

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

487/5
(Број захтева)19.06.2025.
(Датум)Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

УТИЦАЈ ПРИСУСТВА УЉА НА ПЕРФОРМАНСЕ ЈЕДНОСТЕПЕНИХ СО2 РАСХЛАДНИХ СИСТЕМА

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ: Машинство (ужа научна област: Термотехника)

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата: ВЛАДИМИР (САША) ЧЕРНИЦИН
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2018.
4. Година уписа на докторске студије: 2018.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Урош Милованчевић

Звање: ванредни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Milovančević U., Genić S., Jaćimović B., Otović M.: Wet cooling of air on plate finned tube heat exchangers, International Journal of Refrigeration, Vol. 165, 2024, pp. 133-144. Elsevier, ISSN: 0140-7007, M21, IF5 2023: 3.6, 10.1016/j.ijrefrig.2024.05.004.
2. Mihailović M., Milovančević U., Genić S., Jaćimović B., Otović M., Kolendić P.: Air side heat transfer coefficient in plate finned tube heat exchangers, Experimental Heat Transfer, Vol. 33(4), 2020, pp. 388-399. Taylor & Francis Inc, Philadelphia, ISSN: 0891-6152, M21, IF5 2020: 2.963, 10.1080/08916152.2019.1656298.
3. Marković S., Jaćimović B., Genić S., Mihailović M., Milovančević U., Otović M.: Air side pressure drop in plate finned tube heat exchangers, International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid, Vol. 99, 2019, pp. 24-36. Elsevier Sci Ltd, Oxford, ISSN: 0140-7007, M21, IF5 2019: 3.655, 10.1016/j.ijrefrig.2018.11.038.
4. Milovančević U., Jaćimović B., Genić S., El-Sagier F., Otović M., Stevanović S. Thermoeconomic analysis of spiral heat exchanger with constant wall temperature, Thermal Science, Vol. 23(1), 2019, pp. 401-410. Univerzitet u Beogradu - Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, ISSN: 0354-9836, M22, IF5 2019: 1.475, 10.2298/TSCI170605150M.
5. Otović M., Mihailović M., Genić S., Jaćimović B., Milovančević U., Marković S.: Reconsideration of data and correlations for plate finned-tube heat exchangers, Heat and Mass Transfer, Vol. 54(10), 2018, pp. 2987-2994. Springer, New York, ISSN: 0947-7411, M22, IF5 2018: 1.604, 10.1007/s00231-018-2328-0.
6. Genić S., Jaćimović B., Milovančević U., Ivošević M., Otović M., Antić M.: Thermal performances of a "black box" heat exchanger in district heating system, Heat and Mass Transfer, Vol. 54(3), 2018, pp. 867-873. Springer, New York, ISSN: 0947-7411, M22, IF5 2018: 1.604, 10.1007/s00231-017-2182-5.
7. Stevanović S., Petrović T., Marković D., Milovančević U., Stevanović S., Urošević T., Kozarski M.: Changes of quality and free radical scavenging activity of strawberry and raspberry frozen under different conditions, Journal of Food Processing and Preservation. Wiley, Hoboken, Vol. 46, 2022, ISSN: 0145-8892, M23, IF5 2022: 2.6, 10.1111/jfpp.15981.
8. Milovančević U., Kosi F.: Performance analysis of system heat pump - heat recuperator used for air treatment in process industry, Thermal Science, Vol. 20(4), 2016, pp. 1345-1354. Univerzitet u Beogradu - Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, ISSN: 0354-9836, M23, IF5 2016: 1.148, 10.2298/TSCI160225132M.

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 19.06.2025. године размотрило предложеног закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за размену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена:

Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 487/5
Датум: 19.06.2025. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 19.06.2025. године донело је:

О Д Л У К У

о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **Владимира Черницина**, маг. инж. маш. под насловом **„Утицај присуства уља на перформансе једностепених CO₂ расхладних система“**.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Маја Тодоровић, ред. проф., др Горан Ступар, ванр. проф., др Александра Сретеновић Добрић, ванр. проф., др Милена Отовић, доц. и др Мирослав Кљајић, ред. проф., ФТН Нови Сад.

За ментора докторске дисертације именује се др Урош Милованчевић, ванр. проф.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о научној заснованости теме докторске дисертације кандидата Владимира С. Черницина, маг. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Универзитета у Београду - Машинског факултета бр. 487/3 од 15.05.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под називом „Утицај уља на перформансе једностепених CO₂ расхладних система” кандидата Владимира С. Черницина, маг. инж. маш.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Владимир С. Чернин је рођен 22.11.1993. године у Панчеву. Завршио је основну школу „Бранко Радичевић” и гимназију „Урош Предић”, у којој је матурирао 2012. године. Основно и средње образовање завршио је са одличним успехом у свим школским годинама. Носилац је дипломе „Вук Караџић” након завршетка гимназије.

