



СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
ОГРАНАК САНУ У НИШУ
ОГРАНАК САНУ У НОВОМ САДУ

ДОБИЈАЊЕ, УПОТРЕБА И ЕКОЛОШКИ УТИЦАЈ БИОДИЗЕЛА КАО ТРАНСПОРТНОГ ГОРИВА

НИШ И НОВИ САД 2026

ДОБИЈАЊЕ, УПОТРЕБА И ЕКОЛОШКИ УТИЦАЈ
БИОДИЗЕЛА КАО ТРАНСПОРТНОГ ГОРИВА



SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
SASA BRANCH IN NIŠ
SASA BRANCH IN NOVI SAD

**PRODUCTION, USE, AND ENVIRONMENTAL IMPACT
OF BIODIESEL AS A TRANSPORT FUEL**

Accepted at the VIth meeting of the Department of Technical Sciences
held on October 1, 2025, after being reviewed by
SASA Corresponding member Vesna Mišković Stanković
and Professor Jelena Avramović

E d i t o r s
Academician VLADA VELJKOVIĆ
SASA Corresponding member VLADIMIR SRDIĆ

Niš and Novi Sad 2026

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
ОГРАНАК САНУ У НИШУ
ОГРАНАК САНУ У НОВОМ САДУ

**ДОБИЈАЊЕ, УПОТРЕБА И ЕКОЛОШКИ УТИЦАЈ
БИОДИЗЕЛА КАО ТРАНСПОРТНОГ ГОРИВА**

Примљено на VI скупу Одељења техничких наука,
одржаном 1. октобра 2025, на основу рецензија
дописног члана САНУ Весне Мишковић Станковић
и проф. др Јелене Аврамовић

У р е д н и ц и
Академик ВЛАДА ВЕЉКОВИЋ
Дописни члан САНУ ВЛАДИМИР СРДИЋ

Ниш и Нови Сад 2026

ДОБИЈАЊЕ, УПОТРЕБА И ЕКОЛОШКИ УТИЦАЈ БИОДИЗЕЛА
КАО ТРАНСПОРТНОГ ГОРИВА

Издаје

Српска академија наука и уметности
Огранак САНУ у Нишу, Универзитетски трг 2
Огранак САНУ у Новом Саду, Николе Пашића 6



Лектура и коректура
Милица Миленковић

Технички уредник
Миле Ж. Ранђеловић

Штампа
Unigraf - X-cory, Ниш

Тираж 200 примерака

ISBN 978-86-6184-119-4

© Српска академија наука и уметности 2026

С А Д Р Ж А Ј

Предговор

Влада Б. Вељковић, Милан Томић
Добијање, употреба и еколошки утицај биодизела као транспортног
горива – уводно предавање..... 1

Vlada B. Veljković, Milan Tomić
Production, use and environmental impact of biodiesel as a transport fuel –
Introductory lecture

Ана Марјановић Јеромела, Милан Томић
Потенцијал биљних уља као сировина за производњу биодизела
у Републици Србији 13

Ana Marjanović Jeromela¹, Milan Tomić
Potential of plant oils as feedstocks for biodiesel production
in the Republic of Serbia

Наташа Ђуришић–Младеновић, Милан Томић
Отпадне олео-сировине у производњи биодизела 25

Nataša Đurišić–Mladenović, Milan Tomić
Waste-based oleo-feedstocks in biodiesel production

Влада Б. Вељковић
Компаративна анализа и могућности унапређења технологија
биодизела..... 39

Vlada B. Veljković
A comparative analysis and pathways for improvement of biodiesel
technologies

Ивана Б. Банковић–Илић, Влада Б. Вељковић
Континуални реакциони системи у производњи биодизела 61

Ivana B. Banković–Ilić, Vlada B. Veljković
Continuous reactors in biodiesel production

Зоран Б. Тодоровић, Влада Б. Вељковић
Примена косолвената и еутектичких растварача у добијању
биодизела..... 81

Zoran B. Todorović, Vlada B. Veljković
Application of cosolvents and eutectic solvents in biodiesel production

Милан Томић, Наташа Ђуришић–Младеновић
Утицај биодизела на перформансе, емисију издувних гасова и
поузданост мотора СУС..... 101

Milan Tomić, Nataša Đurišić–Mladenović
Influence of biodiesel on performance, exhaust gas emissions,
and reliability of IC engines

Ференц Е. Киш
Утицај животног циклуса биодизела на глобално загревање
и енергетски биланс његове производње 115

Ferenc E. Kiss
Life cycle impact of biodiesel on global warming
and the energy balance of its production

Слободан Н. Вукосавић
Електрична возила и одрживи развој друмског саобраћаја 129

Slobodan N. Vukosavić
Electric vehicles and sustainable development of road traffic

Предговор

Циклус предавања „Добијање, употреба и еколошки утицај биодизела као транспортног горива“, организован од стране огранака САНУ у Нишу и Новом Саду у периоду од фебруара до новембра 2024. године, обухватио је кључне аспекте производње, примене и еколошког утицаја биодизела. Програм је одобрио низ релевантних тела САНУ, укључујући Одељење техничких наука и Комисију за одобравање циклуса предавања. Са циљем да осветли кључне аспекте биодизела, циклус је обухватио уводно предавање и још осам предавања сврстаних у три подгрупе: сировине за добијање биодизела, методе његовог добијања и употреба и еколошки утицај биодизела (табела 1 у Додатку).

Циклус се састојао од уводног предавања и осам тематских предавања, подељених у три групе: сировине за производњу биодизела у Србији, технологије његовог добијања и употреба уз еколошки утицај (табела 1, додатак). Уводно предавање истакло је важност алтернативних извора енергије у контексту све веће глобалне потражње и негативних ефеката коришћења фосилних горива, као што су климатске промене, и представило биодизел као перспективну замену за фосилни дизел због биолошке разградивости, нижих емисија CO_2 и могућности производње од обновљивих сировина. На основу тога, први део циклуса био је усмерен на конкретне аспекте производње биодизела, анализу сировина и доступних капацитета у Србији.

Производња биодизела у Србији заснива се на биљним уљима (сунцокрет, соја, уљана репица) и отпадним олео-сировинама. Биљна уља имају висок потенцијал, али су ограничена доступним земљиштем и конфликтом са производњом хране, док отпадне сировине представљају еколошки и економски оправдану алтернативу. Ефикасно сакупљање и припрема отпадних уља кључни су за одрживу производњу, у складу са RED II директивом. Из ових сировина, биодизел се добија трансестерификацијом триацилглицерола или естерификацијом слободних масних киселина. Традиционални процеси користе хомогене базне катализаторе, док иновативне методе укључују хетерогене катализаторе, ензимску катализу, ултразвучно и микроталасно зрачење, хидродинамичку кавитацију и реакторе са вибрационом мешалицом. Континуални реактори и употреба косолвената или еутектичких растварача омогућавају већу ефикасност, краће реакционо време и смањен еколошки отисак. Биодизел је значајно алтернативно гориво за моторе са унутрашњим сагоревањем, које, иако има нешто ниже енергетске карактеристике од дизела, смањује емисију чврстих честица, CO и несагорелих угљоводоника, а повећава NO_x . Анализе животног циклуса показују потенцијал за смањење емисија

уз оптимизацију процеса. Биодизел игра важну улогу у транзицији ка одрживом транспортном сектору, иако електрична возила постепено постају дугорочно решење, са еколошким и техничким изазовима који још увек постоје.

Циклус предавања пружио је свеобухватан преглед производње, примене и утицаја биодизела, истичући значај технолошких иновација и усаглашавања са еколошким стандардима у оквиру одрживе енергетске транзиције. Овакво усмерење отвара пут ка еколошки прихватљивом и економски одрживом друмском транспорту. Главни закључци су:

Интеграција биљних уља и отпадних сировина – Развој производње биодизела у Србији захтева мултидисциплинарни приступ који обухвата унапређење агротехнике, оплемењивање биљака и успостављање одрживих система за сакупљање и прераду отпадних олео-сировина.

Иновације у производњи – Оптимизација реакционих услова, примена јефтинијих сировина и ефикаснијих катализатора, као и развој напредних реактора и технологија, представљају основу за већу одрживост и конкурентност биодизела.

Улога у одрживом транспорту – Биодизел смањује емисије и зависност од фосилних горива, а постизање декарбонизације захтева синергију између биодизела, електричних возила и „зелених горива”.

Уредници:

Академик Влада Б. Вељковић

Дописни члан САНУ Владимир Срдич

ДОБИЈАЊЕ, УПОТРЕБА И ЕКОЛОШКИ УТИЦАЈ БИОДИЗЕЛА КАО ТРАНСПОРТНОГ ГОРИВА

– Уводно предавање –

Влада Б. Вељковић,¹ Милан Томић²

¹ Српска академија наука и уметности – САНУ

² Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет, Нови Сад

У раду су објашњене основне карактеристике, значај, предности и ограничења употребе биодизела као одрживе алтернативе конвенционалним транспортним горивима. Посебан фокус је стављен на глобалне трендове у производњи биодизела, са нагласком на водеће земље произвођаче и доминантне сировине у употреби. Такође, дат је преглед развоја производње биодизела у Србији од 1990-их година до данас, укључујући анализу капацитета, институционалних оквира и економских баријера које су утицале на неуспех индустријске производње. На основу доступних података, процењено је да Србија има потенцијал за производњу до 284.000 тона биодизела годишње, што би могло задовољити до 19,4% потреба транспортног сектора. Међутим, стварна производња је и даље скромна и ограничена на мале шаржне погоне.

Кључне речи: биодизел, производња у свету, производња у ЕУ, потенцијал Србије, трансестерификација.

1. Увод

Иако идеја о употреби биљних уља као горива за моторе са унутрашњим сагоревањем (СУС) потиче још из краја 19. века, озбиљнија истраживања на ову тему добијају на значају тек крајем 20. века. Још 1893. године Рудолф Дизел је конструисао мотор СУС који је као погон користио уље кикирикија, а свој изум представио је на Светској изложби у Паризу 1900. године, чиме је указао на потенцијал биљних уља као горива. Међутим, због лаке доступности и ниже цене нафте, биљна уља су потиснута у други план и остала недовољно заступљена у енергетском сектору.

Обновљено интересовање за биљна уља и њихове деривате, као што је биодизел, појављује се током 1970-их година, услед прве велике енергетске кризе изазване ембаргом ОПЕК-а (Организације земаља извозница нафте). Нагли раст цена нафте и нестабилност у снабдевању подстакли

су бројне земље да започну систематична истраживања обновљивих, локално доступних енергетских извора. У том контексту, биљна уља су препозната као могућа замена за дизел гориво, посебно у секторима пољопривреде и транспорта.

Крајем осамдесетих и почетком деведесетих година прошлог века, развојем процеса трансестерификације – хемијске реакције којом се биљна уља и животињске масти конвертују у метил-естаре масних киселина (биодизел) – истраживања у овој области доживљавају интензиван развој. Овим поступком добијено је гориво чије физичко-хемијске особине одговарају стандардима савремених дизел мотора, чиме је отворен пут за ширу примену биодизела као алтернативног горива.

Рад представља анализу основних својстава, значаја, предности и ограничења употребе биодизела као одрживе алтернативе конвенционалним транспортним горивима. Посебна пажња посвећена је глобалним трендовима у производњи биодизела, уз нагласак на водеће земље произвођаче и најзаступљеније сировине. Такође, анализира се развој производње биодизела у Србији, с освртом на производне капацитете, институционални оквир и економске баријере које су условиле неуспех његове индустријске примене.

2. Шта је биодизел?

Биодизел представља смешу алкил-естара виших масних киселина, добијену хемијским процесом трансестерификације. У овом процесу, биљна уља или животињске масти – које се углавном састоје од триацилглицерола – реагују са алкохолом (најчешће метанолом или етанолом) у присуству катализатора (обично NaOH или KOH), при чему настају алкил-естари (биодизел) и глицерол као нуспроизвод.

Трансестерификација омогућава да се биљна уља високе вискозности претворе у гориво чије су физичко-хемијске карактеристике у великој мери сличне класичном дизел гориву добијеном из нафте. Биодизел је гориво намењено моторима СУС са компресионим паљењем, тј. дизел моторима, и може се користити као чисто (B100) или у мешавинама са фосилним дизелом.

Квалитет биодизела строго је дефинисан техничким стандардима који осигуравају његову безбедну и поуздану примену у савременим моторима. У Европској унији примењује се стандард EN 14214, а у Сједињеним Америчким Државама стандард ASTM D6751. Ови стандарди прописују дозвољене границе за параметре као што су вискозност, густина, садржај воде и метанола, тачка замућења и други критични индикатори квалитета.

3. Због чега биодизел – предности и недостаци биодизела?

Пораст интереса у свету за биодизел је резултат низа економских, енергетских и еколошких изазова повезаних са коришћењем фосилних горива. Међу њима су:

- **Зависност од цене нафте и глобалне политичке нестабилности:** Цена нафте на светском тржишту значајно зависи од геополитичке стабилности региона богатих нафтом. Нестабилност у земљама чланицама ОПЕК-а и другим великим произвођачима (изазвана сукобима или санкцијама) може изазвати велика колебања у ценама, угрожавајући енергетску безбедност зависних држава.
- **Ограниченост резерви нафте:** Светске доказане резерве нафте су ограничене на приближно 1.650 милијарди барела (226 милијарди тона) [1]. Са текућим трендом производње од око 13 милиона тона дневно, ове резерве би могле бити исцрпљене за наредних 47 година, што наглашава неопходност развоја и коришћења алтернативних горива као што је биодизел.
- **Заштита животне средине:** Сагоревање фосилних горива је главни извор емисије CO₂ и других штетних гасова, као и загађујућих материја, као што су NO_x, CO, честице (PM) и SO₂. Ови једињења негативно утичу на здравље људи и деградирају животну средину.
- **Раст потражње за горивима у транспорту:** Уз раст броја возила, посебно у земљама у развоју, потражња за дизел горивом у транспортном сектору наставља да расте (за око 1,9% у 2023. години и 0,8% у 2024. години [2]), што показује значај развоја алтернативних горива као одговор на ову потребу.

Употреба биодизела, подстакнута настојањем за енергетском независношћу и смањењем емисије штетних гасова, доноси бројне предности, али и одређена ограничења. Међу најзначајнијим предностима биодизела истичу се следеће:

- Биодизел се може производити из широког спектра локално доступних сировина, као што су биљна уља, животињске масти, коришћена јестива уља и микроалге. Та сировинска разноврсност омогућава флексибилност у производњи и смањује зависност од увоза енергената.
- Једна од кључних еколошких предности биодизела је његова биоразградљивост. У случају просипања, он не изазива трајно загађење воде и земљишта, јер се разлаже знатно брже од фосилних горива, чиме се ризици по животну средину своде на минимум.
- Поред тога, биодизел доприноси смањењу укупне емисије CO₂, јер се током његовог сагоревања ослобађа углавном она количина

CO₂ коју су биљке, као примарни извор сировина, апсорбовале током раста. Овим се затвара угљенични циклус и смањује нето емисија стакленичких гасова.

- Биодизел има знатно нижу токсичност у поређењу са нафтом и њеним дериватима, што га чини безбеднијим за руковање и складиштење. Његова висока тачка паљења (~150 °C) сврстава га у мање запаљива горива, што је додатна предност у погледу безбедности током транспорта и манипулације.
- У погледу техничких карактеристика, биодизел омогућава добре перформансе мотора, нарочито у погледу обртног момента и снаге. Такође побољшава подмазивање компоненти система за убризгавање горива, чиме се смањује хабање и продужава радни век мотора.
- Једна од кључних предности је и могућност мешања са фосилним дизелом у било ком односу, што омогућава његову примену у постојећим моторима без потребе за модификацијама.
- На крају, сагоревање биодизела резултира знатно нижим емисијама CO, PM и угљоводоника (HC), што позитивно утиче на квалитет ваздуха и здравље људи.

С друге стране, употреба биодизела праћена је и одређеним изазовима како у производњи, тако и током експлоатације.

- Једна од главних мана је повећана емисија NO_x, који учествују у формирању фотохемијског смога и могу негативно утицати на квалитет ваздуха.
- Биодизел такође показује слабије нискотемпературне карактеристике. Његова релативно висока температура стињавања може изазвати проблеме са протоком горива, отежан старт и рад мотора у хладним климатским условима.
- Још један значајан изазов представља ниска оксидациона стабилност биодизела, због које он током дужег складиштења подлеже деградацији, што може довести до формирања талога и запушења филтера.
- Поред тога, због своје хигроскопности, биодизел лако апсорбује влагу из околине, што може довести до хидролизе алкил-естара масних киселина, пораста садржаја слободних масних киселина, повећаног ризика од микробиолошке контаминације и убрзане корозије компоненти система за гориво.

Употреба биодизела праћена је одређеним изазовима, али постоје и ефикасна решења за њихово превазилажење. Повећана емисија NO_x може се ублажити применом катализатора, оптимизацијом рада мотора и коришћењем адитива. Слабе нискотемпературне карактеристике могу се побољшати додавањем адитива који снижавају температуру стињавања

и побољшавају течљивост горива. Ниска оксидациона стабилност биодизела решава се употребом антиоксиданаса који спречавају разградњу током складиштења. Проблем апсорпције влаге и последичне хидролизе алкил-естара ублажава се контролом услова складиштења (суви, тамни резервоари), употребом средстава против влаге и редовним одржавањем система за гориво. Поред тога, истражују се стабилније сировине и напредне технологије производње ради унапређења укупног квалитета и поузданости биодизела.

Социо-економски изазови повезани са употребом биодизела огледају се у могућности да интензивирани производња биогорива доведе до конкуренције са производњом хране, што потенцијално може проузроковати пораст цена основних пољопривредних производа и угрозити прехранбену безбедност. Овај проблем је посебно изражен када се за производњу биодизела користе житарице и уљарице које имају широку примену у исхрани људи и стоке. Међутим, он се може ублажити коришћењем отпадних уља, животињских масти и гајењем уљаних култура на земљиштима непогодним за производњу хране, чиме се подстиче одржива производња биодизела.

Са технолошко-производног аспекта, производња биодизела обухвата више изазова који утичу на ефикасност и трошкове процеса. Један од главних техничких проблема је немешљивост уља и алкохола, што захтева примену интензивног мешања или емулгатора ради постизања довољног контакта реактаната. Поред тога, реакција трансестерификације захтева вишак алкохола и строго контролисане услове како би се обезбедила висока конверзија триглицерида у алкил-естаре. Брзина и ефикасност реакције зависе од врсте катализатора, квалитета сировина и температуре процеса. Катализатори као што су NaOH и KOH, иако ефикасни, носе додатне изазове: њихова цена, ограничена растворљивост у реакционој мешавини и потреба за каснијим уклањањем из производа повећавају укупне трошкове производње. Такође, на процес снажно утичу и карактеристике сировина – присуство воде, слободних масних киселина и степен незасићености уља могу довести до сапонификације, смањења приноса и лошијег квалитета финалног производа.

Решења изазова у производњи биодизела обухватају:

- примену хетерогених катализатора, као што је CaO, који се лакше одвајају из реакционе смеше, могу се поново користити и смањују потрошњу воде у поступку пречишћавања,
- употребу наткритичних процеса који не захтевају катализатор, а омогућавају бржу конверзију при високим температурама и притисцима, уз већу толеранцију на различит квалитет сировина,

- развој ензимске катализе која омогућава реакцију у блажим условима, мањи удео споредних производа и већу отпорност на присуство слободних масних киселина и воде, иако је и даље неопходно смањити трошкове ензима,
- као и примену континуалних реактора који обезбеђују већу контролу процеса, краће време реакције и лакшу примену у индустријским условима.

Интеграцијом ових напредних решења могуће је значајно унапредити ефикасност и економичност производње биодизела, истовремено смањујући његов укупни еколошки отисак.

4. Стање производње биодизела у свету и ЕУ

Производња биодизела представља значајан сегмент у структури обновљивих енергетских извора у свету. Укупно инсталирана производна инфраструктура у свету обухвата око 500 фабрика, укупног капацитета од око 76 милиона тона годишње. Иако капацитети делују импозантно, реална производња варира услед тржишних и регулаторних утицаја. У периоду од 2019. до 2022. године, светска производња биодизела и хидропроцесираног биљног уља кретала се између 38,2 и 42,3 милиона тона, а пројекције за 2030. годину указују на пораст до 44 милиона тона.

На глобалном нивоу, водеће земље у производњи биодизела су [3]:

- Индонезија: преко 12 милиона тона (2023),
- Бразил: око 6,6 милиона тона (2023),
- САД: приближно 5,4 милиона тона (2022),
- Немачка: око 3,5 милиона тона (2022),
- Француска: око 2,2 милиона тона (2022),
- Аргентина: преко 1,9 милиона тона (2022),
- Холандија и Шпанија: свака између 1,7 и 1,8 милиона тона (2019),
- Тајланд, Малезија, Италија и Пољска: од 1 до 1,5 милиона тона (2019) и
- Кина: приближно 2,1 милион тона (2022).

Ови подаци показују да доминација у производњи биодизела није ограничена на регион ЕУ-27 или САД, већ да значајну улогу у глобалном снабдевању имају и земље југоисточне Азије (Индонезија, Малезија и Тајланд) и Јужне Америке (Бразил и Аргентина). Индонезија, као водећи произвођач, издваја се по највећем обиму производње, што се преваходно може приписати изузетном потенцијалу за гајење уљаних палми и доступности сировине.

У погледу сировинске структуре, на светском нивоу преовлађују:

- палмино уље (30%),
- сојино уље (25%),

- уљана репица (20%) и
- отпадна јестива уља (20%),

док преосталих 5% чине остале уљане културе, животињске масти и индустријски остаци.

Унутар ЕУ-27, производња и употреба биодизела одвијају се у оквиру снажне регулаторне политике усмерене ка декарбонизацији транспортног сектора. Према подацима за 2020. годину, укупне енергетске потребе у транспорту износиле су 251 Мтое, од чега је 16 Мтое (6,3%) покривено биогоривима [4]. У оквиру ове количине, биодизел чини око 80% укупне потрошње биогорива, док напредна биогорива – добијена из сировина наведених у Анексу IX Директиве RED III – учествују са приближно 25% [5], што указује на постепену транзицију ка одрживијим изворима енергије.

Европска унија располаже са 186 постројења за производњу биодизела, са укупно инсталисаним капацитетом од 18,4 милиона тона. У 2020. години произведено је 13,7 милиона тона, што представља искоришћеност капацитета од око 74,5%. Недостатак између домаће производње и потрошње (0,52 милиона тона) надокнађен је увозом, при чему су водећи добављачи били Аргентина (36%), Кина (22%), Уједињено Краљевство (14%), Малезија (12%), Јужна Кореја (4,98%) и Индонезија (4,79%). Већину производње унутар ЕУ-27 (преко 93%) остварује осам земаља: Немачка (32,4%), Француска (15,2%), Шпанија (14%), Холандија (9,5%), Пољска (9%), Италија (5,2%), Белгија (4,7%) и Португал (3,2%) [6]. У сировинској структури доминирају биљна уља, и то уљане репице (38%), палмино (18%), сојино (7%) и сунцокретово уље (2%), док се све више користе и алтернативне сировине попут отпадних уља (23%), животињских масти (8%) и остатака биомасе (4%) [7], што је у складу са политиком одрживости, развоја циркуларне економије и применом Директиве RED III, која подстиче употребу напредних биогорива.

5. Стање производње биодизела у Србији

5.1. Ретроспектива развоја, изазова и институционалних оквира

Услед несташице фосилних горива током прве половине 1990-их, проузроковане ембаргом који је увела међународна заједница, у Србији су започета истраживања о могућностима примене алтернативних горива, укључујући и биодизел. Међутим, прва искуства су била изразито неповољна, као последица некритичког приступа, одсуства стандарда квалитета и нерегулисаног тржишта. На тржишту се појавило гориво под називом биодизел, које је, у ствари, било мешавина нерафинисаног

сојиног уља и дизел горива. Разлог за појаву оваквих производа лежи у великој разлици у цени – док је дизел гориво на црном тржишту достигло цену од око 2,5 ДМ/л,^{*} нерафинисано уље је коштало мање од 1,0 ДМ/л. Иако су краткорочна испитивања показала да се такве мешавине могу користити са минималним губитком снаге и повећаном потрошњом горива (5–10%), стручњаци су већ тада упозоравали на могуће озбиљне последице по поузданост и радни век мотора. Те бојазни су се убрзо и оствариле – масовна употреба ових мешавина довела је до бројних хаварија. Само у Војводини је забележено око 400–500 случајева озбиљних оштећења мотора који су захтевали генералну поправку [8].

Упркос почетним потешкоћама, током 1994–1995. године у Србији је реализован национални пројекат производње биодизела, који је званично укључен у енергетски биланс земље са планираном годишњом производњом од 50.000 тона. Реконструисано је више хемијских погона, обезбеђени су укупни производни капацитети од 133.200 тона годишње (табела 1), што је омогућило Србији да се позиционира као један од значајнијих произвођача у Европи. Усвојене су технологије шаржне и једна континуална производња, а процеси су унапређени у области дегумирања уља и сепарације глицеролске воде и масних киселина из сировог глицерола. Међутим, и поред несташнице дизел горива, производња биодизела није достигла очекиване нивое, што се делимично може објаснити ненаменском употребом сировина и утицајем увозничких лобија.

Након укидања санкција, интересовање за производњу биодизела у Србији је утихнуло, делимично и због одсуства стандарда квалитета – све до 2003. године, када је усвојен стандард SRPS EN 14214, којим су дефинисани технички захтеви за квалитет биодизела. Додатни корак ка унапређењу сектора представљала је ратификација Уговора о оснивању Енергетске заједнице са Европском унијом 2006. године, чиме је Србија преузела обавезу примене директива о обновљивим изворима енергије. Према Директиви 2003/30/ЕС, било је предвиђено да до краја 2010. године најмање 5,75% горива у транспорту потиче из обновљивих извора, што је захтевало достављање одговарајућег националног плана. Ипак, већ 2005. године постало је јасно да Србија значајно заостаје за овим циљем, не успевши да достигне ни приближно пројектовану количину од 121.000 тона биодизела. Потписивањем Споразума о стабилизацији и придруживању 2008. године (који је ступио на снагу 2013), Србија је додатно учврстила своје обавезе ка енергетској транзицији у складу са регулативама Европске уније.

^{*} ДМ – немачка марка.

Табела 1 Капацитети и производња биодизела код нас [8]

Фирма	Капацитет (т/год)	Производња (т/год)		
		1994.	1995.	до 2004.
Прва Искра Наменска	35,000	2,500	5,000	-
Прва Искра-Базна, Барич	15,000	-	1,000	-
Бриксол, Вршац	45,000	1,500	3,000	-
Хемпро, Шид	15,000	310	2,000	-
Хинс, Нови Сад	10,000	-	5	-
Биопетрол, Пожега	10,000	-	100	900
Ага-2, Чока	1,000	150	150	-
Калисто, Ада	600	10	15	-
Екопримат, Ново Милошево	600	-	-	90
Примус еко, Суботица	1,000	-	-	5
Укупно:	133,200	4,470	11,270	995

Значајан помак у индустријској производњи биодизела у Србији забележен је 2007. године, када је фабрика „Викторија Оил“ у Шиду започела производњу са пројектованим капацитетом од 100.000 т/год. Те године произведено је око 27.000 тона биодизела који је испуњавао захтеве стандарда EN 14214. Ипак, убрзо након покретања производње, услед недостатка подстицајних мера, субвенција и нестабилности тржишта, производња је обустављена. Потпуно гашење сектора додатно је подстакнуто увођењем акцизе на биогорива 2013. године, што је економски оптеретило производњу (акциза данас износи 58,12 дин/л). Иако је 2023. године уведена могућност повраћаја дела акцизе у зависности од намене, ове мере нису довеле до обнове производње. Институционално, важан корак напред представљало је усвајање Закона о коришћењу обновљивих извора енергије у марту 2021. године, као и доношење Одлуке о обавезном уделу биогорива у новембру исте године, којом су утврђени минимални енергетски удели биогорива у укупној количини горива на тржишту Србије: 0,5% за 2022. и 2023. и 1% за 2024. годину. Међутим, упркос овим мерама, током 2024. године није забележена значајнија производња ни употреба биодизела у Србији.

Упркос постојећим инсталисаним капацитетима, технолошком знању и расположивом сировинском потенцијалу, Србија ни током 2024. године није успела да успостави одржив модел производње и употребе биодизела. Главни узроци оваквог стања су изостанак дугорочне и доследне државне стратегије, нестабилан тржишни амбијент, неусаглашеност законских оквира и недостатак економских подстицаја. Уколико Србија жели да испуни своје европске обавезе и обезбеди већу енергетску независност и стабилност, неопходно је поновно покретање производње биодизела кроз координисану сарадњу државних институција, научне

заједнице и индустрије, као и примену проверених модела и најбољих пракси из других земаља региона.

5.2. Потенцијал производње биодизела у Србији

Производња биодизела у Србији представља значајан потенцијал за јачање енергетске независности и испуњавање преузетих обавеза у области обновљивих извора енергије, посебно у транспортном сектору. Са расположивом сетвеном површином од око 240.000 ha под уљарицама, која се може користити без угрожавања потреба прехранбене и сточарске индустрије, могуће је произвести између 128.000 и 266.000 тона биодизела годишње, чиме би се супституисало од 8,8% до 18,2% укупне домаће потрошње дизел горива у транспорту [9]. Ове количине се односе искључиво на вишкове у односу на потребе прехранбене и сточарске индустрије.

Међутим, дугорочно ослањање на јестива уља није одрживо због етичких и економских дилема везаних за конкуренцију између производње хране и горива („храна или гориво“). Стога је од посебне важности интензивирање истраживања и развој производње биодизела из нејестивих и отпадних уљаних сировина. Потенцијал производње из отпадног јестивог уља процењује се на око 10.000 тона годишње, што може заменити додатних 0,7% дизел горива у транспорту. Тај капацитет би се значајно увећао увођењем системског сакупљања отпадног јестивог уља из угоститељског сектора, индустрије и домаћинства. Поред тога, у Србији постоји и неискоришћен потенцијал сировина из остатака прехранбене индустрије, попут семена парадајза, грождја и дувана, чијом прерадом се може добити додатних 7.650–8.100 тона биодизела, што одговара супституцији од око 0,5% укупне потрошње дизел горива. Укупно посматрано, сировински потенцијал Србије за производњу биодизела процењује се између 145.650 и 284.110 тона годишње, што би могло покрити од 10,0% до 19,4% годишњих потреба за дизел горивом у транспортном сектору.

Међутим, искоришћеност овог потенцијала тренутно је изузетно ниска. Производња се своди на рад малих, шаржних постројења капацитета од свега 100 литара на сваких шест сати до 2.400 литара дневно, која се углавном налазе на породичним газдинствима. Ова производња је резултат приватне иницијативе и доступности нискобуџетне опреме, чија цена ретко прелази 2.000 евра. Међутим, посебну забринутост изазива неуједначен и често непоуздан квалитет добијеног биодизела, што додатно доприноси неповерењу корисника, присутно још од почетка 1990-их година.

6. Закључак

С обзиром на енергетски, еколошки и економски потенцијал, биодизел представља значајну алтернативу фосилним горивима у транспортном сектору. Његова примена доприноси смањењу емисије штетних гасова, енергетској независности и бољем искоришћењу локалних ресурса. Глобална искуства као и искуства земаља ЕУ показују да уз одговарајућу законску регулативу, подстицајне мере и технолошки развој, производња и употреба биодизела може достићи висок ниво. Србија, иако располаже релевантним ресурсима, техничким знањем и инсталисаним капацитетима, није успела да успостави одржив систем производње. Производња се задржава на нивоу малих капацитета и приватних иницијатива, уз слабу институционалну подршку. Неопходно је доношење дугорочне стратегије, усклађене са европским прописима, као и подстицајне политике које ће омогућити активирање постојећих капацитета и развој нових. Посебну пажњу треба посветити алтернативним сировинама, попут отпадних и нејестивих уља, чиме би се избегла конкуренција са прехранбеном индустријом.

Литература

1. <https://www.worldometers.info/oil/>
2. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/key-findings?utm_source=chatgpt.com
3. Statista 2021/24 www.statista.com
4. OECD-FAO Agricultural Outlook, 2021.
5. Directive (EU) 2023/2413 of the european parliament and of the council, O.J. of the European Union, L 2023/2413, (2023) 1–128.
6. B. Flach, S. Lieberz, S. Bolla, EU Biofuels Annual 2021, 2021.
7. B. Flach, S. Lieberz, S. Bolla, EU Biofuels Annual 2023, 2023.
8. Т. Фурман и сар.: Биодизел, алтернативно и еколошко течно гориво, Пољопривредни факултет, Нови Сад (2005).
9. N. Đurišić-Mladenovića, F. Kiss, B. Škrbić, M. Tomić, R. Mičić, Z. Predojević. Renew. Sust. Energy Rev. 81, (2018) 280–291.

PRODUCTION, USE AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF BIODIESEL AS A TRANSPORT FUEL

– Introductory Lecture –

Vlada B. Veljković,¹ Milan Tomić²

¹ Serbian Academy of Sciences and Arts, Branch of the SASA in Niš,
Kneza Mihaila 35, Belgrade

² Faculty of Agriculture, University of Novi Sad, Novi Sad

This paper provides an introductory analysis of the concept, significance, advantages, and disadvantages of biodiesel as an alternative transport fuel. Special attention is given to global trends in biodiesel production, highlighting leading producer countries and the dominant raw materials used. The paper presents a retrospective overview of biodiesel production development in Serbia, with an emphasis on the period from the 1990s to the present day. It analyzes production capacities, institutional frameworks, and economic barriers that have influenced the failure of industrial-scale production. Based on available data, it is estimated that Serbia possesses resources for producing up to 284,000 tonnes of biodiesel annually, which could satisfy up to 19.4% of the transport sector's needs. However, actual production remains symbolic and is limited to small batch facilities.

Keywords: Biodiesel, global production, EU production, Serbia, potential, transesterification.

ПОТЕНЦИЈАЛ БИЉНИХ УЉА КАО СИРОВИНА ЗА ПРОИЗВОДЊУ БИОДИЗЕЛА У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ

Ана Марјановић Јеромела,¹ Милан Томић²

¹ Институт за ратарство и повртарство, Нови Сад;

² Пољопривредни факултет Универзитета у Новом Саду

У раду је анализиран потенцијал биљних уља сунцокрета, уљане репице, соје и мање гајених биљних врста (ланик, рицинус, шафраника) као сировине за производњу биодизела у Републици Србији. Представљени су агроеколошки услови за гајење ових врста, специфичности њиховог узгоја, састав уља и прилагођеност производњи на земљиштима различитог квалитета, са посебним освртом на доступност некултивисаног и маргиналног земљишта. Процењује се да до 353.000 ha може бити употребљено без угрожавања прехрамбене производње, што омогућава потенцијалну производњу до 324.000 t биодизела годишње. Рад указује на потребу даљег развоја технологија и подстицаја за производњу биљних врста за производњу биогорива.

Кључне речи: сунцокрет, уљана репица, соја, мање гајене уљане врсте

1. Увод

Биодизел као облик обновљиве енергије све више добија на значају услед глобалне потребе за енергетском транзицијом глобалних климатских промена, смањења емисија стакленичких гасова и енергетске независности. Република Србија, као аграрна земља, располаже ресурсима за производњу сировина биљног порекла, поседује значајне површине обрадивог земљишта, климатске услове и знање из области генетике и оплемењивања, као и технологије производње уљаних биљних врста, што је чини погодном за развој домаће биодизел индустрије. Разноврсност расположивих сировина за производњу биодизела омогућава мању регионалну зависност због ефикаснијег одабира потенцијалне сировине у зависности од регионалних климатских и земљишних услова, као и специфичне пољопривредне праксе. Биодизел се најчешће добија трансестерификацијом биљних уља, при чему настају метил- или етил-естри масних киселина, погодни за употребу у дизел моторима без значајних модификација [1]. Уље је једно од енергетски најбогатијих органских материја, чијим сагоревањем се ослобађа 38,7 MJ енергије по

килограму. Биљна уља се добијају из семена и плодова различитих врста. Према ФАО класификацији у 22 биљне врсте из којих се добија уље, осим њивских уљаних биљка (уљана репица, сунцокрет, рицинус, сусам, мак, шафраника, слачица), укључене су две махунарке (соја и кикирики), текстилне (памук, лан, конопља), дрвенасте (маслина, уљана палма), као и неке тропске биљке. У Србији се традиционално гаје сунцокрет, соја и уљана репица, уз потенцијал за увођење нових врста попут ланика, рицинуса и слачица. Основне биљне врсте које се традиционално гаје у Србији: сунцокрет (*Helianthus annuus* L.), соја (*Glycine max* (L.) Merr.) и уљана репица (*Brassica napus* L.), представљају примарне сировине за производњу јестивог уља, али имају и велики потенцијал за примену у производњи биодизела [2,3].

2. Најзнајчајније уљане врсте у Србији

2.1. Сунцокрет, уљана репица и соја

Сунцокрет је најзаступљенија уљана врста у Србији, са површинама које премашују 240.000 ha. Просечан принос износи око 2,8 t/ha, а садржај уља варира између 35% и 45%. Соја (*Glycine max* (L.) Merr.) се узгаја на површини близу 197.000 ha, при чему принос достиже 2,75 t/ha, уз садржај уља око 20%. Уљана репица (*Brassica napus* L.) заузима око 45.600 ha, са просечним приносом 2,84 t/ha и садржајем уља до 48% [1–3]. Већина производње ових индустријских врста сконцентрисана је у Војводини, која чини преко 90% укупне производње сунцокрета и соје, те око 80% репице [4]. Приноси варирају у зависности од сортимента, агроколошких услова и примењене агротехнике.

2.2. Мање гајене врсте са потенцијалом за производњу биодизела

Поред основних уљаних култура, у Србији постоји значајан потенцијал за гајење мање заступљених врста, као што су ланик (*Camelina sativa* (L.) Crantz), рицинус (*Ricinus communis* L.), шафраника (*Carthamus tinctorius* L.), слачица (*Brassica* spp.) и лан (*Linum usitatissimum* L.). Ове врсте су посебно погодне за узгој на маргиналним земљиштима и у условима ограничених ресурса. На пример, ланик добро подноси сушу и земљишта мање плодности, а уље му је богато ω -3 масним киселинама, што га чини перспективном уљаном врстом за производњу биодизела са додатном нутритивном вредношћу [5,6]. Рицинус је посебно занимљив због високог приноса уља и садржаја рицинолеинске киселине, која има повољна својства за производњу биогорива [7].

3. Агроеколошки и агротехнички захтеви за гајење уљаних биљака

Уљане културе захтевају одређене агроеколошке услове ради постизања стабилних и високих приноса. Умерено континентална клима Србије, са просечним падавинама од 500 до 750 mm и довољним бројем сунчаних дана, омогућава успешну производњу сунцокрета, соје и уљане репице. Најповољнији рН земљишта за већину уљаних биљака је у опсегу од 6,6 до 7,6. Ипак, врсте као што су ланик и конопља могу поднети и кисела (рН до 5,5) и алкална земљишта (рН до 8,5) [1,5]. Са све учесталијим климатским екстремима – сушама, поплавама и температурним осцилацијама – повећава се значај гајења толерантних врста и одабраног сортимента, као што су уљана репица и ланик, које показују добру адаптацију на полусушне и маргиналне услове [6].

Уљане биљке развиле су низ морфолошких и физиолошких карактеристика које им омогућавају постизање стабилних приноса и у екстремним условима средине. Већина енергетских усева добро подноси веће климатске осцилације и лошије агроеколошке услове (уљана репица, ланик, конопља), немају велике потребе за хранивима (ланик, конопља) и могу се гајити и на маргиналним и заслањеним земљиштима (ланик), земљиштима смањене плодности (конопља) или у полусушним подручјима (ланик).

