laković**, Mladen S. Stojiljković, Slobodan V. Laković, Velimir Stefanovic, Dejan Mitrovic, COLD END OPERATING CONDITIONS IMPACT ON THE STEAM POWER PLANT ENERGY EFFICIENCY, THERMAL SCIENCE, prihvaćen za štampu 2010
4. Laković S., **Laković M.**, Stefanović V., Stojiljković M., "RACIONALNOST IZBORA RADNIH PARAMETARA I OPREME ZA POVRATNO HLAĐENJE PARNOG BLOKA", Termotehnika 14 S.T., (prihvaćeno za štampu).
5. **Laković M.**, Laković S., Stojiljković M., Stefanović V., Živković P., Živković D., "DNEVNA PROMENA PRITISKA U KONDENZATORU POVRATNO

HLADENOG PARNOG BLOKA ZA PROSEČAN LETNJI DAN", Termotehnika 14. S.T. (prihvaćeno za štampu).

6. **M. Laković**, S. Laković, V. Stefanović, M. Stojiljković, P. Živković, D. Živković, "CONDENSING PRESSURE DAILY VARIATION IN THE STEAM POWER PLANT WITH CLOSED CYCLE COOLING SYSTEM DURING SUMMER DAY", Proceedings, 14th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, 2009., pp. 269-277
7. Slobodan Laković, **Mirjana Laković**, Mladen Stojiljković, Velimir Stefanović, RATIONALITY OF CHOICE OF WORKING PARAMETERS AND EQUIPMENT FOR POWER PLANT CLOSE-CYCLE COOLING, 14th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, 2009., pp. 261-268
8. S. Laković, **M. Laković**, PERSPECTIVE OF PANEL-TYPE COOLING TOWER IN THERMAL POWER COOLING, Power Plants 2008, Vrnjačka banja, Symposium proceedings, CD, Book of abstracts pp. 46-47
9. **M. Laković**, S. Laković, P. Živković. EFFECTS OF GLOBAL WARMING ON THERMAL POWER PLANT PERFORMANCES, Power Plants 2008, Vrnjačka banja, dings, CD, Book of apstracts pp. 90-91,
10. Laković S., **Laković M.**, "POSSIBILITIES FOR IMPROVING THE LARGE STEAM CONDENSER PERFORMANCES ", Simpozijum Elektrane 2006, Vrnjačka banja, Srbija, 19-22. septembar 2006., ceo rad na CD-u, Zbornik apstrakata str. 38
11. **Lakovic M.**, "IMPACT OF THE CONDENSER OPERATING CONDITIONS ON THE STEAM MONO BLOCK ENERGY EFFICIENCY", 17th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2006, August 2006, Praha, Czech Republic, paper on CD, Summaries Vol. 4, pp. 988-989
12. Velimir Stefanović, **Mirjana Laković**, Slobodan Laković, Dragoljub Živković, POWER PLANT KOLUBARA A A5 110 MW COOLING TOWER PARAMETERS ANALYSIS USING IRASTOR 1-D NUMERICAL MODEL, 14th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, 2009., pp. 740-749