Уписао је Машински факултет у Београду школске 2012/2013. године. Основне академске студије је завршио у септембру 2015. године. Завршни (B.Sc) рад је радио из предмета Увод у енергетику, под називом „Одређивање оптималног пречника магистралног топловода” и добио оцену 10. Основне академске студије је завршио са просечном оценом 8,83 стекавши академски степен Инжењер машинства.

Мастер академске студије је уписао школске 2015/2016. године, такође на Машинском факултету у Београду, модул Термотехника. На Мастер академским студијама је дипломирао 31. марта 2018. године, са просечном оценом 9,40. Мастер рад (M.Sc) је одбрањен са оценом 10 на тему „Енергетска анализа објекта сигурне куће и унапређење уз примену топлотне пумпе” стекавши академски степен Мастер инжењер машинства. Рад је представљен, као један од најбољих у својој генерацији, на 49. међународном конгресу и изложби о КГХ у оквиру студентске сесије.

Током студирања кандидат је стекао и практична искуства обављајући стручне праксе у неколико домаћих фирми и пројектантских бироа. Такође, био је учесник

међународног ASHRAE (енг. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) студентског такмичења.

Пре завршетка Мастер академских студија (од 01.06.2017. године) запослио се у фирми „Bexel Consulting” у којој је провео годину и по дана. За то време радио је на пословима пројектовања термотехничких инсталација и консалтинга, а такође се обучио и за рад у неколико програмских пакета.

Докторске академске студије на Машинском факултету у Београду кандидат уписује школске 2018/2019. године. Тренутно је редован студент треће године Докторских студија.

Од 01.12.2018. запослен је на Машинском факултету као истраживач приправник на реализацији пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја, „Интелигентни системи управљања климатизације у циљу постизања енергетски ефикасних режима у сложеним условима експлоатације” – ТР 33047. У звање асистента на Катедри за термотехнику изабран је 09.10.2020. године. Од јесењег семестра 2018. године, па све до данас, био је задужен за одржавање аудиторних и лабораторијских вежби на Катедри за термотехнику у оквиру Кабинета за расхладну технику и топлотне пумпе, на следећим предметима: Цевни водови и Основе технике хлађења на трећој години ОАС, Хлађење у прехранбеним технологијама (ПРМ и ИБС), Компоненте расхладних уређаја, Расхладна постројења и Цевни водови на првој години МАС и Топлотне пумпе на другој години МАС. У току досадашњег рада био је у Комисији за преглед и одбрану 39 мастер радова на Катедри за термотехнику.

Током досадашњег рада на Машинском факултету у звању асистента на Катедри за термотехнику у склопу сарадње Машинског факултета са привредом учествовао је на изради следећих пројеката:

- Елаборат о процени вредности расхладне опреме по спецификацији у хладњачи „Тамишка Д.О.О” у Панчеву, ев. број 07.08-463/1/17032023, 2023;
- Стручни надзор над извођењем радова на уградњи и повезивању компресорска SAV 355 L на постојећу амонијачну расхладну инсталацију у Индустрији смрзнуте хране Фриком Д.О.О, датум понуде 31.08.2023;
- Идејни пројекат (ИДП) - Машински пројекат експесне вентилације у Погону сладоледа у индустрији смрзнуте хране Фриком Д.О.О, у Београду, ИДП 117/24/6.2.1, 2024;
- Идејни пројекат (ИДП) - Машински пројекат експесне вентилације у Компресорској станици у индустрији смрзнуте хране Фриком Д.О.О, у Београду, ИДП 118/24/6.2.2, 2024;
- Стручно мишљење у вези са појавом кондензације у изолационој конструкцији у хладњачи „Росо Лосо” у Панчеву, Извештај 119/24/1.1, 2024;
- Идејни пројекат (ИДП) - Машински пројекат повезивања фризера CF1000 и CF2000 са постојећом амонијачном расхладном инсталацијом у Погону сладоледа у индустрији смрзнуте хране Фриком Д.О.О, у Београду, ИДП 120/24/6.2.1, 2024;
- Пројекат за грађевинску дозволу (ПГД) - Машински пројекат климатизације и вентилације Сервисно-пословног објекта Vladex D.O.O у Шимановцима ПГД 121/25/6, 2025;

- Стручно мишљење о техничком решењу предвиђеном у Пројекту за грађевинску дозволу (ПГД) пројекта амонијачних расхладних инсталација производно-складишног објекта Мара Д.О.О у Сомбору, број 07-05 122/25.