За продуктиван раст и развој уљаних биљака потребно је да се добре пољопривредне мере спроводе у одговарајућим агроеколошким условима. Пољопривредници треба да познају оптималне потребе уљаних биљака за најзначајнијим агроеколошким чиниоцима: земљиштем, светлошћу, топлотом и водом.

3.1. Агроеколошки чиниоци

Уљане биљке најбоље успевају на дубоким, плодним и карбонатним земљиштима средњег механичког састава, неутралне до слабо алкалне реакције, која нису склона формирању покорице. На лакшим земљиштима, мање плодности, дају рентабилније приносе од већине других ратарских усева и често су унутар газдинства предодређена за гајење на земљиштима лошијег квалитета. Са опадањем плодности земљишта, опадају и приноси. Успешно се гаје у брдско-планинским регионима до 750 m, могу се гајити на киселим (до рН 5,5) и алкалним земљиштима (до рН 8,5), али им највише одговарају неутрална до слабо алкална (рН 6,6–7,6).

Србија се налази између 42. и 46. степена северне географске ширине и на свим подручјима инсолација је довољна, светлост није ограничавајући фактор за гајење озимих и јарих форми.

Температурна колебања имају велики утицај на производњу уљаних биљака. Код озимих врста временом сетве се подешава степен развијености биљке пре зиме. Температуре имају велики утицај на трајање периода цветања. Висину и квалитет приноса у великом проценту одређују температуре од цветања до сазревања.

Уљане биљке имају различите захтеве за водом. Потребна годишња сума падавина је у просеку 500–750 mm. Најосетљивије су на сушу у фази формирања цветних пупољака до цветања (интензиван пораст) и у фази наливања семена. Код озимих уљаних врста, у нашим семиаридним условима, најкритичнији је недостатак воде у сетви.

3.2. Агротехнички захтеви

Природне непогоде: суше, екстремна колебања температуре, поплаве и олујни ветрови, постепено се повећавају последњих неколико година. Са климатским променама, очекује се да ће ове непогоде бити све чешће и израженије. Према Другом двогодишњем ажурираном извештају и Трећем националном саопштењу Републике Србије UNFCCC (2019), Република Србија је међу европским земљама најугроженијим у погледу природних катастрофа и климатских промена.

Агроеколошки услови у Србији погодују производњи енергетских биљних врста у које спадају и уљане врсте. За ублажавање ограничења у гајењу, од кључног значаја је правилан избор врсте, форме и сорте. Свака од њих има специфичне предности које је чине погодном за одређене услове гајења. Систем добре пољопривредне праксе и правилан плодоред омогућавају стабилне приносе чак и у неповољним условима.

У поређењу са основним ратарским врстама, многе уљане врсте (нпр. ланик, конопља) не захтевају оптималне услове, толеришу климатске екстреме и могу се гајити на маргиналним, сланим или сиромашним земљиштима и уз примену редуковане обраде. Посебно је значајна њихова толеранција на абиотички стрес (нпр. суша и високе температуре), што доприноси стабилности производње.

Уљане биљне врсте показују морфолошке и физиолошке адаптације на екстремне услове. Иако неке од ових врста имају традицију у производњи, друге су мање познате пољопривредницима. Постоје сорте за комерцијалну производњу, док је за неке оплемењивање тек у почетној фази. Центар изврности за оплемењивање биљака отпорних на климатске промене, основан 2021. године при Институту за ратарство и повртарство у Новом Саду, усмерен је на стварање генотипова енергетских култура са побољшаним особинама.

Заштита од болести и штеточина се спроводи у складу са таксономским специфичностима сваке врсте. У већини случајева мере заштите

су минималне или непотребне, а интегралним приступом могу се свести на најмању меру. Модеран сортимент уљних врста има скраћену вегетацију ради избегавања суше, а за производњу биодизела најпожељније су врсте са високим приносом уља. Њихова прилагодљивост, развијена технологија гајења и вишенаменска употреба дају им значајно место у контексту климатских промена [8].

4. Производни капацитети и регулатива

Република Србија располаже са око 3,48 милиона хектара обрадивог земљишта, а процењено је да 170–200 хиљада хектара годишње остаје неупотребљено. У производњи уљаних врста доминира Војводина (93% од укупне производње уљаних врста у Р. Србији) где у сетвеној структури учествује са близу 20% уз могућност даљег напретка у технологији производње. Процењује се да у Србији постоји до 353.000 ha земљишта погодног за производњу уљаних култура намењених за биодизел, без нарушавања прехранбене сигурности [2,4]. Инсталирани капацитети за производњу биодизела износе око 126.000 t годишње, али су недовољно искоришћени због високих акциза и недостатка субвенција [3]. Тренутно производња биодизела већином потиче од јестивих уља добијених од биљака узгајаних на плодном тлу што је у колизији са глобалном производњом хране и ограниченим земљишним потенцијалом, али и са последњом усвојеном RED II (енг. *Renewable energy directive*) директивом из 2018. године (2018/2001) која предвиђа супституцију у транспортном сектору 14% фосилног горива до краја 2030. године, уз повећање учешћа нејестивих сировина и оних са ниским ILUC ризиком (нпр. ланик, рицинус, слачица) [7]. Из тог разлога производњу биодизела неопходно је усмерити у правцу примене нејестивих биљних уља које је могуће узгајати на земљиштима ниског квалитета, као што су: рицинус (*Ricinus communis* L.), уљана репица с високим садржајем ерука киселине, барбадоски орашчић (*Jatropha curcas* L.), као и етиопска (*Crambe abyssinica* Hochst. ex R. E. Fr.) и абисинска (*Brassica carinata* Braun.) слачица и уљана ротква (*Raphanus sativus* L. var. *oleiformis* Pers.). Њихове производне карактеристике их чине погодним за одрживу производњу биогорива, без угрожавања прехранбене безбедности. Сировине које имају низак ILUC (*Indirect Land Use*) ризик настале су гајењем индустријског биља на маргиналном земљишту или обрадом површина које се нису користиле за биљну производњу или су биле напуштене, кроз побољшање пољопривредне праксе чиме се површине за производњу прехранбених сировина одржавају на истом нивоу [9]. Међутим, примену ових биљних врста и земљишта мање плодности, прате одређене агрономске и технолошке препреке, као што су релативно ниски приноси уља и мања ефикасност метода екстракције, што ограничава њихову економску конкурентност у

односу на традиционалне уљарице и плодна земљишта. Због тога је неопходан интегрисан и интердисциплинаран приступ у циљу идентификације најпогоднијих сировина, при чему треба узети у обзир еколошке, економске и друштвене аспекте одрживости производње биодизела. Европска биоэкономија хитно тражи нове одрживе и домаће сировине које могу да се користе за различите намене – и у прехранбене и у непрехрамбене сврхе. Савремене европске еколошке и пољопривредне политике подстичу избор биљних врста које имају низак угљенични отисак, позитивно утичу на биодиверзитет и доносе задовољавајуће приходе пољопривредницима. Ова сложена ситуација додатно је отежана ефектима климатских промена које снажно и негативно утичу на многе важне европске ратарске усеве.

У том контексту започет је пројекат CARINA („CARinata и CamellINA за унапређење одрживе диверзификације у пољопривредним системима ЕУ“) који је финансиран у оквиру програма Horizon Europe. Пројекат одговара на изазове увођењем две иновативне уљане врсте из породице купусњача: абисинска слачица (и ланика, које су идентификоване као прилагођене различитим педоклиматским условима широм Европе. Пројекат MIDAS (Употреба маргиналних земљишта за одрживо гајење индустријских биљака и развој иновативних биопроизвода) има за циљ да искористи потенцијал маргиналних пољопривредних земљишта за одрживо гајење индустријских врста и развој иновативних производа на биолошкој основи. Пројекат укључује идентификацију и картографисање постојећих и будућих маргиналних површина које могу добити сертификат за ниски индиректни утицај промене намене земљишта (low-ILUC), уз процене ерозије земљишта, водног стреса, ограничења и потенцијала заштите биодиверзитета, као и услуга екосистема. Овим се подржава доношење информисаних одлука о производњи биомасе на недовољно искоришћеним земљиштима. Изабране индустријске биљне врсте, прилагођене маргиналним условима гајења, унапређују се савременим биотехнолошким методама и прилагођеним агротехничким праксама, са посебним фокусом на ефикасније коришћење воде и одрживост ресурса. Иновативни модели пољопривредне производње, попут мешовите сетве (intercropping) и агрошумарства (agroforestry), тестирају се кроз студије случаја на фармама, како би се развила практична решења за жетву биомасе и унапређење биодиверзитета.

Све већи значај има и коришћење загађених земљишта за производњу сировина за добијање горива. Зеремски и сарадници [10] у свом раду анализирају могућност коришћења врста из породице *Brassicaceae* у поступку фиторемедијације. Врсте из породице *Brassicaceae* представљају значајну групу уљарица које дају важан допринос привреди многих земаља широм света. Оне заузимају велики удео у производњи уља, као и у све више

заступљеној индустрији биогорива. Биодизел добијен на овај начин, може се користити у стандардним дизел моторима.

Један од кључних проблема при коришћењу биомасе са фиторемедијационих локација за производњу биодизела јесте могућност преноса тешких метала из биљака у уље. Утврђено је да *Brassica napus* са загађених индустријских подручја може да садржи повећане количине олова, бакра и кадмијума у уљу. Ипак, више од половине метала остаје у чврстим остацима након екстракције, што указује на могућност еколошки прихватљиве производње биодизела из такве биомасе. Такође, примена суперкритичног метанола, без катализатора, као енергетски ефикаснији метод, даје виши принос и мање отпада и омогућава бржу реакцију и једноставније пречишћавање финалног производа. Међутим, питање преноса метала у биодизел и њиховог присуства у издуним гасовима захтева додатна и детаљнија истраживања.

5. Квалитет уља и перспективе оплемењивања

Кључни параметар за производњу квалитетног биодизела је састав масних киселина у полазној сировини. Идеални профил има низак садржај засићених масних киселина, нарочито палмитинске, и полинезасићених масних киселина, и висок удео мононезасићених масних киселина, као што је олеинска киселина. Уље уљане репице садржи висок удео олеинске киселине и низак удео полинезасићених масних киселина, што доприноси бољој оксидативној стабилности и перформансама на ниским температурама [1,6]. Оплемењивање уљаних врста са циљем побољшања ових параметара је од изузетног значаја за успешну производњу квалитних сировина за индустрију биодизела. Оплемењивачки програми у Р. Србији већ су развили сортимент прилагођен оваквим захтевима, посебно код врста као што су уљана репица и ланик. Варијабилност биљних генетичких ресурса омогућава стварање нових сорти побољшаног квалитета и отпорности на болести и стресне услове. У Институту за ратарство и повртарство оплемењивање уљаних врста има традицију дугу 50 година. Резултат је збирка од 7000 линија сунцокрета, као и колекција дивљих сродника сунцокрета, затим колекције генетичких ресурса уљане репице, бундева и још 24 алтернативне уљане врсте. Познавање генетске разноврсности кључно је за ефикасно коришћење ових ресурса [11]. Институт за ратарство и повртарство регистровао је сорте које су адаптиране за специфичне услове гајења и могу се применити у производњи биогорива. Додатно побољшање процеса прераде, укључујући ефективну трансестерификацију и чишћење, доприноси већој искористивости и економичности производње [5].

6. Одрживост и економски аспекти

Гајење уљаних врста за производњу биодизела мора бити усклађено са принципима одрживости, очувањем плодности земљишта, микробиолошке активности и његове структуре, смањењем употребе пестицида и побољшањем биодиверзитета. Уљане врсте као што су ланик, конопља и тикве имају мање захтеве према ресурсима неопходним за производњу и могу се успешно гајити у ротацији са другим биљним врстама, карактеристичним за ратарску производњу у Р. Србији [5,6]. Диверзификација усева и увођење нових врста смањују ризике и зависност од увоза енергената. Развој биорафинерија и валоризација нуспроизвода (нпр. Протеински оброци, глицерин) повећавају профитабилност и доприносе кружној привреди [2]. Ипак, економска исплативост производње биодизела често је ограничена високим трошковима, нарочито у случајевима када се као сировина користе биљне врсте намењене људској исхрани. Употреба јестивих уља у ове сврхе може довести до конкуренције са производњом хране, чиме се повећава ризик од раста цена основних животних намирница. Србија је међу водећим европским произвођачима соје и сунцокрета, са изразито повољним агроеколошким условима за узгој и других уљаних биљних врста. Имајући у виду да трошкови набавке сировина могу чинити и до 95% укупних трошкова производње биодизела, овај процес остаје скупљи у односу на производњу горива фосилног порекла. Стога се у последње време посебна пажња усмерава ка употреби нејестивих уљаних биљних врста као алтернативних и исплативијих извора уља за производњу биодизела. Поред тога, располаже дугом традицијом у оплемењивању, снажним прерађивачким сектором, стручним кадром, развијеном инфраструктуром и ефикасним системом државне регулативе у области семенарства. Ипак, потенцијали које Србија поседује у развоју сорти, производњи семена и гајењу уљарских култура још увек нису у довољној мери искоришћени. Едукацијом произвођача и даљим побољшањем сортимента, технологије и механизације, у Србији се може очекивати повећање површина под уљаним врстама и сигурности производње.

7. Закључак

Република Србија располаже значајним потенцијалом за одрживу производњу биодизела из домаћих биљних уља. Осим сунцокрета, соје и уљане репице, уљане биљне врсте као што су ланик, рицинус и шафраника представљају вредну алтернативу, нарочито за коришћење маргиналног земљишта. Унапређење оплемењивања, развој и примена одговарајућих технологија производње, подршка инфраструктури и усаглашавање са европским регулативама, од кључне су важности за развој

одрживе индустрије биодизела у Србији. Увођењем иновативних пољопривредних пракси, могуће је обезбедити енергетску сигурност, економску оправданост и еколошку одрживост производње.

Захвалница

Рад је део активности аутора на програмима Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије 451-03-136/2025-03/200032 и 451-03-137/2025-03/200117. Додатна финансијска подршка је обезбеђена пројектима Европске комисије CARINA (101081839) и MIDAS (101082070), као и Покрајинског секретаријата за високо образовање и научноистраживачку делатност АП Војводине (003073815 2024 09418 003 000 000 001 04 003).

Литература

1. N. Đurišić-Mladenović, F. Kiss, B. Škrbić, M. Tomić, R. Mičić, Z. Predojević, *Renew. Sust. Energy Rev.* 81 (2018) 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.059>
2. F. Kiss, N. Đurišić-Mladenović, M. Tomić, A. Marjanović-Jeromela, *Contem. Agric.* 73 (2024) 84-94. <https://doi.org/10.2478/contagri-2024-0011>
3. F. Kiss, M. Tomić, R. Romanić, I. Pavkov, N. Đurišić Mladenović, *Econ. Enterp.* 71 (2023) 460-471. <https://doi.org/10.5937/EKOPRE2308460K>
4. А. Марјановић-Јеромела, Д. Рајковић, Ж. Миловац, П. Митровић, А. Кондић-Шпика, Т. Зеремски, Д. Миладиновић, В. Сикора, А. Корен, С. Продановић, Ј. Миладиновић, *Зборник радова Потенцијал и ефекти коришћења биомасе у Републици Србији, 2-3.11.2022, Београд, Србија (2024), 69-76.* https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_5256
5. В. Вељковић, А. Марјановић-Јеромела, М. Костић, Д. Рајковић, О. Стаменковић, Ланик, *могућности у производњи уља и биогорива, Универзитет у Нишу, Технолошки факултет у Лесковцу (2022)* https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_3417
6. Marjanović-Jeromela, D. Rajković, A. Kondić-Špika, D. Miladinović, A. Radanović, S. Vasin, F. Franeta, Ž. Milovac, *Book of Abstracts 7th Congress of the Serbian Genetic Society, 2-5 October 2024, Zlatibor, Serbia (2024) 198-198.* https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_4936
7. А. Величковић, А. Марјановић-Јеромела, Ј. Аврамовић, Д. Рајковић, М. Крстић, Б. Кипровски, В. Вељковић, *Биодизел од рицинусовог уља - од семена до одрживе енергије, Универзитет у Приштини, Факултет техничких наука у Косовској Митровици (2024), 1-207.* https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_4992

8. Koren, V. Sikora, Ž. Milovac, P. Mitrović, D. Miladinović, S. Prodanović, A. Marjanović-Jeromela, *Altern. Crops Cultiv. Pract.* 4 (2022) 17-20. https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_3437
9. А. Марјановић-Јеромела, Ж. Миловац, Ф. Франета, Ј. Васин, С. Милић, Т. Зеремски, В. Сикора, Г. Малица, П. Митровић, С. Гвозденац, С. Васин, Б. Кипровски, Д. Рајковић, А. Кондић-Шпика, Д. Миладиновић, А. Корен, Ј. Овука, М. Крстић, В. Миклич, *Зборник резимеа радова 17. Симпозијум о заштити биља, Златибор, Србија 27-30. новембар 2023: 25-25.*
https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_4157
10. Т. Zeremski, D. Randelović, K. Jakovljević, A. Marjanović-Jeromela, S. Milić, *Plants* 10 (2021) 2340. <https://doi.org/10.3390/plants10112340>
11. Д. Миладиновић, А. Димитријевић, С. Јоцић, А. Марјановић-Јеромела, М Брдар-Јокановић, С. Цвејић, Н Хладни, В. Сикора, М. Јоцковић, С. Терзић, Ј. Овука, Б. Дедић, В. Миклич (2018). *Зборник апстраката. 6. симпозијум Секције за оплемењивање организама Друштва генетичара Србије и 9. симпозијум Друштва селекционара и семинара Републике Србије, 7–11. мај 2018, Врњачка Бања. Србија., 72–73.* https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_fiver_2333
12. В. Миклич, Ј.Овука, А. Марјановић-Јеромела, С. Терзић, С. Јоцић, С. Цвејић, Д. Миладиновић, Н. Хладни, В. Радић, Б. Остоић, М. Јоцковић, Н. Душанић, В. Ђорђевић, Ј. Миладиновић, С. Балешевић-Тубић, И. Балалић, *Селекција и семенарство*, 24(2) (2018), 1–9.
<https://doi.org/10.5937/SelSem1802001M>,
<https://fiver.ifvcns.rs/handle/123456789/1814>

POTENTIAL OF PLANT OILS AS FEEDSTOCKS FOR BIODIESEL PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Ana Marjanović Jeromela¹, Milan Tomić²

¹ Institute of Field and Vegetable Crops, Novi Sad;

² Faculty of Agriculture, University of Novi Sad, Novi Sad

The paper provides a comprehensive overview of the potential of plant oils—primarily from sunflower, rapeseed, soybean, and less cultivated species like camelina, castor, and safflower—as feedstocks for biodiesel production in the Republic of Serbia. Agroecological conditions, production capacities, and regulatory frameworks are examined, highlighting the potential use of marginal and uncultivated land. Estimates indicate that up to 353,000 ha of land could be used for this purpose without compromising food production,

enabling the potential annual production of up to 324,000 tons of biodiesel. The need for enhanced plant breeding programs, sustainable agricultural practices, and investment in biorefineries is emphasized to align with the EU's RED II directive and ensure long-term competitiveness and sustainability.

Keywords: sunflower, rapeseed, soybean, less cultivated oil crops

ОТПАДНЕ ОЛЕО-СИРОВИНЕ У ПРОИЗВОДЊИ БИОДИЗЕЛА

Наташа Ђуришић-Младеновић,¹ Милан Томић²

¹ Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад, Нови Сад

² Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет, Нови Сад

У светлу растуће енергетске нестабилности, климатских промена и потребе за смањењем емисије гасова стаклене баште, развој одрживих извора енергије постаје императив. Биогорива представљају једно од решења које дају допринос за потребе одрживог развија и смањењу проблема климатских промена. Истраживање алтернативних сировина за производњу биодизела као главног обновљивог горива за широко коришћене дизел моторе, нарочито нејестивих и отпадних уља, омогућава рационалнију употребу ресурса и доприноси смањењу утицаја на животну средину. Рад даје преглед отпадних олео-сировина, укључујући отпадна јестива уља (ОЈУ) и остале отпадне сировине на бази триглицерида, предности и недостатке њиховог коришћења. Такође, представљена је улога ових сировина у сектору саобраћаја према релевантној европској регулативи за обновљива горива. Тиме овај преглед даје свеобухватни увид у потенцијале и ограничења отпадних уља различитог порекла у производњи биодизела.

Кључне речи: биогорива, биодизел, отпадна јестива уља, алтернативне отпадне сировине

1. Увод

Према последњим европским директивама о обновљивим изворима енергије (*RED – Renewable Energy Directive*), биогорива су течни производи добијени из биомасе, намењени употреби у сектору саобраћаја. Постоје различите класификације биогорива, а подела према генерацијама заснива се на пореклу сировине: прву генерацију чине биогорива добијена од јестивих усева (на пример од кукуруза, шећерне трске, уљане репице); другу – она добијена од нејестивих и отпадних сировина (на пример, од пољопривредних остатака и отпада, биоразградивог дела комуналног отпада); трећу – биогорива добијена од алгалне биомасе; и четврту – биогорива произведена од генетички модификованих организама [1, 2]. Према технолошкој зрелости и утицају на животну средину, биогорива се деле на конвенционална и напредна [1, 2]. Конвенционална биогорива се производе у значајним количинама комерцијализованим технологијама, и то су најчешће управо биогорива прве генерације,

произведена добро развијеним процесима од јестивих култура, чиме се ове две класификације преклапају. Међутим, ова биогорива су повезана са негативним ефектима као што су конкуренција са производњом хране и индиректна промена намене земљишта (*ILUC* ефекат – *indirect land-use change*), с обзиром да услед повећане потражње за пољопривредним сировинама доводе до потребе ширења пољопривредних површина на рачун шума и других природних екосистема, што додатно повећава нето емисије угљен-диоксида, те тако коначно не доприносе решењу проблема климатских промена. Насупрот томе, напредна биогорива се добијају из нејестивих сировина, најчешће у облику биоотпада или остатака, као и алги или микроорганизама, уз знатно веће уштеде у емисији гасова са ефектом стаклене баште током животног циклуса, будући да њихова производња у великој мери не захтева додатно коришћење обрадивог земљишта, воде за наводњавање и других примарних природних ресурса. Ипак, производња ових горива још није заживела широко у индустријским размерама, иако постоје различити технолошки приступи који се налазе у различитим фазама развоја – од лабораторијског нивоа, преко пилот и демонстрационих погона, до ране индустријске примене.

Прва *RED* директива (2009/28/EC) обавезала је државе чланице Европске уније да обезбеде најмање 10% обновљивих извора у финалној потрошњи енергије у транспорту до 2020. године. Њу је заменила *RED II* директива (2018/2001), која поставља нове циљеве за 2030. годину – најмање 14% енергије у транспорту треба да потиче из обновљивих извора, уз посебан нагласак на одржива и напредна биогорива. *RED III* директива (2023/2413), донета у оквиру пакета *Fit for 55*, који представља стратегију Европске уније за постизање климатске неутралности и смањење емисија гасова стаклене баште за најмање 55% до 2030. године у односу на 1990. годину, додатно поштрава прописе: уводи обавезу смањења емисије гасова са ефектом стаклене баште у саобраћају за најмање 14,5% или алтернативно увођење најмање 29% обновљивих извора енергије у саобраћају. Поред тога, *RED III* директива ограничава улогу биогорива прве генерације и уводи обавезан допринос обновљивих горива небиолошког порекла, као што је зелени водоник. Основне разлике између *RED II* и *RED III* директиве су укратко представљене у табели 1.

RED II уводи формалну класификацију напредних биогорива преко Анекса IX, у којем су набројане различите сировине од којих се могу произвести одржива биогорива, укључујући и напредна. Део А овог

Табела 1. Поређење главних захтева *RED II* директиве из 2018. год. и *RED III* директиве из 2023. год.

	RED II	RED III
Област примене	друмски и железнички саобраћај	у односу на укупну енергију у саобраћају
Постављени циљ - учешће у датој области примене	14% обновљивих извора енергије	14,5% смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште или 29% обновљивих извора енергије
Напредна биогорива (Анекс IX, део А)	3,5% (уз примену мултипликатора)	5,5% комбиновано обе врсте биогорива са 1% RFNBO ^а минимално
Обновљива горива небиолошког порекла (RFNBO) ^а	-	
Отпадна јестива уља (Анекс IX, део Б)	1,7% максимално	1,7% максимално
Биогорива од јестивих усева	Један од два захтева (онај мањи): 7% или потрошња на нивоу 2020. увећана за 1%	Један од два захтева (онај мањи): 7% или потрошња на нивоу 2020. увећана за 1%
Мултипликатори ^б	2 - за напредна биогорива и отпадна уља (Анекс IX, део А и Б) 4 - за обновљиву електричну енергију у возилима 1,5 - за обновљиву електричну енергију у железничком саобраћају 1,2 - за авио и поморски саобраћај, осим за биогорива од јестивих усева	У односу на укупни циљ од 29% обновљиве енергије и све подгрупе за енергетску основу или постављено максимално смањење гасова са ефектом стаклене баште 2 - за напредна биогорива и отпадна уља (Анекс IX, део А и Б) 4 - за обновљиву ел.енергију у возилима 1,5 - за обновљиву електричну енергију у железничком саобраћају 1,2 - за авио и поморски саобраћај, осим за биогорива од јестивих усева

^а На енглеском *Renewable Fuels of Non-Biological Origin – RFNBO*

^б Фактор којим се множи енергетска вредност (топлотна моћ) одређене количине датог биогорива ради одређивања његовог удела у односу на постављени циљ саме директиве у сектору саобраћаја.

Анекса обухвата сировине као што су слама, дрвни отпад, канализациони муљ, сточни отпад и друге одрживе и нејестиве сировине, чијом прерадом се могу произвести напредна биогорива. Државе чланице ЕУ су у обавези да постепено повећавају њихов удео у производњи биогорива. Насупрот томе, биогорива добијена из сировина из дела Б Анекса IX, као што су коришћено јестиво уље (*UCO – used cooking oil*) познато и под називом отпадно јестиво уље (ОЈУ), и животињске масти (категорије I и II), не припадају категорији напредних биогорива, иако се ове сировине третирају као отпадне и одрживе. Поређење сировина из дела А и Б Анекса IX *RED III* директиве о обновљивим изворима енергије приказано је у табели 2.

Табела 2. Поређење сировина за производњу биогорива из Анекса IX *RED III* директиве, део А и део Б, чија се енергетска вредност може обрачунати двоструко у односу на циљеве постављене овом директивом

	Анекс IX, део А	Анекс IX, део В
Статус биогорива од ових сировина у <i>RED III</i>	Призната за двоструки обрачун енергетске вредности - напредна биогорива	Призната за двоструки обрачун енергетске вредности - не представљају напредна биогорива
Примери	Слама, влакнасти остатак од прераде шећерне трске („багас“), сточни отпад и стајњак, канализациони муљ, лигноцелулозна биомаса из пољопривреде или шумарства, целулозни материјали који нису намењени за храну, коришћено дрво (незагађено), алге које се не узгајају на пољопривредном земљишту, микроорганизми, плесни и ензими, биоразградиви део комуналног отпада, отпад из индустрије целулозе и папира	ОЈУ, масти категорије I/II
Учинак у односу на смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште	Врло висок	Умерен
Ограничење у оквиру <i>RED III</i>	Нема, чак се стимулише производња из ових сировина	Има, максимално 1,7%, додатно државе могу поставити ограничења
Типична употреба	Производња синтетичких угљоводоника, биогаса и биометана	Производња биодизела и <i>HEFA</i> ^a

^a *HEFA, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* - хидротретирани естри и масне киселине, раније често означавано у енглеској литератури као *HVO, Hydrotreated Vegetable Oils* - хидрогенована биљна уља

Дакле, законодавни оквир ЕУ подстиче употребу сировина из дела А за производњу напредних биогорива, ради постизања већег смањена емисије гасова са ефектом стаклене баште и степена одрживости у сектору саобраћаја; учешће ОЈУ и животињских масти је ограничен на 1,7% због умереног потенцијала за смањење гасова са ефектом стаклене баште (типично 75–85%), као и ризика од злоупотреба и наменског „стварања отпада“, што ће бити касније објашњено. Ипак, директива потврђује недвосмислен значај ОЈУ и животињских масти у диверзификацији сировина за производњу одрживих горива у саобраћају.

Примарна биогорива која се производе од ових сировина (ОЈУ и животињске масти) су биодизел и тзв. обновљива угљоводонична горива (обновљиви бензин, дизел и/или керозин), који се често скраћено означавају као *HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)* горива [3]. Ова горива се могу произвести од свих сировина на бази триглицерида, међу које спадају, поред ОЈУ и животињских масти, уља попут уља уљане репице, соје, алгална, итд. Анализа структуре сировина за производњу биодизела и *HEFA* горива у Европи у периоду 2015–2024. године указује на константно висок удео уљане репице као примарне сировине, иако се учешће ове сировине смањило у датом периоду са око 50% на 42%, уз повећање удела ОЈУ у истом периоду, и то од 15% до око 25% [4]. Истовремено, удео животињских масти је релативно стабилан и у опсегу 7–9% [4]. Овај тренд указује на све већу примену циркуларних сировина и имплементацију принципа одрживости у складу са директивама *RED II* и *RED III*. ОЈУ су се, дакле, наметнула као кључна алтернатива јестивим уљима у производњи биогорива, првенствено биодизела, уз позитиван утицај на смањење притиска на пољопривредне ресурсе и енергетску безбедност.

Осим у производњи горива, ОЈУ налазе примену у разним секторима: у производњи сапуна и мазива, као сировина за биолубриканте и површински активне материје, као растворљиви носач у зеленим растварачима, па чак и као подлога за ферментацију у биотехнолошким процесима. С друге стране, постоје и одређена ограничења при њиховом коришћењу. Хетерогеност у квалитету ОЈУ и различито присуство нечистоћа често захтевају додатни предtretман (филтрацију, сушење, декантовање) пре производње биогорива, првенствено биодизела, слика 1. ОЈУ се такође морају одлагати у складу са прописима, јер њихово испуштање у канализацију или животну средину доводи до озбиљног загађења животне средине. Због ризика од присуства токсичних једињења, употреба ОЈУ у производњи сточне хране забрањена је у ЕУ од 2002. године [5]. Упркос одређеним ограничењима, ОЈУ представљају значајан ресурс у производњи биодизела и других обновљивих горива и

биохемикалија, уз све већи значај у политици одрживог управљања отпадом и енергијом.

Количина ОЈУ која настаје у свакој држави зависи од навика становништва и учешћа биљних уља у исхрани, при чему су количине из угоститељског сектора оне до којих се може доћи лакше и јефтиније, него до ОЈУ из домаћинства, због постојећих система сакупљања [5,6].

2. Карактеристике ОЈУ

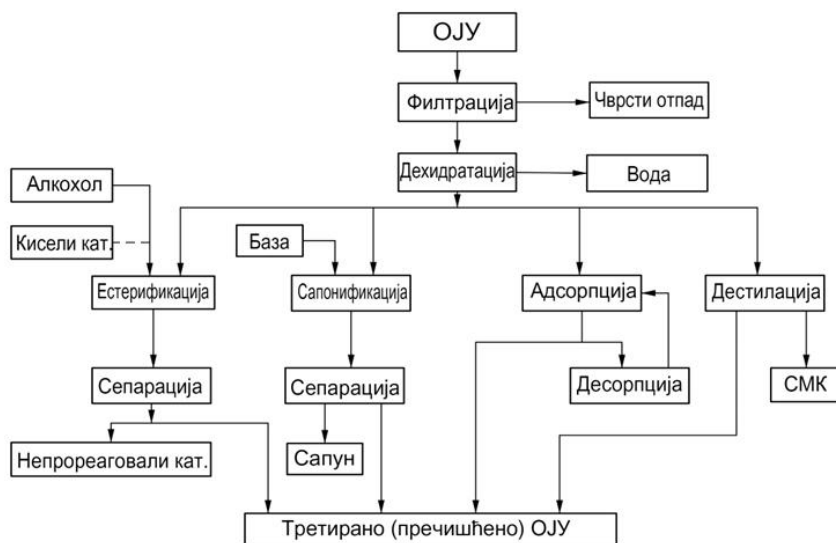
Отпадна јестива уља (ОЈУ) представљају искоришћена јестива уља која се одбацују, тј. одлажу након коришћења у фази припреме хране (најчешће пржењем или печењем) [5]. Према хемијском саставу, ОЈУ представљају смешу триглицерида, као што су то и полазна јестива уља, с тим да су карактеристике ОЈУ друкчије, због деградације првобитног састава у контакту са намирницама и водом у њима на високој температури, кроз реакције хидролизе, оксидације, полимеризације, и сл. [5]. Чак и када потичу од истог јестивог уља, ОЈУ из различитих процеса припреме хране се разликују у зависности од услова коришћења јестивих уља (на различитим температурама током различитог времена пржења различитих намирница, у различитим судовима). Углавном се разликују у вискозности, садржају слободних масних киселина (СМК), тј. Киселинском броју, садржају полимеризованих триглицерида, садржају таложне материје и укупном садржају поларних једињења (ТПМ), тачки паљења и садржају незасићених једињења, тј. јодном броју [7]. Могући начини предtretмана ОЈУ приказани су на слици 1; могу се поделити на физичке и хемијске поступке, са циљем уклањања честица, влаге и смањења садржаја СМК.

3. Могућности коришћења ОЈУ у производњи биогорива

С обзиром на хемијски састав ОЈУ, њихова конверзија у алтернативна горива се првенствено заснива на хемијским процесима, као што су трансестерификација, чији главни производ је биодизел, и хидрообрада, када се триглицериди преводе у смешу угљоводоника, који се даље могу раздвојити на оне који одговарају бензинској, керозинској и/или дизел фракцији нафте (тј. *HEFA* горива).

Биодизел представља прво комерцијализовано алтернативно гориво обновљивог порекла за дизел моторе, које се састоји од алкил (најчешће метил) естара масних киселина (*FAME* – *Fatty Acid Methyl Esters*) [6]. Биодизел се производи под благим радним условима (на ~ 64 °C и атмосферском притиску), и може се производити у широком распону постројења, од малих капацитета до оних великих индустријских сразмера [9]. Међутим, ова врста горива има одређена ограничења: нижу топлотну

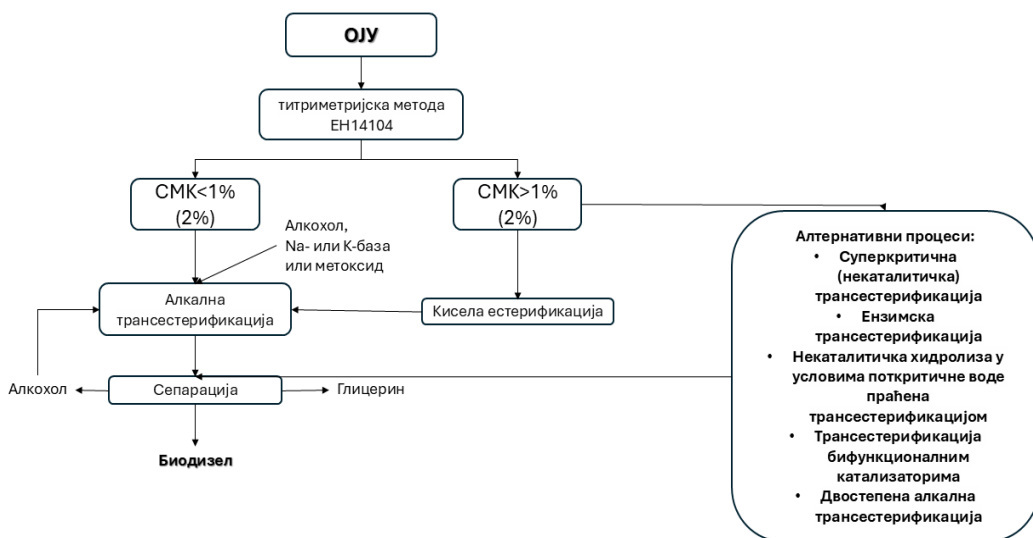
вредност у односу на фосилни дизел, лошије нискотемпературне особине и мању оксидациону стабилност, због чега се користи првенствено у виду смеша са конвенционалним дизел горивом до углавном максимално 30% [2]. Да би се ОЈУ користило као сировина за производњу биодизела, обавезан је предтретман, при чему је неопходно постићи смањење садржаја СМК испод 1–2%, тј. киселинског броја испод 2–4 mg KOH/g [10], како би се избегло стварање сапуна у случају производње биодизела применом базних катализатора и тиме смањење приноса. На слици 2 је илустрована шема могућих путева конверзије отпадних јестивих уља (ОЈУ) у биодизел у зависности од полазног садржаја СМК.



Слика 1. Илустрација могућих предтретмана ОЈУ (адаптирано из [8])

Киселинска естерификација представља најекономичнији и најчешће примењиван начин припреме сировине са повећаним садржајем СМК. То је реакција између СМК и алкохола (најчешће метанола) у присуству киселог катализатора. Кисели катализатор може да утиче и на реакцију трансестерификације триглицерида, али је знатно спорија у односу на киселинску естерификацију и базну трансестерификацију да би се економично користила у производњи биодизела [11]. У ОЈУ, након третмана киселинском естерификацијом, поред триглицерида се налазе и алкил (тј. метил) естри масних киселина; циљ естерификације је смањење садржаја СМК испод вредности које би ометале базну трансестерификацију (тј. <1–2%). Најчешће се користи сумпорна киселина као катализатор за естерификацију у процесу припреме сировине са повећаним саржајем СМК, чак и у случајевима за олео-сировине са преко 50% СМК, доводећи до смањења СМК испод нивоа од 2 mg KOH/g [11]. Проблеми при

коришћењу сумпорне киселине су следећи: неопходно је уклањање воде која настаје током естерификације, како би се спречила хидролиза и стварање сапуна у следећем кораку базне трансестерификације; регенерација употребљене киселине, корозивно дејство киселине, негативан утицај процеса на животну средину. Неки од ових проблема могу се решити применом киселих чврстих катализатора (зеолити, јоноизмењивачке смоле, хетерополикиселине, хидроталцити, на бази биоугља), с обзиром да се лако одвајају из реакционе смеше, показују малу корозивност, и прихватљивији су са аспекта заштите животне средине, али главни недостаци при њиховој употреби су деактивација нечистоћама присутним у ОЈУ (првенствено водом и једињењима фосфора) и њихова висока цена [11]. Алтернативни начини искоришћења ОЈУ са повећаним садржајем СМК, при којима није потребан корак киселинске естерификације, представљени су на слици 2.



Слика 2. Шема могућих путева конверзије отпадних јестивих уља (ОЈУ) у биодизел

С друге стране, *HEFA* горива представљају горива нове генерације, која су добијена хидротретирањем сировина на бази триглицерида у присуству водоника под високим температурама (300–600°C) и притиском до 10 МПа [2]. За разлику од биодизела, *HEFA* је смеша угљоводоника сличних онима у фосилним горивима, што омогућава потпуну компатибилност са постојећом нафтном инфраструктуром и моторима, те представља тзв. *drop-in* гориво [2,3]. Може се користити у смешама са конвенционалним горивима и то са већим уделом (до 50%, а у одређеним условима и више), и пружа топлотну вредност упоредиву са дизелом. Још

једна предност *HEFA* горива је могућност директне употребе различитих сировина, укључујући ОЈУ, без потребе за сложеним предтретманом, као што је то случај при производњи биодизела [2], што га чини погодним за примену у циркуларној економији. Ипак, за разлику од биодизела, производња овог горива је могућа само у сложеним индустријским погонима великих капацитета.