Кандидат успешно примењује следеће програмске језике и софтверске пакете: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), MATLAB, Python, Revit, Mathcad, SolidWorks, AutoCAD 2D и Navisworks. Одлично се служи енглеским језиком. Поседује основна знања из руског и немачког. Поседује возачку дозволу Б категорије. Члан је Друштва за КГХ (климатизација, грејање и хлађење) и IIR (International Institute of Refrigeration).

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

На Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета Владимир С. Черницин је положио следеће испите: Виши курс математике (оцена 10), Нумеричке методе (оцена 10), ОМНИР и комуникација (оцена 10), Одабрана поглавља из термодинамике (оцена 10), Истраживање и публикување 1 (оцена 10), Одабрана поглавља из механике флуида (оцена 10), Виши курс из процесних феномена (оцена 10), Термодинамичка анализа процеса и уређаја (оцена 10), Истраживање и публикување 2 (оцена 10), Моделирање и оптимизација расхладних система (оцена 10), Виши курс из топлотних операција и апарата (оцена 10), Истраживање и публикување 3 (оцена 10), Истраживање и публикување 4 (оцена 10) и Пројекат идеје докторске дисертације (оцена 10). Просечна оцена на докторским академским студијама кандидата је 10,00 уз остварених 120 ЕСПБ бодова.

У периоду од априла до октобра 2021. године кандидат је боравио и стручно се усавршавао на једном реномираном Универзитету у Америци (The Grainger College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign) под менторством уваженог професора др Предрага Хрњака. У оквиру овог шестомесечног усавршавања кандидат је стекао практична искуства у раду са једностепеним CO₂ расхладним системима и топлотним пумпама, која ће му помоћи у реализацији докторске дисертације, као и у даљем раду. Такође, у оквиру матичне Лабораторије за термотехнику на Машинском факултету кандидат се кроз лабораторијски рад са студентима и експериментални рад на неким од постојећих система оспособио за предстојећа експериментална испитивања на будућој предметној инсталацији. Иако коначна форма предметне инсталације још није реализована, у њеној иницијалној изведби кандидат је спровео нека почетна мерења која су му помогла у бољем разумевању самог система.

Кандидат је аутор и коаутор 20 научних радова, од којих су: 1 категорије M21a (рад у врхунском међународном часопису), 17 категорије M33 (саопштење са међународног скупа штампано у целини), 1 категорије M34 (саопштење са међународног скупа штампано у изводу) и 1 категорије M53 (рад у националном часопису).

Рад у врхунском међународном часопису (M21a)

1. Zhang W., Li W., **Cernicin V.**, Hrnjak P.: *Theoretical and experimental investigation on the effects of internal heat exchangers on a reversible automobile R744 air-conditioning system under various operating conditions*, Applied Thermal Engineering, Vol. 236, Part B, 2024, Art. No. 121569, pp. 1-12, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121569

1. Ivanović M., **Černicin V.**, Milovančević U., Otović M., Sretenović Dobrić A., Stevanović S.: *Investigation of key parameters for optimizing high pressure in a single-stage transcritical CO₂ system*, Proceedings of the 55th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2024, pp. 165-174, ISBN 978-86-85535-19-2
2. Otović M., Milovančević U., **Černicin V.**, Genić S., Radevski M.: *The valuation of refrigeration equipment in one ammonia cold storage in Serbia*, Proceedings of the 54th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2024, pp. 121-126, ISBN 978-86-85535-17-8
3. **Černicin V.**, Milovančević U., Otović M., Zhang W.: *The difference between simplified theoretical and experimental cycle analysis of CO₂ heat pump*, Proceedings of the 10th IIR Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, North Macedonia, 2023, pp. 230-237, ISBN 978-2-36215-054-8
4. **Černicin V.**, Zhang W.: *The effect of internal heat exchanger in a reversible CO₂ system under various operating conditions*, Proceedings of the 53rd International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 95-106, ISBN 978-86-85535-14-7
5. **Černicin V.**, Milovančević U., Gojak M., Otović M., Sretenović Dobrić A.: *Theoretical determination of the optimum pressure of the transcritical CO₂ systems in supermarket*, Proceedings of the 53rd International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 121-130, ISBN 978-86-85535-14-7
6. Tamindžić J., Tucović M., Sretenović Dobrić A., Milovančević U., **Černicin V.**: *Analysis of energy consumption of a residential building using hourly simulations*, Proceedings of the 53rd International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 19-32, ISBN 978-86-85535-14-7
7. Mandić A., Milovančević U., Beljanski V., Otović M., **Černicin V.**: *Effects of purging non-condensable gases from ammonia refrigeration system*, Proceedings of the 53rd International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2023, pp. 107-119, ISBN 978-86-85535-14-7
8. Paunić M., **Černicin V.**: *Virtual model generation of representative volume element for unidirectional composite*, Proceedings of the 8th International conference on Industrial engineering - SIE 2022, Belgrade 2022, pp. 338-341. ISBN 978-86-6060-131-7
9. Paunić M., **Černicin V.**: *Application of finite element method for analysis the parameters of fracture mechanics*, Proceedings of the 8th International conference on Industrial engineering - SIE 2022, Belgrade 2022, pp. 263-266, ISBN 978-86-6060-131-7
10. Zhang W., **Cernicin V.**, Hrnjak P.: *The role of internal heat exchanger in an R744 vapor compression system in the Air-conditioning mode under various conditions*, 19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, US, 2022, Art. No. 2151, pp. 1-11.
11. **Cernicin V.**, Zhang W., Hrnjak P.: *The role of internal heat exchanger in an R744 vapor compression system in the Heat pump mode under various conditions*, 19th

- International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, US, 2022, Art. No. 2153, pp. 1-10.
12. Malić Lj., Paunović A., Milovančević U., Otović M., **Černicin V.**, Sretenović A.: *Air-to-water heat pump operation analysis*, Proceedings of the 51st International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2020, pp. 31-35, ISBN 978-86-85535-07-9
 13. Otović M., Milovančević U., Genić S., Mitrović N., **Černicin V.**, Otović S., Antić M.: *Testing of the influence of the spray cooling system on the air cooler efficiency*, Proceedings of the 51st International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2020, pp. 11-16, ISBN 978-86-85535-07-9
 14. Otović M., Genić S., Milovančević U., **Černicin V.**, Otović S., Stevanović S.: *Testing of air heaters with plate finned tubes with spray cooling*, Proceedings of the 50th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2020, pp. 163-170, ISBN 978-86-81505-99-1
 15. Ninković D., Milovančević U., Otović M., **Černicin V.**: *Comparative analysis of electric energy consumption of cascade system R134a/CO₂ with single stage R404A and two-stage CO₂ installation*, Proceedings of the 50th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2020, pp. 287-293, ISBN 978-86-81505-99-1
 16. Paunić M., Jovanović M., **Černicin V.**: *Optimal characteristics of a self-expanding nitinol stent under the action of arterial forces*, Proceedings of Third International Student Scientific Conference - Multidisciplinary Approach to Contemporary Research, Belgrade, Serbia, 2019, pp. 90-99, ISBN: 978-86-6179-071-3
 17. **Černicin V.**, Milovančević U.: *Energy analysis of „Safe house” building and energy improvement by heat pump implementation*, Proceedings of the 49th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2018, pp. 229-233, ISBN 978-86-81505-93-9

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34)

1. Genić S., Stamenić M., Stanković V., Otović M., Milovančević U., **Černicin V.**, Otović S.: *Service life of equipment in process, energy, and termotechnical plants*, Book of abstracts of the 55th International HVAC&R Congress and Exhibition, Belgrade, Serbia, 2024, pp. 38, ISBN 978-86-85535--20-8

Рад у националном часопису (M53)

1. Ivanović M., **Černicin V.**, Milovančević U., Otović M., Stevanović S.: *Uporedna analiza tri generacije natkritičnih CO₂ sistema*, Časopis KGH, Vol. 51, No. 4, 2022, pp. 47-50, ISSN 0350-1426, e-ISSN 2560-340X

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија сматра да је кандидат **Владимир С. Черницин** испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације и да је способан за самостални рад на предложеној теми. Поред одслушаних предавања, положених испита и одбрањеног Пројекта идеје докторске дисертације, у протеклом периоду кандидат је обављао различита експериментална истраживања, учествовао у реализацији стручних пројеката

и публикувао научне радове, што га квалификује за пријаву докторске дисертације „Утицај уља на перформансе једностепених CO₂ расхладних система”.

2. Предмет и циљ истраживања

Избор расхладног флуида представља полазну тачку у пројектовању расхладних система. Да би овај избор био адекватан, инжењер мора да буде упознат са транспортним и термодинамичким својствима жељеног флуида. Ипак, светски трендови у погледу смањења емисије гасова стаклене баште и утицаја на глобално загревање (кроз директни и индиректни утицај расхладног система), као и заштите озонског омотача све више сужавају тај избор [1]. Расхладни флуиди који у свом саставу садрже хлор или бром су већ одавно напуштени и забрањени због оштећивања озонског омотача, док су HFC (хидрофлуороугљеници), за које се планирало да представљају дуготрајно решење, сад на листи за смањење и/или избацивање [2]. Једну алтернативу представљају синтетички флуиди (HFO-хидрофлуороолефини, тј. незасићена HFC једињења) и смеше са малим утицајем на глобално загревање, док другу представљају „еколошки” безбедни, природни флуиди, као што су: вода, ваздух, угљоводоници, амонијак и угљен-диоксид.