4. Сакупљање ОЈУ

Могућности искоришћења ОЈУ се разматрају у складу са расположивим количинама које се на економски прихватљив начин могу сакупити. Количина ОЈУ која настаје и она која се може сакупити на економски прихватљив начин у свакој држави зависи од навика становништва у исхрани. ОЈУ из угоститељског сектора се лакше и јефтиније сакупља, него ОЈУ из домаћинства [5,6]. У 2016. је у ЕУ сакупљено 675 000 тона ОЈУ од правних лица, и мање од 50 000 тона из домаћинства [12]. Ипак, процене говоре да око 50% ОЈУ настаје у домаћинствима, од чега се само око 7% сакупља, те је потребно развијање ефикасног система за сакупљање из домаћинства [12]. У Белгији, Холандији и Аустрији постоје добро установљени ефикасни системи за сакупљање ОЈУ из домаћинства на националном нивоу, док у Италији, Шпанији, Мађарској, Чешкој Републици, Словачкој и Грчкој постоје локалне иницијативе и пилот пројекти, који још нису прерасли у свеобухватне системе [12].

У Србији, од 2012. је забрањено бацање уља и масти из угоститељских и других објеката у којима се припрема храна; ОЈУ се у овим објектима морају сакупљати одвојено од другог отпада и предати овлашћеним оператерима који имају дозволу за сакупљање, односно третман отпадних уља. Не постоји званични централни, јавни увид у податке о прикупљеним количинама ОЈУ од увођења обавезе сакупљања ОЈУ од привредних субјеката према Правилнику о условима, начину и поступку управљања отпадним уљима (Сл. Гласник РС, 71/2010), али неке процене говоре да је у питању количина од око 5000 тона годишње [6].

Системи сакупљања ОЈУ могу бити организовани као децентрализовани или централизовани. Децентрализовани приступ, познат и као сакупљање „од врата до врата“, погодан је за објекте који генеришу велике количине ОЈУ, попут ресторана [5]. Насупрот томе, централизовани модел подразумева прикупљање мањих количина од већег броја извора, као што су домаћинства. У пракси се могу формирати различите мреже сакупљања – примарни сакупљачи прикупљају уље на месту настанка, а потом га предају секундарним сакупљачима или директно објектима за даљу прераду, на пример у производњу биодизела или других производа [5]. При избору адекватног начина сакупљања ОЈУ у једном региону,

потребно је идентификовати кључне факторе који утичу на ефикасније сакупљање ОЈУ, узимајући у обзир и што мањи утицај на животну средину изабраног модела сакупљања. Оцена животног циклуса различитих система сакупљања ОЈУ указала је на широк опсег могућих утицаја на животну средину исказаних преко емисије гасова са ефектом стаклене баште: од 7% (0,7 g емитованих гасова са ефектом стаклене баште током сакупљања у односу на укупну емисију целог процеса производње биодизела од ОЈУ од 10 g CO₂eq/MJ биодизела) до чак око 50% (8 g емитовано током сакупљања у односу на укупну емисију од 17 g CO₂eq/MJ биодизела) [13].

Иако је могуће унапредити систем сакупљања ОЈУ, укупне количине које се могу прикупити остају ограничене. Због тога се европско тржиште у великој мери ослања на увоз, пре свега палминог уља из Азије, како би се обезбедиле довољне количине неопходне за производњу биогорива у складу са захтевима актуелне *RED* директиве. Пораст тражње, као и могућност двоструког обрачуна енергетског доприноса ОЈУ, довели су до тога да његова цена премаши цену рафинисаног јестивог уља. Овај тренд је подстакао и појаву нелегалних пракси, попут мешања рафинисаних уља са ОЈУ ради вештачког повећања пријављених количина. Такве појаве указују на неопходност увођења ригорознијих механизма за праћење порекла и одрживости сировина, посебно у случајевима када се увозно палмино или сојино уље злоупотребава за такве сврхе [3].

5. Иновативни извори отпадних олео-сировина

Међу алтернативним изворима триглицерида који се могу користити за производњу биодизела, све већу пажњу истраживача привлаче отпадни материјали, као што су пољопривредни остаци, биоразградиви део комуналног отпада (првенствено остаци од хране), животињске масти и масноће прикупљене из канализационих система [14]. Главне предности коришћења ових извора су искоришћавање отпада без тржишне вредности, смањење количине органског отпада који завршава на депонијама и ублажавање негативног утицаја на животну средину. С друге стране, њихова примена у енергетске сврхе праћена је и бројним изазовима: значајне варијације у садржају уља и саставу масних киселина у зависности од порекла, потреба за додатним корацима у припреми и пречишћавању сировине пре екстракције уљне фракције – што повећава трошкове – као и честа доминација засићених масних киселина, што негативно утиче на нискотемпературна својства добијеног биодизела.

Према прегледном раду Ђуришић–Младеновић и сар. [6], одређене врсте пољопривредног отпада у Србији показују потенцијал као локални извори триглицерида због присуства уљне фракције. Конкретно, семенке

парадајза, дувана и грожђа идентификоване су као могући ресурси. На основу домаћих приноса ових култура и процењеног садржаја уља, прорачунате годишње количине потенцијалне производње биодизела износе приближно 5700 тона из семенки парадајза, 1200 тона из семена дувана и 1000 тона из семенки грожђа [6]. Ипак, применљивост ових сировина ограничена је због потребе за улагањем у адекватну инфраструктуру за сакупљање и/или предtretман, при чему су расположиве количине често значајно ниже у односу на конвенционалне изворе триглицерида.

6. Закључак

Упркос ограниченим расположивим количинама, чак и у условима високо ефикасних система сакупљања, ОЈУ представља важну сировину у производњи биогорива, пре свега због количина које стално настају, нарочито у градским срединама, релативно високе енергетске вредности и потенцијала за допринос диверзификацији извора олео-сировина. Ради ефикаснијег коришћења, неопходан је мултидисциплинарни приступ који обухвата унапређење технолошких процеса припреме и производње, уз оптимизацију инвестиционих и оперативних трошкова.

Систем сакупљања ОЈУ од правних лица, који већ постоји у Србији, може послужити као основа за развој националног модела искоришћења ове сировине у производњи биодизела, нарочито уколико се додатно унапреди и прошири на ОЈУ из домаћинства. У поређењу са другим отпадним материјалима, ОЈУ показује највећи реални потенцијал за коришћење у енергетске сврхе. Његова адекватна употреба доприноси не само енергетској ефикасности, већ и смањењу негативних еколошких утицаја који проистичу из неадекватног одлагања ове врсте отпада.

Захвалница

Рад је део активности аутора на Програмима Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије 451-03-137/2025-03/200134 и 451-03-137/2025-03/200117.

Литература

1. Н. Ђуришић–Младеновић, З. Предојевић, Б. Шкрбић, Хемијска индустрија 70 (2016) 225–241. doi: 10.2298/HEMIND150311029D
2. Н. Ђуришић–Младеновић, З. Предојевић, Алтернативна горива, Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад, Нови Сад, 2021.
3. Н. Ђуришић–Младеновић, М. Томић, Ф. Киш, З. Предојевић, Зборник радова са научног скупа одржаног 2. и 3. новембра 2022. Потенцијал и ефекти коришћења биомасе у Републици Србији,

- уредник В. Вељковић, Српска академија наука и уметности, Београд, Србија (2024), 77–87.
4. B. Flach, S. Lieberz, S. Bolla, *Biofuels Annual/EU. Report E42024/0024*, US Department of Agriculture, GAIN - Global Agricultural Information Network.
https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_E42024-0024.pdf
 5. J. Радуловић, Ф. Киш, М. Томић, Н. Ђуришић-Младеновић, Хемијски преглед 62 (2021) 86–94.
 6. N. Ђуришић-Младеновић, F. Kiss, B. Škrbić, M. Tomić, R. Mičić, Zlatica Predojević, *Renew. Sust. Energy Rev.* 81 (2018) 280–291.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.059>
 7. H. Sanli, M. Canakci, E. Alptekin E. Characterization of waste frying oils obtained from different facilities. *World Renew. Energy Congr.*, Linkoping, Sweden (2011), pp. 479–485.
 8. G.L. Maddikeri, A.B. Pandit, P.R. Gogate, *Ind. Eng. Chem. Res.* 51 (2012) 14610–14628. <https://doi.org/10.1021/ie301675j>
 9. F. Kiss, M. Tomić, R. Romanić, I. Pavkov, N. Ђуришић-Младеновић, *Ekonomika preduzeća* 71 (2023) 460–471.
<https://doi.org/10.5937/EKOPRE2308460K>
 10. Z.J. Predojevic. *Fuel* 87 (2008) 3522–3528.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.07.003>
 11. Н. Ђуришић-Младеновић, З. Предојевић, Б. Шкрбић, *Заштита материјала* 56 (2015) 141–149.
<https://doi.org/10.5937/ZasMat1502141D>
 12. A. van Grinsven, E. van den Toorn, R. van der Veen, B. Kampman, *Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU*, CE Delft, Delft (2020). <https://cedelft.eu/publications/used-cooking-oil-uco-as-biofuel-feedstock-in-the-eu/>
 13. C. Caldeira, J. Queirós, A. Noshadravan, F. Freire F. *Resour Conserv Recycl* 112 (2016) 83–92.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.005>.
 14. Н. Ђуришић-Младеновић, *Зборник радова 34. међународног саветовања Енергетика 2018, Златибор, 27-30.03.2018*, pp. 515–521.

WASTE-BASED OLEO-FEEDSTOCKS IN BIODIESEL PRODUCTION

Nataša Đurišić–Mladenović,¹ Milan Tomić²

¹ University of Novi Sad, Faculty of Technology Novi Sad, Novi Sad

² University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Novi Sad

In the context of increasing energy instability, climate change, and the need to reduce greenhouse gas emissions, the development of sustainable energy sources has become imperative. Biofuels represent one of the solutions that contribute to sustainable development goals and the mitigation of climate change. Research into alternative feedstocks for biodiesel production as the main renewable fuel for widely used diesel engines, particularly non-edible and waste oils, enables more rational resource utilization and contributes to reduced environmental impact. This paper provides an overview of waste-based oleo-feedstocks, including used cooking oils (UCO) and other triglyceride-based waste materials, outlining the advantages and limitations of their use. In addition, the role of these feedstocks in the transport sector is presented in the context of relevant European renewable fuel regulations. As such, this review offers a comprehensive insight into the potentials and constraints of various types of waste oils for biodiesel production.

Keywords: biofuels, biodiesel, used cooking oil, alternative waste feedstock

КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА И МОГУЋНОСТИ УНАПРЕЂЕЊА ТЕХНОЛОГИЈА БИОДИЗЕЛА

Влада Б. Вељковић

Српска академија наука и уметности, Огранак САНУ у Нишу,
Кнеза Михаила 35, Београд

Биодизел је, по хемијском саставу, смеша алкил-естара виших масних киселина добијених трансестерификацијом триацилглицерола или естерификацијом слободних масних киселина биљних уља или животињских масти и алкохола. Конвенционално, биодизел се добија метанолизом јестивих биљних уља у присуству хомогеног базног катализатора, јер се овим процесом постиже висок принос алкил-естара под благим реакционим условима. Међутим, велике проблеме стварају коришћење сировина са високим садржајем слободних масних киселина и воде и уклањање катализатора испирањем великом количином воде. Стога се пажња окреће на употребу хетерогених катализатора којима се значајно поједностављује процес одвајања и пречишћавања производа, смањују еколошки проблеми, омогућава поновна употреба катализатора и доприноси позитивном економском ефекту. Очекује се да ће процес катализован ензимима (назван „зелени процес“) бити широко коришћен у будућности. Да би се побољшао процес производње биодизела, коришћене су различите методе интензивирања процеса, као што су ултразвучно и микроталасно зрачење, хидродинамичка кавитација, додавање ко-растварача и примена суперкритичних флуида. Међу могућностима унапређења процеса производње биодизела су и коришћење јефтиних сировина, ефикаснијих катализатора и нових типова реактора. Примери унапређења производње биодизела, засновани на сопственим истраживањима, укључују интензивирање хомогено катализованог процеса у реакторима са вибрационом мешалицом и јефтиних катализатора из природног или отпадног материјала (негашени и гашени креч и карботациони муљ).

Кључне речи: биодизел, естерификација, реактор са вибрационом мешалицом, трансестерификација, хетерогени катализатор.

1. Увод

Научна и стручна јавност већ годинама упозорава на исцрпљивање извора фосилних енергената, као и на ризике који произилазе из зависности

многих земаља од земаља које доминирају производњом и дистрибуцијом ових енергетских ресурса [1]. Истовремено, законодавне регулације на глобалном нивоу обавезују да се значајан део традиционалних енергетских извора замени обновљивим изворима у блиској будућности. Обновљиви извори енергије, посебно биогорива, представљају обећавајућу алтернативу фосилним горивима и имају велики потенцијал за њихову замену.

Биодизел, као еколошки прихватљива алтернатива дизел гориву, доприноси смањењу емисије гасова са ефектом стаклене баште. То је смеша алкил-естара виших масних киселина и нижих алкохола, добијена трансестерификацијом биљних уља или животињских масти са алкохолима уз катализатор. Може се користити самостално или у мешавини са фосилним дизелом, чиме се обезбеђује висока ефикасност уз минималне модификације мотора.

У раду су анализиране основне технологије производње биодизела и могућности њиховог унапређења, укључујући хемијске, ензимске и некатализоване трансестерификације. Унапређења се односе на употребу јефтинијих сировина, напредних катализатора и развој реактора и процеса. На крају, примери сопствених истраживања указују на значај примене реактора са вибрационом мешалицом и јефтиних катализатора из отпадних материјала (негашени и гашени креч, карботациони муљ) за одрживу производњу.

2. Основне технологије биодизела

Технологије производње биодизела деле се на катализоване (хомогене и хетерогене) и некатализоване реакције трансестерификације и естерификације. Катализатори могу бити кисели или базни, док хетерогени укључују и биолошке катализаторе попут ензима и микробних ћелија. Некатализоване реакције захтевају високе температуре и притиске, често изнад критичних услова алкохола. Предности и мане технологија приказане су у табели 1.

2.1. Хомогено катализована трансестерификација

Хомогени базни катализатори, попут хидроксида и метоксида калијума и натријума, брзо катализују трансестерификацију у умереним условима и мање су корозивни од киселих [2]. Међутим, нису погодни за сировине са високим садржајем слободних масних киселина и воде, због чега се користе двостепени процеси који укључују киселу естерификацију и базну алкохолизу. Њихова неутрализација и уклањање захтевају додатне кораке, попут прања [3]. Предности и недостаци катализатора су приказани у табели 2.

Табела 1 Упоредна анализа технологија производње биодизела

Параметар	Хомогена		Хетерогена (СаО)	Ензимска	Некатализована
	Базна	Кисела			
Реакциони услови	0,1 МРа 60–70 °С	0,1 МРа 55–80 °С	0,1–24 МРа 60–252 °С	0,1 МРа 30–50 °С	>8,09 МРа, >239,4 °С
Слободне масне киселине у сировини	Сапуни	Естри	Зависи од реакционих услова	Естри	Естри
Вода у сировини	Омета реакцију	Омета реакцију	До одређене количине позитивно утиче на принос	Зависи од врсте и облика липазе и присуства растварача	Нема утицај
Количина метанола	У вишку	У вишку	У вишку	У стехиометријском односу	У великом вишку
Принос естара	Висок	Висок	Висок	Висок	Висок
Издавање глицерола	Тешко	Тешко	Лако	Лако	Лако
Пречишћавање естара	Вишеструко испирање	Вишеструко испирање	Лако	Непотребно	Непотребно
Цена катализатора	Ниска	Ниска	Ниска	Релативно висока	-
Трајање реакције	1–4 h	1–8 h	0,1–3 h	>10 h	2–4 min

Табела 2 Предности и недостаци киселих и базних хомогених катализатора

Врста	Предности	Недостаци
Базе	Умерени реакциони услови Велика брзина реакције Релативно кратко време реакције Мање корозивни од киселих Алкохол у мањој количини Много мања улагања у индустријско постројење	Осетљивост на присуство слободних масних киселина и воде
Киселине	Добијања биодизела из уљних сировина са високим садржајем слободних масних киселина	Осетљивост на присуство воде Настајање нежељених секундарних производа

Лургијева технологија, примењена у „Victoria Oil“ у Шиду, најчешће је коришћени комерцијални поступак трансестерификације са хомогеним базним катализатором [4]. Поступак укључује два реактора са мешалицама и два гравитациона сепаратора. Уз натријум-метоксид као катализатор, реакција се изводи на атмосферском притиску, при 60 °С у првом и

45 °C у другом реактору, постижући висок принос метил-естара (>96,5%) уз ниске производне трошкове.

2.2. Хетерогено катализована трансестерификација

Немогућност рециклирања хомогених катализатора и сложено пречишћавање биодизела подстакли су развој хетерогених катализатора. Они су нерастворни у реакционој смеши, омогућавају једноставније издвајање производа, смањују загађење, и могу се поновно користити. Хетерогена катализа производи квалитетнији биодизел и глицерол, уз смањење трошкова захваљујући једноставнијем процесу [4].

Естерфип-Х процес, који је развио Француски институт за нафту, користи чврсти катализатор (мешавина оксида Zn и Al) [5]. Постројење има два реактора са непокретним слојем катализатора, где се реакција одвија на 200 °C и 40–50 bar, уз сепарацију глицерола након сваког реактора. Биодизел из другог реактора садржи 98,3% метил-естара, са укупним приносом од 99% [4].

2.3. Биолошки катализована трансестерификација

Биолошки катализатори су ензими (липазе) и целе микробне ћелије. Ензими се користе слободно суспендовани или имобилизовани на носачу, док микробне ћелије садрже интраћелијске липазе [6]. У последње време, користе се генетски модификовани микроорганизми, тзв. интелигентни квасци.

Ензими као катализатори трансестерификације омогућавају умерене услове реакције, низак молски однос метанол/уље, једноставно пречишћавање, минималне отпадне воде и истовремену трансестерификацију и естерификацију [7]. Међутим, њихови недостаци су инхибиција метанолом, ниска брзина реакције, висока цена и потреба за контролом услова. Проблеми са метанолом могу се решити ступњевитим додавањем, употребом органских растварача или алтернативних ацил акцептора попут етил-ацетата [6]. Иако су тренутно ограничени високом ценом и спорим процесом, имобилизовани ензими пружају стабилност и могућност поновне употребе, што их чини перспективним за комерцијалну производњу биодизела [8].

Иако су ензимски катализатори скупи, више компанија успешно је имплементирало индустријске поступке производње биодизела. Примери укључују Lvming Co. Ltd. и Hainabaichuan Co. Ltd. из Кине [9], Piedmont Biofuel из САД [10], као и Purolite, Sunho Biodiesel Corporation и Transbiodiesel [11]. Lvming Co. Ltd. у Шангају користи технологију Универзитета у Пекингу за производњу биодизела у шаржном реактору са имобилизованом липазом *Candida* sp. 99–125, постижући принос од 90%

[9]. Hainabaichuan Co. Ltd. користи комерцијалну липазу Novozyme 435 у процесу развијеном на Универзитету Тсингхуа. Piedmont Biofuel је развио континуалну технологију FАeSTER за сировине са до 100% слободних масних киселина [10].

2.4. Некатализована трансестерификација

Некатализоване реакције трансестерификације, које се обично изводе у суперкритичним условима уз употребу метанола или етанола, одликују се високим реакционим брзинама, лаким одвајањем производа и одсуством сапонификације, чиме се избегавају додатни кораци пречишћавања естара и отпадних токова [12]. Овај процес омогућава употребу сировина које садрже слободне масне киселине и воду, без потребе за претходном обрадом. Реакције са критичним алкохолом захтевају високе оперативне услове – температуре у распону од 280 до 400 °С и притиске од 10 до 30 МРа, али се завршавају у веома кратком времену од свега два минута. Такође, неопходан је висок молски однос метанол/уље (до 42–52:1), што доводи до значајне потрошње енергије, посебно током рекулерације метанола, и високих трошкова процеса [13,14]. Због ових захтева, неопходно је пажљиво пројектовати и оптимизовати процес како би се осигурала његова економска и енергетска одрживост.

3. Могућности унапређења производње биодизела

Технологије производње биодизела напредују, али су потребна даља унапређења ради веће ефикасности, смањења трошкова и еколошке одрживости. Кључни правци иновација укључују оптимизацију сировина, развој катализатора, унапређење процеса, побољшање квалитета биодизела, повећање размера производње, смањење утицаја на животну средину и интеграцију тржишта.

3.1. Коришћење „напреднијих“ сировина

Биодизел се може сврстати у све четири генерације биогорива у зависности од врсте сировине. Разлике у биодизелу различитих генерација произилазе из врсте сировина, док је хемијски састав углавном исти. Предности и недостаци биодизела различите генерације дате су у табели 3. За конкурентну цену биодизела, кључна су разматрања врсте и доступности сировине, као и метода производње [15,16], при чему цена сировине највише утиче на цену производње [17].

Табела 3 Предности и недостаци биодизела различите генерације [30]

Генерација	Сировина	Предности	Недостаци
Прва	Јестива уља (сојино, репичино, сунцокретово, палмино)	Једноставна и добро успостављена технологија Једноставно повећање размере процеса Трошковано конкурентан процес	Компетиција у коришћењу за храну или гориво Ниска ефикасност коришћења земљишта Низак принос и ограничена доступност обрадивог земљишта Негативна нето енергија
Друга	Нејестива уља, отпадна уља и масти, коришћена јестива уља	Нејестиве уљарице и раст на маргиналном земљишту Еколошка одрживост Мање контроверзна Мања емисија гасова са ефектом стаклене баште	Изазови за развој индустријске производње Високи капитални трошкови Није широко расположива за примену
Трећа	Алгална уља	Висок принос биомасе Ниска улазна енергија Широко распрострањена доступност Угљеник неутрална	Ниска добијена енергија Полуиндустријски ниво, није комерцијализована
Четврта	Уља добијена напредним фотобиолошким системима који користе сунчеву енергију (вештачка фотосинтеза) Генетски модификоване алге	Има за циљ да буде угљеник негативна	Лабораторијски/развојни ниво

Биодизел прве генерације производи се од јестивих биљних уља и животињских масти, као што су соја, сунцокрет, репица, палма и кокос [2], мада се користе и друга уља, као што су шафраника, кукуруз, и пшеница [18]. Иако чине преко 95% сировина [19], њихова употреба носи изазове као што су конкуренција са производњом хране и високи трошкови, а такође не могу задовољити глобалну потражњу за дизелом [20,21].

Биодизел друге генерације производи се од нејестивих и отпадних уља, отпадних животињских масти и коришћених уља. Уљарице друге генерације расту на маргиналним земљиштима уз минималну употребу ресурса, што их чини јефтинијим од јестивих [22]. Иако постоји 26 потенцијалних усева за биодизел, висок садржај слободних масних киселина повећава трошкове [23,24]. Отпадна уља из производње уља, попут сапунице, киселог уља и деодорисаног дестилата [25,26], и коришћена јестива уља избегавају конкуренцију са производњом хране, али захтевају пречишћавање [27]. Животињске масти су јефтине нуспроизводи, али висок садржај засићених масти отежавају прераду и смањује квалитет [18,28,29].

Хетеротрофне микроалге за биодизел треће генерације представљају обећавајући извор енергије [31, 32] са високом фотосинтетском ефикасношћу, брзим растом, високим садржајем уља (до 77% биомасе) и способношћу раста на необрадивим земљиштима и отпадним водама [33, 34]. Међутим, изазови укључују високе потребе за водом и ђубривом, велике емисије гасова стаклене баште, високе трошкове енергије у преради и мању стабилност биодизела због високе незасићености липида [35]. Комерцијална производња суочава се са високим трошковима и ниском продуктивношћу [36].

Четврта генерација биодизела укључује технологије хватања и складиштења угљеника, омогућавајући „угљеник-негативан“ процес [37]. За разлику од претходних генерација, ова генерација уклања CO_2 из атмосфере, користећи генетски модификоване микроорганизме као што су алге, квасци и цијанобактерије са високим приносима и способношћу акумулације CO_2 . Ови микроорганизми се користе у фотобиолошким соларним ћелијама за производњу биомасе и липида, који се прерађују у биодизел [38]. Процес захтева велика почетна улагања, што ограничава његову широку примену [36].

Потенцијално значајне уљане сировине укључују: јефтине нејестиве уљарице (нпр. слачица, конопља), уљарице са маргиналних земљишта и без агро-мера (коровске биљке), уљарице у плодореду (озими усеви), отпадне сировине из индустрије јестивих уља, месне прераде и сокова (нпр. коштице шљиве и вишње), коришћена јестива уља и масти (нпр. отпадне масти/уља из ресторана) и уља алги.

3.2. Унапређење каталитичких система

Развој напредних катализатора је кључан за унапређење производње биодизела, омогућавајући ефикасније реакције, ниже трошкове и већу еколошку одрживост. Главни изазови су висока цена и деактивација катализатора, што захтева развој трајних и исплативих система [39]. Савремени катализатори морају бити економски приступачни, бифункционални и

стабилни на ниским температурама. Истраживања се фокусирају на хетерогене и ензимске катализаторе, као и на интеграцију паметних материјала за побољшање ефикасности и дугорочне стабилности [39, 40].

Хетерогени катализатори, као што је калцијум оксид (CaO), све више замењују хомогене катализаторе у производњи биодизела због поновне употребе и еколошке прихватљивости. CaO , добијен из природних и отпадних материјала, као што су кречњак и љуске јаја, омогућава високе приносе биодизела (95–98%) под благим условима [41]. Његова вишеструка употреба значајно смањује трошкове и отпад, чинећи га погодним за велике производне капацитете [42]. Савремени развој катализатора ослања се на отпадне природне материјале, што решава проблем отпада и смањује загађење.

Нанокатализатори, као што су ZnO и TiO_2 , побољшавају каталитичку активност и ефикасност реакције због веће специфичне површине [40]. ZnO омогућава принос биодизела од 97% на 60 °C за 3 h [43], док TiO_2 повећава конверзију стварањем реактивних врста [44]. Њихови недостаци, као што су отежано издвајање и агрегација, могу се превазићи применом наночестица као премаза или интеграцијом у реакторе с непокретним слојем [45].

Ензимски катализатори омогућавају трансестерификацију у благим условима, али висока цена остаје изазов [40]. Ензими успешно конвертују уљане сировине нижег квалитета у блажим условима (30–50 °C), уз приносе преко 95% и поједностављен процес пречишћавања [46, 47]. Имобилизација липаза побољшава стабилност ензима и економску исплативост процеса [48].

3.3. Унапређење постојећих и развој нових процеса

Производња биодизела је напредовала, подстакнута потребом за одрживим енергетским решењима и еколошком ефикасношћу. Савремене технологије уводе иновативне методе које омогућавају већи принос, нижу цену производње и коришћење различитих сировина. Напредак обухвата нове процесе, интеграцију реакционих и сепарационих система и примену концепта биорафинерија. Такође, примењују се напредне технологије као што су јонске течности, еутектички растварачи, магнетна активација, микроталаси и ултразвук, које побољшавају ефикасност и смањују еколошки утицај [40, 49]. Детаљан преглед ових нових технологија, заједно са њиховим предностима и ограничењима, приказан је у табели 4. Нови типови реактора, попут микроканалних, кавитационих и ултразвучних, доприносе бржој и ефикаснијој производњи уз смањење енергетских и оперативних трошкова [50].

Табела 4 Предности и недостаци напредних технологија (адаптирано према [49])

Техника	Предност	Недостаци
Јонске течности	Висока хемијска и термичка стабилност Подешавање структуре и својства Висока каталитичка активност Низак или занемарљив напон паре и запаљивост Мање токсични од органских растварача Течности на собној температури Могућа рециклажа	Високи трошкови синтезе Ограничења у апликацијама великих размера Неки од њих су осетљиви на влагу Не-биоразградљивост Отежано издвајање Висок вискозитет
Еутектички растварачи	Једноставна припрема Висока чистоћа Ниска цена Нема реактивности са водом Нетоксичност и биоразградљивост	Неизвесност у вези стабилности при продуженој употреби Недостатак информација о процени у целом животном циклусу
Ко-растварач (ВІОХ процес, тетрахидрофуран)	Једнофазни систем и брза реакција Температура и притисак околине Поновна употреба ко-растварача Могу се користити различите сировине	Токсичност тетрахидрофурана Тешко одвајање метанола и ко-растварача Утицај на животну средину
Магнетна	Ефикасно одвајање Убрзава производни циклус Коришћење порозних катализатора Побољшава активност Мањи пад притиска	Агломерација катализатора Захтева предорак премаза за органске катализаторе
Микроталаси	Брзо време реакције Низки молски однос уље/метанол Мање нуспроизвода Мања потрошња енергије Висок принос и чистији биодизел	Тешко повећање размере процеса Неконтролисано загревање Мала дубина продирања микроталасног зрачења

Наставак табеле 4

Техника	Предност	Недосташи
Ултразвук	Повећава брзину реакције Висок принос естара Ниска потрошња енергије	Велика количина катализатора, што повећава формирање сапуна, количину отпадне воде и трошкове процеса Заостали катализатор повећава рН биодизела
Плазма	Супер кратко време реакције Независна од катализатора Без формирања сапуна и глицерола	Тешко је контролисати механизам реакције Тешко зауставити реакцију
Електролиза	Не захтева повишену температуру Краће време реакције Мања производња отпадних вода Мали производни трошкови Присуство воде повећава принос Неосетљиво на велику количину слободних масних киселина и воде	Осетљивост на висок рН Проводљивост електролита треба стално пратити
Ензимска	Висока селективност и специфичност Вишеструка употреба ензима Еколошки прихватљив Неосетљиви на велику количину слободних масних киселина Ниски производни трошкови Висока чистоћа биодизела	Осетљивост ензима на високу температуру и денатурацију Низак принос биодизела и спора реакција Захтевају органски растварач и воду Инхибиторни ефекат глицерола
Накритична	Независно од катализатора Велика брзина реакције Без претходне обраде сировине	Скупло постројење Висока температура и притисак Висок молски однос уље/алкохол

Технологије које интегришу реакцију и сепарацију, као што су реактивна дестилација и мембрански реактори, смањују потрошњу енергије и трошкове опреме, поједностављујући процесе и побољшавајући перформансе катализатора [49]. Хибридни процеси, попут комбинације ензимске катализе с микроталасним загревањем или ултразвучним зрачењем у континуалним реакторима, унапређују ефикасност, смањују потрошњу енергије и побољшавају укупну ефикасност. Такође, интеграција соларне и енергије ветра повећава оперативну ефикасност процеса [51].

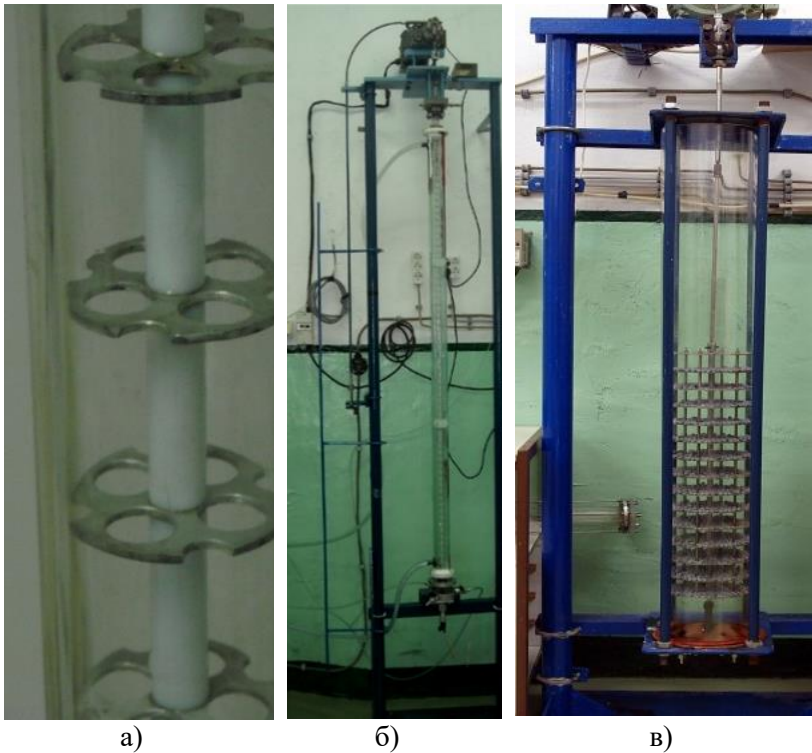
4. Примери унапређења производње биодизела

Ради унапређења производње биодизела као одрживе алтернативе фосилним горивима, истражују се различите сировине и каталитички системи ради побољшања ефикасности и економске одрживости. Четири студије упоређују процесе базно катализоване хомогене и хетерогене катализаторе. Први пример користи хомогени катализатор (KOH) у реактору са вибрационом мешалицом за узлазни ток сунцокретовог уља и метанола, док други користи хетерогени катализатор (CaO) у реактору са непокретним слојем. Последња два примера фокусирају се на шаржне процесе са калцинисаном карботационом погачом и гашеним кречом (Ca(OH)₂) за уља репице и коришћена јестива уља. Табела 4 пружа преглед сировина, катализатора, типа реактора, процесних услова, оптималних параметара, приноса и времена трајања процеса.

4.1. Интензивирање трансестерификације у континуалном реактору са вибрационом мешалицом

Континуални реактор са вибрационом мешалицом, који има перфорирание плочице на заједничком носачу који се креће кроз колону (слика 1), комбинује предности барботажног реактора и механичког мешања [52]. Овај систем обезбеђује уједначену дисипацију енергије, стабилну дисперзију малих капљица алкохола у уљу и равномерно смицајно мешање [53, 54], што омогућава високе приносе биодизела и ефикасну трансестерификацију [55]. Реактори максимизирају међуфазну површину при ниској потрошњи енергије [53], чиме се побољшава ефикасност и исплативост процеса производње биодизела из различитих сировина.

Реактори са вибрационом мешалицом истраживани су у Србији за производњу биодизела на лабораторијском и полуиндустријском нивоу [55].



Слика 1 Реактор са вибрационом мешалицом: а) изглед перфорираних плочица, б) лабораторијски реактор ($D_c = 2,5$ cm, 1,8 l/h) и в) полуиндустријски реактор ($D_c = 16$ cm, 74 l/h)

Хидродинамичка истраживања потврдила су идеално клипно струјање и могућност лаког повећања запремине реактора [53]. Континуална производња биодизела катализована калијум-хидроксидом успешно је реализована из различитих сировина (табела 5). Према Лурги концепту, постројење са два реактора и сепаратора постиже високе приносе (>96%) при ниским температурама и кратким временом боравка (12–30 min). Поступак је заштићен патентом [61].

4.2. Негашени креч као катализатор у континуалном реактору са непокретним слојем

Реактори са непокретним слојем, састављени од колоне испуњене честицама катализатора, нуде ниске трошкове, једноставан рад и лако раздвајање производа, омогућавајући добијање биодизела и глицерола високе чистоће. Истраживања су укључила сунцокретово уље (конверзија >98,5%) и отпадну свињску маст (конверзија >96,5%) уз метанол и калцинисан негашени креч (2–3,15 mm) као катализатор који је био активан 20 h [62–64]. Поступак је заштићен патентом [65].

Табела 5 Примери унапређења производње биодизела

Процес трансестерификације	Тип реактора	Геометрија реактора	Сировина	Катализатор, количина, %	Алкохол, алкохол/уље, mol/mol	Температура, °C	Време боравка, min	Принос биодизела (конверзија), %	Референтна
Континуални, хомогено базно катализовани	Реактор са вибрационом мешалицом	$D_c = 25,4 \text{ mm}$, $d_o = 6/8 \text{ mm}$, $h = 2,54 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ m}$, $A = 10 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 51\%$, $n_p = 63$	Сунцокретово уље	КОН, 1%	Метанол, 6:1	30	13	96,5	[53]
	Реактор са вибрационом мешалицом	$D_c = 25,4 \text{ mm}$, $d_o = 6/8 \text{ mm}$, $h = 2,54 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ m}$, $A = 10 \text{ mm}$, $f = 3 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 51\%$, $n_p = 63$	Сунцокретово уље	КОН, 1%	Етанол, 6:1	30–70	13	(94,3–97,3)	[56]
	Реактор са вибрационом мешалицом	$D_c = 25,4 \text{ mm}$, $d_o = 6/8 \text{ mm}$, $h = 2,54 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ m}$, $A = 10 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 51\%$, $n_p = 63$	Сунцокретово уље	КОН, 1%	Метанол, 6:1, тетрахидрофуран, 0–30%	6:1, 20	13 26	(78–84)	[57]
	Реактор са вибрационом мешалицом	$D_c = 25,4 \text{ mm}$, $d_o = 6/8 \text{ mm}$, $h = 2,54 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ m}$, $A = 10 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 51\%$, $n_p = 63$	Отпадна свињска маст	КОН, 0,5–1,0	Метанол, 4,5:1–7,5:1	60	10	(96,2) (1% КОН, 4,5:1)	[58]
	Реактор са вибрационом мешалицом (190 сфера, 8,3 mm)	$D_c = 16,6 \text{ mm}$, $d_o = 8 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ cm}$, $l = 1,53 \text{ m}$, $A = 23,5 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 46,6\%$, $n_p = 15$	Уље репице	КОН, 1%	Метанол, 6:1	30	13	(96,0–98,3)	[59]
	Реактор са вибрационом мешалицом, низ од два реактора и два сепаратора	$D_c = 25,4 \text{ mm}$, $d_o = 6/8 \text{ mm}$, $h = 2,54 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ m}$, $A = 10 \text{ mm}$, $f = 2 \text{ Hz}$, $\varepsilon = 51\%$, $n_p = 63$	Сунцокретово уље	КОН, 1%	Метанол, 6:1	30	12 30	(80), први реактор (98–100), други реактор	[60, 61]

Наставак табеле 5

Процес трансестерификације	Тип реактора	Геометрија реактора	Сировина	Катализатор, количина, %	Алкохол, уље, mol/mol	Температура, °C	Време боравка, min	Принос биодизела (конверзија), %	Референца
Континуални, хетерогено базно катализован	Реактор са непокретним слојем	$D_c = 30 \text{ mm}, l = 0,60 \text{ m}$	Сунцокретово уље	Негашени креч (2–3,15 mm)	18:1	60	60–120	(>98,5) (6:1, 0,188 kg/(kg _h , 0,40 m)	[62]
	Реактор са непокретним слојем	$D_c = 35 \text{ mm}, l = 0,44 \text{ m}$	Сунцокретово уље	Негашени креч (2–3,15 mm)	18:1	60	60–120	(98,8) (12,2:1, 120 min)	[63]
	Реактор са непокретним слојем	$D_c = 30 \text{ mm}, l = 0,50 \text{ m}$	Отпадна свињска маст	Негашени креч (2–3,15 mm)	Метанол, 6:1	60	60	(>96,5)	[64]
Шаржни, хетерогено базно катализован	Балон са магнетном мешалицом	250 ml, 900 грм	Уље репице	Карботациони муљ (<2,0×0,8 μm), 10%	Метанол, 9:1	60	60	(97,9)	[66]
	Балон са магнетном мешалицом	250 ml, 900 грм	Уље репице	Карботациони муљ (<2,0×0,5 μm), 10%	Метанол, 9:1	40–60			[67]
Шаржни, двостепени процес трансестерификација	Балон са магнетном мешалицом	250 ml, 900 грм	Коришћена јестива уља (1,8 4,5 mg KOH/g, Classic Unifrit Oil)	H ₂ SO ₄ , 2%	Метанол, 8,5:11	45	60	0,41–0,58 mg KOH/g	[68]
	2) процес трансестерификација		гашени креч (CaO), 5% Некалцини-сани креч (Ca(OH) ₂), 5% Некалцини-сани креч (Ca(OH) ₂), 5%; тристанол-амин:ментол (2:1), 10% KOH, 1%	Метанол, 6:1	60	60	120	(>99) (>94) (>97%)	
					Метанол, 6:1	60	60	(>96,5)	

4.3. Калцинирана карботациона погача као катализатор у шаржном процесу

Филтрациона погача из карботационог муља шећеране, након припреме (сушење, млевење, калцинација на 550°C), коришћена је као катализатор са садржајем преко 90% СаО [66]. Ефикасност некалциниране карботационе погаче је упоредива са нанокатализаторима и природним СаО, омогућавајући конверзију >97% у 1 h и двоструку употребу уз мали пад активности [66,67]. Биодизел од уља репице испуњава већину стандарда EN 14214. Поступак је заштићен патентом [69].

4.4. Гашени креч Са(ОН)₂ као катализатор у присуству еутектичког растварача у шаржном процесу

Отпадна јестива уља из пржења различитих намирница (помфрит, пилеће месо, свињски одресци) и метанол коришћена су за производњу биодизела уз некалцинирани гашени креч (5% масе уља) као катализатор и триетаноламин:ментол (1:2 mol/mol) као ко-растварач (10% масе уља) [68]. Реакција прати кинетику псеудо-првог реда, са конверзијом >97,5% за 40 min. Иако мање активан од КОН, гашени креч је јефтинији, лако се раздваја и може се поново користити. Уклањањем калцинације материјала смањују се трошкови процеса у односу на СаО.

5. Закључак

Будућност комерцијалне производње биодизела лежи у коришћењу економичних и одрживих сировина, као што су нејестива уља, искоришћене и отпадне масти, уз развој ефикасних и стабилних катализатора, посебно оних добијених из отпадних или природних материјала, укључујући бифункционалне катализаторе који побољшавају флексибилност процеса. Поред тога, примена напредних технологија, као што су иновативни типови реактора и интеграција процеса у биорафинерије, омогућава повећање ефикасности, смањење трошкова и минимизацију еколошког отиска, чиме се обезбеђује одрживост и конкурентност биодизела у будућности.

Захвалница

Рад је резултат пројекта Ф-78 који финансира Фонд за науку САНУ.

Литература

1. S. B. Živković, M. V. Veljković, I. B. Banković–Ilić, I. M. Krstić, S. S. Konstantinović, S. B. Ilić, J.M. Avramović, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79 (2017) 222–247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.048>.
2. I. B. Banković–Ilić, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 3621–3647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.002>.
3. I. J. Stojković, O. S. Stamenković, D. S. Povrenović, V. B. Veljković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 32 (2014) 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.005>.
4. I. Stamenković, I. Banković–Ilić, O. Stamenković, V. Veljković, D. Skala, *Hem. Ind.* 63 (2009) 1–10. <https://doi.org/10.2298/HEMIND0901001S>.
5. L. Bournay, D. Casanave, B. Delfort, G. Hillion, J. A. Chodorge, *Catal. Today* 106 (2005) 190–192. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.07.181>.
6. W. Parawira, *Crit. Rev. Biotechnol.* 29 (2009) 82–93. <https://doi.org/10.1080/07388550902823674>.
7. N. D. Ognjanović, S. D. Petrović, D. I. Bezbradica, Z. D. Knežević–Jugović, *Hem. Ind.* 64 (2010) 1–8. <https://doi.org/10.2298/HEMIND1001001O>.
8. M. Lotti, J. Pleiss, F. Valero, P. Ferrer, *Biotechnol. J.* 13 (2018) 1700155. <https://doi.org/10.1002/biot.201700155>.
9. T. Tan, J. Lu, K. Nie, L. Deng, F. Wang, *Biotechnol. Adv.* 28 (2010) 628–634. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.05.012>.
10. L. P. Christopher, K. Hemanathan, V. P. Zambare, *Appl. Energy.* 119 (2014) 497–520. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.017>.
11. R. DiCosimo, J. McAuliffe, A. J. Poulou, G. Bohlmann, *Chem. Soc. Rev.* 42 (2013) 6437–6437. <https://doi.org/10.1039/C3CS35506C>.
12. D. T. Tran, J. S. Chang, D. J. Lee, *Appl. Energy.* 185 (2017) 376–409. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.006>.
13. G. Madras, C. Kolluru, R. Kumar, *Fuel* 83 (2004) 2029–2033. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.03.014>.
14. E. F. Aransiola, T. V. Ojumu, O. O. Oyekola, T. F. Madzimbamuto, D. I. O. Ikhu–Omogbe, *Biomass Bioenergy* 61 (2014) 276–297. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>.
15. J. H. Ng, H. K. Ng, S. Gan, *Clean Technol. Environ.* 12 (2010) 213–38. <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0235-2>.
16. H. H. Mardhiah, H. C. Ong, H. H. Masjuki, S. Lim, H. V. Lee, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 1225–1236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.036>.

17. I. M. Atadashi, M. K. Aroua, A. Abdul Aziz, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 1999–2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.020>
18. M. Kumar, M. Sharma, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (2016) 1129–1138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.032>.
19. I. Lukić, Ž. Kesić, M. Zdujić, D. Skala, In: *Vegetable Oils – Properties, Uses and Benefits*, B. Holt, Ed., Nova Pbl., New York (2016), pp 83–128. https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_technorep_3173.
20. B. R. Moser, A. Williams, M. J. Haas, R. L. McCormick, *Fuel Process. Technol.* 90 (2009) 1122–1128. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.004>.
21. M. Balat, *Energy Convers. Manag.* 52 (2011) 1479–1492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>
22. M. M. Gui, K. T. Lee, S. Bhatia, *Energy* 33 (2008) 1646–1653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.06.002>.
23. M. M. Azam, A. Waris, N.M. Nahar, *Biomass Bioenergy* 29 (2005) 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.05.001>.
24. D. Y. C. Leung, X. Wu, M. K. H. Leung, *Appl. Energy* 87 (2010) 1083–1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>.
25. C. Echim, R. Verhe, W. De Greyt, C. Stevens, *Energy Environ. Sci.* 2 (2009) 1131–1141. <https://doi.org/10.1039/B905925C>.
26. R. Piloto-Rodríguez, E.A. Melo, L. Goyos-Pérez, S. Verhelst, *Braz. J. Chem. Eng.* 31 (2014) 287–301. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002763>.
27. C. D. M. de Araújo, C. C. De Andrade, E. De Souzae Silva, F. A. Dupas, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 27 (2013) 445–452. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.014>.
28. A. R. González, E. G. Gallego, *Ing. Univ.* 15 (2011) 197–218. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu15-1.vopt>.
29. M. Kumar, M. Sharma, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44 (2015) 814–823. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9485-5>.
30. K. Sudhakar, R. Mamat, M. Samykan, W.H. Azmc, W.F.W. Ishak, T. Yusaf, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91 (2018) 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.100>.
31. P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, A. Isambert, *J. Biosci. Bioeng.* 101 (2006) 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>.
32. J. Milano, H. C. Ong, H. H. Masjuki, W. T. Chong, M. K. Lam, P. K. Loh, V. Vellayan, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58 (2016) 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.150>.
33. G. Markou, E. Nerantzis, *Biotechnol. Adv.* 31 (2013) 1532–1542. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.07.011>

34. B. R. Danilović, J. M. Avramović, J. T. Ćirić, D. S. Savić, V. B. Veljković, *Hem. Ind.* 68 (2014) 213–232.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131547>.
35. W. Yee, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 32 (2016) 1–11.
[10.1007/s11274-016-2023-6](https://doi.org/10.1007/s11274-016-2023-6).
36. X.-M. Sun, L.-J. Ren, Q.-Y. Zhao, X.-J. Ji, H. Huang, *Biochim. Biophys. Acta, Mol. Cell Biol. Lipids* 1864 (2019) 552–566.
<https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2018.10.004>.
37. B. Karmakar, G. Halder, *Energy Convers. Manag.* 182 (2019) 307–339.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.066>.
38. N. Ghosh, G. Halder, *Energy Convers. Manag.* 270 (2022) 116292.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116292>.
39. A. A. Abdelrahman, M. A. Abo El-Khair, *J. Environ. Chem. Eng.* 13 (2025) 114966. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114966>.
40. R. Jayabal, *RINENG* 24 (2024) 103668.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103668>.
41. W. Kingkam, J. Maisomboon, K. Khamenkit, S. Nuchdang, K. Nilgumhang, S. Issarapanacheewin, D. Rattanaphra, *Catalysts* 14 (2024) 240. <https://doi.org/10.3390/catal14040240>.
42. A. Kathalingam, S. Hussain, P. Anbu, R. Arulmozhi, I. Sivanesan, H.S. Kim, *Nanomater.* 14 (2024) 1620. <https://doi.org/10.3390/nano14201620>.
43. A. Wang, W. Quan, H. Zhang, S. Li, Y. Song, M.J. Kim, *RSC Adv.* 11 (2021) 20465–20478. <https://doi.org/10.1039/D1RA03158A>.
44. A.A. Yusuf, I. Veza, J.D. Ampah, S. Afrane, S. Sarikoç, M.A. Mujtaba, I. Yahuza, *Process Saf. Environ. Prot.* 191 (2024) 1419–1431.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.060>.
45. S. Vellaiyan, *Biomass Convers. Bioref.* 14 (2023) 18951–18964,
<https://doi.org/10.1007/s13399-023-03989-1>.
46. A. Spanou, N.C. Liakouli, C. Fiotaki, I.V. Pavlidis, *ChemBioChem* 25 (2024) e202400514, <https://doi.org/10.1002/cbic.202400514>.
47. H. Ko, M.J. Kim, H.J. Kim, H.Y. Lee, J.H. Bae, B. H. Sung, J.H. Sohn, *J. Clean. Prod.* 428 (2023) 139336.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139336>.
48. A. Bharati, D.N. Trunov, I. Sedlářová, A. Belluati, M. Šooš, *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 667 (2023) 131362.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131362>.
49. A. A. Babadi, S. Rahmati, R. Fakhlaei, B. Barati, S. Wang, W. Doherty, K. (Ken) Ostrikov, *Biomass Bioenergy* 163 (2022) 106521.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106521>.
50. M. Agnihotri, R. Chamola, U. Bhan, S. Jain, *Energy Source Part A: Recovery Util. Environ. Eff.* 46 (2023) 872–887.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2292237>.

51. M. A. Hanif, F. Nadeem, R. Tariq, U. Rashid, In *Renewable and Alternative Energy Resources*, M.A. Hanif, F. Nadeem, R. Tariq, U. Rashid, eds., Academic Press, 2022, pp. 171–261.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818150-8.00007-1>.
52. I. Banković Ilić, V. Veljković, D. Skala, monografija, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2009.
53. I. S. Stamenković, I. B. Banković-Ilić, P. B. Jovanić, V. B. Veljković, D. U. Skala, *Fuel* 89 (2010) 3971–3984.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.026>.
54. V. B. Veljković, I. Banković-Ilić, D. Skala, *Hem. Ind.* 78 (2024) 187–203. <https://doi.org/10.2298/HEMIND230320028V>.
55. I. Banković-Ilić, M. Miladinović, V. Veljković, *Hem. Ind.* 78 (2024) 205–225. <https://doi.org/10.2298/HEMIND230630010B>.
56. I. Stamenković, O. Stamenković, Z. Todorović, I. Banković Ilić, M. Lazić, V. Veljković, D. Skala, II konferencija "Održivi razvoj i klimatske promene" SUSTAINNIS 2010, Niš, Srbija (2010), CD ROM, str. 291–295.
57. I. B. Banković-Ilić, Z. B. Todorović, J. M. Avramović, A. V. Veličković, V. B. Veljković, *Fuel Process. Technol.* 137 (2015) 339–350.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.03.023>.
58. M. R. Miladinović, I.J. Stojković, A. V. Veličković, O. S. Stamenković, I. B. Banković-Ilić, V. B. Veljković, *Chin. J. Chem. Eng.* 27 (2019) 2481–2490, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.02.019>,
59. I. Stamenković, O. Stamenković, Z. Todorović, I. Banković Ilić, M. Lazić, V. Veljković, D. Skala, II konferencija „Održivi razvoj i klimatske promene“ SUSTAINNIS 2010, Niš, Srbija (2010), CD ROM str. 180–184.
60. I. Stamenković, O. Stamenković, Z. Todorović, I. Banković Ilić, M. Lazić, V. Veljković, D. Skala, *The Proceedings of the 1st Conference of the Sustainable Development and Climate Changes*, Nis, Serbia (2008) pp. 251-255.
61. I. Stamenković, O. Stamenković, I. Banković Ilić, Z. Todorović, M. Lazić, V. Veljković, D. Skala, *RS 52398 B* (2014).
62. M. R. Miladinović, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, D. U. Skala, *Fuel* 154 (2015) 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.057>.
63. M. R. Miladinović, O. S. Stamenković, P. T. Banković, A. D. Milutinović-Nikolić, D. M. Jovanović, V. B. Veljković, *Energy Convers. Manag.* 130 (2016) 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.020>.
64. I. J. Stojković, M. R. Miladinović, O.S. Stamenković, I. B. Banković–Ilić, D. S. Povrenović, V. B. Veljković, *Fuel* 182 (2016) 454–466.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.014>.
65. O. Stamenković, M. Miladinović, V. Veljković, I. Stemenković, Z. Todorović, M. Lazić, D. Skala, *RS 53484-B* (2014).

66. J. B. Krstić, Z. B. Nježić, M. D. Kostić, B. D. Marić, O. Š. Šimurina, O. S. Stamenković, V.B. Veljković, *Process Saf. Environ. Prot.* 168 (2022) 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.021>.
67. Z. B. Nježić, M. D. Kostić, B. D. Marić, O. S. Stamenković, O. Š. Šimurina, J. Krstić, V. B. Veljković, *Fuel* 334 (2023) 126581. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126581>.
68. M. D. Kostić, A.B. Bijelić, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, *Environ. Prog. Sustain. Energy* 42 (2023) e14070. <https://doi.org/10.1002/ep.14070>.
69. З. Њежић, О. Стаменковић, М. Костић, И. Ђаловић, П. Митровић, В. Вељковић, О. Шимурина, Н. Илић, *RS* 62365 В1 (2021).

A COMPARATIVE ANALYSIS AND PATHWAYS FOR IMPROVEMENT OF BIODIESEL TECHNOLOGIES

Vlada B. Veljković

Serbian Academy of Sciences and Arts, Branch of the SASA in Niš,
Kneza Mihaila 35, Belgrade

Biodiesel is, by its chemical composition, a mixture of alkyl esters of higher fatty acids obtained by transesterification of triacylglycerols or esterification of free fatty acids of vegetable oils or animal fats and alcohols. Conventionally, biodiesel is obtained by methanolysis of edible vegetable oils in the presence of a homogeneous basic catalyst, since this process achieves a high yield of alkyl esters under mild reaction conditions. However, major problems arise from the use of oily feedstocks with high contents of free fatty acids and water and the removal of the catalyst by washing with a large amount of water. Therefore, attention is being paid to the use of heterogeneous catalysts, which significantly simplify the process of separation and purification of products, reduce environmental problems, enable the reuse of catalysts, and contribute to a positive economic effect. It is expected that the process catalyzed by enzymes (called the "green process") will be widely used in the future. To improve the biodiesel production process, various process intensification methods have been used, such as ultrasonic and microwave radiation, hydrodynamic cavitation, the addition of co-solvents, and the application of supercritical fluids. Among the possibilities for improving the biodiesel production process are the use of cheap raw materials, more efficient catalysts, and new types of reactors. Examples of improvements in biodiesel production, based on our research, include intensification of the homogeneously catalyzed process in reactors with a reciprocating plate reactor and inexpensive catalysts from natural or waste materials (quick and slaked lime and calcined waste filter cake from a sugar beet processing plant).

Keywords: biodiesel, esterification, reactor with vibrating stirrer, transesterification, heterogeneous catalyst.

КОНТИНУАЛНИ РЕАКЦИОНИ СИСТЕМИ У ПРОИЗВОДЊИ БИОДИЗЕЛА

Ивана Б. Банковић-Илић,¹ Влада Б. Вељковић²

¹ Универзитет у Нишу, Технолошки факултет у Лесковцу

² Српска академија наука и уметности, Огранак САНУ у Нишу,
Кнеза Михаила 35, Београд

Последње две деценије значајну пажњу међу истраживачима привлачи биодизел, као једна од обновљивих и еколошки прихватљивих алтернатива конвенционалним фосилним горивима. Биодизел се може мешати са конвенционалним дизелом у различитим односима, при чему се значајно може смањити емисија угљен-диоксида у атмосферу, без великих модификација мотора. Производња биодизела се може обавити у различитим реакторским системима, међутим, континуална производња, у поређењу са шаржном и полушаржном, нуди значајне предности које се превасходно односе на већу ефикасност и продуктивност, као и поуздано повећање размере. У овом раду је дат сажет преглед континуалних реактора за производњу биодизела, уз фокусирање на предностима и недостацима сваког реакторског типа. На крају рада, дата је компаративна анализа приноса биодизела, кинетике реакције трансестерификације и ефикасности конверзије у два специфична, иновативна реактора, реактору са вибрационом мешалицом и реактору са пакованим слојем. Овакав приступ нуди драгоцене увиде за оптимизацију процеса и избор реактора на основу специфичних захтева, као што су доступност сировина, кинетика реакције и економска разматрања. Ови увиди утиру пут за имплементацију одрживих и ефикасних процеса производње биодизела у будућности.

Кључне речи: трансестерификација, реактор са вибрационом мешалицом, реактор са пакованим слојем, хидродинамика, пренос масе

1. Увод

Растуће интересовање за чисте изворе енергије подстакло је истраживања у производњи биодизела, обновљиве и еколошки прихватљиве алтернативе фосилним горивима. Биодизел се производи трансестерификацијом триацилглицерола (ТАГ) или естерификацијом слободних масних киселина биљних, алгалних уља или животињских масти са

алкохолом, са или без катализатора. Фактори као што су својства сировина и катализатора, однос алкохола и уља, температура, време и интензитет мешања утичу на квалитет и принос биодизела [1]. После реакције, биодизел се одваја механичким методама, уклања се алкохол, а затим пречишћава сувим или влажним прањем. Сваки од ових корака се може имплементирати на различите начине, али посебно значајно питање је у којем типу реактора се одиграва главни корак – хемијска реакција.

Овај рад анализира различите вишефазне реакторе, истичући њихове предности и недостатке, са посебним фокусом на реакторе са вибрационом мешалицом и пакованим слојем.

2. Основни типови реактора за производњу биодизела

Тип реактора у производњи биодизела зависи од начина транспорта реактаната и може бити шаржни, континуални или полу-шаржни (полу-континуални). Шаржни реактор ради дисконтинуално, континуални омогућава непрекидни ток реакционе смеше, док полу-шаржни комбинује оба режима рада. За избор режима рада и капацитета реактора, кључно је анализирати предности и недостатке примене појединих типова (табела 1).

3. Континуални реактори за производњу биодизела

Континуални хемијски реактори за производњу биодизела могу се класификовати у пет група према начину рада, врсти мешања, оперативним условима и примени енергетских поља (табела 2) [2–4].

3.1. Цевни реактори

Цевни реактори су цилиндричне цеви са турбулентним струјањем флуида, погодни за високе притиске и мале чврсте честице у непокретном слоју. Предности укључују једноставну конструкцију, лако повећање размера, лако чишћење и уједначен квалитет производа, док изазови обухватају велики однос дужине и пречника, велики садржај дисперговане фазе и лоше мешање, што захтева пажљиво пројектовање реактора.

Осцилаторни реактори, као први подтип ове групе, са периодичним осцилаторним струјањем течне фазе ради побољшања мешања и преноса масе, показују значајне потенцијале у континуалној производњи биодизела. У њима је побољшана кинетика и пренос масе, посебно у почетној фази реакције, што их чини алтернативом конвенционалним реакторима [5–9]. Постигнути су високи приноси биодизела са различитим уљима [5, 7, 8, 10], али њихова практична и комерцијална примена још увек захтева додатна истраживања.

Табела 1 Предности и недостаци појединих типова реактора у производњи биодизела

Тип реактора	Предности	Недостаци
Шаржни	Једноставно пројектовање и рад Добро мешање реактанта Лако прилагођавање промени услова процеса и врсти сировине Лака контрола процеса Једноставан scale-up поступак Погодни за мале брзине реакција Мала подложност кваровима код реакција у више ступњева	Велика потрошња енергије Мала производност Променљив квалитет производа Велика запремина Лош пренос топлоте и масе Дуго време реакције Потребна већа количина алкохола Већи трошкови сепарације биодизела
Континуални	Добар пренос топлоте и масе Мала потрошња енергије Уједначен квалитет производа Погодност за брзе реакције и веће капацитете Добра ефикасност процеса Лака и прецизна контрола процеса Мали капитални трошкови	Комплексно пројектовање Високи трошкови аутоматизације Отежани scale-up поступак
Полу-континуални	Добар пренос топлоте и масе Велика производност Лака контрола процеса Мало расипање материјала	Велика потрошња енергије Радно интензиван процес Отежано повећање размере процеса Значајни оперативни трошкови

Табела 2 Подела континуалних реактора

Тип реактора	Подтипови
Цевни	Осцилаторни реактор Реактор са пакованим (непокретним) слојем чврсте фазе Реактор са капањем течности Реактор са флуидизованим слојем Микроканални реактор
Ротирајући	Проточни реактор са мешањем Реактор са ротирајућом цеви Реактор са ротирајућим диском
Микроталасни	-
Кавитациони	Ултразвучни реактор Хидродинамички реактор Реактор са ударним таласима
Реактор-сепаратор	Мембрански реактор Реактор за реактивну дестилацију Центрифугални контактор

Реактори са непокретним слојем укључују насумично насуте или уређено паковане чврсте честице катализатора или њихове комбинације са инертном материјом. Структура и расподела величина честица утичу на феномене преноса, међуфазну површину и међучестични простор. Чврсти катализатори омогућавају лакшу сепарацију производа, скраћују време реакције трансестерификације и продужавају употребу катализатора због споре деактивације. Међутим, недостаци укључују ситњење честица катализатора услед пада притиска, потребу за већим молским односом алкохол:уље, отежану замену слоја, контролу температуре и адсорпцију глицерола на површини катализатора, што ограничава капацитет реактора [11].

Реактори са капањем течности обезбеђују присан контакт и велику контактну површину између пакованог слоја чврсте фазе и реакционе смеше која струји наниже у облику капи или филма. Производња биодизела у овим реакторима је слабо истражена [12–14] иако су погодни због континуалног одвајања производа и пара метанола, олакшаног преноса масе, једноставног рада чак и при високим притисцима и температурама, и малих трошкова. Недостаци су могућност плављења и каналисања, лош пренос топлоте и тежа контрола параметара реакције, што отежава повећање размера. Потребан је даљи развој оптимизације перформанси, уз фокус на материјале за паковање, димензије реактора и дистрибуцију протока.

Реактори са флуидизованим слојем побољшавају контакт између чврсте и течне фазе захваљујући медијуму који узлазно протиче кроз слој чврстог катализатора довољном брзином да га суспендује. Тиме се повећава брзина и ефикасност реакције, постиже одлично мешање и пренос топлоте и масе, као и уједначена дистрибуција температуре, а могућ је рад са различитим сировинама. То је важно за производњу биодизела, чији принос, на пример, може достићи скоро 92% применом отпадног кухињског уља и ћелија *Pseudomonas mendocina* као катализатора [15]. Међутим, изазови у примени су агломерација чврсте фазе, губитак притиска, деактивација и замена катализатора и високи почетни трошкови подешавања рада [16].

Микроканални реактори, са малим каналима величине милиметра, побољшавају пренос топлоте и масе због великог односа површине и запремине, омогућавајући прецизну контролу реакције. Користе се за смањење величине реактора и потрошње улазног материјала, али се могу зачепити, запрљати и кородирати због мале запремине, па се теже одржавају и имају високу цену. Обично се не примењују на индустријском нивоу производње биодизела. Кључни параметри пројектовања су дужина и број канала, пречник млазнице и конфигурација спојева (облик Y, T, крст, цик-цак, спирала и сл.) [11]. У лабораторијској производњи биодизела,

постигнути су високи приноси (преко 95%) метанолизом различитих врста уља уз употребу хомогених или чврстих катализатора [17–21].

3.2. Ротирајући реактори

Код ротирајућих реактора, механичко мешање се постиже помоћу једног или више ротирајућих елемената (импелери, цеви, дискови итд).

Проточни реактори са мешањем, као први подтип ове групе, цилиндричне су посуде са једном или више мешалица различитих типова (турбинске, импелерне, монолитне и сл.). У циљу побољшања мешања препоручује се употреба вертикалних преграда на унутрашњем зиду реактора, посебно у великим вишефазним реакторима. Ови реактори су погодни за индустријску производњу биодизела уз примену хомогених или хетерогених катализатора због једноставне контроле температуре и стабилних услова процеса [22–24].

Реактори са ротирајућом цеву користе центрифугалну силу за побољшање преноса масе и топлоте између немешљивих течних фаза, тако што се и при малим напонима смицања у шупљем цилиндру формира танак течни филм. Велики однос површине према запремини реактора побољшава конверзију уља у биодизел [4], па су погодни за његову лабораторијску и индустријску производњу. На пример, успешно су примењени у конверзији репичиног уља са хомогеним катализатором (NaOH) (97,6% принос за 45 секунди) [25]. Такође, индустријски ротирајући цев-у-цев реактори обезбеђују високе приносе биодизела (преко 97,3%) и смањују потрошњу енергије за мешање [26, 27], а такав реактор користила је и компанија COSTELLO [28].

Реактори са ротирајућим дисковима користе динамички ротирајући диск или низ дискова у центру реакторске коморе. Струјање течног филма који се формира и распоређује по диску од центра ка периферији је идеално клипно. Контролисана брзина ротације доводи до снажног смицања и турбуленције, побољшава пренос масе и кинетику реакције, што повећава принос и смањује трошкове пречишћавања производа. Тако је метанолизом сојиног уља остварен 97% принос биодизела за 2–3 секунде уз NaOH као катализатор на 60 °C [29].

3.3. Микроталасни реактори

Примена електромагнетне енергије, попут микроталасног зрачења, представља иновативну технологију у производњи биодизела. Равномерним загревањем реакционе смеше у микроталасним реакторима побољшава се принос чистијег производа, смањује време реакције, потрошња енергије и постиже еколошка повољност у односу на конвенционалне методе [30]. Применом микроталаса постигнут је 84% и 99,5%

принос биодизела из уља соје [31] и памука [32], а комбиновањем са ултразвуком 93% принос из микроалги [33]. Поред примарне употребе за реакцију трансестерификације, микроталаси се користе и за предтретман сировина и активацију катализатора. Главни изазов у примени ових реактора је виша цена у поређењу са конвенционалним, али уштеда енергије може оправдати почетну инвестицију. Такође, прелазак на индустријску производњу може бити проблем због отежане расподеле микроталаса у већим запреминама, али развој ове технологије обећава ефикасне и одрживе процесе у будућности.

3.4. Кавитациони реактори

Кавитациони реактори користе феномен кавитације, који подразумева формирање, раст и имплозију мехурића у течности када се она изложи променама притиска. То може бити изазвано применом ултразвука, енергије струјања или снаге ударних таласа. Када мехурићи повећају величину апсорбовањем енергије до критичне вредности, они колапсирају, стварајући екстремне услове високог притиска и температуре, дисоцијацију молекула и покретање хемијских реакција. Тиме се даље повећава брзина реакције уз мању потрошњу енергије, мада имплозија мехурића може узроковати ерозију материјала и повећање трошкова одржавања реактора.

Ултразвучни реактори су засновани на примени акустичне кавитације услед промене притиска мехурића пролазом звучних таласа. Процес обухвата три фазе: претварање електричне енергије у механичку, пренос акустичне енергије у медијум и хемијску трансформацију. Ултразвучна технологија у трансестерификацији уља побољшава мешање и обезбеђује довољну енергију за покретање реакције, што смањује време реакције и потрошњу енергије у поређењу са механичким мешањем [30]. Ултразвучни реактори су успешни и у шаржном [34, 35] и континуалном [36, 37] режиму, али су други погоднији за конверзију великих количина уља [38]. Ипак, скупа опрема, потреба за хлађењем смеше и неравномерна распоређеност кавитације у запремини реактора представљају изазове при повећању обима на индустријски ниво.

Хидродинамички кавитациони реактори користе промене притиска настале изненадним варијацијама у брзини струјања течности, што утиче на стварање мехурића који експлодирају, ослобађајући енергију која повећава брзину и ефикасност трансестерификације. Могу радити на нижим притисцима и температурама па су енергетски ефикасни, а смањени су и трошкови пречишћавања производа. Иако су јефтине од ултразвучних реактора, захтевају специјализовану опрему и редовно одржавање због могућег хабања материјала. У шаржном режиму, постигнут

је 80% принос биодизела од нејестивих уља [39], а у континуалном 88% од сунцокретовог уља [40].

Реактор са ударним таласима користи ротирајући ротор са шупљинама за генерисање и контролу ударних таласа. Енергија ударних таласа повећава температуру и притисак у течности, интензивира мешање и ствара кавитационе мехуриће, што побољшава контакт између алкохола и уља, чинећи реакцију бржом и ефикаснијом а пренос масе и топлоте бољим. Предности ових реактора укључују и смањење енергетске потрошње и потребног катализатора и могућност обраде различитих сировина. Међутим, високи трошкови опреме, сложеност одржавања и хабање материјала реактора представљају недостатке овог типа технологије. Hydro Dynamics, Inc. нуди различите моделе ових реактора за континуалну производњу биодизела са капацитетом од 3 до 495 kg годишње [41].

3.5. Симултани реактор-сепаратори

Ови континуални реактори комбинују трансестерификацију и сепарацију производа у једном кораку и уређају, што повећава брзину реакције и ефикасност процеса. Због мањег броја процесних јединица, смањују се капитални и оперативни трошкови, а употреба мање хемикалија и катализатора повољно утиче на животну средину. Изазови у примени укључују потребу за стабилним и ефикасним катализатором, прецизном контролом процеса и оптимизацијом технологије за већу производњу.

Мембрански реактори, као први подтип ове групе, интегришу реакциону комору и селективно пропусну мембрану, омогућавајући истовремено одвијање хемијске реакције и сепарацију производа. Ово побољшава квалитет производа и омогућава континуално одвајање реактанта, убрзава реакцију и смањује потребу за додатним процесним јединицама. Мембране се разликују по селективности, трајности и хемијској отпорности, а могу бити полимерне (флексибилне на услове процеса), керамичке (хемијски отпорне) или композитне (комбинују предности обе). Мембране могу бити инертне или каталитичке, у зависности од улоге у процесу. Мембрански реактори могу постићи за 30% већи степен конверзије у поређењу са традиционалним проточним реакторима [11]. Различите мембране, као што су инертна керамичка од TiO_2 , каталитичка композитна од агарозе и мембрана од нетканог полипропилена, успешно су примењене у континуалним и шаржним процесима производње биодизела, са приносима од 55% до 97% [42–45]. Изазови у примени мембранских реактора укључују повећање размера, загађење мембрана и деградацију током времена, што може утицати на ефикасност.

Реактори за реактивну дестилацију интегришу реакцију трансестерификације и раздвајање производа путем дестилације у једној јединици.

Ови реактори су флексибилни и ефикасни, посебно када се користе различити извори уља и када се тачке кључања течности и притисци паре реактаната и производа разликују. Имају 6–10 пута већу производност у поређењу са другим типовима реактора [11]. У производњи биодизела побољшавају ефикасност и еколошку прихватљивост процеса, чистоћу производа, смањују употребу катализатора и трошкове [46, 47].

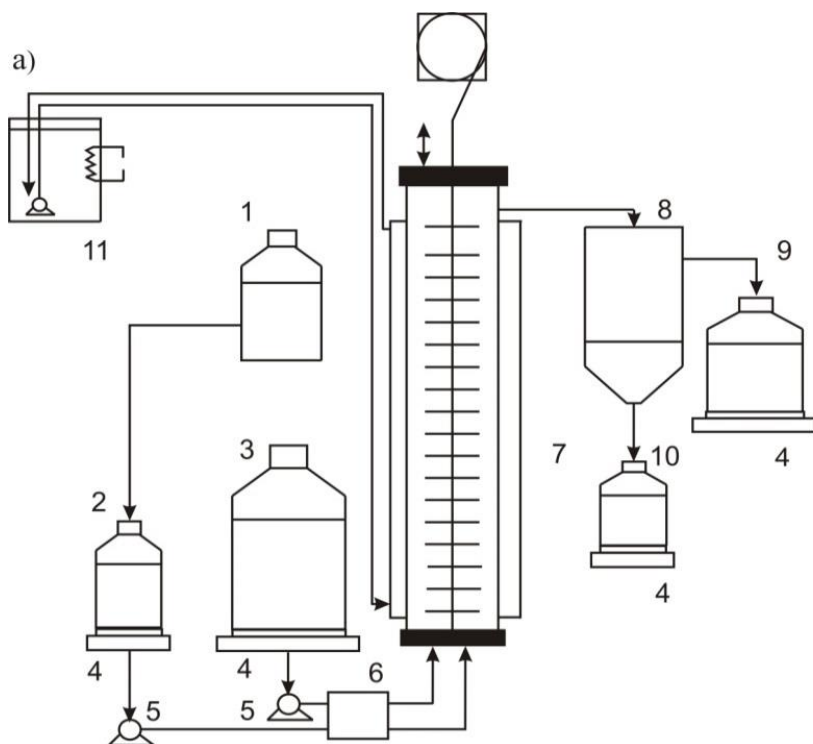
Ануларни центрифугални реактори су сепарациони уређаји који користе центрифугалну силу за раздвајање некомпатибилних течности и извођење хемијских реакција. Ови реактори омогућавају интензивно мешање и добар пренос масе, што убрзава реакције, побољшава раздвајање производа на основу густине, ефикасност процеса, смањује време реакције и трошкове енергије и сировина [4]. Применом ових реактора постигнут је висок принос биодизела [48], али у лабораторијским условима не долази до потпуне конверзије. Главни недостаци су мало време задржавања и потреба за прецизном контролом процесних параметара.

4. Иновативни реакторски системи у производњи биодизела

Унапређење производње биодизела могуће је кроз употребу нејестивих и отпадних уљаних сировина, побољшање каталитичких система и развој нових процеса и реактора [49–52]. Иновативни реактори, као што су мембрански, микроканални, микроталасни, ултразвучни и реактори са суперкритичним флуидима, реактор са вибрационом мешалицом (РВМ) и реактор са непокретним слојем (РНС) катализатора, оптимизују производњу биодизела у погледу приноса, чистоће производа и енергетске ефикасности. Овај рад фокусира се на два типа континуалних цевних реактора који побољшавају производњу биодизела.

4.1. Реактор са вибрационом мешалицом

Реактор са вибрационом мешалицом (РВМ) је вишефазни контактни реактор са малом потрошњом енергије и великом брзином преноса масе [53]. Карактерише га осцилаторно кретање вибрационог сета перфорираних плочица причвршћених за вертикални носач (слика 1), које побољшава ефикасност мешања и међуфазну површину фаза. Предности РВМ-а укључују једноставну конструкцију, смањено аксијално мешање, добру радијалну и аксијалну униформност, као и поузданије повећање размере у поређењу са другим типовима цевних реактора [54]. Убрзан пренос масе у РВМ-у побољшава ефикасност процеса у односу на конвенционалне шаржне реакторе.



Слика 1 Шема лабораторијског постројења за добијање биодизела у РВМ: 1 – посуда за припрему раствора катализатора у алкохолу, 2 – резервоар за раствор катализатора у алкохолу, 3 – резервоар за биљно уље, 4 – вага, 5 – перисталтичке пумпе за транспорт биљног уља и раствора катализатора у алкохолу, 6 – предгрејач уља и алкохола, 7 – РВМ, 8 – гравитациони сепаратор, 9 – уљно-естарски фазни резервоар, 10 – глицерол-алкохол фазни резервоар и 11 – водено купатило са рецикулацијом

Пројектовање и оптимизација континуалних РВМ за производњу биодизела захтевају разумевање хидродинамичких [55–60] и масенопреносних [61–67] карактеристика, као и кинетике реакције. У њима је могуће остварити велику конверзију ТАГ-а у естре масних киселина уз умерене услове процеса у лабораторијским и полуиндустријским размерама применом различитих уљаних сировина [68–72].

4.1.1. Хидродинамичке карактеристике РВМ

Промена притиска на дну реактора (ППДР) и снага мешања утичу на димензионисање уређаја за транспорт течности, погонског мотора и оперативне трошкове реактора, док аксијална дисперзија утиче на производност. Ови параметри зависе од конструкције реактора, радних услова, физичких особина фаза, врсте и концентрације чврстих честица и хидродинамичких услова струјања.

Истраживања примене РВМ у алкохолизацији уља за производњу биодизела су ограничена и фокусирана на хидродинамичке и масеносне карактеристике током метанолизе сунцокретовог уља уз калијум-хидроксид [70–72]. ППДР и снага мешања расту са интензитетом вибрације (производ амплитуде и фреквенције вибрације) због већих губитака услед трења, док повећање температуре и молског односа метанола и уља смањује ППДР и снагу мешања услед смањења густине и вискозности реакционе смеше.

Садржај гаса у вишефазним реакторима одређује средње време задржавања и специфичну међуфазну површину. Постоји „критични“ интензитет вибрације при којем садржај гаса достиже минимум, а затим расте до „критичне“ вредности. Садржај гаса се повећава са брзином струјања гаса до 3 cm/s, након чега остаје константан [57, 59, 60, 73]. Физичка својства течности утичу на садржај гаса – најмање је у води, а највеће у *n*-бутанолу због спречене коалесценције мехурова. У не-њутновским растворима карбоксиметилцелулозе, садржај гаса зависи од молске масе и концентрације раствора [74].

У систему метанол/сунцокретово уље у РВМ пречника 2,54 cm, садржај дисперговане фазе зависи од молског односа метанола и уља (већи је при 6:1 него 3:1), али не и од температуре [70, 72]. Амплитуда и фреквенција вибрација немају значајан утицај на садржај дисперговане фазе, али се он нелинеарно повећава са повећањем интензитета вибрације до 5 cm/s, након чега остаје скоро константан због благог смањења величине капи.

С повећањем интензитета вибрације, величина капи формираних у РВМ се смањује услед повећане снаге мешања, а смањење је израженије на већим протоцима течности због турбулентних сила [67]. Саутеров средњи пречник капи (ССПК) у нереакционим системима опада са повећањем амплитуде и фреквенције вибрација и може се корелисати са снагом мешања у горњем делу реактора [70, 72]. У реакционом систему (метанол-КОН/сунцокретово уље), ССПК је мањи него у нереакционом због стабилизације малих капи емулгаторима (сапуни, моноглицериди, диглицериди), што доводи до уже расподеле величине капи [75].

Тетрахидрофуран (ТХФ) као косолвент трансформише хетерогене системе у стабилне емулзије, при чему ССПК у оба система опада по висини реактора, посебно у доњем делу услед ситњења капи [68]. У реакционом систему, ССПК остаје константан у горњем делу реактора, где се формира хомогена дисперзија малих капи. Повећањем концентрације ТХФ, ССПК се смањује због повећане растворљивости реактанта и ситњења капи.

4.1.2. Масенопреносне карактеристике РВМ

Запремински коефицијент преноса масе (ЗКПМ) и специфична међу-фазна површина (СМП) утичу на ефикасност вишефазних реактора. ЗКПМ расте са интензитетом вибрације до максималне вредности услед повећане снаге мешања и ситњења мехурова гаса [63–65, 61, 75–77], посебно при већим интензитетима вибрације [77]. Додавање Рашигових прстенова у међупросторе између плочица повећава ЗКПМ за 30% због утицаја чврсте фазе [64]. Геометрија РВМ такође утиче на ЗКПМ – са повећањем броја плочица, ЗКПМ расте због интензивније дисипације енергије [66], док већи пречник отвора и слободна површина плочица смањују ЗКПМ услед мање снаге мешања [63, 64]. ЗКПМ се може корелисати са снагом мешања, интензитетом вибрације, брзинама гаса и течности, као и са геометријом реактора [74].