Међу наведеним природним расхладним флуидима угљен-диоксид (CO₂, ознака према стандарду ISO 817 је R744) једини је незапаљив и нетоксичан флуид, који може да обавља левокретни циклус парно компресорског уређаја испод 0 °C [2]. Овај флуид је један од најстаријих расхладних флуида који се користе, примењиван доста крајем 19. и почетком 20. века. Због његових карактеристичних својстава (нпр. високи радни притисци, ниска критична тачка, итд.) тадашњи техничко-технолошки развој није могао да прати услове које су диктирали новодолазећи синтетички флуиди (фреони), па је угљен-диоксид убрзо замењен њима. Угљен-диоксид поново добија на популарности 90-тих година прошлог века буђењем „еколошке свести”, а инжењери, од тада до данас, покушавају да прикажу његов пун потенцијал кроз нова техничка решења којима би се побољшале перформансе оваквих система и смањила потрошња електричне енергије. Данас је његова примена све већа како код расхладних система и топлотних пумпи мање и средње снаге, тако и код великих индустријских постројења [1-4].

Коришћење CO₂ као расхладног флуида је понајвише присутно у комерцијалној расхладној техници, односно расхладним системима у супермаркетима [5, 6]. Овакви системи се обично срећу у следећим конфигурацијама: индиректни, каскадни, наткритични системи или као комбинација ових система [3]. Код индиректних расхладних система CO₂ се користи као секундарни расхладни флуид са променом фазе. Код каскадних расхладних система CO₂ се смешта у доњу каскаду, док се у горњој каскади могу наћи фреон R134a (или његове HFO алтернативе), али и пропан (R290). У пракси се најчешће срећу наткритични CO₂ системи због своје цене и рада са једним расхладним флуидом. Нажалост, показано је да основне конфигурације ових CO₂ система у климатским подручјима са високим температурама амбијенталног ваздуха троше више енергије од стандардних фреонских система [7, 8].

У стандардним супермаркетима уобичајено је да примењени расхладни системи испуњавају потребу за хлађењем на два температурска нивоа. Одржавање температуре смрзнутих производа у замрзивачима се одвија на нискотемпературском нивоу (енг. *LT* - *low-temperature*), док је средњетемпературски ниво (енг. *MT* - *medium-temperature*) присутан код расхладних комора и расхладних витрина. Из тог разлога се овакве расхладне инсталације уобичајено изводе као двостепене (енг. *booster*). Често, CO₂

расхладним системима се опслужује и систем климатизације оваквих објеката. Ипак, неретко постоји потреба за хлађењем само на једном од два температурска нивоа. У том случају користи се једноступена расхладна инсталација. Оваква инсталација се изводи у виду кондензационе јединице, где се већина компоненти агрегатира у релативно малом кућишту (захтеви за смештајем такве опреме су ограничавајући фактор код мањих објеката), док се испаривач заједно са експанзионим вентилом смешта у расхладну комору. Кондензациона јединица, поред основних компоненти, садржи сву потребну арматуру и аутоматику за контролисан рад и у поткритичном и у наткритичном подручју. За сабијање паре и обезбеђивање протока расхладног флуида углавном се користе компресори различитог типа. Кондензационе јединице, које су предвиђене за *MT* режим, обично обезбеђују хлађење ваздуха од $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Побољшање перформанси рада ових система, повећање коефицијента хлађења и/или смањење потрошње електричне енергије, неки су од кључних изазова који се данас налазе испред научне-инжењерске заједнице.

Поред разматрања својстава расхладног флуида, потребно је имати у виду да он није једина супстанција која циркулише кроз све компоненте система. У циљу подмазивања и заптивања компресора користе се различити типови уља. Компресор у току рада потискује с паром расхладног флуида и део уља, који се може вратити у компресор преко система за одвајање уља. Неминовно, један део уља ће наставити циркулацију с расхладним флуидом и доспети у друге компоненте. То је посебно заступљено код система мање снаге, где је процес издвајања уља једноставнији или пак не постоји. Растворљивост уља и расхладног флуида утиче на својства флуида и саме процесе размене топлоте. Код CO_2 система у употреби су синтетичка уља. Иако се полиалфаолефин (РАО) уља могу користити код поткритичних система, полиалкилен гликол (РАГ) и полиол естар (РОЕ) уља имају данас ширу примену због бољих својстава у наткритичном подручју [9].