СМП зависи од флуидно-динамичких услова и својстава фаза у реактору. При малим интензитетима вибрације, СМП расте услед ситњења мехурова гаса [64] или остаје непромењена ако су величина мехура и садржај гаса константни [67, 78]. При већим интензитетима вибрације, СМП се повећава због већег садржаја гаса и мањих мехурова. Брзина струјања гаса утиче на СМП зависно од режима струјања – при малим брзинама, СМП расте са интензитетом вибрације, док при већим брзинама мехурови постају густо паковани, подстичући коалесценцију и повећање СМП због повећаног садржаја гаса [60, 64, 67, 78]. Додавање Рашигових прстенова (+30%) повећава СМП [64], док сферне куглице немају утицај [74]. Геометрија реактора такође игра улогу – већи пречник отвора и слободна површина плочица смањују СМП [64]. У РВМ пречника 2,54 cm са смешом метанола и сунцокретовог уља, СМП расте са молским односом и интензитетом вибрације услед утицаја на ССП и садржај дисперговане фазе [74].

4.1.3. Утицај оперативних услова на принос МЕМК и кинетику реакције

Истраживање метанолизе сунцокретовог уља катализоване КОН (1% масе уља) у континуалном РВМ (Ø 2,54 cm) показало је да на принос метил естара масних киселина (МЕМК) утичу амплитуда и фреквенција вибрације, температура и молски однос метанола и уља [72]. Оптимални услови (амплитуда 1 cm, фреквенција 2 Hz, температура 30 °C, молски однос 6:1, време задржавања 13 min) били су исти за једностепени и двостепени систем, а резултати су успешно пренети на полуиндустријски ниво, где је метанолиза уља репице дала 98% приноса биодизела.

При ниским концентрацијама ТХФ-а (0% и 1%), излазни принос биодизела био је 78–80%, док је при 30% ТХФ-а брзо растао због елиминације ограничења преноса масе, достигавши 84% [68]. Ово указује да је оптимално спроводити метанолизу у низу од два РВМ.

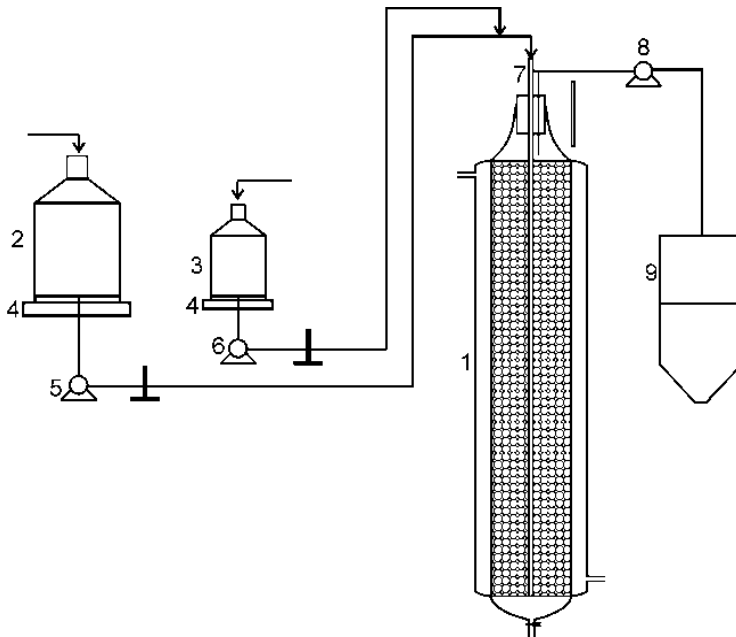
У континуалном РВМ (Ø 2,54 cm) капацитета 120 kg на дан, изведена је производња биодизела из отпадне свињске масти на 60 °С, користећи метанол и КОН [69]. Истражена је оптимизација процесних параметара (молски однос, концентрација катализатора, висина реактора) у односу на принос МЕМК, применом методологије површине одзива. Оптимални услови (катализатор 0,9% масе масти, молски однос 4,5:1, висина 192 cm, време задржавања 10 min) омогућили су принос МЕМК од 96,2%. Дефинисани су кинетички модели трансестерификације, укључујући модел псеудо првог реда и модел са променљивим механизмом и преносом масе.

4.2. Реактор са непокретним слојем

Реактор са непокретним слојем катализатора (РНС) је једноставан за пројектовање, рад и сепарацију производа, уз ниске оперативне трошкове [79]. Састоји се од колоне испуњене честицама чврстог катализатора (слика 2). Омогућава висок принос и чистоћу биодизела, бржу трансестерификацију и дужу употребу катализатора. Недостаци укључују потребу за већим молским односом алкохола и уља, сложену замену катализатора и ситњење његових честица [11].

За анализу хетерогено катализоване трансестерификације уља у РНС, кључно је испитати струјање течне фазе и пренос масе. Ови реактори при стационарном раду постижу идеално клипно протицање под одређеним условима [80], који укључују однос пречника реактора и катализатора, као и дужину слоја. На ове параметре значајно утичу брзина струјања, време задржавања, молски однос реактаната, величина честица и концентрација катализатора [11].

Пример континуалне метанолизе сунцокретовог уља у РНС висине 60 cm, катализоване живим кречом на 60 °С, показао је значајан утицај молског односа метанола и уља у распону 6:1–18:1, просторне брзине струјања смеше и висине слоја катализатора, од којих је највећи утицај имала висина слоја [81]. Оптимални услови били су 40 cm слоја, молски однос 6:1 и брзина струјања 0,188 kg/(h·kg катализатора), који су обезбедили принос МЕМК-а од 98,5% без губитка активности катализатора за 30 h рада.



Слика 2 Шема лабораторијског постројења за добијање биодизела у РНС: 1 – РНС, 2,3 – резервоари за биљно уље и алкохол, 4 – ваге, 5,6 – пумпе за транспорт реактаната, 7 – стаклена цев за увођење и термостатовање реактаната, 8 – пумпа за транспорт реакционе смеше из реактора и 9 - гравитациони сепаратор

Континуална производња биодизела у РНС са негашеним кречом оптимизована је применом методологије површине одговора и два експериментална дизајна – пуни факторијални (ФФД) и Бокс-Бенкенов (ББД) [83]. Оба су дала сличне оптималне услове: молски однос метанол/уље 12,2:1, температура 60 °С и време задржавања 2 h, уз предвиђени принос МЕМК од 99,1%, што је близу експерименталног (98,8%). ББД је захтевао три пута мање експеримената од ФФД-а, чиме је смањио трошкове и време оптимизације, па се препоручује за унапређење процеса.

4.3 Поређење РВМ и РНС у производњи биодизела

Избор између РВМ и РНС у производњи биодизела зависи од процесних услова, кинетике реакције, сировина, катализатора, могућности повећања размере и економских фактора. РВМ нуде боље мешање, пренос топлоте и масе, ефикасније коришћење катализатора и лакшу контролу реакције, док РНС захтевају мање енергије, омогућавају веће конверзије и стабилност катализатора. Економска анализа (капитални и оперативни трошкови и захтеви за одржавањем) кључна је за оптималан избор.

5. Закључак

Континуални реактори имају велики потенцијал за унапређење производње биодизела кроз побољшану продуктивност, квалитет производа и ефикасност процеса. Опште препоруке за њихов избор нису универзалне, али применом техника интензивирања процеса могу се побољшати конверзија и исплативост. Нове технологије, попут реактора са вибрационом мешалицом и непокретним слојем катализатора, нуде једноставност, флексибилност у избору сировина, економичност и еколошку одрживост. Оптимална имплементација зависи од трошкова, оптимизације процеса и даљег развоја, што захтева техно-економске анализе.

Захвалница

Рад је резултат пројеката које финансирају Министарство науке, технолошког развоја и иновација (451-03-65/2024-03/200133) и Фонд за науку САНУ (Ф-78).

Литература

1. S. B. Živković, M. V. Veljković, I. B. Banković–Plić, I. M. Krstić, S. S. Konstantinović, S. B. Ilić, J. M. Avramović, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79 (2017) 222–247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.048>
2. M. N. B. Mohiddin, Y. H. Tan, Y. X. Seow, J. Kandedo, N. M. Mubarak, M. O. Abdullah, Y. S. Chan, M. Khalid, *J. Ind. Eng. Chem.* 98 (2021) 60–81. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>
3. J. Okolie, J. I. Escobar, G. Umenweke, W. Khanday, P. U. Okoye, *Fuel* 307 (2022) 121821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121821>
4. M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, M. Dehghani, H. K. S. Panahi, A. Mollahosseini, M. Hosseini, M. M. Soufiyan, *Prog Energy Combust Sci.* 74 (2019) 239–303. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>
5. J. F. García-Martín, C. C. Barrios, F. J. Alés-Álvarez, A. Dominguez-Sáez, P. P. Alvarez-Mateos, *Renew. Energy* 125 (2018) 546–556. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.002>
6. A. T. I. M. Ghazi, M. F. M. G. Resul, R. Yunus, T. C. S. Yaw, *J. Eng. Sci. Technol.* 2 (2008) 138–145.
7. H. M. Kefas, R. Yunus, U. Rashid, Y. H. Taufiq-Yap, *J. Environ. Chem. Eng.* 7 (2019) 102993. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102993>
8. M. M. Niyas, A. Shaija, *Therm. Sci Eng Prog.* 40 (2023) 101794. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101794>
9. M. Zheng, R. L. Sketon, M. R. Mackley, *Process Saf. Environ. Protect.* 85 (2007) 365–371. <https://doi.org/10.1205/psep07030>
10. K. Highina, I. M. Bugaje, G. M. Ngala, *World J. Renew. Energ. Eng.* 1 (2014) 1–7.

<https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42698796/PERFOMANCE-libre.pdf>

11. K. A. Zahan, M. Kano, *Energy Procedia*. 156 (2019) 452–457.
<http://10.1016/j.egypro.2018.11.086>
12. W. Jindapon, S. Ruengyoo, P. Kuchonthara, C. Ngamcharussrivichai, T. Vitidsant, *Renew. Energy*. 157 (2020) 626–636.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.066>
13. Y. L. Meng, S. J. Tian, S. F. Li, B. Y. Wang, M. H. Zhang, *Bioresour. Technol.* 136 (2013) 730–734.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.081>
14. S. M. Son, K. Kusakabe, *Chem. Eng. Process.* 50 (2011) 650–654.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.04.001>
15. G. Chen, J. Liu, J. Yao, Y. Qi, B. Yan, *Energy Convers. Manag.* 138 (2017) 556–564. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.036>
16. O. Awogbemi, D. V. Von Kallon, *Bioeng.* 9 (2022) 347. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080347>
17. N. Chueluecha, A. Kaewchada, A. Jaree, *Energy Convers. Manag.* 141 (2017) 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.020>
18. Y. Natarajan, A. Nabera, S. Salike, V. D. Tamilkkuricil, S. Pandian, M. Karuppan, A. Appusamy, *Chem. Eng. Process: Process Intensif.* 136 (2019) 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.12.008>
19. H. S. Santana, D. S. Tortola, J. L. Silva Jr, O. P. Taranto, *Energy Convers. Manag.* 141 (2017) 28–39.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.089>
20. P. Sun, J. Sun, J. Yao, L. Zhang, N. Xu, *Chem. Eng. J.* 162 (2010) 364–370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.04.064>
21. A. Yamsub, A. Kaewchada, A. Jaree, *Korean J. Chem. Eng.* 31 (2014) 2170–2176. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0120-5>
22. Darnoko, M. Cheryan, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 77 (2000) 1269–1272.
<https://doi.org/10.1007/s11746-000-0199-x>
23. M. Kouzu, A. Fujimori, R. Fukakusa, N. Satomi, S. Yahagi, *Fuel Process. Technol.* 181 (2018) 311–317.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.10.008>
24. Y. Sun, J. Zhang, Z. Sun, L. Zhang, *Environ. Prog. Sustain. Energy.* 38 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1002/ep.13053>
25. H. Lodha, R. Jachuck, S. S. Singaram, *Energ Fuel.* 26 (2012) 7037–7040.
<https://doi.org/10.1021/ef301235t>
26. Y. H. Chen, Y. H. Huang, R. H. Lin, N. C. Shang, *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 668–673. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.081>
27. Y. H. Chen, Y. H. Huang, R. H. Lin, N. C. Shang, C. Y. Chang, C. C. Chang, P. C. Chiang, C. Y. Hu, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 42 (2011) 937–944. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.05.007>

28. Z. Qiu, L. Zhao, L. Weatherley, *Chem. Eng. Process.* 49 (2010) 323–330.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.03.005>
29. K. J. Chen, Y. S. Chen, *Chem. Eng. Process.* 78 (2014) 67–72.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.02.009>
30. M. K. Lam, K. T. Lee, A. R. Mohamed, *Biotechnol. Adv.* 28 (2010) 500–518
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.03.002>
31. L. R. A. Scares, A. S. Franca, L. S. Oliveira, 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), Prague, Czech Republic (2017), p. 581.
<https://doi.org/10.1109/ICMAE.2017.8038712>.
32. K. Thirugnanasambandham, V. Sivakumar, *Environ. Prog. Sustain. Energy.* 34 (2015) 1229–1235. <https://doi.org/10.1002/ep.12094>
33. G. Ma, W. Hu, W. Pei, L. Jiang, M. Song, R. Mu, *Energy Convers. Manag.* 90 (2015) 41–46.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.061>
34. J. M. Avramović, O. S. Stamenković, Z. B. Todorović, M. L. Lazić, V. B. Veljković, *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 18 (2012) 115.
<https://doi.org/10.2298/CICEQ110705053A>
35. J. M. Avramović, D. B. Radosavljević, A. V. Veličković, I. J. Stojković, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, *Zast. Mater.* 60 (2019) 70–80.
<https://doi.org/10.5937/zasmat1901070A>
36. P. R. Gogate, V. S. Sutkar, A. B. Pandit, *Chem. Eng. J.* 166 (2011) 1066–1082. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.069>
37. L. T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, H. Bandow, *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 5394–5401.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.060>
38. V. B. Veljković, J. M. Avramović, O. S. Stamenković, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 1193–1209.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.022>
39. A. Pal, A. Verma, S. Kachhwaha, S. Maji, *Renew. Energy.* 35 (2010) 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.027>
40. H. Javadikia, Y. Nosrati, M. Mostafaei, L. Naderloo, M. Tabatabaei, *J. Agric. Mach.* 7 (2017) 260–269. <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.51920>
41. <https://www.hydrodynamics.com/cavitation-technology/> [приступљено 10. априла 2024.]
42. S. Baroutian, M. K. Aroua, A. A. Raman, N. M. Sulaiman, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 1095–1102.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.076>
43. P. Cao, M. A. Dubé, A. Y. Tremblay, *Biomass Bioenergy.* 32 (2008) 1028–1036. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.020>
44. R. Hou, D. Zhang, X. Duan, X. Wang, S. Wang, Z. Sun, *RSC Adv.* 6 (2016) 81794–81801. <https://doi.org/10.1039/C6RA17118D>

45. Q. Luo, B. He, M. Liang, A. Kong, J. Li, *Fuel*. 197 (2017) 51–57.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.089>
46. N. Petchsoongsakul, K. Ngaosuwana, W. Kiatkittipong, F. Aiouache, S. Assabum-rungrat, *Energy Convers. Manag.* 153 (2017) 493–503.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.013>
47. I. Noshadi, N. Amin, R. S. Parnas, *Fuel*. 94 (2012) 156–64.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.018>
48. M. Y. Abduh, W. Van Ulden, V. Kalpoe, H. H. Van De Bovenkamp, R. Manurung, H. J. Heeres, *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 115 (2013) 123–131.
<https://doi.org/10.1002/ejlt.201200173>
49. C. Carlucci, *Catalysts*, 12 (2022) 717.
<https://doi.org/10.3390/catal12070717>
50. R. Gopi, V. Thangarasu, M. A. Vinayakaselvi, A. Ramanathan, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 154 (2022) 111869.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111869>
51. Z. Qiu, L. Zhao, L. Weatherley, *Chem. Eng. Process.* 49 (2010) 323–330.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.03.005>
52. D. T. Tran, J. S. Chang, D.J. Lee, *Appl. Energy*. 185 (2017) 376–409.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.006>
53. L. B. Nikolić, V. B. Veljković, D. U. Skala, *Hem. Ind.* 55 (2001) 249–254. <https://doi.org/10.2298/JSC0407581N>
54. T. C. Lo, J. Prochazka, in *Handbook of solvent extraction*, T. C. Lo, M. H. I. Baird, C. Hanson Eds., John Wiley & Sons, New York (1983), p. 373.
55. M. Aleksić, V. B. Veljković, I. B. Banković-Ilić, M. L. Lazić, D. U. Skala, *Hem. Ind.* 57 (2003) 107–113.
<https://doi.org/10.2298/HEMIND0210409A> (in Serbian).
56. I. Banković-Ilić, V. Veljković, D. Skala, *Hem. Ind.* 48 (1994) 397–402.
57. I. B. Banković-Ilić, V. B. Veljković, M. L. Lazić, D. U. Skala, *Chem. Eng. Commun.* 134 (1995) 17–32.
<https://doi.org/10.1080/00986449508936320>.
58. M. Hafez, M. H. I. Baird, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 56 (1978) 229–238.
59. D. U. Skala, V. B. Veljković, V. V. Janjić, M. L. Lazić, I. B. Banković-Ilić, *Can. J. Chem. Eng.* 71 (1993) 817–820.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450710521>
60. V. Veljković, D. Skala, *Can. J. Chem. Eng.* 64 (1986) 906–914.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450640604>
61. I. B. Banković-Ilić, V. B. Veljković, M. L. Lazić, D. U. Skala, *Chem. Ind.* 55 (2001) 376–382.
62. I. B. Banković-Ilić, V. B. Veljković, M. L. Lazić, D. U. Skala, *Chem. Ind.* 55 (2001) 383–388.
63. M. Lounes, J. Thibault, *Chem. Eng. Commun.* 127 (1994) 169–189.
<https://doi.org/10.1080/00986449408936231>.

64. A. Sundaresan, Y. B. G. Varma, *Can. J. Chem. Eng.* 68 (1990) 951–958.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450680610>
65. N. V. Rama Rao, M. H. I. Baird, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78 (2003) 134–137. <https://doi.org/10.1002/jctb.704>
66. D. Skala, V. Veljković, *Can. J. Chem. Eng.* 66 (1988) 192–199.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450660203>
67. V. Veljković, D. Skala, *Can. J. Chem. Eng.* 66 (1988) 200–210.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450660203>
68. I. B. Banković-Ilić, Z. B. Todorović, J. M. Avramović, A. V. Veličković, V. B. Veljković, *Fuel Process. Technol.* 137 (2015) 339–350.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.03.023>
69. M. R. Miladinović, I. J. Stojković, A. V. Veličković, O. S. Stamenković, I. B. Banković-Ilić, V. B. Veljković, *Chin. J. Chem. Eng.* 27 (2019) 2481–2490. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.02.019>
70. I. S. Stamenković, I. B. Banković-Ilić, P. B. Jovanić, V. B. Veljković, D. Skala, *Fuel* 89 (2010) 3971–3984.
<http://www.doi:10.1016/j.fuel.2010.06.026>
71. I. Stamenković, O. Stamenković, I. B. Banković-Ilić, Z. Todorović, M. Lazić, V. Veljković, D. Skala, Serbian patent RS 52398 B, 2013 (in Serbian).
72. I. Stamenković, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2014 (in Serbian).
73. N. V. Rama Rao, N. S. Srinivas, Y. B. G. Varma, *Can. J. Chem. Eng.* 61 (1983) 168–177. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450610204>
74. I. Banković-Ilić, V. Veljković, D. Skala, monografija, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2009.
75. O. S. Stamenković, M. L. Lazić, Z. B. Todorović, V. B. Veljković, D. U. Skala, *Bioresour. Technol.* 98 (2007) 2688–2699.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.024>
76. M. H. I Baird, N. V. Rama Rao, *Can. J. Chem. Eng.* 66 (1988) 222–231.
<https://doi.org/10.1002/cjce.5450660206>
77. A. Sundaresan, Y. B. G. Varma, N. S. Yang, Z.Q. Shen, B.H. Chen, A.F. McMillan, *Ind. Eng. Chem. Proc. DD.* 25 (1986) 776–780.
<https://doi.org/10.1021/i200034a031>
78. N. S. Yang, Z. Q. Shen, B.H. Chen, A. F. Mc Millan, *Ind. Eng. Chem. Proc. DD.* 25 (1986) 660–664. <https://doi.org/10.1021/i200034a011>
79. I. B. Banković-Ilić, M. R. Miladinović, V. B. Veljković, *Hem. Ind.* 78 (2024) 205–225, <https://doi.org/10.2298/HEMIND230630010B>
80. C. Perego, S. Peratello, *Catal. Today.* 52 (1999) 133–145.
81. M. R. Miladinović, O. S. Stamenković, V. B. Veljković, D. U. Skala, *Fuel.* 154 (2015) 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.057>

82. D. M. Marinković, M. R. Miladinović, J. M. Avramović, I. B. Krstić, M. V. Stanković, O. S. Stamenković, D. M. Jovanović, V. B. Veljković, *Energy Convers. Manag.* 163 (2018) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.048>
83. M. R. Miladinović, O. S. Stamenković, P. T. Banković, A. D. Milutinović, D. M. Jovanović, V. B. Veljković, *Energy Convers. Manag.* 130 (2016) 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.020>

CONTINUOUS REACTORS IN BIODIESEL PRODUCTION

Ivana B. Banković Ilić,¹ Vlada B. Veljković²

¹ University of Niš, Faculty of Technology in Leskovac

² Serbian Academy of Sciences and Arts, Branch of the SASA in Niš,
Kneza Mihaila 35, Belgrade

In the last two decades, biodiesel has attracted significant attention among researchers as one of the renewable and environmentally friendly alternatives to conventional fossil fuels. Biodiesel can be mixed with conventional diesel in various ratios, which can significantly reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere, without major engine modifications. Biodiesel production can be carried out in various reactor systems, however, continuous production, compared to batch and semi-batch, offers significant advantages related primarily to higher efficiency, productivity and scalability. This paper provides a brief overview of continuous reactors for biodiesel production, with an emphasis on the advantages and disadvantages of each type individually. At the end of the paper, a comparative analysis of biodiesel yield, transesterification reaction kinetics and conversion efficiency in two specific, innovative reactors is provided, namely a reciprocating plate reactor and a packed bed reactor. This approach offers valuable insights for process optimization and reactor selection based on specific requirements, such as feedstock availability, reaction kinetics, and economic considerations. These insights pave the way for the implementation of sustainable and efficient biodiesel production processes in the future.

Keywords: transesterification, vibrating stirrer reactor, packed bed reactor, hydrodynamics, mass transfer.

ПРИМЕНА КОСОЛВЕНАТА И ЕУТЕКТИЧКИХ РАСТВОРАЧА У ДОБИЈАЊУ БИОДИЗЕЛА

Зоран Б. Тодоровић,¹ Влада Б. Вељковић^{1,2}

¹ Технолошки факултет у Лесковцу Универзитета у Нишу

² Српска академија наука и уметности, Огранак САНУ у Нишу,
Кнеза Михаила 35, Београд

Косолвенти су растварачи који се додају у малим количинама како би се повећала мешљивост између некомпатибилних фаза, чиме се побољшава растворљивост уља у алкохолу. Њихова употреба у производњи биодизела смањује време реакције, молски однос алкохол:уље, температуру, количину катализатора и трошкове. Последњих година расте интересовање за „зелене“ раствараче као што су еутектички растварачи, који имају изузетна својства у поређењу са јонским течностима, чија производња и пречишћавање имају високе трошкове и проблеме са биоразградивошћу. Еутектички растварачи се у производњи биодизела користе као катализатори, косолвенти и за побољшање екстракције уља.

Кључне речи: биодизел, косолвенти, еутектички растварачи

1. Увод

Косолвенти су растварачи који се употребљавају у малим количинама да би унапредили мешање две немешљиве фазе. Они се додају у обе фазе да би се створила хомогена смеша. Хемијска класификација косолвената предвиђа које супстанце ће бити добро растворљиве у одређеном растварачу, што зависи од њихове поларности. Структура растварача важна је за предвиђање могућих нежељених реакција са раствореним супстанцама. Растварачи се такође класификују на основу физичких својстава као што су тачка топљења, тачка кључања и испарљивост, што им помаже да се поделе на различите категорије према њиховим температурним и испарљивим карактеристикама.

Еутектички растварачи су напредак у „зеленој“ хемији, представљајући смеше две или више компоненти које формирају еутектичку смешу са нижом температуром топљења од појединачних компоненти. Компоненте су повезане водоничним везама [1, 2], а њихова еутектичка тачка означава температуру која је значајно нижа од температуре топљења идеалне течне смеше [3]. Занимање за еутектичке раствараче расте због

њихових предности: једноставности припреме, ниских трошкова и због употребе сигурних и лако доступних компоненти.

У раду се разматра примена косолвената и еутектичких растварача у истраживањима која имају за циљ развој нових или унапређење постојећих поступака за добијање биодизела. Додатком косолвената у малим количинама у реакциону смешу алкохола и уљане сировине повећава се мешљивост између реактаната и побољшава њихова међусобна растворљивост. Њихова употреба у производњи биодизела смањује време реакције, молски однос алкохол:уље, температуру, количину катализатора и трошкове. Еутектички растварачи као „зелени“ растварачи користе се као катализатори и косолвенти, као и за побољшање екстракције уља из уљаних сировина.

2. Косолвенти

2.1. Класификација косолвената

Растварачи се класификују по вискозности на ниско (< 2 mPas на 20 °C), средње (2 – 10 mPas) и високо вискозне (> 10 mPas) [4]. Диелектрична константа одређује поларност растварача, вода има високу ($\epsilon \approx 80$), а хексан ниску ($\epsilon \approx 2$). Поларни растварачи имају значајан диполни моменат, док је код неполарних низак. Површински напон зависи од међумолекулских сила, па је код поларних течности виши него код неполарних. Растворљивост супстанци процењује се партиционим коефицијентом ($\log P$), који мери расподелу супстанце између две немешљиве течности, попут воде и октанола.

2.2. Предвиђање растворљивости косолвената

Различити модели се користе за предвиђање растворљивости косолвената, укључујући моделе Скатчарда [5], Хансена [6] и Јалковског [7]. Скатчард је увео концепт афинитета растварача за растворену супстанцу, који су касније Хилдебранд (Hildebrand) и Скот (Scot) дефинисали као „параметар растворљивости“ [6]. Хилдебрандов параметар је погодан за неполарне супстанце, док Хансенов модел разлаже укупни параметар растворљивости на дисперзионе, диполне и водоничне интеракције (δ_d , δ_p и δ_h , редом). Разлика параметара растворљивости растварача и косолвента у трокоординатном систему (δ_d , δ_p и δ_h) изражава се као

$$D_0 = \sqrt{(\delta_{d \text{ раств}} - \delta_{d \text{ косол}})^2 + (\delta_{p \text{ раств}} - \delta_{p \text{ косол}})^2 + (\delta_{h \text{ раств}} - \delta_{h \text{ косол}})^2}$$

и омогућава процену компатибилности растварача и косолвента.

2.3. Примена косолвената у трансестерификацији

Коришћење косолвената у производњи биодизела побољшава растворљивост уља у алкохолу, смањује време реакције, молски однос алкохол:уље, температуру и количину катализатора, чиме се смањују трошкови [8]. Косолвенти утичу и на одвајање катализатора, производа и непрореагованих реактаната. Пожељно је да имају сличну тачку кључања као алкохол ради лакше рекуперације. Они морају бити инертни и у потпуности уклоњени из биодизела и глицерола због токсичности [9].

2.4. Употреба косолвената у кисело-катализованом трансестерификацији

Кисело катализоване трансестерификације су спорије од базно катализованых, захтевају већи моларни однос алкохол:уље, већу концентрацију катализатора и блаже реакционе услове. Примена косолвената значајно скраћује време реакције и побољшава услове. Џанг и сарадници су користили *n*-хексан као косолвент за екстракцију липида из микроалги *Chlorella* sp. и повећање растворљивости етанола у уљу, постижући 90%-тну конверзију триацилглицерола (ТАГ) у етанолу катализованом сумпорном киселином за 2 сата [10]. Лам и Ли су испитали различите косолвенте у метанолизи уља из микроалги катализованом сумпорном киселином [11].

2.5. Примена косолвената у базно-катализованом трансестерификацији

Тан и сарадници су у КОН-катализованом метанолизи отпадног уља са ацетоном као косолвентом постигли принос >98% за 30 минута на собној температури [12]. Лу и сарадници су потврдили ефикасност ацетона у истом процесу [13]. Фадил и сарадници су тестирали различите косолвенте у КОН-катализованом метанолизи риблиг уља, при чему су најбољи резултати постигнути са *n*-хексаном (конверзија >97%) уз оптималне услове: 50 °C, 30 min, молски односи хексан:метанол 1,5:1 и метанол:уље 5:1, уз 0,60% КОН [14]. Гуан и сарадници су испитали етре као косолвенте у КОН-катализованом метанолизи сунцокретовог уља и утврдили оптималне молске односе косолвент:метанол [15]. Мартинез-Гера и сарадници су показали да *n*-хексан у NaOH-катализованом „in-situ“ етанолу катализованом метанолизи уља микроалги *Chlorella* sp. уз микроталасно зрачење побољшава пренос масе, смањује употребу етанола за 50% и спречава деградацију сировина (липида) и производа (етил естра масних киселина (ЕЕМК)) [16].

Кумар и сарадници су користили тетраhydroфуран (ТХФ) као косолвент за метанолизу уља на 45 °C, што је довело до потпуне конверзије [17], док су Тодоровић и сарадници анализирали метанолизу сунцокретовог уља уз КОН и CaO као катализаторе [18]. Количина ТХФ-а до

50% масе уља је убрзала реакцију у присуству КОН као резултат смањења величине капи метанола. Код метанолизе уз СаО, само су *n*-хексан и ТХФ су убрзавали почетну реакцију, док други косолвенти нису, попут триетил-амина, триетаноламина (ТЕОА) и етил-ацетат, или су негативно утицали, попут диетил-етра, диоксиана и метил-етил-кетона. Банковић-Илић и сарадници су утврдили да ТХФ у реактору са вибрационом мешалицом смањује величину капи и да предложени кинетички модел добро одговара експерименталним подацима [19].

Алхасан и сарадници су са хлоробенzenом и ацетоном постигли добре резултате у метанолизи уља памука, али не и са диетил-етром [20]. Енсинер и сарадници су утврдили да је диетил-етар ефикасан у КОН-катализованој метанолизи репичиног уља, као и терц бутил-метил-етар и ТХФ [9]. Санчез и сарадници су показали да *n*-хексан у NaOH-катализованој метанолизи уља из морских алги смањује садржај МЕМК-а [21]. Ву и сарадници су показали да комбинација NaOH и бентонита успешно катализује метанолизу сојиног уља на ниској температури уз диетил-етар (молски однос 0,5:1) [22].

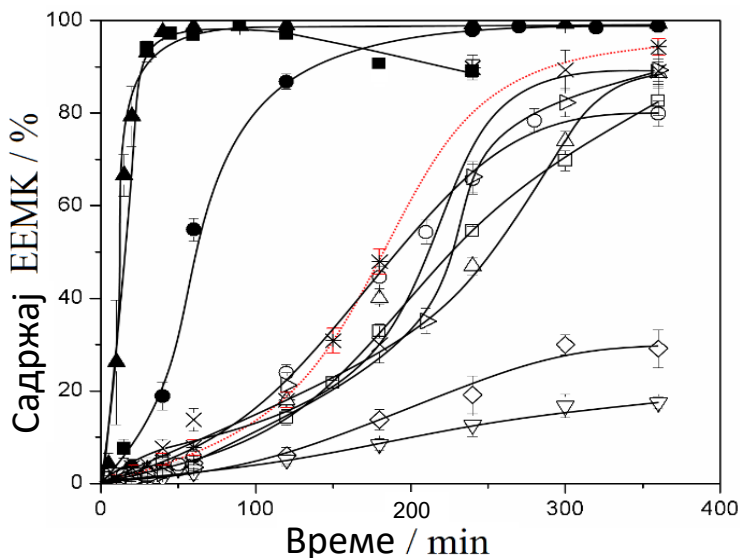
Сирови биодизел може служити као косолвент у СаО-катализованој метанолизи. Тодоровић и сарадници су оптимизовали услове реакције у температурном опсегу 33,2–66,8 °С, са молским односом метанол:уље 3,5:1–8,5:1 и концентрацијом катализатора 0,219–1,065 mol/l, уз 10% биодизела као косолвента [23]. Оптимални услови (молски однос 7,1:1, 0,74 mol/l катализатора и 52 °С) омогућавају принос од 99,8% за 1,5 сати. Гранадос и сар. (2009) су утврдили да 3% биодизела као косолвента побољшава СаО-катализовану метанолизу сунцокретовог уља [24].

Ђокић-Стојановић и сарадници су испитали утицај десет косолвената на етанолизу сунцокретовог уља катализовану СаО у шаржном реактору [25]. Без катализатора, реакција се није одиграла, док је без косолвената била спора (ЕЕМК 89,7% након 4 h). Косолвенти су подељени у стимулативне (диетанол-амин, ТЕОА, етилен-гликол) и инхибиторне (диоксан, глицерол, етил-метил-кетон, *n*-хексан, триетил-амин, етилен-гликол-диметил-етар, ТХФ) (слика 1). Стимулативни косолвенти су повећали брзину реакције, скратили индукциони период и смањили хидролизу. ТЕОА је најефикаснији, постижући 79,3% ЕЕМК за 20 min, те је препоручен као оптимални косолвент.

2.6. Механизми активације СаО у присуству косолвената

У етанолизи сунцокретовог уља, почетна фаза је спора, али формирање калцијум-диглицероксида из глицерола и СаО убрзава реакцију. Додавање мале количине глицерола побољшава активност катализатора, док његов вишак може појачати повратну реакцију [27]. Стимулативни

косолвенти (диетанол-амин, ТЕОА, етилен-гликол) скраћују почетну фазу и повећавају садржај ЕЕМК-а. Рентгенско-дифракциона анализа потврђује присуство калцијум-диглицероксида и трансформацију СаО у Са(ОН)₂ током реакције [28].



Слика 1 Утицај различитих косолвената на садржај ЕЕМК у реакцији СаО-катализоване етанализе комерцијалног сунцокретовог уља са различитим косолвентима: диетанол-амином (•), триетанол-амином (▲), етилен-гликолом (■), диоксаном (x), глицеролом (○), етил-метил-кетон (Δ), *n*-хексаном (□), триетиламином (◇), етилен-гликол-диметил-етром (∇) и тетраhydroфураном (>) у поређењу са контролном реакцијом без косолвената (*, тачкаста линија) при следећим реакционим условима: температура 70° С, моларни однос етанол:уље 12:1, концентрација катализатора 1,374 mol·dm⁻³ и количина косолвената 20% у односу на масу уља [26].

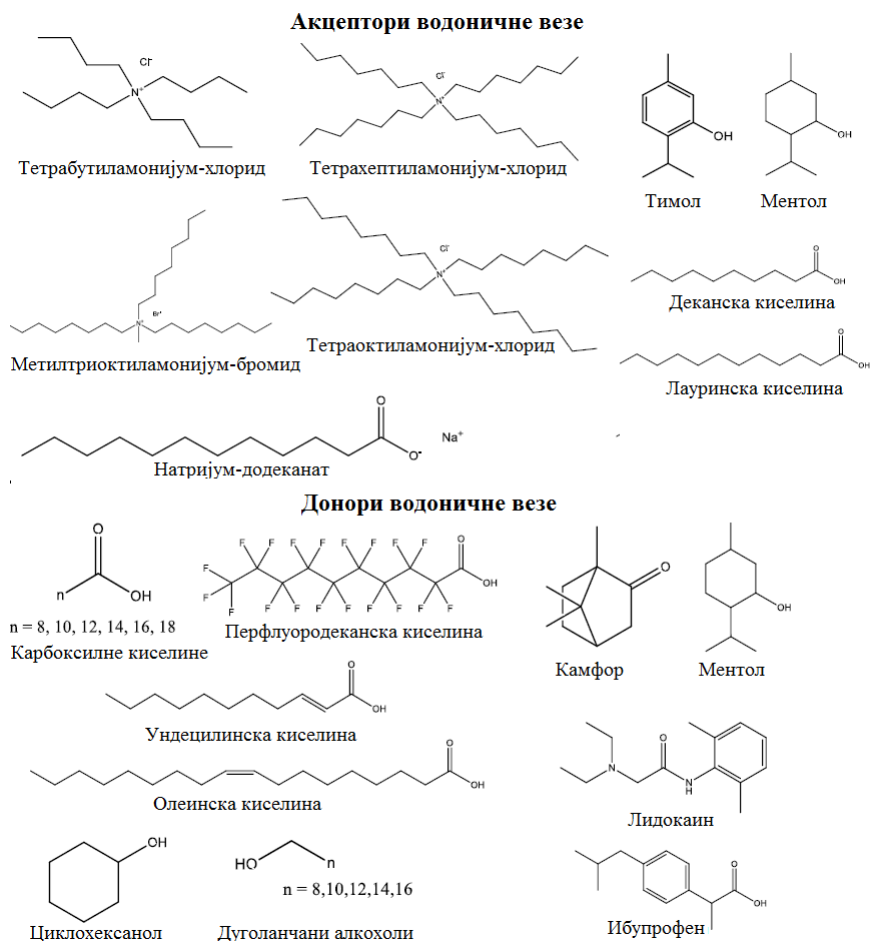
Стимулација реакције еутектичким растворима формираним од ТЕОА, диетанол-амин или етилен-гликола са глицеролом је потврђена експериментално [29]. У неким случајевима, калцијум-диглицероксид се раствара и деактивира катализатор током метанализе [30], док његова делимична растворљивост у етанолу може довести до формирања растворљивих прекурсора који се касније претварају у чврст катализатор [31]. Такође, количина калцијум-диглицероксида може бити испод границе детекције рентгенско-дифракционе анализе, али је и даље активан у етанализи [30].

3. Еутектички растварачи

3.1. Дефинисање еутектичких растварача

Еутектички растварачи су први пут описани пре више од две деценије [32]. Они су развијени на основу холин-хлорида (ChCl) и ZnCl_2 у молском односу 1:2, са температурама мржњења од 23 до 25 °C. Технологија се развијала кроз истраживања која су показала значајно снижење температуре топљења услед формирања водоничних веза [1].

Ови растварачи могу заменити више од 600 испарљивих органских растварача који се користе у индустријским и научним процесима, а њихова својства се могу прилагодити различитим потребама [33]. ChCl је најчешћи акцептор водоничне везе, док доноси углавном укључују аминне, амиде, органске киселине и полиоле као што су глицерол и етилен гликол (слика 2).



Слика 2 Најчешће примењивани акцептори и доноси водоничне везе у хидрофобним еутектичким растварачима [34].

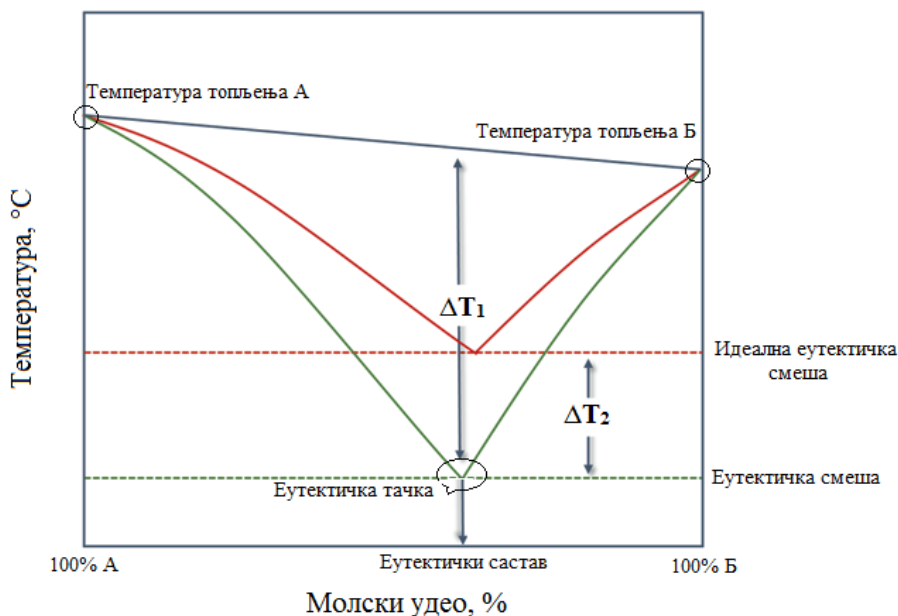
Еутектички растварачи су смеше чија температура топљења зависи од састава смеше и може се представити фазним дијаграмом. Еутектичка тачка, која представља минималну температуру топљења, добија се пресеком кривих топљења компоненти (слика 3). Депресија температуре топљења у односу на полазне компоненте резултат је интеракција између анјона и донора водоничне везе, а смањење температуре је пропорционално јачини ових веза. Разумевање фазног дијаграма и температуре топљења је кључно за формирање ових растварача.

3.2. Подела еутектичких растварача

3.2.1. Подела еутектичких растварача на основу природе конституената

Еутектички растварачи могу се класификовати према различитим аспектима, као што су природа компоненти, хидрофилност и број конституената. На основу природе саставних елемената и њихових молских удела, разликује се пет основних типова еутектичких растварача (табела 1) [35]:

1. **Тип I:** Састоје се од анхидрованих металних халогенида (нпр. $ZnCl_2$, $SnCl_2$ и кватернарних амонијумових соли).
2. **Тип II:** Укључују хидриране металне халогениде који формирају анјонске комплексе, као што је $CrCl_3 \cdot 6 H_2O$ са $ChCl$.



Слика 3 Чврсто-течно фазни дијаграм идеалне еутектичке смеше (црвена линија) и еутектичке смеше (зелена линија). ΔT_1 и ΔT_2 су депресије температура мржњења [34].

3. **Тип IV:** Састоје се од анхидрованих металних халогенида и донора водоничне везе, као што је цинк-хлорид са ацетамидом или уреом.
4. **Тип V:** Укључују нејонизоване компоненте попут полииола, шећера или карбоксилних киселина, али и хидрофобне супстанце као ментол, тимол или камфор.
5. **Тип III:** Садрже кватернарну амонијумову со и доноре водоничне везе, попут поликарбоксилних киселина или полиалкохола. Ови растварачи су највише проучавани због своје разноврсности и прилагодљивих својстава.

Табела 1 Типови еутектичких растварача [35]

Тип	Општа формула	Пример
I	$Kat^+ X^- zMCl_x$; M = Zn, Sn, Fe, Al, Ga, In	ChCl:ZnCl ₂
II	$Kat^+ X^- zMCl_x \cdot yH_2O$; M = Cr, Co, Cu, Ni, Fe	ChCl:CoCl ₂ ·6H ₂ O
III	$Kat^+ X^- zRZ$; Z = CO, NH ₂ , COOH, OH	ChCl:U
IV	$MCl_x + RZ = MCl_{x-1}^+ \cdot RZ + MCl_{x+1}^-$; M = Al, Zn; Z = CONH ₂ , OH	Уреа:ZnCl ₂
V	Нејонски еутектички растварачи, чине их само молекулске супстанце	Глукоза:фруктоза

3.2.2. Подела еутектичких растварача на основу поларности

Већина еутектичких растварача је хидрофилна, али су недавно развијени и хидрофобни еутектички растварачи, погодни за екстракцију органских и неорганских молекула из водених раствора. Они се добијају избором компоненти које се не мешају лако са водом, али формирају водоничне везе. Први такви растварачи састојали су се од кватернарних амонијумових соли и масних киселина [36], при чему су ментол и деканска киселина најчешће коришћени као акцептор и донор водоничне везе. Ови растварачи су нарочито корисни у екстракцији компоненти из водених двофазних система.

3.2.3. Подела еутектичких растварача на основу броја конституената

Трокомпонентни еутектички растварачи добијају све већи значај, јер омогућавају побољшање физичкохемијских својстава у односу на двокомпонентне системе. Често садрже воду као трећу компоненту ради смањења вискозности, посебно код раствора са шећерима или органским киселинама (нпр. ChCl:глукоза:вода 1:1:1). Постоје и безводни трокомпонентни системи (нпр. DL-јабучна киселина:глукоза:фруктоза 1:1:1), као

и четворокомпонентни растварачи попут фруктоза:глюкоза:сахароза:вода 1:1:1:1 [37].

3.2.4. Природни еутектички растварачи

Природни еутектички растварачи (NADES) развијени су као нетоксична и биоразградива алтернатива синтетичким супстанцама, посебно у прехранбеној и фармацеутској индустрији. Лако се припремају од доступних компоненти као што су шећери, алкохоли и аминокиселине. Чои и сарадници су их први описали као смеше природних супстанци са способношћу растварања тешко растворљивих једињења [38].

3.2.5. Терапијски еутектички растварачи

Терапијски еутектички растварачи (THEDES) су еутектички системи у којима је најмање једна компонента фармацеутски активна супстанца [39]. Концепт се појавио крајем 20. века, када су развијени растварачи засновани на ибупрофену и терпенима за побољшање трансдермалне апсорпције лекова [40]. Значајан напредак остварен је 2015. године када је комбинација ChCl и аспирина повећала растворљивост и стабилност аспирина [41]. Ови растварачи имају велики потенцијал у антимикуробним формулацијама и системима за контролисану испоруку лекова.

3.2.6. Магнетни еутектички растварачи

Магнетни еутектички растварачи, који садрже тетраклороферратни анјон ($[\text{FeCl}_4]^-$), омогућавају издвајање применом магнетног поља. Иако су истраживања у раној фази, растварачи попут $[\text{ChCl}:\text{фенол}][\text{FeCl}_4]$ и $[\text{ChCl}:\text{ЕГ}][\text{FeCl}_4]$ коришћени су за ултразвучну микроекстракцију тиофена из *n*-хептана. Њихова магнетна својства омогућавају ефикасну и економичну екстракцију [42].

3.3. Еутектички растварачи у производњи биодизела

3.3.1. Употреба еутектичких растварача у катализи производње биодизела

Еутектички растварачи се користе као катализатори или растварачи у естерификацији, трансестерификацији и биокатализованим процесима. Они минимизирају споредне реакције, попут сапонификације, олакшавајући раздвајање и пречишћавање производа.

3.3.2. Еутектички растварачи као катализатори у естерификацији

Пре употребе у трансестерификацији, отпадна уља и масти морају се пречистити, смањујући садржај слободних масних киселина испод 0,5% [43]. Деацидификација се постиже неутрализацијом или кисело-катализованом трансестерификацијом, при чему је друга метода ефикаснија,

али спорија. Киселине попут хлороводоничне и сумпорне обезбеђују висок принос естара, али имају недостатке као што су корозивност и високи трошкови. Због тога се еутектички растварачи испитују као еколошки прихватљива алтернатива.

Кисели еутектички растварачи показали су се као ефикасни катализатори за естерификацију палмитинске киселине са метанолом и етанолом [44]. Ови катализатори су припремљени мешањем ChCl са различитим органским киселинама (сирћетна, мравља, оксална и трихлор-сирћетна киселина) у молском односу 1:1. Од њих, ChCl :трихлор-сирћетна киселина је најактивнији катализатор. Де Санти и сарадници постигли су високе приносе метил-палмитата и метил-стеарата након 2 часа реакције [45]. У естерификацији палмитинске киселине, Ли и сарадници су добили најбоље резултате са тетрабутил-амонијум-хлорид:сирћетна киселина [46], док су Ђианг и сарадници постигли највећу конверзију у етанолу са додецилтриметиламонијум-хлорид:*p*-толуенсулфонска киселина монохидрат (DTAC:PTSA) (1:3) [47].

3.3.3. Еутектички растварачи као катализатори у трансестерификацији

Лунг и сарадници су први применили $\text{ChCl}:\text{ZnCl}_2$ као Луисов кисели катализатор у метанолизи сојиног уља, али су постигли ниску конверзију (54,52%) након 72 сата [48]. Хајан и сарадници су користили ChCl са (1R)-(-)-камфор-10-сулфонском киселином за метанолизу мешавине сировог и отпадног палминог уља, постижући 90% конверзије за 40 минута, уз значајно смањење садржаја слободних масних киселина [49]. Љу и Ванг су користили $\text{ChCl}:\text{PTSA}$ (1:3) као еутектички растварач за трансестерификацију сојиног уља, постижући 98,66% метил-естара за 2 сата на 100 °C [50]. Љу и сарадници су тестирали PTSA са различитим кватернарним амонијумовим солима у трансестерификацији отпадног маслиновог уља, утврдивши да каталитичка активност расте са дужином угљеничног ланца [51]. Најбоље резултате постигао је тетраоктил амонијум бромида:*p*-толуен-сулфонска киселина (TOAB:PTSA) (1:2) при 63,5 °C, уз 9:1 молски однос метанола и 10% катализатора.

3.3.4. Еутектички растварачи као катализатори у двостепеним процесима

Двостепени процес за производњу биодизела укључује естерификацију сировог палминог уља са високим садржајем слободних масних киселина, а затим трансестерификацију. У једном процесу, коришћен је еутектички растварач DEAC:PTSA (1:3) за естерификацију сировог уља са 9,5% слободних масних киселина [52]. После 30 минута реакције, садржај слободних масних киселина је смањен на 0,7%, а степен конверзије

је био 92,6%, са приносом метил-естара од 97%. Након естерификације, уље је подвргнуто метанолизи, што је дало биодизел са 90-95% метил-естара и веома ниским садржајем слободних масних киселина (0,06%).

Истраживачи су користили еутектички растварач алил-трифенилфосфонијум-бромид:р-толуен-сулфонска киселина (АТТВ:ПТСА) као кисели катализатор за естерификацију слободних масних киселина, што је дало задовољавајуће резултате. Такође, еутектички растварач ChCl:PTSA (1:3) показао се као ефикасан катализатор [53]. После 30 минута естерификације (молски однос метанол:уље 10:1, 0,75% растварача, температура 60 °C), садржај слободних масних киселина је смањен са 9% на мање од 1%, уз 96% степен конверзије и 97% принос метил-естара. Након метанолизе, добијен је биодизел са 92% приноса и врло ниским садржајем слободних масних киселина (0,07%) и високим садржајем метил-естара (96%).

3.3.5. Еутектички растварачи комбиновани са другим катализаторима

Еутектички растварачи се углавном користе у хомогеним катализованом процесима метанолизе и етанолизе уља, док су у хетерогеним катализаторским реакцијама мање чести. Тако је еутектички растварач ChCl:G (1:2) коришћен за етанолузу отпадног палминог уља са садржајем слободних масних киселина од 7,53% [54]. Употребом еутектичког растварача спречава се сапонификација и побољшава пренос масе између немешљивих фаза. Под оптималним условима (молски однос етанол:уље 9:1, NaOH 1%, 0–5% растварача, температура 70 °C, брзина мешања 400 min^{-1}), производ је имао висок садржај етил-естара (>99%), док је принос био 83%.

У метанолизи уља индијске букве (*Pongamia pinnata*) катализованом NaOH , бољи приноси су постигнути коришћењем киселих еутектичких растварача ChCl :оксална киселина и ChCl :сирћетна киселина у поређењу са базним еутектичким растварачем ChCl:U (молски однос 1:2) [55]. За метанолизу сусамовог уља, највећи принос метил-естара (97,8%) добијен је уз употребу еутектичког растварача ChCl :етилен-гликол [55]. У истраживању метанолизе смеше отпадног уља и масти из ресторана брзе хране, катализоване NaOH , коришћен је еутектички растварач ChCl:G при температури од 65 °C и времену реакције од 3 сата [56].

3.3.6. Еутектички растварачи комбиновани са хетерогеним катализаторима

Еутектички растварачи као што је ChCl:G (молски однос 1:2) у комбинацији са хетерогеним катализатором CaO показали су значајне предности у активирању катализатора и уклањању неактивних слојева као што су CaCO_3 и Ca(OH)_2 [57]. Овај систем је коришћен у метанолизи репичиног

уља, где је жарени СаО у присуству растварача дао значајно повећање приноса метил-естара (95%), у поређењу са 87,3% без растварача. Нежарени СаО дао је низак принос (4%), али уз еутектички растварач, принос је повећан на 91,9%. Овај систем је такође био успешан у метанолизи сунцокретовог уља [58].

Тротер и сарадници истраживали су примену еутектичких растварача на бази ChCl у етанолизи сунцокретовог уља, користећи СаО као катализатор [59]. Еутектички растварачи су деловали као косолвенти, растварајући калцијум-карбонат и калцијум-хидроксид са површине катализатора, али нису имали каталитичку активност. Највиша активност је постигнута са ChCl:U (молски однос 1:2), а растварачи на бази полиола били су ефикаснији од амидних. Ови растварачи су убрзали процес етанолизе и омогућили брже раздвајање фаза финалне смеше на собној температури, у поређењу са системима без растварача који су захтевали више од 24 сата.

ShenavaeiZare и сарадници (2021) су за метанолизу уља из шафранике користили комерцијални и СаО добијен методама преципитације и импрегнације са зеолитом Na-ZSM5. У комбинацији са различитим еутектичким растварачима на бази ChCl , најбољи резултат је постигнут са ChCl:EG [60]. Пан и сарадници су у сличном процесу метанолизе смеше биљног уља и олеинске киселине користили чврсте киселе катализаторе у присуству еутектичког растварача ChCl:G [61]. Ови растварачи су показали ефикасност као стабилизатори хетерогених киселих катализатора, уклањајући воду и побољшавајући степен конверзије.

3.3.7. Еутектички растварачи као растварачи у биокатализованим трансестерификацијама

Еутектички растварачи су ефикасни у биокатализованим процесима трансестерификације због ниске цене, нетоксичности и добре компатибилности са липазама. У метанолизи сојиног уља, коришћен је ChCl:G (1:2) и липаза Новозим 435, што је дало 88% конверзије после 24 сата [62]. Huang и сарадници (2014) су користили липазу Новозим 435 за синтезу биодизела из уља семена *Millettia pinnata* уз ChCl:G и ChOAc:G раствараче, постигавши најбољи резултат од 54,8% конверзије са ChOAc:G (1:2) [63]. Клајнер и сарадници (2016) су спровели двостепену етанолизу рафинисаног уља из уљане репице, постижући приносе етил-естара од 87,8% и 95,2% са ChCl:U и ChCl:G [64]. У првој фази процеса, коришћена је липаза гљивице *Thermomyces lanuginosus*, а у другој липаза *Phyllophora antarctica* В уз еутектичке раствараче ChCl:U (молски однос 1:2) или ChCl:G (молски однос 1:2).

3.3.8. Еутектички растварачи у екстракцији глицерола из сировог биодизела

За екстракцију глицерола из сировог биодизела користе се различити еутектички растварачи, као што су $\text{ChCl}:\text{G}$, (2-хлороетил)-триметиламонијум-хлорид:глицерол и етиламонијум-хлорид:глицерол, са највишим екстракционим приносом од 51,25% при молском односу растварач:биодизел 1:1 [65]. Такође, растварачи, као што су $\text{ChCl}:\text{EG}$ и $\text{ChCl}:\text{TFAA}$, показали су добру ефикасност при молском односу 3:1 [66]. Метода комбиновања метил-трифенил-фосфонијум-бромид са глицеролом, етилен-гликолом или триетилен-гликолом смањује садржај глицерола на 0,02% [67]. Еутектички растварачи ChCl са етилен-гликолом и 2,2,2-трифлуоро-ацетамидом такође су били ефикасни у екстракцији глицерола из биодизела добијеног из палминог уља [68]. Такође, еутектички растварачи $\text{ChCl}:\text{EG}$ (молски однос 1:3 и 1:4) потпуно су екстраховали глицерол из сировог биодизела при молском односу растварач:биодизел 3:1 [69]. За екстракцију укупног глицерола из биодизела добијеног из палминог уља коришћени су трокомпонентни еутектички растварачи на бази ChCl , глицерола и етилен-гликола [70]. Најефикаснији молски односи били су 2:1 и 2,5:1 за $\text{ChCl}:\text{G}:\text{EG}$ (молски однос 2:1:2) и 0,5:1 за $\text{ChCl}:\text{G}:\text{EG}$ (молски однос 1:1:2), постигавши екстракцију са ефикасношћу од 99,63% и 99,75%.

4. Закључак

Рад приказује класификацију косолвената на основу њихових физичко-хемијских својстава. Анализирана је растворљивост косолвената: партиципони коефицијент, Хидебранд-Скотова дефиниција параметра растворљивости и Хансенов параметар растворљивости. Детаљно је проучена примена косолвената у реакцијама трансестерификације. Додавањем одговарајуће количине косолвента у реакциони медиј за производњу биодизела повећава се растворљивост уља у алкохолу. Употреба косолвената у реакцији трансестерификације омогућава не само скраћење времена реакције, већ и смањење моларног односа алкохол-уље, температуре, количине катализатора, а самим тим и производних и оперативних трошкова. Додатак косолвента у реакциони систем може истовремено утицати на одвајање катализатора, реакцијских продуката и нереагованих реактаната.

Други део рада фокусира се на дефинисање еутектичких растварача као нове генерације еколошки прихватљивих растварача који се лако припремају коришћењем безбедних и лако доступних компоненти, а чија се својства могу прилагодити различитим потребама, омогућавајући широку примену. Рад пружа класификацију еутектичких растварача на основу природе састојака, поларитета и броја компоненти. Описани су

природни, терапијски и магнетни еутектички растварачи. Детаљно је анализирана употреба еутектичких растварача у производњи биодизела, уз бројне примере из литературе. Ови растварачи се користе самостално или у комбинацији с другим катализаторима у процесима као што су естерификација, трансестерификација и двостепени процеси који укључују естерификацију праћену алкално катализованом трансестерификацијом. Поред тога, еутектички растварачи се користе и као растварачи у биокатализованим трансестерификацијама. Једна од њихових предности је способност минимизације споредних реакција, попут сапонификације, што значајно олакшава накнадно одвајање и пречишћавање добијених производа.

Захвалница

Рад је резултат пројекта Ф-78 који финансира Фонд за науку САНУ.

Литература

1. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, R. K. Rasheed, V. Tambyrajah Chem. Commun. 1, (2003) 70–71. <https://doi.org/10.1039/B210714G>
2. Q. Zhang, K. De Oliveira Vigier, S. Royer, F. Jérôme, 2012a. Chem. Soc. Rev. 41, 7108–7146. <https://doi.org/10.1039/C2CS35178A>
3. M. Martins, P. S. Pinho, J.A.P. Coutinho, (2019) J. Solution Chem. 48, 962–982. <https://doi.org/10.1007/s10953-018-0793-1>.
4. Reichardt, Solvents and solvent effects in organic chemistry, Third Edition, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, (2003), ISBN: 3-527-30618-8.
5. G. Scatchard, Chem. Rev., 8 (1931) 321-333. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr60030a010>
6. Hansen, The Three Dimensional Solubility Parameter and Solvent Diffusion Coefficient and Their Importance in Surface Coating Formulation. Copenhagen: Danish Technical Press, (1967) p 13-28. <https://www.hansen-solubility.com/contents/HSP1967-OCR.pdf>
7. S. H. Yalkowsky, T. Roseman, Solubilization of Drugs by Cosolvents, In: Yalkowsky, S.H. (Ed.), Marcel Dekker, New York, 12 (1981), p. 91-134.
8. L. Díaz, F. Horstmann, A. Brito, L. A. González, Heliyon 9 (2023) e13006 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13006>
9. J. M. Encinar, N. Sánchez, G. Martínez, L. García, Bioresour. Technol. 102 (2011) 10907–10914. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.068>.
10. Y. Zhang, Y. Li, X. Zhang, T. Tan, Bioresour. Technol. 196 (2015) 712–715. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.052>
11. M. K. Lam, K. T. Lee, Fuel Process. Technol. 110 (2013) 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.12.021>

12. L. T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, H. Bandow, *Fuel* 103 (2013) 742-748.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.029>
13. P. D. Luu, N. Takenaka, B. V. Luu, L. N. Pham, K. Imamura, Y. Maeda, *Energy Procedia* 61 (2014) 2822-2832.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.303>
14. B. Fadhil, E. T. B. Al-Tikrity, M.A. Albadree, *Fuel* 162 (2015) 215–223
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.001>
15. G. Guan, N. Sakurai, K. Kusakabe, *Chem. Eng. J.* 146 (2009) 302–306.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.009>
16. Martinez-Guerra, V. G. Gude, A. Mondala, W. Holmes, R. Hernandez, *Bioresour. Technol.* 156 (2014) 240-247.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.026>
17. G. R. Kumar, R. Ravi, A. Chadha, *Energy Fuels* 25 (2011) 2826-2832.
<https://doi.org/10.1021/ef200469u>
18. Z. B. Todorović, O. S. Stamenković, I. S. Stamenković, J. M. Avramović, A. V. Veličković, I. B. Banković–Ilić, V. B. Veljković, *Fuel* 107 (2013) 493–502 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.049>
19. B. Banković-Ilić, Z. B. Todorović, J. M. Avramović, A. V. Veličković, V. B. Veljković, *Fuel Process. Technol.* 137 (2015) 339–350.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.03.023>
20. Y. Alhassan, N. Kumar, I. M. Bugaje, H. S. Pali, P. Kathkar, *Energy Convers. Manag.* 84 (2014) 640–648
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.080>
21. R. Sánchez, A. Maceiras, M. Cancela, Rodríguez, *Energies* 5 (2012) 243-257 <https://doi.org/10.3390/en5020243>
22. L. Wu, K. Huang, T. Wei, Z. Lin, Y. Zou, Z. Tong, *Fuel* 186 (2016) 597-604. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.08.106>
23. Z. B. Todorović, D. Z. Troter, D. R. Đokić-Stojanović, A. V. Veličković, J. M. Avramović, O. S. Stamenković, Lj. M. Veselinović, V. B. Veljković, *Fuel* 237 (2019) 903-910.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.056>
24. M. L. Granados, D. M. Alonso, A. C. Alba-Rubio, R. Mariscal, M. Ojeda, P. Brettes, *Energy Fuels* 23 (2009) 2259–2263.
<https://doi.org/10.1021/ef800983m>
25. R. Đokić-Stojanović, Z. B. Todorović, D. Z. Troter, O. S. Stamenković, Lj. M. Veselinović, M. V. Zdujić, D. D. Manojlović, V. B. Veljković, *J. Serb. Chem. Soc.* 84 (2019) 253–265.
<https://doi.org/10.2298/JSC180827007D>
26. D. R. Đokić-Stojanović, докторска дисертација, Технолошки факултет, Лесковац, Универзитет у Нишу (2021).
<http://eteze.ni.ac.rs/application/showtheses?thesesId=8531>

27. S. Esipovich, A. Danov, A. Belousov, J. Rogozhin, *Mol. Catal. A: Chem.* 395 (2014) 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2014.08.011>
28. D. R. Đokić-Stojanović, Z. B. Todorović, D. Z. Troter, O. S. Stamenković, Lj. M. Veselinović, M. V. Zdujić, D. D. Manojlović, V. B. Veljković, *Hem. Ind.* 73 (6) (2019) 351–362. <https://doi.org/10.2298/HEMIND190822033D>
29. D. Z. Troter., Z. B. Todorović, D. R. Đokić–Stojanović, Lj. M. Veselinović, M. V. Zdujić, V. B. Veljković, *J. Mol. Liq.* 266 (2018) 557–567 <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.106>
30. L. M. Sanchez-Cantu, F.M. Reyes-Cruz, E. Rubio-Rosas, L. M. Perez-Diaz, E. Ramirez, J. S. Valente, *Fuel*, 138 (2014) p 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.006>
31. M. Kouzu, J. Hidaka, K. Wakabayashi, M. Tsunomori, *Appl. Catal. A-Gen.* 390 (2010) 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.09.029P>.
32. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, H. L. Munro, R. K. Rasheed, V. Tambyrajah, *Chem. Commun.* 19, (2001) 2010–2011. <https://doi.org/10.1039/B106357J>
33. S. Verma, K. Saini, S. Maken, *J. Mol. Liq.* 393 (2024) 123605. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123605>
34. D. Z. Troter., Z. B. Todorović., B. S. Đorđević, O. S. Stamenković., V. B. Veljković, *Primena jonskih tečnosti i eutektičkih rastvarača u proizvodnji biodizela*, Tehnološki fakultet u Leskovcu Univerziteta u Nišu i Ogranak SANU u Nišu, Leskovac (2021), ISBN 978-86-89429-48-0.)
35. P. Kalhor, K. Ghandi, 2019. Deep eutectic solvents for pretreatment, extraction, and catalysis of biomass and food waste. *Molecules* 24, 4012. <https://doi.org/10.3390/molecules24224012>.
36. D. J. G. P. van Osch, L. F. Zubeir, A. van den Bruinhorst, M. A. A. Rocha, M. C. Kroon, *Green Chem.* 17 (2015) 4518–4521. <https://doi.org/10.1039/C5GC01451D>.
37. M. Espino, M. A. Fernández, F.J.V. Gómez, M.F. Silva, *Trends Anal. Chem.* 76 (2016) 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.006>.
38. Y. H. Choi, J. van Spronsen, Y. Dai, M. Verberne, F. Hollmann, I. W. C. E. Arends, G. J. Witkamp, R. Verpoorte, *Plant Physiol.* 156 (2011) 1701–1705. <https://doi.org/10.1104/pp.111.178426>.
39. M. Aroso, J. C. Silva, F. Mano, A. S. Ferreira, M. Dionísio, I. Sa-Nogueira, S. Barreiros, R. L. Reis, A. Paiva, A. R. C. Duarte, *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 98 (2016) 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2015.11.002>.
40. P. W. Stott, A. C. Williams, B. W. Barry, *J. Controlled Release* 50 (1998) 297–308. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(97\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(97)00153-3).
41. E. Su, A. M. Klibanov, *Appl. Biochem. Biotechnol.* 177 (2015) 753–758. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1777-x>.

42. P. M. Chelstowska, M. Kaykhaii, J. P. Wasylka, M. Guardia, *J. Mol. Liq.* 365 (2022) 120158. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120158>
43. P. Felizardo, M. J. Correia, I. Raposo, J. F. Mendes, R. Berkemeier, J. M. Bordado, *Waste Manage.* 26 (2006) 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.025>.
44. B. Tang, Y. J. Lee, H. E. Park, K. H. Row, *Anal. Lett.* 47 (2014b) 2443–2450. <https://doi.org/10.1080/00032719.2014.908386>.
45. V. de Santi, F. Cardellini, L. Brinchi, R. Germani, *Tetrahedron Lett.* 53 (2012) 5151–5155. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2012.07.063>
46. Y. R. Lee, Y. J. Lee, W. Ma, K. H. Row, *Korean J. Chem. Eng.* 33 (2016a) 2337–2341. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0073-y>.
47. S. Jiang, Z. Zeng, W. Xue, W. Zhang, Z. Zhou, 2020. Kinetic study on the reaction of palmitic acid with ethanol catalyzed by deep eutectic solvent based on dodecyl trimethyl ammonium chloride. *Korean Journal of Chemical Engineering* 37, 1482–1489. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0557-7>.
48. T. Long, Y. Deng, S. Gan, J. Chen, *Chinese J. Chem. Eng.* 18 (2010) 322–327. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60359-6](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60359-6).
49. M. A. Hayyan, M. Hashim, F.S. Hayyan, *Chem. Eng. Sci.* 116 (2014) 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.03.031>.
50. W. Liu, F. Wang, *J. Oleo Sci.* 67(9) (2018) 1163–1169. <https://doi.org/10.5650/jos.ess18018>
51. Y. Liu, H. Yan, J. Liu, W. Dong, Z. Cao, X. Hu, Z. Zhou, *Renew. Energy* 162 (2020) 1842–1853. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.121>.
52. M. A. Hayyan, M. Hashim, F. S. Hayyan, I. M. Mjalli, J. AlNashef, *Ind. Crops Prod.* 46 (2013d) 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.033>.
53. M. A. Hayyan, M. Hashim, F. S. Hayyan, I. M. Mjalli, J. AlNashef, *Clean. Prod.* 65 (2014) 246–251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.031>
54. R. Manurung, D. A. Ramadhani, S. Maisarah, *AIP Conference Proceedings (Green Process, Material, and Energy: A Sustainable Solution for Climate Change)* (2017a) 1855, 070004. <https://doi.org/10.1063/1.4985531>.
55. S. A. Kadapure, A. Kiran, J. Anant, N. Dayanand, P. Rahul, K. Poonam, *J. Environ. Chem. Eng.* 5 (2017) 5331–5336. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.018>.
56. N. Khan, S. H. Park, L. Kadima, C. Bourdeau, E. Calina, C. W. Edmunds, D. P. Pursell, *ACS Omega* 6 (2021) 9204–9212. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00556>.
57. W. Huang, S. Tang, H. Zhao, S. Tian, *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 11943–11947. <https://doi.org/10.1021/ie401292w>

58. M. Miladinović, D. Mišević, D. Troter, S. Konstantinović, Z. Todorović, I. Banković-Ilić, V. Veljković, XXIV Congress of Chemists and Technologists of Macedonia with international participation, Ohrid, Macedonia, Book of Abstracts, (2016) FE 009, p. 195.
59. D. Z. Troter, Z. B. Todorović, D. R. Đokić-Stojanović, Lj. M. Veselinović, M. V. Zdujić, V. B. Veljković, *J. Mol. Liq.* 266 (2018) 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.106>.
60. T. ShenavaeiZare, A. Khoshsima, B. ZareNezhad, *Fuel* 302 (2021) 121171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121171>.
61. Y. Pan, M. A. Alam, Z. Wang, J. Wu, Y. Zhang, Z. Yuan, *Bioresour. Technol.* 220 (2016) 543–548. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.113>.
62. Zhou, P. Lv, Y. Shen, J. Wang, J. Fan, *Water Res.* 47 (2013) 3514–3522. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.057>.
63. Z. L. Huang, B. P. Wu, Q. Wen, T. X. Yang, Z. Yang, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 89 (2014a) 1975–1981. <https://doi.org/10.1002/jctb.4285>
64. A. Kleiner, P. Fleischer, U. Schörken, *Process Biochem.* 51 (2016) 1808–1816. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.10.016>
65. A. P. Abbott, P. M. Cullis, M. J. Gibson, R.C. Harris, E. Raven, *Green Chem.* 9 (2007b) 868–872. <https://doi.org/10.1039/B702833D>.
66. K. Shahbaz, F.S. Mjalli, M. A. Hashim, I. M. AlNashef, *J. Appl. Sci.* 10 (2010) 3349–3354. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.3349.3354>.
67. K. Shahbaz, F. S. Mjalli, M. A. Hashim, I. M. AlNashef, *Energy Fuels* 25 (2011a) 2671–2678. <https://doi.org/10.1021/ef2004943>
68. K. Shahbaz, F. S. Mjalli, M. A. Hashim, I. M. AlNashef, *Sep. Sci. Technol.* 48 (2013) 1184–1193. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.731124>.
69. T. Homan, K. Shahbaz, M. M. Farid, *Sep. Purif. Technol.* 174 (2017) 570–576. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.036>.
70. K. C. Ho, K. Shahbaz, W. Rashmi, F. S. Mjalli, M. A. Hashim, I. M. Alnashef, *J. Eng. Sci. Technol. Special Issue 1* (2015) 98–111. [http://jestec.taylors.edu.my/eureca2014\(1\)_1_2015/eureca_14\(1\)_98_111.pdf](http://jestec.taylors.edu.my/eureca2014(1)_1_2015/eureca_14(1)_98_111.pdf).

APPLICATION OF COSOLVENTS AND EUTECTIC SOLVENTS IN BIODIESEL PRODUCTION

Zoran B. Todorović,¹ Vlada B. Veljković²

¹ Faculty of Technology in Leskovac, University of Niš

² Serbian Academy of Sciences and Arts, Branch of the SASA in Niš,
Kneza Mihaila 35, Belgrade

The paper presents a classification of cosolvents based on their physicochemical properties. The solubility of cosolvents has been analyzed: partition coefficient, the Hildebrand-Scott definition of the solubility parameter, and the Hansen solubility parameter. The application of cosolvents in transesterification reactions is thoroughly analyzed. By adding an adequate amount of cosolvent to the reaction medium for biodiesel production, the solubility of the oil in alcohol increases. The use of cosolvents in the transesterification reaction allows not only the reduction of the reaction time but also the alcohol-to-oil molar ratio, temperature, catalyst amount, and thus the production and operational costs. The addition of a cosolvent to the reaction system can simultaneously influence the separation of the catalyst, the reaction products, and unreacted reactants. The second part of the paper focuses on defining eutectic solvents as a new generation of green solvents that are easily prepared using safe and readily available components, and whose properties can be adjusted to different needs, enabling wide applications. The paper provides a classification of eutectic solvents based on the nature of the constituents, polarity, and the number of constituents. Natural, therapeutic, and magnetic eutectic solvents are described. The use of eutectic solvents in biodiesel production is thoroughly analyzed, with numerous examples from the literature. Eutectic solvents are used either alone or in combination with other catalysts in processes such as esterification, transesterification, and two-step processes involving esterification followed by alkaline-catalyzed transesterification. Furthermore, these solvents are used as solvents in biocatalyzed transesterifications. One of their advantages is the ability to minimize side reactions, such as saponification, which significantly facilitates the subsequent separation and purification of the obtained products.

Keywords: biodiesel, cosolvents, eutectic solvents.

УТИЦАЈ БИОДИЗЕЛА НА ПЕРФОРМАНСЕ, ЕМИСИЈУ ИЗДУВНИХ ГАСОВА И ПОУЗДАНОСТ МОТОРА СУС

Милан Томић,¹ Наташа Ђуришић-Младеновић²

¹ Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет, Нови Сад

² Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад,
Нови Сад

У раду је размотрен утицај биодизела на перформансе, потрошњу горива, емисију издувних гасова и поузданост мотора са унутрашњим сагоревањем. Употреба биодизела не захтева модификације на мотору. Захваљујући свом хемијском саставу, биодизел има повољне физичко-хемијске особине, виши цетански број и бољу мазивост у поређењу са дизелом. Услед ниже топлотне моћи, употреба биодизела, посебно у чистом облику, најчешће доводи до благог пада снаге и обртног момента мотора, као и до повећане специфичне потрошње горива. С друге стране, значајна предност биодизела огледа се у смањењу емисије CO, угљоводоника и честичне материје. Међутим, резултати испитивања указују да примена биодизела изазива пораст емисије NO_x. Поузданост мотора при раду са биодизелом се генерално повећава захваљујући бољој мазивости и смањеном стварању наслага у мотору.

Кључне речи: биодизел, снага, потрошња горива, емисија издувних гасова, поузданост

1. Увод

Интензивно повећање коришћења енергије, условило је потребу проналажења њених алтернативних извора, који ће бити прилагођени постојећим конструкцијама мотора, уз задовољење додатних критеријума везаних за обновљивост, заштиту животне средине и поузданост коришћења. Током последње три деценије, биодизел је постао најпознатије обновљиво течно гориво, управо због задовољења наведених критеријума. Наиме, применом биодизела нису потребне адаптације на мотору или систему за напајање мотора горивом. По свом саставу, биодизел представља смешу алкил естара виших масних киселина. Производи се од биљних уља или животињских масти, чиме задовољава критеријум обновљивости. Трећи критеријум, који се односи на заштиту животне средине, најзначајнија је предност биодизела. Наиме, добро је познато, да се дизел (ЕД) састоји од стотине различитих ланаца угљоводоника, са остацима сумпора и пре-

остале сирове нафте. Поред тога, чак и ниско сумпорни и нискоароматични фосилни дизел садржи 20–24% аромата који су испарљиви, токсични и канцерогени [1]. Са друге стране, биодизел не садржи сумпор нити ароматична једињења. Применом биодизела смањује се хабање делова мотора, што је последица добрих мазивих својства биодизела у односу на ЕД [2], чиме је задовољен и четврти критеријум (поузданост коришћења).

2. Физичкохемијске особине биодизела и њихов утицај на рад мотора

Квалитет биодизела у Европи одређен је стандардом ЕН14214, а у САД стандардом АСТМ Д6751 (Таб. 1). Европски стандард дефинише биодизел као метил-естре масних киселина (МЕМК), а амерички као естре масних киселина што омогућава употребу различитих врста алкохола [3].

Биодизел се све више користи као додатак ЕД. Мешавине се означавају као БХХ, где ХХ означава процентуални удео биодизела. Стандард ЕН 590:2009+A1:2010 дозвољава додавање до 7% биодизела у ЕД, док ЕН 16709:2015 и ЕН 16734:2016 дефинишу мешавине Б10, Б20 и Б30. У САД, АСТМ Д7467-13 регулише мешавине Б6-Б20 (табела 1).

Иако сви параметри дефинисани стандардима датим у табели 1 нису директно повезани са процесом сагоревања, они могу ометати сагоревање и тиме утицати на емисију штетних материја и поузданост коришћења биодизела. У наставку је дат кратак опис значаја и утицаја датих параметара.

Табела 1 Физичко-хемијске карактеристике чистог биодизела као и његових мешавина са ЕД [3]

Карактеристика	Јединица	Б100	Б10	Б20	Б30	Б6-Б20	
		EN14214	ASTM D6751	EN16734: 2016.	EN16709: 2015.	EN16709: 2015.	ASTM D7467
Густина на 15 °С	kg·m ⁻³	860-900	820-845	820-860	825-865		
Кинематска вискозност на 40 °С	mm ² ·s ⁻¹	3,5-5,0	1,9-6,0	2,0-4,5	2,00-4,26	2,00-4,65	
Цетански број	-	>51	>47	>51	>51	>51	>40
Садржај МЕМК	% (v·v ⁻¹)	>96,5	<10	14,0-20,0	24,0-30,0	6-20	
Тачка паљења	°С	>101	>130	>55	>55	>52	
Садржај метанола	% (mm ⁻¹)	<0,2					
Садржај воде	mg·kg ⁻¹	<500	<200	<260	<290	<200	
Укупно нечистоћа	mg·kg ⁻¹	<24					

Наставак табеле 1

Карактеристика	Јединица	Б100	Б10	Б20	Б30	Б6-Б20	
		EN14214	ASTM D6751	EN16734: 2016.	EN16709: 2015.	EN16709: 2015.	ASTM D7467
Угљенични остатак	% (m·m ⁻¹)	<0,3	<0.05	<0.3			
Садржај сулфатног пепела	% (m·m ⁻¹)	<0,02	<0.02				
Корозија бакарне плочице	Класа	1	Br.3 max	1			
Садржај сумпора	mg·kg ⁻¹	<10					
Садржај фосфора	mg·kg ⁻¹	<4	<0,001				
Јодни број	g I ₂ ·100g ⁻¹	<120					
Садржај естара линолеинске киселине	% (m·m ⁻¹)	<12					
Садржај полинезасићених масних киселина	% (m·m ⁻¹)	<1					
Оксидативна стабилност (110 °C)	h	>8	>3	>20	>20	>20	>6
Киселински број	mg KOH·g ⁻¹	<0.5	<0.5				<0.30
Слободни глицерол	% (m·m ⁻¹)	<0.02	<0.020				
Садржај моноглицерида	% (m·m ⁻¹)	<0.7					
Садржај диглицерида	% (m·m ⁻¹)	<0.2					
Садржај триглицерида	% (m·m ⁻¹)	<0.2					
Укупни глицерол	% (m·m ⁻¹)	<0.25	<0.24				
Метали I групе (Na+K)	mg·kg ⁻¹	<5	<5				
Метали II групе (Ca+Mg)		<5	<5				
Нискотемпературне карактеристике							
Тачка замућења	°C		-3 - -12				
Тачка стињавања	°C		-15 - -16				
Филтрабилност	°C		<5				

Густина горива зависи од његовог хемијског састава. Промена густине утиче на перформансе и дуготрајност рада мотора, а истовремено може повећати потрошњу горива и емисију издувних гасова [2]. Савремени дизел мотори су подешени за рад са горивом које има одговарајућу густину, на основу које се калибрише количина убризгавања горива [4].