Доступна литература обухвата велики број прегледних радова и истраживања која се тичу различитих конфигурација CO_2 расхладних система, њихових компоненти, као и феномена који се у њима одвијају. Ипак, многи математички модели и анализе се базирају на својствима чистог расхладног флуида, игноришући утицај уља на размену топлоте и саме перформансе система [10]. Да би се утицај уља уопште могао размотрити, за почетак је потребно установити количину уља која циркулише кроз инсталацију, а која се углавном представља преко масеног удела уља у смеси у форми *OCR* (енг. *Oil Circulation Ratio*) вредности [11-14]. Утицај уља се може представити и као обједињени утицај циркулације уља на целокупни систем, што је од посебне важности за тумачење рада расхладног система. Истраживања која узимају у обзир утицај уља углавном разматрају пренос топлоте при кључању на различите начине, док мањи број радова разматра утицај и на друге компоненте. Ипак, може се закључити да је ова област у највећем недостатку по броју одговарајућих термодинамичких модела и тумачења утицаја мешавине уља и расхладног флуида [15-17].

Предмет ове докторске дисертације је анализа утицаја уља на перформансе једноступеног CO_2 расхладног система. Овај систем је изведен у виду кондензационе јединице за потребе хлађења производа у расхладној комори на средњетемпературском нивоу (*MT* режим), што симулира рад једне типичне инсталације у супермаркету. Анализа утицаја уља би се заснивала прво на експерименталном испитивању при различитим реалним сценаријима рада, а затим на теоријском тумачењу уз развој

одговарајућег математичког модела и потом њиховим међусобним поређењем. Количина уља које циркулише би се мерила на одговарајућим местима на систему уз снимање/бележење и других параметара релевантних за рад система. На основу резултата и закључака добијених у истраживању утицаја уља, дошло би се до бољег разумевања рада оваквих система, као и до одговарајућег модела за њихов бољи опис.

Научни циљ истраживања је анализа утицаја уља на перформансе посматраног расхладног система, који се може представити кроз неколико карактеристичних целина:

- Критички преглед литературе у домену CO₂ расхладних система, с нагласком на кондензационе јединице и утицај уља;
- Развој теоријског модела за прорачун утицаја уља (*OCR*) на перформансе расхладног система;
- Експериментални рад и мерење релевантних параметара; статистичка обрада добијених резултата;
- Поређење мерења са резултатима прорачунског модела и калибрација модела;
- Потенцијални предлози побољшања ефикасности система; уопштавање проблема, тј. анализа могућности примене резултата истраживања на сличне уређаје (нпр. на *LT* системе).

2.1. Релевантни библиографски извори

- [1] Song Y., Cui C., Yin X., Cao F.: *Advanced development and application of transcritical CO₂ refrigeration and heat pump technology – A review*, Energy Reports, Vol. 8, 2022, pp. 7840-7869, doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.233
- [2] Kim M. H., Pettersen J., Bullard C. W.: *Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 2, 2004, pp. 119-174, doi:10.1016/j.pecs.2003.09.002
- [3] Bansal P.: *A review - Status of CO₂ as a low temperature refrigerant: Fundamentals and R&D opportunities*, Applied Thermal Engineering, Vol. 41, 2012, pp. 18-29, doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.12.006
- [4] Yu B., Yang J., Wang D., Shi J., Chen J.: *An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO₂ refrigeration cycle*, Energy, Vol. 189, 2019, Art. No. 116147, pp. 1-20, doi.org/10.1016/j.energy.2019.116147
- [5] Gullo P., Hafner A., Banasiak K.: *Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives*, International Journal of Refrigeration, Vol. 93, 2018, pp. 269-310, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.07.001
- [6] Sun J., Kuruganti T., Munk J., Dong J., Cui B.: *Low global warming potential (GWP) refrigerant supermarket refrigeration system modeling and its application*, International Journal of Refrigeration, Vol. 126, 2021, pp. 195-209, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.037
- [7] Mitsopoulos G., Syngounas E., Tsimpoukis D., Bellos E., Tzivanidis C., Anagnostatos S.: *Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO₂ refrigerant*, Energy Conversion and Management: X, Vol. 1, 2019, Art. No. 100006, pp. 1-17, doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100006
- [8] Sharma V., Fricke B., Bansal P.: *Comparative analysis of various CO₂ configurations in supermarket refrigeration systems*, International Journal of Refrigeration, Vol. 46, 2014, pp. 86-99, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.001

- [9] ASHRAE: *Lubricants in Refrigeration Systems*, ASHRAE Handbook - Refrigeration, Chapter 12, 2018, pp. 1-36, ISBN 978-1-939200-98-3
- [10] Thome J. R.: *Comprehensive Thermodynamic Approach to Modeling Refrigerant-Lubricating Oil Mixtures*, HVAC&R Research, Vol. 1, No. 2, 1995, pp. 110-125, doi.org/10.1080/10789669.1995.10391313
- [11] Zhang W., Li W., Cernicin V., Hrnjak P.: *Theoretical and experimental investigation on the effects of internal heat exchangers on a reversible automobile R744 air-conditioning system under various operating conditions*, Applied Thermal Engineering, Vol. 236, Part B, 2024, Art. No. 121569, pp. 1-12, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121569
- [12] Zhu J., Botticella F., Elbel S.: *Experimental investigation and theoretical analysis of oil circulation rates in ejector cooling cycles*, Energy, Vol. 157, 2018, pp. 718-733, doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.152
- [13] Li K., Luo S., Wang Z., Zhang H., Su L., Fang Y., Zhou X., Zhang H., Tu R.: *An experimental investigation of oil circulation ratio influence on heating performance in an air condition heat pump system for electric vehicles*, International Journal of Refrigeration, Vol. 122, 2021, pp. 220-231, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.11.007
- [14] Tang Z., Zhang S., Zou H., Kong F., Tang M., Wu J., Tian C.: *Operational stability influenced by lubricant oil charge in the CO₂ automotive air conditioning system*, International Journal of Refrigeration, Vol. 158, 2024, pp. 58-67, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.016
- [15] Feja S., Hanzelmann C.: *Experimental studies of thermodynamic properties of R744-oil-mixtures up to 140 °C and 150 bar*, International Journal of Refrigeration, Vol. 60, 2015, pp. 135-141, doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.07.018
- [16] Domin D., Mecklenfeld A., Tegethoff W., Kohler J.: *Thermodynamic property model of a partially miscible CO₂-PAG68 mixture*, Proceedings of the 10th IIR Conference: Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, North Macedonia, 2023, pp. 163-172, DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2023.0019, ISBN 978-2-36215-054-8
- [17] Feja S., Hanzelmann C., Domin D., Mecklenfeld A., Kohler J.: *Determination and evaluation of thermodynamic properties of a refrigeration oil with CO₂ (Daniel Plot)*, Proceedings of the 10th IIR Conference: Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, North Macedonia, 2023, pp. 173-182, DOI: 10.18462/iir.nh3-co2.2023.0020, ISBN 978-2-36215-054-8

3. Полазне хипотезе

Током истраживања, у овој докторској дисертацији, испитиваће се различити режими рада расхладног система који ради са CO₂ као расхладним флуидом. Планом истраживања предвиђен је рад на систему који опслужује средњетемпературски ниво хлађења. Експериментална истраживања ће се спровести на пројектованој инсталацији која ће се изградити и монтирати у Лабораторији за термотехнику. Једина намена уља у расхладном систему је подмазивање покретних делова компресора и следствено повећање заптивености и запреминског степена испоруке. Циркулација уља кроз расхладни систем је неминовна и умногоме утиче на радне перформансе, пад притиска при струјању расхладног флуида кроз цевоводе, као и на интензитет размене топлоте на размењивачима топлоте (на хладњаку гаса на топлој страни и на испаривачу на хладној

страни система). Такође, уколико се из одређених разлога поремети поврат уља у расхладни компресор, само подмазивање може да буде угрожено (што ремети предвиђени режим рада компресора), а у крајњим ситуацијама доводи и до великих кварова. У раду ће се обухватити експериментални подаци доступни у литератури и даће се упоредни приказ са резултатима сопствених мерења.

Неке од полазних претпоставки су:

- Повећани коефицијенти циркулације уља (повећано узношење уља из компресора) неповољно утичу на рад система, смањујући интензитет размене топлоте на размењивачима топлоте, што све директно зависи и од успостављеног режима рада расхладног система;
- Пуњење инсталације расхладним флуидом, као и правилна контрола оптималног притиска на потису компресора, веома битно утичу на перформансе система;
- Потенцијална међусобна растворљивост уља и расхладног флуида може негативно да утиче на деградацију мазивних својстава уља, што као последицу има смањење запреминске ефикасности компресора и његову лошију испоруку.