Код биодизела, густина зависи од састава масних киселина (МК) [5]. Густина биодизела је обрнуто пропорционална молекулској маси његових састојака и директно пропорционална степену незасићености. То значи да се густина смањује са порастом дужине ланца МК, док се повећава са порастом незасићености [6]. Ово својство може се користити као показатељ присуства непожељних једињења у биодизелу, као и за процену његовог квалитета [7].

Кинематичка вискозност има значајан утицај на распршивање горива у комори за сагоревање. Ниже вредности вискозитета омогућавају формирање ситнијих капљица горива током убризгавања, што погодује бољој атомизацији и хомогенијем мешању са ваздухом. Ипак, ситније капљице, поседују нижу кинетичку енергију, те им је смањена способност пенетрације у дубину коморе за сагоревање. Супротно томе, горива веће вискозности формирају крупније капљице већег средњег пречника, које имају већу кинетичку енергију и дубље продиру у комору, али истовремено доприносе нехомогености смеше [8]. Превише ниска вискозност може неповољно утицати на рад пумпе високог притиска, јер услед недостатка подмазивања долази до појачаног хабања њених елемената. Такође, слабије заптивање услед ниске вискозности може узроковати губитке горива и његову неправилну дистрибуцију. Због тога се доња граница вискозности одређује на основу заптивних и подмазујућих својстава, док се горња граница поставља у складу са захтевима за финоћом распршивања.

Код **биодизела**, вискозност расте са порастом дужине ланца и степена засићености МК [9]. Такође, значајан утицај има и конфигурација дво-струке везе – *транс* конфигурација доводи до веће вискозности у поређењу са *цис* конфигурацијом [10]. Присуство органских нечистоћа, као што су неизреаговани три-, ди- или моноглицериди, такође може допринети повећању вискозности.

Цетански број (CN) представља кључни показатељ његове способности да се спонтано запали под условима високог притиска и температуре у цилиндру мотора. Повећање CN доприноси смањењу кашњења паљења, што води ка тишем и потпунијем сагоревању смеше, а тиме и смањењу емисије штетних издувних гасова. Овај ефекат је посебно изражен током стартовања мотора и у режимима рада при ниском оптерећењу. Повећање CN са 50 на 58 скраћује време паљења за око 40%, што

резултује смањењем емисије NO_x (до $\approx 9\%$), HC (30–40%) и CO (до 26%). Пораст CN изнад вредности оптимално предвиђене за конкретан мотор не доноси додатна побољшања перформанси. Код **биодизела**, CN расте са порастом дужине угљоводоничног ланца и степена засићености МК [11]. Биодизел природно поседује виши CN у поређењу са ЕД [12].

Садржај естара представља основни параметар квалитета биодизела. Нижи удео МЕМК може указивати на присуство неизреагованих супстанци или контаминацију спојевима који нису естарске природе. Такве нечистоће могу изазвати запушавање филтера, стварање наслага у мотору, као и оштећења система за обраду издувних гасова.

Тачка паљења и садржај метанола представљају уско повезана својства која одређују безбедносни ризик приликом складиштења и транспорта биодизела. Типичне вредности тачке паљења биодизела су између 150 и 170 °C, међутим, присуство заосталог метанола може значајно снижити ову вредност. Када садржај метанола премаши дозвољену границу дефинисану стандардом, тачка паљења пада испод 100 °C, чиме се значајно повећава опасност од запаљења. Заостали метанол такође снижава CN , погоршава мазивост, изазива корозију компоненти од Al и Zn .

Садржај воде у биодизелу има кључан утицај на његову стабилност и особине током експлоатације. Повећана количина воде може довести до хидролизе естара МК, што резултира стварањем СМК, које изазивају корозију и запушавање филтера. Због хигроскопности, биодизел лако апсорбује влагу из околине, а када садржај воде пређе границу растворљивости ($\sim 0,15\% \text{ m/m}$), долази до таложења слободне воде, стварања муља и развоја микроорганизама, што може запушити систем за напајање горивом.

Садржај сулфатног пепела указује на присуство неорганских загађивача, као што су метални сапуни, остаци катализатора и абразивне честице. Током сагоревања, ови материјали оксидишу и формирају пепео који може узроковати накупљање наслага у мотору и зачепљење ДПФ-а.

Угљенични остатак је индикатор склоности горива да у условима ограниченог приступа кисеонику формира кокс, који се таложи на ињекторима и у комори за сагоревање. Ова особина је повезана са присуством глицерола, СМК, остатака катализатора и високом концентрацијом полинезасићених МК.

Укупна контаминација односи се на присуство нерастворљивих честица које могу настати током производње (нпр. сапуни) или бити унете приликом складиштења и транспорта. Ове нечистоће узрокују запушавање филтера, отежан проток горива, преоптерећење и хабање пумпи, као и неправилан рад система за убризгавање.

Корозија бакарне траке указује на присуство киселих једињења која могу изазвати оштећења компоненти од Cu, Zn и бронзе. Овај параметар је уско повезан са киселинским бројем и редовно се користи као показатељ хемијске стабилности горива.

Садржај глицерола (слободног, моно-, ди- и триглицерида, као и укупног глицерола) зависи претежно од ефикасности производног процеса. Недовољно испирање може оставити заостали глицерол, који се временом таложи и реагује са другим поларним једињењима. Ове супстанце могу изазвати коксовање и стварање чврстих наслага на бризгалкама и вентилима. Повишене вредности вискозности и угљеничног остатка често указују на повећан садржај глицерола.

Јодни број представља меру укупне незасићености МК у биодизелу. Већи јодни број указује на већи садржај двоструких веза и тиме већу подложност оксидацији и полимеризацији, што може узроковати стварање наслага на виталним компонентама мотора.

Присуство фосфора негативно утиче на ефикасност катализатора и доводи до повећане емисије чврстих честица. Иако је биодизел природно ниског садржаја фосфора, он се може појавити као последица неадекватне естерификације.

Присуство алкалних и земноалкалних метала (Na, K, Ca, Mg) у биодизелу углавном потиче из катализатора и апсорбената. Ови метали учествују у формирању нерастворљивих сапуна, могу изазвати блокаде у системима за убризгавање и убрзати механичко хабање компоненти.

Садржај сумпора у биодизелу је по правилу занемарљив, али присуство заосталог сумпора услед киселе естерификације СМК може узроковати хабање мотора и смањену ефикасност ДПФ и СЦР система.

Киселински број указује на присуство СМК и неорганских киселина у биодизелу. Висок киселински број повећава ризик од корозије и таложења наслага. Он је такође добар показатељ деградационих промена током складиштења горива.

Оксидациона стабилност означава способност биодизела да одоли оксидацији на собној температури. Ова особина је нарочито важна за биодизел богат вишеструко незасићеним МК. Током оксидације долази до формирања пероксида, који даље прелазе у киселине, алдехиде и кетоне, док паралелно могу настајати полимери, смоле и муљ. Ови производи изазивају пораст вискозности, запушавање филтера и таложење наслага на кључним компонентама мотора.

Температура блокаде хладног филтера (CFPP) је кључни параметар при оцени нискотемпературних особина биодизела. Она означава најнижу температуру на којој гориво може неометано пролазити кроз филтер.

На CFPP утичу дужина и засићеност МК, као и њихова разгранатост. Дуги и засићени ланци подижу тачку топљења, док двоструке везе и разгранате структуре побољшавају понашање биодизела на ниским температурама.

3. Утицај биодизела на перформансе мотора и потрошњу горива

Већина истраживача потврђује да примена чистог биодизела доводи до извесног смањења снаге и обртног момента мотора. Овај ефекат се најчешће приписује нижој топлотној вредности биодизела у поређењу са ЕД. Ипак, уочен пад перформанси је у многим случајевима мањи од очекиваног. Резултати испитивања показују да се пад обртног момента и снаге може кретати од неколико процената до око 9%, у зависности од сировинске основе, својстава горива и услова рада. Просечан пад обртног момента од 9,1% забележен је у истраживању [13], док је у раду [14] регистровано смањење снаге од 7,14% употребом Б100. Анализом биодизела из семена памука, забележено је смањење снаге у распону од 3 до 6%, уз 5% нижу топлотну вредност горива у поређењу са ЕД [15], а користећи Б100 на бази сунцокретовог уља, утврђен је минималан пад снаге и обртног момента, уз очекивано повећање специфичне потрошње горива [16]. Слично томе, у раду [17] је забележено просечно смањење снаге од 4,4% при коришћењу Б100 из отпадних уља, што је објашњено већом вискозношћу, већом густином и нижом топлотном вредношћу горива (за око 8,8%).

Применом мешавина биодизела у ЕД, аутори наводе да су разлике у перформансама занемарљиве, нарочито код мешавина са мањим уделом биодизела. Снага мотора опада постепено са повећањем учешћа биодизела у смеси, што се повезује са повећањем вискозности и смањењем топлотне вредности горива [18]. Занимљиво је да одређене мешавине могу позитивно утицати на перформансе. Тако је забележио повећање снаге при додавању до 20% биодизела, што нарочито долази до изражаја при пуном и делимичном оптерећењу [8,19].

Један од најчешће забележених ефеката употребе биодизела јесте пораст специфичне потрошње горива. Ово се првенствено приписује нижој топлотној вредности. Пораст потрошње најчешће је пропорционалан смањењу топлотне вредности, а расте са повећањем учешћа биодизела у смеси.

4. Утицај биодизела на емисију издувних гасова

4.1. Утицај биодизела на емисију азотних оксида (NO_x)

Бројна истраживања показују да употреба Б100 резултира повећаном емисијом NO_x у поређењу са ЕД, и то у распону од 6% до чак 27% [2,8,20-22]. Иако Зелдовичев механизам, који описује термичко формирање NO при високим температурама сагоревања, представља основни модел за објашњење настанка NO_x у дизел моторима, он не може у потпуности објаснити овај пораст. Наиме, сагоревање биодизела се генерално одвија при нижим температурама (просечно и до 10% ниже у односу на ЕД [2]), што упућује на значајан допринос додатних фактора.

Један од кључних узрока повећања емисије NO_x при примени биодизела јесте његов хемијски састав – посебно присуство молекуларно везаног кисеоника садржаног у биодизелу у просеку између 10 и 12% [23]. Ипак, поједини резултати указују на комплекснији механизам. Тако је, на пример, забележено да Б100 произведен од уљане репице, иако има највиши садржај кисеоника (10,9%), емитује мању количину NO_x у поређењу са мешавином Б35 [24]. Слично је уочено и код биодизела добијеног из јатрофе, где је емисија NO_x била већа при употреби Б20 него Б100 [25]. Једно од могућих објашњења лежи у чињеници да биодизел не садржи ароматичне угљоводонике, који су присутни у значајној мери у ЕД и доприносе стварању NO_x [26].

Такође, биодизел генерално има виши CN од ЕД, што значи краћи период кашњења паљења и ранији почетак сагоревања. Овакав сценарио доводи до дужег задржавања сагорелих гасова у комори мотора, чиме се потенцијално повећава време излагања азота високој температури и, последично, формирање NO_x [27]. Међутим, виши CN истовремено смањује удео фазе предмешања, што резултира блажим сагоревањем и мањим градијентом пораста притиска, те нижим цикличним температурама. Ово би, парадоксално, требало да допринесе смањењу NO_x емисије [28].

На емисију NO_x утиче и већа количина горива која сагорева у комори, услед веће густине биодизела (око 3,5% у односу на ЕД). Уз то, због већег вискозитета биодизела, убризгана запремина може бити додатно повећана за 1,2–3,2% [29], чиме се сагорева додатна количина горива.

Емисија NO_x зависи од режима рада мотора. Повећањем броја обртаја, емисија NO_x опада, због смањене запреминске ефикасности и краћег времена задржавања гасова у комори. Насупрот томе, при нижим обртајима долази до већег уноса ваздуха и дужег времена сагоревања, што погодује формирању NO_x [30].

Оптерећење мотора има значајан утицај: концентрација NO_x у сагорелим гасовима расте са повећањем оптерећења, али се емисија по јединици снаге повећава до 50% оптерећења, након чега стагнира [20].

Удео биодизела у горивној смеси има готово линеаран утицај на емисију NO_x . На пример, применом мешавина Б15, Б25, Б50, Б75 и Б100 емисија NO_x расте за 1,51%, 3,10%, 4,89%, 9,59% и 11,38% респективно [8].

Биодизели богати незасићеним МК и са краћим угљеничним ланцима показују повећану емисију NO_x [31].

Смањење емисије NO_x могуће је постићи применом различитих техничких и технолошких мера (ЕГР, СЦР, вишестепеним убризгавањем горива, скраћењем времена сагоревања, хлађењем уисног ваздуха).

4.2. Утицај биодизела на емисију угљен-монооксида (СО)

Примена биодизела, било као чистог или као компоненте у мешавинама са ЕД, генерално доводи до смањења емисије СО. Обим редукције зависи од процентуалног учешћа биодизела у смеси, као и од сировинског порекла и хемијског састава самог горива [32]. Пресудни утицај имају садржај кисеоника и CN, док су дужина угљеничних ланаца и степен засићености МК у биодизелу значајни фактори. Наиме, МК са дужим ланцима повољно утичу на смањење емисије СО [31].

Експериментална истраживања указују на јасан тренд смањења емисије СО са порастом удела биодизела у горивној смеси. Употребом мешавина Б15, Б25, Б50, Б75 и Б100 забележено просечно смањење емисије СО у односу на ЕД за 1,84%, 3,79%, 9,30%, 11,43% и 13,15%, респективно [32]. Највећи ефекат редукције остварен је у режиму рада при максималном оптерећењу, где је емисија СО смањена и до 29,1% [8].

Насупрот томе, при нижим оптерећењима, уочено је да биодизел може изазвати благи пораст емисије СО у поређењу са ЕД и мешавинама са нижим уделом биодизела (нпр. Б20), и то у просеку за око 8,33% [20]. Овај ефекат се тумачи вишим коефицијентом вишка ваздуха у том режиму рада, који умањује релативни допринос кисеоника из биодизела, као и сниженом температуром сагоревања и лошијом хомогенизацијом смеси услед веће вискозности и неповољних дестилационих карактеристика биодизела.

4.3. Утицај биодизела на емисију несагорелих угљоводоника (НС)

Сагоревање биодизела резултира значајним смањењем емисије НС, које се у литератури креће у интервалу од 45% до 67% у поређењу са ЕД. Ова редукција приписује се вишем садржају кисеоника у биодизелу, вишем CN, као и ранијем почетку убризгавања горива, услед његове веће густине, вискозности и мањег степена стишљивости [25, 31–34].

Вишеструка истраживања указују на то да се повећањем удела биодизела у горивној смеси емисија НС постепено смањује. Ипак, неки аутори извештавају да су најниже емисије НС постигнуте при нижим уделима биодизела (Б10 и Б20) [34]. Даље повећање удела биодизела у мешавини може довести до благог пораста емисије НС, иако су апсолутне вредности и даље ниже него код коришћења чистог ЕД. Ова појава се тумачи нижом топлотном вредношћу биодизела, што узрокује повећану специфичну потрошњу горива, што у одређеним локалним зонама у комори за сагоревање може довести до неповољног односа горива и ваздуха.

Према америчкој Агенцији за заштиту животне средине (ЕПА), повећањем садржаја биодизела у смеси долази до смањења емисија токсичних једињења као што су ацеталдехид, етилбензен, формалдехид, нафтален и ксилен. Са мањим степеном поузданости, бележи се и смањење акролеина и н-хексана, док код стирена може доћи до благог пораста. За једињења попут бензена, 1,3-бутадиенских и толуенских фракција још увек не постоје довољно уверљиви експериментални подаци за доношење коначних закључака [36].

Смањење емисије НС употребом биодизела повезано је са структуром МК. Дужи угљенични ланци и виши степен zasiћености доприносе повећању CN и садржаја кисеоника, што води ка стабилнијем сагоревању и мањој емисији несагорелих угљоводоника.

4.4. Утицај биодизела на емисију чврстих честица (PM)

Примена биодизела доводи до значајног смањења емисије PM – и преко 50% у поређењу са емисијама које се остварују употребом ЕД [20–22,28]. Ова редуција резултат је више синергијских фактора: високог садржаја кисеоника у молекулима биодизела, нижег атомског односа угљеник/водоник, одсуства ароматичних једињења и сумпора, као и вишег CN који доприноси краћем времену кашњења паљења и повољнијем развоју фазе сагоревања услед ранијег убризгавања горива [19, 38–39].

Хемијска структура МЕМК значајно утиче на формирање чврстих честица. Биодизели са краћим угљеничним ланцима показују израженију тенденцију смањења PM, док степен zasiћености масних киселина, не показује статистички значајан утицај [31, 39].

Емисија PM показује изражену корелацију са уделом биодизела у горивној смеси – са порастом садржаја биодизела долази до линеарног смањења њене емисије [40].

5. Утицај биодизела на поузданост мотора са унутрашњим сагоревањем

Већина аутора се слаже да биодизел, захваљујући свом хемијском саставу и већем садржају кисеоника, доприноси потпунијем сагоревању и тиме смањује стварање чврстих депозита унутар мотора [41].

Биодизел показује повољнија мазива својства у поређењу са ЕД. Према истраживањима [42–43], биодизел значајно смањује коефицијент трења и доприноси дужем радном веку компонената мотора. На пример, присуство рицинолеинске киселине у рициновом уљу побољшава мазивост биодизела и на тај начин доприноси заштити механичких делова [44]. И биодизел добијен из сунцокретовог уља показује добре подмазујуће особине, што се приписује високом садржају линеолне киселине [2].

6. Закључак

Биодизел представља перспективно и одрживо алтернативно гориво које омогућава значајно смањење емисије штетних гасова, уз истовремено побољшање мазивости и смањење хабања делова мотора. Иако његова употреба може довести до благог пада снаге и повећања специфичне потрошње горива, као и потенцијалног пораста емисије азотних оксида, ови ефекти се могу успешно контролисати одговарајућим техничким решењима и оптимизацијом услова сагоревања.

Међутим, кључни предуслов за поуздану и дуготрајну експлоатацију мотора на биодизел јесте **обезбеђивање одговарајућег квалитета горива у складу са захтевима стандарда ЕН14214**. Употреба горива које не испуњава ове захтеве може довести до зачепљења филтера, корозије, стварања наслага, деградације компоненти система за убризгавање и значајног смањења поузданости мотора. Због тога, уз предности које нуди са становишта заштите животне средине и одрживости, **доследна примена стандарда ЕН14214 и контрола квалитета биодизела представљају неопходан услов за његову безбедну, ефикасну и дуготрајну употребу у дизел моторима**.

Списак скраћеница

ЕД – гасно уље евро дизел (EN 590:2022); МК – масне киселине; Б15, Б20, Б25 – мешавина биодизела и ЕД са запреминским учешћем 15, 20, 25 зап.% биодизела; Б100 – чист биодизел; ПМ – чврсте честице (енг. *Particulate Matter*), МЕМК – метил естри масних киселина; ЕЕМК – етил естри масних киселина; СМК – слободне масне киселине; ДПФ – филтер чврстих честица (енг. *Diesel Particulate Filter*); СЦР – селективна каталитичка редуција (енг. *Selective catalytic reduction*)

Захвалница

Рад је део активности аутора на Програмима Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије 451-03-137/2025-03/200134 и 451-03-137/2025-03/200117.

Литература

1. U. Randal, Technical Handbook for Marine Biodiesel. Cito Culture Environmental Biotechnology US: 1999.
2. M. Tomić, L. Savin, R. Mičić, M. Simikić, T. Furman, Energy. 65, (2014) 101-108.
3. Н. Ђуришић-Младеновић, З. Предојевић, Алтернативна горива, Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад, Нови Сад (2021).
4. A. Q. Mairizal, S. Awad, C. R. Priadi, D. M. Hartono, S. S. Moersidik, M. Tazerout, Y. Andres, Renew Energ. 145, (2020) 375–381.
5. C. Caldeira, F. Freire, E.A. Olivetti, R. Kirchain, R. Fuel, 196, (2017) 13–20.
6. T. H. Gouw, J. C. Vlughter, J. Am. Oil Chem. Soc. 41, (1964) 142-145
7. M. Tomić, N. Đurišić-Mladenović, R. Mičić, M. Simikić, L. Savin, Fuel, 235, (2019) 269–276.
8. M. Tomić, L. Savin, R. Mičić, M. Simikić, T. Furman, Therm. Sci. 17, (2013) 263-278.
9. G. Knothe, K. Steidley, Fuel. 84, (2005) 1059-1065.
10. S. Z. Erhan, S. Asadauskas, A. Adhvaryu, J. Am. Oil Chem. Soc. 79(11) (2002).
11. J. H. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements, G. Knothe, NREL/SR-510-36244. (2004).
12. P. Saxena, S. Jawale, M. H. Joshipura, Procedia Eng. 51, (2013) 395–402.
13. A. C. Hansen, M.R. Gratton, W. Yuan, Trans. ASABE, 49, (2006) 589-595
14. S. Murillo, J.L. Miguez, J. Porteiro, E. Granada, J.C. Moran, Fuel, 86, (2007) 1765-1771
15. H. S. Yücesu, I. Cumali, Energy Sources, Part A, 28, (2006) 389-398
16. M. Karabektas, G. Ergen, International Symposium on Combustion, Kirikkale University, 67, (2006) 689-694.
17. Z. Utlu, M.S. Koçak, Renew Energ. 33, (2008) 1936-1941.
18. H. Aydin, H. Bayindir, Renew Energ. 35, (2010) 588-592.
19. M. Gumus, S. Kasifoglu, Biomass Bioenerg. 34, (2010) 134-139.
20. M. Tomić, L. Savin, M. Simikić, F. Kiss, K. Kešelj, M. Ivanišević, O. Ponjičan, M. Zoranović, A. Sedlar, Fuel, 292, (2021) 120300
21. M. J. Hass, K. M. Scott, T. L. Alleman, R. L. McCormick, Energ Fuel. 15, (2001) 1207-12.

22. M. Simikić, M. Tomić, L. Savin, R. Mičić, I. Ivanišević, M. Ivanišević, *Renew Energ.* 121, (2018) 677-687.
23. O. A. Kuti, J. Zhu, K. Nishida, X. Wang, Z. Huang, *Fuel.* 104, (2013) 838-846.
24. G. Labeckas, S. Slavinskas, *Energy Convers. Manag.* 47, (2006) 1954-1967.
25. P. K. Sahoo, L. M. Das, M. K. G. Babu, P. Arora, V. P. Singh, N. R. Kumar, et al., *Fuel.* 88, (2009) 1698-1707.
26. Q. Yu, and B. Khandelwal, *Energies*, 17, (2024) 3939.
27. S. Lahane, K.A. Subramanian, *Fuel.* 139, (2015) 537-545.
28. D. M. Knežević, *Dok. Diser., Mašinski fakultet Beograd*, (2014).
29. M. E. Tat, PhD thesis, Iowa State University. (2003).
30. C. Y. Lin, R. J. Li, *Fuel Process. Technol.* 90, (2009) 883-888.
31. B. F. Lin, J.H. Huang, D. Y. Huang, *Fuel.* 88, (2009) 1779-85.
32. A. N. Ozsezen, M. Canakci, *Biomass Bioenerg.* 34(12), (2010) 1870-1878.
33. A. N. Ozsezen, M. Canakci, A. Turkcan, C. Sayin, *Fuel*, 88, (2009) 629-636.
34. H. Ozgunay, S. Çolak, G. Zengin, O. Sari, H. Sarikahya, L. Yuceer, *Waste Manag.*, 27, (2007) 1897-1901.
35. A. Tsolakis, A. Megaritis, M. L. Wyszynski, K. Theinnoi, *Energy*, 32, (2007) 2072-2080.
36. US Environmental Protection Agency. (2002). (EPA 420-P-02-001).
37. A. K. Yadav, M. E. Khan, A. M. Dubey, A. Pal, *Case Stud. Therm. Eng.* 8, (2016) 236-244.
38. M. A. Mujtaba, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, L. Razzaq, H. Mehmood Khan, M.S. Elahi, M.M. Soudagar, M. Gul, W. Ahmed, V. Dhana Raju, R. Kumar, H. C. Ong, *Renew Energ.* 179, (2021) 1447-1457.
39. M. Lapuerta, J. M. Herreros, L. L. Lyons, R. Garcia-Contreras, Y. Brice, *Fuel.* 87, (2008) 3161-9.
40. D. H. Qi, L. M. Geng, H. Chen, Y. Z. H. Bian, J. Liu, X. C. H. Ren, *Renew Energ.* 34, (2009) 2706-13.
41. S. Sinha, A. K. *J Eng Gas Turb Power.* 132, (2010) 42801-42811.
42. M. S. Graboski, R. L. McCormick, *Prog. Energy Combust. Sci.* 24(2), (1998) 125-164.
43. M. Lapuerta, O. Armas, J. R. Fernandez, *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, (2008) 198-223.
44. J. W. Goodrum, D. P. Geller, *Bioresour Technol.* 96(7), (2005) 851-5.

INFLUENCE OF BIODIESEL ON PERFORMANCE, EXHAUST GAS EMISSIONS, AND RELIABILITY OF IC ENGINES

Milan Tomić, Nataša Đurišić–Mladenović

This paper discusses the influence of biodiesel on engine performance, fuel consumption, exhaust gas emissions, and the reliability of IC engines. The use of biodiesel does not require modifications to the engine. Due to its chemical composition, biodiesel possesses favorable physicochemical properties, a higher cetane number, and better lubricity compared to diesel fuel. The use of biodiesel, especially in its pure form, most often results in a slight decrease in engine power and torque, as well as an increase in specific fuel consumption due to its lower heating value. On the other hand, a significant advantage of biodiesel lies in the reduction of CO, HC, and PM emissions. However, test results indicate that the use of biodiesel leads to an increase in NO_x emissions. Engine reliability when operating on biodiesel generally improves due to better lubricity and reduced deposit formation within the engine.

Keywords: biodiesel, power, fuel consumption, exhaust gas emissions, reliability

УТИЦАЈ ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА БИОДИЗЕЛА НА ГЛОБАЛНО ЗАГРЕВАЊЕ И ЕНЕРГЕТСКИ БИЛАНС ЊЕГОВЕ ПРОИЗВОДЊЕ

Ференц Е. Киш

Универзитет у Новом Саду, Технолошки факултет Нови Сад

Овај рад испитује угљенични отисак (УО) и кумулативну потребу за енергијом из фосилних извора (КПФЕ) у животном циклусу биодизела, на основу прегледа 55 анализа животног циклуса објављених у научним часописима после 2010. године. Резултати су изражени по јединици енергије у биодизелу како би се осигурала упоредивост података. Просечан УО биодизела добијеног из сирових или рафинисаних биљних уља, без утицаја промене употребе земљишта, креће се у распону 37–66 г CO_2 екв./МЈ, у зависности од сировине. С друге стране, УО биодизела произведеног из отпадних уља и масти просечно износи око 20 г CO_2 екв./МЈ, што је знатно мање у поређењу са УО фосилних горива који износи 94 г CO_2 екв./МЈ. Укључивање утицаја због промена употребе земљишта обично повећава УО биодизела, али чак и када се тај утицај узме у обзир, око 70% резултата показује ниже вредности у односу на УО фосилних горива. У зависности од сировине, просечна КПФЕ биодизела се креће у распону 0,4–0,6 МЈ/МЈ, што је значајно ниже у поређењу са КПФЕ фосилних горива.

Кључне речи: оцењивање животног циклуса, ЛЦА, угљенични отисак, енергетски биланс, биодизел.

1. Увод

Биодизел се често промовише као зелена алтернатива фосилном гориву, јер угљен-диоксид (CO_2) који се ослобађа приликом његовог сагоревања, за разлику од CO_2 из фосилних горива, не доприноси глобалном загревању, док је биомаса, која се користи као сировина за производњу биогорива, суштински обновљив извор енергије.

Међутим, у многим процесима у сложенем животном циклусу биодизела користи се енергија из необновљивих извора и емитују гасови са ефектом стаклене баште (ГЕСБ) који умањују степен обновљивости биодизела и доприносе његовом угљеничном отиску. Фосилна горива се користе за производњу сировина, конверзију уља и масти у биодизел, као и за дистрибуцију горива. У производном ланцу биодизела се користе различите хемикалије и други материјали чија производња захтева енер-

гију из фосилних извора и доприноси емисији ГЕСБ. Поред тога, производња уљарица за потребе индустрије биодизела може имати за последицу превођење шума и травнатих површина у оранице, што је по правилу праћено губитком органског угљеника у земљишту и вегетацији у виду емисије CO_2 , док примена азотних ђубрива доприноси емисији азот-диоксида (N_2O), који има близу триста пута већи потенцијал глобалног загревања у односу на исту масу CO_2 [1].

Како би се сагледао укупан утицај биодизела, потребно је анализом обухватити коришћење енергије и емисију ГЕСБ у свим процесима који су повезани са његовим животним циклусом. Метод оцењивања животног циклуса (енг. Life Cycle Assessment, LCA), који је дефинисан стандардима ISO 14040:2006 и ISO 14044:2006, омогућује сагледавање укупних токова енергије и материјала у целокупном животном циклусу биодизела, почев од производње сировине, конверзије сировине у биодизел, дистрибуцију горива и сагоревање биодизела [2]. Европска комисија у свом извештају из 2003. године (COM (2003)302) је заузела став да ЛЦА пружа најбољи методолошки оквир за оцењивање утицаја производа на животну средину, док Директива Европског парламент и Савета (ЕУ) 2018/2001, позната као директива о биогоривима, захтева примену овог приступа за вредновање угљеничног отиска биогорива.

Циљ овог рада је да се кроз преглед ранијих резултата ЛЦА установи угљенични отисак и потреба животног циклуса биодизела за енергијом из фосилних извора у зависности од врсте сировине. Посебна пажња биће посвећена идентификацији фаза и процеса у животном циклусу биодизела са значајним доприносима његовом укупном утицају.

2. Метод

Претраживањем рецензираних радова у бази научних часописа Скопус (енг. *Scopus*), идентификован је значајан број ЛЦА биодизела. За даљу анализу изабрани су радови у којима се квантификује угљенични отисак (УО) и/или кумулативна потреба за енергијом из фосилних извора (КПФЕ) применом метода за процену утицаја животног циклуса (енг. *Life Cycle Impact Assessment, LCIA*). Разматране су искључиво студије објављене након 2010. године, имајући у виду стално унапређење енергетске ефикасности у производњи биомасе и њеној конверзији у биогорива, као и развој ЛЦА методологије, нарочито у погледу свеобухватнијег укључивања токова и процеса у животном циклусу производа.

Анализа је била ограничена на најважније сировине за производњу биодизела (слика 1), на којима се заснива око 90% светске производње биодизела [3]. Детаљном анализом обухваћено је 55 радова који одго-

варају наведеним критеријумима. С обзиром на то да се у појединим радовима наводи више од једног резултата – на пример, анализира се осетљивост резултата на промене у условима и начину производње или на методске изборе – укупан број података износи 234 за УО и 50 за КПФЕ.

Како би резултати различитих ЛЦА студија били упоредиви, сви резултати су исказани у односу на 1 МЈ енергије у биодизелу (рачунато према доњој топлотној моћи горива): у грамима еквивалента CO_2 по МЈ биодизела (g CO_2 екв./МЈ) за УО и у количини енергије садржане у фосилним горивима утрошеним у животном циклусу биодизела по МЈ биодизела (МЈф/МЈ) за КПФЕ.

При прерачунавању резултата који су изворно изражени у односу на масу или запремину биодизела, коришћена је доња топлотна моћ биодизела по јединици масе и запремине (како је наведено у директиви о биогоривима). У случајевима где су резултати исказани у односу на пређени пут, узети су у обзир само радови у којима је наведена специфична потрошња биодизела по јединици раздаљине.

У случају биодизела добијеног трансестерификацијом триглицерида метанолом (метил естри масних киселина, МЕМК), резултати добијени анализом утицаја производног ланца повећани су за 4 г CO_2 екв./МЈ (процена заснована на подацима из [4]) како би се обухватио и утицај CO_2 фосилног порекла који настаје приликом сагоревања биодизела. Наиме, око 5,3% CO_2 који се ослобађа при сагоревању МЕМК потиче од метанола, који се углавном добија из фосилних горива [4]. Иста корекција примењена је и на анализе целокупног животног циклуса у којима је погрешно претпостављено да током сагоревања МЕМК не долази до емисије CO_2 фосилног порекла.

3. Резултати и дискусија

3.1. Угљенични отисак и потреба животног циклуса биодизела за енергијом из фосилних извора

Слика 1 даје преглед обрађених резултата ранијих ЛЦА који се односе на угљенични отисак биодизела. Посебно су приказани резултати који не узимају у обзир емисије ГЕСБ настале као последица промене у употреби земљишта (ПУЗ) и резултати који укључују ове утицаје. На основу ранијих ЛЦА могу се издвојити неколико кључних запажања у вези са угљеничним отиском биодизела.

Прво, налази показују да биодизел генерално има нижи УО у поређењу са референтним фосилним горивом, чија вредност према директиви о биогоривима износи 94 г CO_2 екв./МЈ. Детаљна анализа резултата ранијих студија показала је да је 98% процена које не укључују утицаје ПУЗ и

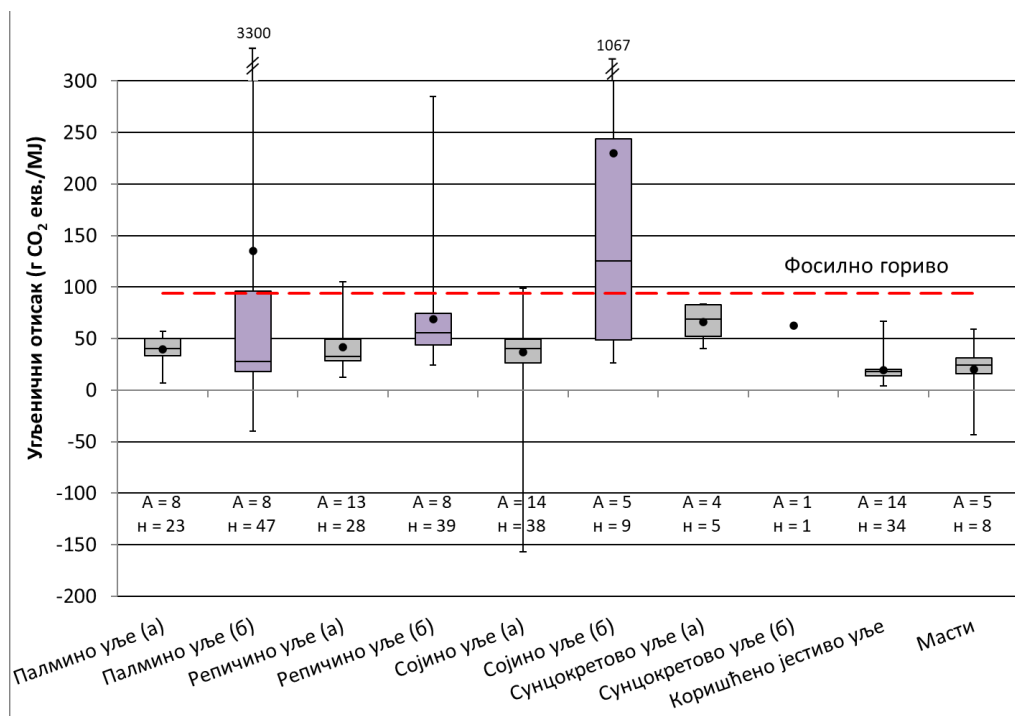
72% процена које их укључују било ниже од УО фосилног дизела. Просечна вредност свих обрађених резултата, укључујући и екстремне, износи 68 г CO_2 екв./МЈ, док је медијана 36 г CO_2 екв./МЈ.

Друго, студије које узимају у обзир и утицаје ПУЗ генерално дају веће вредности УО у односу на оне које не разматрају ове утицаје, али постоје изузеци. Медијана резултата који укључују утицаје ПУЗ износи 45 г CO_2 екв./МЈ, што је приближно 45% више од медијане резултата који не разматрају те утицаје. Разлика је још израженија када се посматрају просечне вредности: аритметичка средина резултата који узимају у обзир утицаје ПУЗ износи 115 г CO_2 екв./МЈ, у поређењу са 34 г CO_2 екв./МЈ за резултате без тих утицаја.

Треће, биодизел произведен од отпадних материјала, као што су коришћено јестиво уље или отпад из кланичне индустрије (биодизел друге генерације), обично има нижи УО у поређењу са биодизелом произведеним од сирових или рафинисаних биљних уља (биодизел прве генерације). У зависности од сировине, медијане без ПУЗ се крећу у распону 33–69 г CO_2 екв./МЈ за биодизел прве генерације, док је медијана за коришћено јестиво уље 18 г CO_2 екв./МЈ (слика 1). Ова разлика углавном произлази из уобичајене претпоставке у ЛЦА биодизела да је отпад, као сировина за биодизел, доступан без терета (енг. *burden-free*) за даљу употребу, односно да је утицај ове сировине до момента сакупљања једнак нули [1].

Четврто, резултати ЛЦА биодизела показују значајну варијабилност. Појединачне вредности крећу се у широком опсегу од -157 до 3300 г CO_2 екв./МЈ (слика 1). Значајне разлике у резултатима уочене су и у случају биодизела произведеног од исте сировине, што се приписује разликама у условима производње, пољопривредним праксама, технологијама производње, изворима енергије, као и примени различитих приступа инвентарисању животног циклуса, пре свега дефинисању граница система и решавању проблема мултифункционалности [1,5]. Недовољно разумевање емисија повезаних са употребом ђубрива и заштитних средстава, као и последица ПУЗ на глобално загревање такође доприносе варијабилности резултата [1].