4. Научне методе истраживања

Научне методе које ће се применити односе се на:

1. Критички осврт на постојеће методе прорачуна компонената система;
2. Математичко моделирање које ће обухватити целокупни систем;
3. Експериментални рад, који ће обухватати:
 - Мерења перформанси на физичком моделу – расхладној инсталацији. Протоци, притисци и температуре радних флуида, као и струјни параметри ће се мењати у опсегу који омогућава експериментална инсталација, а који су довољни да се могу извршити уопштавања експериментално добијених података.
 - Обрада експерименталних резултата ће се спровести методама статистичке анализе (метод најмањих квадрата, итд.) у циљу утврђивања релевантних параметара који утичу на рад система.
 - Даће се поређење сопствених експерименталних података са резултатима из модела.

5. Очекивани научни допринос

Научни допринос би се остварио реализовањем поменутих научних циљева кроз експериментални рад и формирање прорачунског модела. Очекује се да оформљени прорачунски модел даје добра тумачења оваквог типа система, али и да добијени модел буде применљив и за друге сличне системе.

Такође, допринос се огледа и у мерењу и одређивању утицаја уља на перформансе расхладног CO₂ система у функцији релевантних величина на формираној експерименталној инсталацији од стране кандидата, као и у предлогу мера за побољшање рада оваквог система.

Стручни допринос би се огледао у томе да са бољим тумачењем рада кондензационих јединица би се могло приступити прецизнијем пројектовању, извођењу,

оптимизацији, као и експлоатацији оваквих система, имајући у виду пораст броја примењених система у пракси.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања ове докторске дисертације приказан је таксативно кроз досадашње остварене резултате рада, као и кроз очекиване исходе у наставку израде дисертације:

1. Детаљан преглед и критичка анализа доступне научне-стручне литературе у домену расхладних система са угљен-диоксидом.
2. Примена одговарајућег математичког модела за прорачун термодинамичких и транспортних својстава бинарних смеша (мешавине CO₂ и примењеног уља).
3. Развој математичког модела преноса топлоте хладњака гаса.
4. Развој математичког модела компресора.
5. Израда математичких процедура за прорачун утицаја уља на перформансе расхладног система.
6. Прорачун релевантних параметара и израда техничке документације потребних за извођење физичког модела - експерименталне инсталације у Лабораторији за термотехнику Универзитета у Београду – Машинског факултета.
7. Развој метода мерења релевантних параметара.
8. Лабораторијски рад на експерименталној инсталацији: мерење и одређивање меродавних параметара расхладног уређаја, као и утицаја уља (и других релевантних параметара), при различитим условима рада у стационарним режимима.
9. Анализа и статистичка обрада експерименталних података. Валидација мерених резултата са прорачунатим вредностима из формираног модела.
10. Извођење закључака.

Предвиђено је да **структура докторске дисертације** обухвата следеће целине:

1. Уводна разматрања;
2. Преглед доступне литературе и досадашњих релевантних истраживања;
3. Приказ одговарајућих математичких модела;
4. Формирање одговарајућег прорачунског модела;
5. Приказ и поставка експерименталне инсталације са мерном техником;
6. Експериментално испитивање рада једноступеног CO₂ расхладног система и утицаја уља;
7. Анализа добијених резултата и поређење експерименталних резултата са моделом;
8. Закључци изведени из добијених резултата и дискусија, са нагласком на научном доприносу докторске дисертације.
9. Литература.

7. Закључак и предлог

На основу анализе пријаве теме докторске дисертације кандидата архивиране под бројем 487/1 од 31.03.2025. године и уз сагласност Катедре за термотехнику под бројем 487/2 од 24.04.2025. године, Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације сматра да је кандидат испунио све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације, као и да је способан да реализује наведене предвиђене циљеве истраживања. Предложена тема докторске дисертације је актуелна и погодна за израду докторске дисертације, те се њеним изучавањем може остварити значајан научни и стручни допринос. Ипак, Комисија предлаже проширење назива теме докторске дисертације, ради ближег одређивања предмета истраживања. Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се

Владимиру С. Черницину, маг. инж. маш.

одобри израда докторске дисертације под називом

„Утицај присуства уља на перформансе једностепених CO₂ расхладних система“

која припада научној области машинство, ужој научној области термотехника, а за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

За ментора током израде предлаже се **др Урош Милованчевић**, ванредни професор Универзитета у Београду – Машинског факултета.

Београд, 12.06.2025. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
проф. др Маја Тодоровић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
ванр. проф. др Горан Ступар,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
ванр. проф. др Александра Сретеновић Добрић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
доц. др Милена Отовић,
Универзитет у Београду - Машински факултет

.....
проф. др Мирослав Кљајић,
Универзитет у Новом Саду - Факултет техничких наука