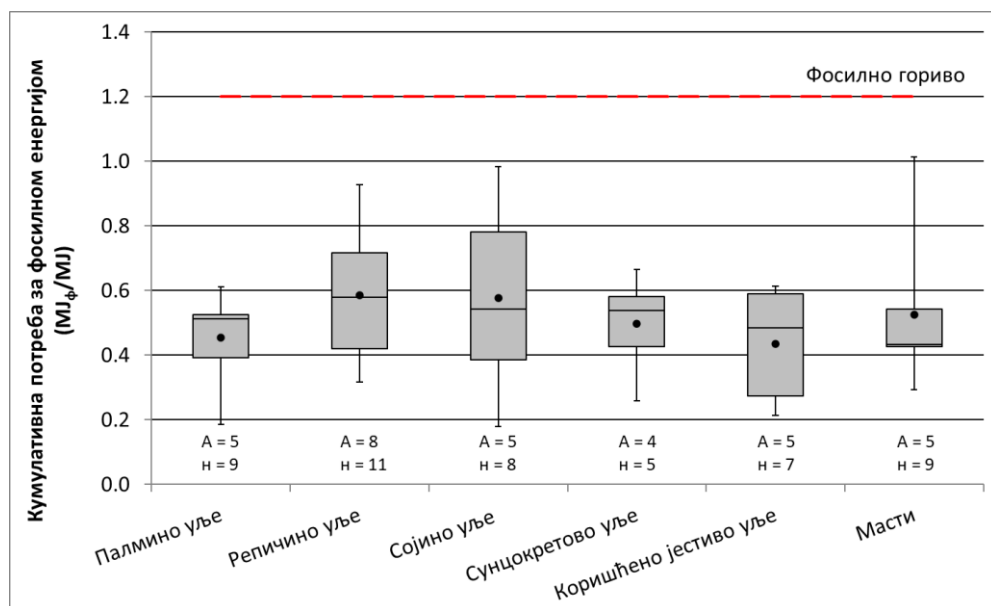
Процене кумулативне потребе животног циклуса биодизела за енергијом из фосилних извора доследно су ниже у односу на КПФЕ фосилног дизела (1,2 MJ_f/MJ [6]). Просечна вредност се креће од 0,4 MJ_f/MJ до 0,6 MJ_f/MJ (слика 2), у зависности од сировине, што значи да се добија око два пута више енергије у гориву него што је фосилне енергије употребљено за његову производњу, односно да је енергетски биланс биодизела по овом критеријуму позитиван. Међутим, важно је напоменути да овај показатељ узима у обзир само енергију из фосилних извора и не укључује обновљиве изворе енергије или друге необновљиве изворе,



Слика 1 Преглед резултата претходних процена угљеничног отиска биодизела, без утицаја (а) и са утицајем (б) промене употребе земљишта. *Објашњење:* Слово *A* означава број литературних извора, а *n* број података из литературе на основу којих је креирана слика. Хоризонтална линија унутар правоугаоника одговара медијани, а црна тачка аритметичкој средини свих резултата. Доња линија правоугаоника представља 30. перцентил а горња 70. перцентил ординално поређених резултата, док екстрими показују најмању и највишу вредност.

као што је нуклеарна енергија. Стога, КПФЕ потцењује укупне потребе животног циклуса за енергијом, посебно у контексту актуелних трендова преласка са фосилних на обновљиве изворе енергије у многим регионима. Ипак, КПФЕ остаје најчешће коришћен показатељ за процену употребе енергије у анализама животног циклуса биодизела [5].

Занимљиво је да предност биодизела друге генерације у смислу КПФЕ није толико изражена као у случају УО. Просечна вредност КПФЕ за биодизел друге генерације износи $0,48 \text{ MJ}_f/\text{MJ}$, што је само 9% ниже у односу на просечну вредност за биодизел прве генерације, док се разлика повећава на 15% када се посматрају медијане. Ово је делимично последица релативно високих енергетских потреба за обраду отпадних уља и масноћа [6], као и великих удаљености које је потребно прећи ради сакупљања потребних количина отпадних материја за потребе фабрика биодизела [7]. Међутим, оно што је кључно, емисије ГЕСБ повезане са



Слика 2. Преглед резултата ранијих процена кумулативних потреба животног циклуса биодизела за енергијом из фосилних извора. *Објашњење:* Слово *A* означава број литературних извора, а *n* број података из литературе на основу којих је креирана слика. Хоризонтална линија унутар правоугаоника одговара медијани, а црна тачка аритметичкој средини свих резултата. Доња линија правоугаоника представља 30. перцентил а горња 70. перцентил ординално поређених резултата, док екстремни показују најмању и највишу вредност.

применом ђубрива и ПУЗ, које су главни разлог за већи УО биодизела прве генерације, немају утицај на КПФЕ [5]. Ове емисије су такође један од главних узрока великих варијација у резултатима УО, што објашњава мању варијацију у вредностима КПФЕ у поређењу са варијацијама у случају УО за биодизел (упореди слике 1 и 2).

3.2. Фазе и процеси за значајним доприносом укупном утицају биодизела

Животни циклус биодизела прве генерације по правилу обухвата следеће фазе: производњу уљарица, у оквиру које се често исказују и утицаји ПУЗ; припрему семена или плода за даљу прераду; издвајање уља, обично пресо-вањем и/или екстракцијом; производњу биодизела, најчешће трансестерификацијом метанолом у присуству алкалног катализатора; и, коначно, сагоревање биодизела.

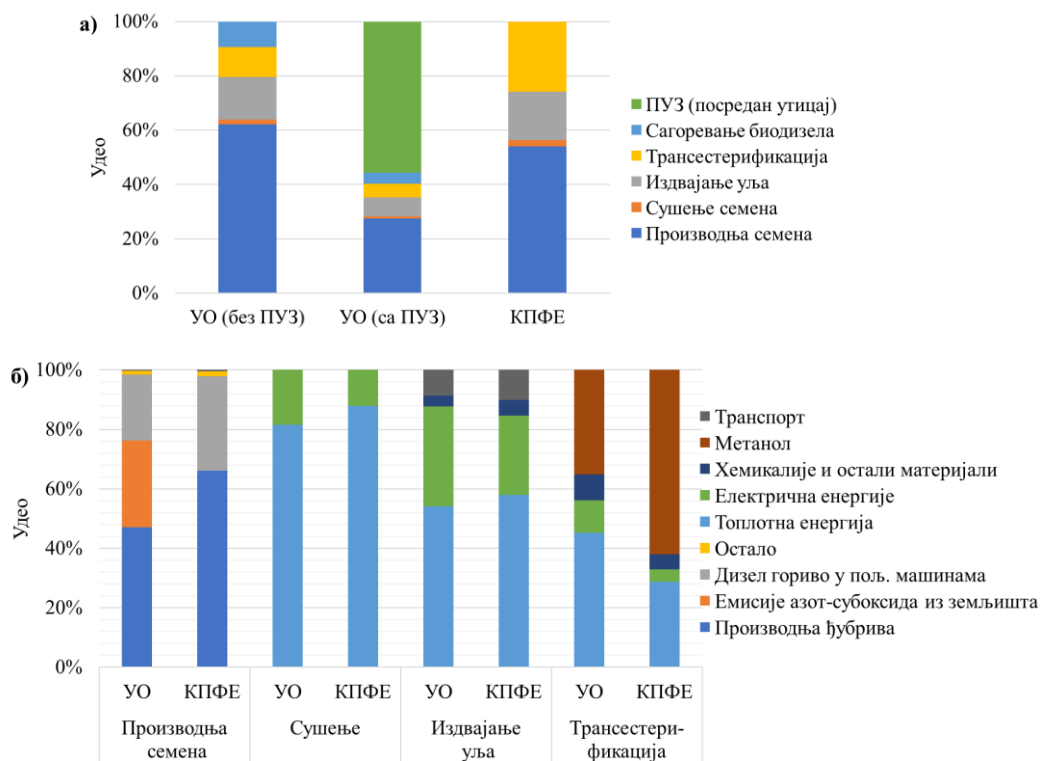
У случају МЕМК, процес сагоревања у просеку доприноси око 5–10% укупном УО биодизела, у зависности од сировине, углавном због присуства фосилног угљеника у биодизелу и мањих количина метана који се

ослобађа током процеса. Када се за трансестерификацију користи биоетанол, допринос ове фазе је занемарљив. Фаза сагоревања не утиче на КПФЕ.

Ако се занемаре утицаји ПУЗ, већина студија показује да фаза пољопривредне производње највише доприноси УО и КПФЕ биодизела добијеног од уља уљане репице и сунцокрета. У овој фази, емисије N_2O , настале микробиолошким процесима нитрификације и денитрификације, чине 30–60% укупног утицаја на глобално загревање, док је остатак углавном повезан са ГЕСБ који су настали у производњи минералних ђубрива, пре свега азотних, и у животном циклусу фосилног горива коришћеног за погон пољопривредних машина [5].

Производња уљарица има значајан удео у укупној потрошњи фосилних горива у животном циклусу биодизела добијеног из ратарских култура (доприносећи са 40–50%), углавном због енергетски интензивне производње минералних ђубрива и потрошње дизел горива у механизацији [5]. Поред тога, фаза трансестерификације такође значајно доприноси КПФЕ и УО биодизела, првенствено због високих енергетских потреба процеса, али и употребе метанола, који се обично добија из фосилних извора [5]. Слика 3 приказује допринос појединих фаза и процеса формирању УО и КПФЕ биодизела произведеног од уљане репице узгајане у Војводини, уз напомену да су могуће велике варијације резултата између различитих региона.

Код сојиног биодизела, многе студије извештавају о значајним емисијама повезаним са ПУЗ. Велики део светске производње соје долази из земаља Јужне Америке, где се соја често узгаја на земљишту добијеном крчењем шума и обрађивањем савана [9,10]. Процењује се да је трансформација природних земљишта у пољопривредна одговорна за 70–77% угљеничног отиска сојиног биодизела произведеног у Аргентини [11]. Производња уљарица у Европи и Сједињеним Америчким Државама углавном се одвија на ораничним површинама, те не доводи директно до ПУЗ, али може имати посредне ефекте [5]. Наиме, узгајање сировина за биодизел на површинама које се иначе користе за производњу хране може довести до конверзије економски непродуктивног земљишта (нпр. природних шума) у оранице на другој локацији, како би се надоместио испад у производњи хране, што је често праћено значајним емисијама ГЕСБ [1]. Процене посредних ефеката захтевају сложене моделе и карактерише их велика несигурност, што резултира широким распоном резултата. У случају уљане репице, процене посредних ефеката на ПУЗ у литератури се крећу у распону од 46 г CO_2 екв./МЈ до 1.434 г CO_2 екв./МЈ [5], док директива о биогоривима препоручује средњу вредност од 55 г CO_2 екв./МЈ као квантитативни израз ових ефеката за све уљарице произведене у Европи.



Слика 3. Допринос појединих фаза (а) и процеса (б) угљеничном отиску и потрошњи фосилних горива у животном циклусу биодизела произведеног од уља уљане репице. Извор: На основу [8].

Главна предност соје у односу на уљану репицу и сунцокрет је њена способност фиксирања атмосферског азота, што значајно смањује потребу за азотним ђубривима. Ипак, део азота из биљних остатака и даље може допринети емисијама N_2O [12]. Када се занемаре утицаји ПУЗ, сојин биодизел има сличан или мањи утицај на глобално загревање у односу на биодизел од уљане репице. Међутим, ова предност се углавном губи када се урачунају утицаји ПУЗ (слика 1). Поред тога, за разлику од уљане репице и сунцокрета, код соје уље није главни производ, па соју треба разматрати као сировину за биодизел само у случајевима када је обезбеђено тржиште за сојину сачму.

У случају биодизела из палминог уља, утицаји настали због ПУЗ имају највећи ефекат на УО. Крчење тропских шума и исушивање тресетишта ради успостављања плантажа могу довести до екстремно високих емисија ГЕСБ. Процењује се да конверзија тресетних подручја може ослободити до $3.300 \text{ г } CO_2 \text{ екв./MJ}$, док конверзија примарних шума резултира емисијама од око $370 \text{ г } CO_2 \text{ екв./MJ}$ [13]. Супротно томе, узгој палми на

деградираном земљишту може довести до нето секвестрације угљеника, смањујући УО палминог биодизела [14].

Палма има већи принос уља по хектару (3–4 тоне) у односу на остале уљарице и захтева мање инпута у пољопривредној производњи [13]. Поред тога, процес издвајања уља је углавном енергетски самоодржив, јер се енергија добија из отпадне биомасе која настаје током прераде палминог плода [13]. Међутим, велике количине отпадне воде из овог процеса представљају значајан извор метана [15]. Ако се не третира, метан из отпадних вода може значајно повећати УО палминог биодизела. На пример, у литератури се наводи да се спаљивањем метана на бакљи угљенични отисак фазе издвајања уља може смањити са 19 г CO₂ екв./MJ на 2,3 г CO₂ екв./MJ, што представља смањење од 85%, уз додатне могућности за даље смањење ако се примени нека технологија за хватање и коришћење биогаза [15].

У анализама животног циклуса биодизела произведеног од коришћених јестивих уља, аутори редовно игноришу потенцијалне утицаје који претходе прикупљању уља, фокусирајући се само на утицаје сакупљања, претходне обраде и производње биодизела углавном кроз двофазни процес који укључује естерификацију киселином и алкалну трансестерификацију [5].

Овај приступ претпоставља да су коришћена јестива уља отпад који је доступан без терета за даљу употребу, јер се утицај процеса у којем настају у целости приписује главном производу тог процеса (нпр. храни). Већина студија истиче да је производна фаза најзначајнији извор утицаја, при чему трансестерификација има доминантан допринос укупним емисијама ГЕСБ и КПФЕ [16]. Висока потрошња енергије и употреба метанола добијеног из фосилних извора објашњавају доминантан утицај ове фазе [17]. Претходна обрада коришћених јестивих уља, која укључује филтрирање и смањење киселости, такође доприноси укупном утицају, али у знатно мањој мери – између 10% и 15% укупног утицаја [17].

Када је реч о доприносу фазе прикупљања, студије дају различите резултате [5]. Док га неке сматрају занемарљивим извором утицаја, друге указују да може чинити између 5% и 25% укупног утицаја биодизела, у зависности од удаљености и начина сакупљања [18]. У појединим случајевима, посебно у системима прикупљања од врата до врата или путем контејнера постављених на јавним местима, емисије из фазе сакупљања могу бити доминантан фактор у укупним утицајима биодизела произведеног од коришћених јестивих уља, чинећи до 50% укупног утицаја на глобално загревање [7].

Животињска маст се у већини студија третира као отпад, односно утицаји који претходе њеном сакупљању искључени су из анализе, јер се у

целости приписују месу као главном производу кланичне индустрије [6, 19, 20]. Те студије наглашавају значајан утицај термичке екстракције масти из масних ткива и других сировина животињског порекла на резултате. Термичка екстракција је изузетно енергетски захтеван процес који обично користи фосилна горива за загревање, што га чини примарним извором укупних емисија ГЕСБ и КПФЕ у животном циклусу биодизела од масти [6]. Додатно, трансестерификација повећава УО и КПФЕ, углавном због употребе метанола и потрошње енергије у процесу [6, 19, 20]. Иако су екстракција масти и трансестерификација главни извори утицаја, неке студије показују да транспорт такође може значајно допринети укупним утицајима, нарочито када се маст превози на велике удаљености.

Неки аутори сматрају да маст није отпад, већ споредни производ кланичне индустрије, јер има економску вредност [21, 22]. У тим студијама део утицаја узгоја стоке и рада кланице приписује се масти, што значајно повећава укупни утицај биодизела произведеног из животињске масти.

4. Закључци

За добијање 1 МЈ енергије у биодизелу потребно је 0,4–0,6 МЈ енергије из фосилних извора, што је знатно ниже него у случају дизел горива фосилног порекла. У већини случајева, биодизел такође има мањи угљенични отисак, али ова предност зависи од врсте сировине, услова и начина производње.

Највећи изазов у смањењу УО биодизела представљају значајне емисије ГЕСБ услед пренамене земљишта или промена у начину употребе земљишта због производње сировина за биодизел. Производња биогорива од сировина које непосредно или посредно доводе до крчења шума или конверзије природних екосистема може знатно повећати емисије CO_2 , што у појединим случајевима доводи до већег УО у односу на фосилно гориво.

Поред утицаја ПУЗ, кључне фазе које доприносе УО и потрошњи фосилних горива у животном циклусу биодизела прве генерације су пољопривредна производња и трансестерификација. У фази пољопривредне производње, емисије N_2O из земљишта значајно доприносе УО, док производни ланац минералних ђубрива, нарочито азотних, као и животни циклус фосилних горива, такође доприносе УО и у великој мери су одговорни за високе КПФЕ ове фазе. Значајан допринос фазе трансестерификације укупном утицају последица је високих енергетских потреба процеса, али и употребе метанола добијеног из фосилних извора. У случају палминог биодизела, метан који се ослобађа из отпадних вода насталих у процесу производње палминог уља може значајно повећати његов УО ако се не третира на адекватан начин.

Резултати ранијих студија показују да биодизел произведен од коришћених јестивих уља и отпадних масти има мањи угљенични отисак у поређењу са биодизелом прве генерације, првенствено због уобичајене претпоставке да су ове сировине отпадни токови и да су самим тим доступне без терета за даљу прераду. Међутим, с обзиром на актуелне тржишне трендове, које карактерише раст потражње за овим сировинама и ван индустрије биодизела, поставља се питање да ли се сва коришћена јестива уља и масти могу сматрати отпадом и да ли је претпоставка о њиховој „бесплатној доступности“ и даље оправдана.

Захвалница

Ово истраживање подржало је Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Уговор бр. 451-03-136/2025-03/200134).

Литература

1. Ф. Киш, Зборник радова са научног скупа : Потенцијал и ефекти коришћења биомасе у Републици Србији, Београд, Србија (2024) 229–240.
2. J. Malça, A. Coelho, F. Freire, *Appl. Energy* 114 (2014) 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.048>
3. U. S. Department of Agriculture, Growing Demand for Fats and Oils Due to Global Biodiesel Expansion, <https://www.fas.usda.gov/data/growing-demand-fats-and-oils-due-global-biodiesel-expansion> [приступљено 21. јуна 2024]
4. I. Sebos, *Carbon Manag.* 13(1) (2022) 154–163. <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2046173>
5. V. Veljković, N. Đurišić-Mladenović, M. Tomić, F. Kiss, Biodiesel and the Environment, In: *Encyclopedia of Renewable Energy Engineering*, Elsevier, Amsterdam (2025, прихваћено за објављивање)
6. J. Dufour, D. Iribarren, *Renew. Energy* 38(1) (2012) 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.016>
7. C. Caldeira, J. Queirós, F. Freire, *Waste Biomass Valori.* 6(5) (2015) 771–779. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9386-z>.
8. F. Kiss, R. Korhecz, In: *Proc. of the 29th International Scientific Conference of Strategic Management and Decision Support Systems in Strategic Management (SM 2024)*, Subotica, Serbia (2024) 253–260.
9. V. P. P. Esteves, E. M. M. Esteves, D. J. Bungenstab, D. G. S. W. Loebmann, D. de Castro Victoria, L. E. Vicente, O. de Queiroz Fernandes Araújo, C. do Rosário Vaz Morgado, *Clean Technol. Environ. Policy* 18(6) (2016) 1655–1673. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1161-8>

10. U. Kesieme, K. Pazouki, A. Murphy, A. Chrysanthou, J. Environ. Manage. 235 (2019) 96–104.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.036>
11. L. Panichelli, A. Dauriat, E. Gnansounou, Int. J. Life Cycle Assess. 14(2) (2009) 144–159. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0050-8>
12. H. Cai, M. Wang, A. Elgowainy, J. Han, Updated N₂O Emissions for Soybean Fields. Systems Assessment Group, Argonne National Laboratory. Lemont, Illinois, USA (2015)
13. M. N. A. Hassan, P. Jaramillo, W. M. Griffin, Energy Policy 39(5) (2011) 2615–2625. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.030>
14. A. Meijide, C. de la Rua, T. Guillaume, A. Röhl, E. Hassler, C. Stiegler, A. Tjoa, T. June, M.D. Corre, E. Veldkamp, A. Knohl, Nat. Commun. 11(1) (2020) 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14852-6>
15. É. G. Castanheira, F. Freire, Int. J. Life Cycle Assess. 22(4) (2017) 587–600. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1097-6>
16. H. Hosseinzadeh-Bandbafha, A. S. Nizami, S. A. Kalogirou, V. K. Gupta, Y. K. Park, A. Fallahi, A. Sulaiman, M. Ranjbari, H. Rahnama, M. Aghbashlo, W. Peng, M. Tabatabaei, Renew. Sustain. Energy Rev. 161 (2022) 112411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112411>.
17. Y. Zhao, C. Wang, L. Zhang, Y. Chang, Y. Hao, Renew. Sustain. Energy Rev. 140 (2021) 110661. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110661>.
18. S. Foteinis, E. Chatzisyneon, A. Litinas, T. Tsoutsos, Renew. Energy 153 (2020) 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.022>.
19. T. Thamsiroj, J.D. Murphy, Renew. Energy 36(1) (2011) 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.05.018>.
20. N. Faleh, Z. Khila, Z. Wahada, M.N. Pons, A. Houas, N. Hajjaji, Renew. Energy 127 (2018) 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.046>.
21. V. P. P. Esteves, C. D. R. V. Morgado, O. D. Q. Fernandes Araújo, Clean Technol. Environ. Policy 22(4) (2020) 965–978. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01842-x>
22. V. M. Z. Sousa, S. M. Luz, A. Caldeira-Pires, F. S. Machado, C. M. Silveira, Int. J. Life Cycle Assess. 22(11) (2017) 1837–1850. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1647-x>.

LIFE CYCLE IMPACT OF BIODIESEL ON GLOBAL WARMING AND THE ENERGY BALANCE OF ITS PRODUCTION

Ferenc E. Kiss

This paper examines the carbon footprint (CF) and cumulative fossil energy demand (CFED) of biodiesel throughout its life cycle, based on a review of 55 life cycle assessments published in scientific journals since 2010. To ensure data comparability, the results are expressed per unit of energy in biodiesel. The average carbon footprint of biodiesel produced from raw or refined vegetable oils, excluding the impact of land use change, ranges from 37 to 66 g CO₂ eq./MJ, depending on the feedstock. In contrast, biodiesel derived from waste oils and fats has a CF of approximately 20 g CO₂ eq./MJ in average, which is lower than that of fossil diesel (94 g CO₂ eq./MJ). Land use change generally increases the carbon footprint of biodiesel; however, even when this factor is considered, about 70% of the results indicate lower values than those of fossil diesel. The cumulative fossil energy demand of biodiesel ranges from 0.4 to 0.6 MJ/MJ, remaining significantly lower than that of fossil fuels.

Keywords: life cycle assessment, LCA, carbon footprint, energy balance, biodiesel.

ЕЛЕКТРИЧНА ВОЗИЛА И ОДРЖИВИ РАЗВОЈ ДРУМСКОГ САОБРАЋАЈА

Слободан Н. Вукосавић^{1,2}

¹ Електротехнички факултет Универзитета у Београду

² Српска академија наука и уметности, Београд

Проширени сажетак

Одрживи развој друмског саобраћаја и декарбонизација сектора транспорта кључни су за смањење емисије гасова са ефектом стаклене баште, за ублажавање климатских промена и за смањење загађења. Електрична возила (ЕВ) са литијумским батеријама су најчешће помињана алтернатива конвенционалним возилима на фосилна горива. ЕВ са литијумским батеријама су често помињана у наступима политичара и често критикована од стране стручњака. Литијумске батерије су самозапаљиве, пламен је веома тешко угасити, при сагоревању емитују значајне количине канцерогених супстанци, њихова градња тражи значајне количине мангана, никла, кобалта, бакра, алуминијума и графита, док им је специфична снага знатно мања од специфичне снаге натријумских батерија, које су око два пута јефтиније. Да би се побољшала одрживост, неопходно је улагати у истраживање лаких, сигурнијих алтернатива батерија, као што су натријумске, калијумске и друге батерије. На дужи рок, оптимално решење за декарбонизацију транспорта је градња возила са ендотермичким моторима који користе такозвана „зелена горива”, чија производња и потрошња имају нулту нето емисију угљен-диоксида. Енергија за производњу „зелених горива” може се добити из соларних и ветроелектрана које нису прикључене на електричну мрежу. На описани начин може се обезбедити енергија потребна за транспорт, уз истовремено избегавање веома значајних трошкова и техничких проблема које би створило прикључење соларних и ветроелектрана на електричну мрежу. Решавање техничких проблема у градњи описаног система је од виталног значаја за реализацију пуног потенцијала одрживих решења у друмском саобраћају.

Средишњи део предавања садржи критику текућих планова за декарбонизацију и достизање климатске неутралности до 2050. године, уз посебан осврт на укупне количине критичних минерала које ће бити неопходне за градњу ветроелектрана, батерија, соларних електрана, електричних возила, мрежних складишта и других направа. Током преда-

вања приказани су релевантни и доступни подаци о ресурсима и резервама минерала, уз уважавање опција и могућности рециклирања. Указано је на растуће проблеме у прибављању минерала, и дати су конкретни предлози и решења којих би се требало придржавати у планирању технолошког развоја, опредељењу нових технологија и пројектовању направа и система на које се ослања зелена агенда. Поред квантитативних разматрања, размотрен је и низ значајних негативних последица које прате настојања земаља Европске уније да прибаве минерале у оближњим земљама. Подробна анализа последица до којих могу донети таква настојања полази од јасно исказаних штетних намера Европске комисије. Комисија жели да пресече Гордијев чвор сучељених жеља да се јефтино дође до минерала и жеља да у оквиру Уније не буде јефтиног, загађујућег рударења тако што ће пренети, „извести“ своје минерално-еколошке проблеме у оближње земље каква је Србија. Међутим, цена тога је политичка нестабилност, губитак поверења локалног становништва, сумње у перспективе Уније и стварање простора за све ваневропске силе на уштрб Србије и на штету ЕУ.

Већ постоји за Србију неповољна пракса увоза комуналног и индустријског отпада из Европске уније, отпада који се не рециклира, не спаљује и не одлаже на територији земаља Уније. У Србији се гомилају легалне и нелегалне депоније отпада, тако да прети реална опасност да Србија постане стециште свога и туђег отпада, што би отежало или онемогућило њено придруживање цивилизованом свету. Број депонија уз већином напуштене руднике достиже 250. Није познато да је било која од њих санирана, да је извршена ремедијација, нити да је обављена рекултивација и повратак ангажованог терена првобитној намени. Депоније су, у пуном значењу речи, еколошке бомбе које под утицајем природне разградње свих човекових творевина изложених зубу времена испуштају свој токсични садржај у околину, и које ће га испуштати наредних пар хиљада година. Ради процеса интеграције и прикључења Европској унији, неопходно је ускладити законе Републике Србије са законима ЕУ и забранити свако рударење које предвиђа депоније какве постоје у Бору и какве се планирају у Јадру, забранити испуштање токсичних вода и штетних гасова у окружење, и вратити у српске законе недавно уклоњене горње границе загађујућих токсичних материја у земљишту и у водама. Депонијско рударење са испуштањем вода је незамисливо у ЕУ, али се оно већ спроводи у источној Србији и планира у долини Јадра, у Богаџићу, Ваљевоу и на другим местима широм Србије. Ресорно министарство би морало обуставити све припреме за отварање нових рудника све док се земљиште, воде и ваздух у Бору, Мајданпеку, Новом Пазару, Зрењанину и целој Србији не доведу у стање коме сведочимо у Аустрији,

Норвешкој и Луксембургу. Такав подухват укључује и опоравак еколошког и хемијског статуса воде у Борској реци, у којој данас нема ни бактерија, заштиту вода у рекама какве су Пек, Млава, Дрина, Колубара, Морава, Јадар и друге од изливања канализације, индустријског и комуналног отпада, пластичних флаша и хемикалија, као и унапређење квалитета речних вода до нивоа подесног за потребе водоснабдевања. Другачије поступање би погоршало постојеће стање, обесхрабрило друге земље да нас приме у своје друштво, онемогућило процесе интеграција и трајно искључило Србију из цивилизованог света.

Ризике којима је изложена Србија увећавају настојања ЕУ да се минерали неопходни за производњу електричних возила прибављају у земљама какве су Конго, Мароко и Србија, где се може рударити на јефтин начин, са депонијама и са испуштањем токсичних садржаја у окружење, уз девастирајуће ефекте по земљу, водоснабдевање и живи свет. Немачки стручњаци (Клаудија Кемферт) и политичари (Франциска Брантнер) указују да је рударење какво се планира у Србији неприхватљиво на територији ЕУ, док би еколошки прихватљиво рударење било знатно скупље, што је узрок прећутне политике ЕУ да не спроводи рударење на територији Уније, већ да охрабри јефтино рударење у ваневропским земљама, чиме се еколошки ризици извозе из ЕУ у земље каква је Србија. Према досадашњој пракси, приходи земље домаћина су по правилу незнатни, док је утицај на окружење и становништво погубан и често непоправљив. Поред ризика које доноси јефтино, депонијско рударење, ризике доносе и климатске промене и раст температуре које утичу на водоснабдевање, ратарство, сточарство и на сав живи свет, а додатну опасност представља и настојање других земаља да у Србију допреме комунални и други отпад који не желе да задрже на својој територији. Током предавања наглашено је да европска индустрија има интерес да Србију користи као сировинску базу за јефтино прибављање минерала, пре свега зато што постојећа пракса у Србији допушта градњу депонија јаловине и отпада и испуштање вода на начин који прате девастирајући утицаји на животну средину, што је недопустиво и незамисливо у земљама ЕУ.

Постоји забрињавајућа иницијатива да ЕУ финансијски подржи рударске компаније, заинтересоване за рударење у Србији на уштрб вода, земљишта, живог света и становништва. Поборници таквих приступа улажу велики напор у дискредитовање сваког отпора локалног становништва. Представницима ЕУ је приказан филм „Не у мојој земљи: литијумске дилеме у Србији“, у коме се залагања српских активиста злонамерно и нетачно представљају као антиевропска, док се аутентичан отпор једног европског народа девастирајућем рударењу представља као плод рада руских тајних служби. Не буду ли раскринкане такве неутемељене инсинуације, може се догодити да се новац пореских обвезника ЕУ, намењен смањењу

зависности ЕУ од Кине, усмери ка компанији каква је Рио Тинто, чији је највећи појединачни акционар кинеска компанија. Подршка коју ЕУ пружа аутократском режиму у Србији, неосетљивост ЕУ на проблеме животне средине у Србији као и спремност да се допусте девастирајући ефекти јефтиног рударења могу код грађана Србије створити озбиљну сумњу у добре намере ЕУ. Ови неповољни процеси надовезују се на раст деснице у земљама ЕУ као и на регресију у национализам, што може озбиљно угрозити европску грађевину. Поред угрожавања ЕУ-интеграција, постоји и опасност да се Србија претвори у земљу прекривену рудницима, депонијама и отпадом. Услед екстремних падавина у кратким периодима, учестале су поплаве, што ће увећати ризике ослобађања токсичних материја из депонија. Појављују се и све дужи интервали летње суше услед измештања падавина из вегетативног дела године, док су све снажније и олује са градом, чији кумулативни ефекат наглашава и погоршава утицаје загађења животне средине и јефтиног рударења.

Предавање је дало осврт на значај и хитност смањења емисија угљен-диоксида у сектору транспорта као и на потребу сузбијања фосилних горива и њихову замену „зеленим“ горивима или електричном енергијом. Путеви остваривања „зелене агенде“ укључују електричне аутомобиле, батерије за складиштење електричне енергије, соларне електране, ветро-електране и друге направе чија производња захтева велике количине критичних минерала. Повећање просечне глобалне температуре и раст утрошка фосилних горива показују да су укупни ефекти досадашњих мера „зелене агенде“ били недовољни. Одлуке су доносили политичари под утицајем профитно мотивисаног крупног капитала, уз недовољан утицај објективних ставова независних стручњака, уз прекомерно ослањање на законе тржишта и уз занемаривање закона физике. Већина до сада коришћених решења захтева велике количине критичних минерала који су слабо заступљени у литосфери и до којих се све теже долази. Рециклирање минерала захтева знатне количине енергије и веома често је неизводљиво, јер техничка решења „зелене агенде“ нису пројектована тако да се олакша рециклирање. Положај ЕУ је утолико неповољнији зато што се критичним минералима потребним за градњу електричних аутомобила снабдева превасходно из Кине. Алтернатива – прибављање минерала путем рударења и прераде руде на територији ЕУ није прихватљива, јер је традиционално рударење са депонијама и испуштањем отпадних вода у окружење неприхватљиво у земљама ЕУ, док су другачија решења превише скупа. Поред осталог, традиционално рударење захтева значајан утрошак енергије, превасходно из фосилних горива каква су природни гас и деривати нафте. У случају јефтиног рударења по угледу на РТБ Бор и пројекат „Јадар“, оно наноси неприхватљиву штету људима и природи. У Европи се, поред осталог, разматрају и савремене методе рударења које

омогућују рад без депонија, које предвиђају пуну рецикулацију воде и које сваки вишак токсичних вода враћају у дубоке геолошке слојеве. Међутим, оне су још увек превише скупе, неисплативе, и нису довољно испитане у мери која би стручним и финансијским институцијама омогућила да европским земљама пружи неупитне гаранције у погледу заштите животне средине, као и накнаду свих врста штета до којих може доћи. Европа стога настоји да „извезе“ своје минерално-еколошке проблеме у земље каква је Србија, где се не примењују закони Европске уније, где се може спроводити традиционално рударење, и где се до минерала може доћи јефтино, науштрб угрожавања водоснабдевања, девастације земљишта и загађења ваздуха. Забрињавајућа околност за грађане Србије је неспремност ЕУ да се уважи потреба за очувањем водоснабдевања, пољопривреде и животног простора. Небрига према животној средини у Србији и подршка недемократским властима урушава поверење грађана у ЕУ, од чега могу профитирати сви други, осим ЕУ и Србије. Интерес ЕУ да јефтино прибавља минерале у Србији произилази пре свега из чињенице да би дугорочан ослонац ЕУ на текуће снабдевање сировинама из Кине довео ЕУ економију у незавидан положај, што је уједно главни покретач кампање преумљавања грађана Србије са циљем да се приволе да жртвују свој животни простор зарад јефтиног рударења. Водеће рударске компаније су превасходно сарађивале са земљама у којима постоји висок коруптивни потенцијал, нефункционалне институције и где су аутократске власти спремне да склопе споразум о рударењу који уништава природу и угрожава становништво. У земљама какве су Папуа Нова Гвинеја и Конго, растући отпори становништва јефтином и еколошки штетном рударењу били су узрок оружаних сукоба и грађанских ратова, што је угрожавало дугорочну сигурност снабдевања минералима. Безизлазан положај локалног становништва, препуштеног глобалним предаторима и корумпираним локалним властима може лако довести до нових сукоба, на штету свих заинтересованих страна, што се поново догађа у Конгу.

Решавање проблема набавке критичних минерала неопходних за развој аутомобилске индустрије тражи корените промене. Пре свега, неопходно је променити технологије у пољу декарбонизације транспорта. Поред тога, потребно је променити приступ пројектовању, ослонити се на лакше доступне минерале и уважити потребу да ислужени уређаји буду рециклирани. Током предавања, два наведена захтева су подробније образложена. Спровођење тренутно важеће зелене агенде захтевало би количине ретких земаља, графита, сребра и кобалта које су, респективно, 38, 61, 40, односно 40 пута веће од њихове годишње производње. Потребне количине сребра и кобалта су 1,724 односно 1,711 пута веће од одговарајућих глобалних резерви. Наведени аргументи не иду у прилог одрживости

зелене агенде, пре свега стога што се потребни уређаји и системи не могу произвести у потребним количинама. Дугорочно, развој и пројектовање уређаја и система који се масовно производе требало би да буду усмерени ка коришћењу минерала обилато заступљених у земљиној кори, чији масени удео премашује 0,1%, што укључује силицијум, алуминијум, гвожђе, калцијум, магнезијум, натријум, калијум, титанијум, манган и фосфор. До тада, важно је имати на уму да многи обновљиви извори и бројне друге направе које тренутно користимо заправо нису обновљиви због недостатка слабије доступних минерала. Стога би требало да буду пројектовани на начин који омогућује и олакшава енергетски ефикасно рециклирање, како би се смањиле потребе за рударењем и прерадом критичних минерала.

Ради осигурања непрекинутог снабдевања минералима, треба пронаћи решења која су дугорочно прихватљива и одржива за све заинтересоване стране. Локалном становништву сваке земље која пристане да буде сировинска база мора се понудити праведан удео у приходима и право на чист ваздух, воду и земљу. У земљама које теже уласку у ЕУ, постојеће депоније, загађено земљиште и воде морају се санирати и рекултивисати пре разматрања било каквог новог рударског пројекта. Сви подухвати слични пројекту „Јадар“ и све припреме за изградњу нових рудника морају бити обустављени док се стање земљишта, вода и ваздуха не доведе у исту равн са стањем земљишта, вода и ваздуха у земљама ЕУ. Требало би забранити све пројекте који предвиђају изградњу нових депонија или излучивање воде у окружење или реципијенте. Пре планирања нових рударских пројеката у земљама трећег света, стање њиховог земљишта, вода и ваздуха треба побољшати и одржавати на нивоу најбољих примера у земљама које ће преузети и користити минерале.

ELECTRIC VEHICLES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ROAD TRAFFIC

Slobodan N. Vukosavić^{1,2}

¹ Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade

² Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade

Sustainable development of road transport and decarbonization of the transport sector are key to reducing greenhouse gas emissions, mitigating climate change, and reducing pollution. Electric vehicles (EVs) with lithium batteries are the most frequently mentioned alternative to conventional vehicles running on fossil fuels. EVs with lithium batteries are often mentioned in speeches by politicians and often criticized by experts. Lithium batteries are self-igniting, the flame is very difficult to extinguish, they emit significant amounts of carcinogenic substances when burned, and their construction requires significant amounts of manganese, nickel, cobalt, copper, aluminum, and graphite, while their specific power is significantly lower than that of sodium batteries, which are about half the cost. To improve sustainability, it is necessary to invest in research into lightweight, safer battery alternatives, such as sodium, potassium, and other batteries. In the long term, the optimal solution for decarbonizing transport is to build vehicles with endothermic engines that use so-called “green fuels”, the production and consumption of which have zero net carbon dioxide emissions. The energy for the production of “green fuels” can be obtained from solar and wind power plants that are not connected to the electricity grid. In this way, the energy needed for transport can be provided, while avoiding the very significant costs and technical problems that connecting solar and wind power plants to the electricity grid would create. Solving the technical problems in the construction of the described system is of vital importance for realizing the full potential of sustainable solutions in road transport.

Додатак

Табела 1 Преглед предавања и предавача у оквиру циклуса

Тематска област	Предавачи	Наслов	Место, датум одржавања
Увод	Влада Вељковић ^а	Стање и перспектива технологије биодизела у Републици Србији	Огранак САНУ у Нишу,
	Ана Марјановић Јеромела ^б		29. фебруар 2024. године;
	Наташа Ђуришић-Младеновић ^в		Огранак САНУ у Новом Саду,
	Милан Томић ^г		15. март 2024. године
Сировине за добијање биодизела у Републици Србији	Ана Марјановић Јеромела	Потенцијал биљних уља као сировина за производњу биодизела у Републици Србији	Огранак САНУ у Нишу,
	Милан Томић		29. фебруар 2024. године
	Наташа Ђуришић-Младеновић		Огранак САНУ у Новом Саду,
	Милан Томић		26. април 2024. године
Технологије биодизела	Влада Вељковић	Компаративна анализа и могућности унапређења технологија биодизела	Огранак САНУ у Новом Саду,
	Ивана Банковић Илић ^д		15. март 2024. године
	Влада Вељковић		Огранак САНУ у Новом Саду,
	Зоран Тодоровић ^е		25. јун 2024. године
Употреба и еколошки утицај биодизела као транспортног горива	Влада Вељковић	Примена косолвената еутектичких растварача у добијању биодизела	Огранак САНУ у Новом Саду,
	Милан Томић		18. октобар 2024. године
	Наташа Ђуришић-Младеновић		Огранак САНУ у Нишу, 28. мај
	Ференц Киш ^в		2024. године
			Огранак САНУ у Нишу, 27.
			септембар 2024. године
	Слободан Вукосавић ^б	Електрична возила и одрживи развој друмског саобраћаја	Огранак САНУ у Нишу, 18. новембар 2024. године;
			Огранак САНУ у Новом Саду, 21. новембар 2024. године

^а Српска академија наука и уметности – Огранак САНУ у Нишу; ^б Институт за ратарство и повртарство, Институт од националног значаја за Републику Србију, Нови Сад; ^в Технолошки факултет у Нишу; ^г Технолошки факултет у Новом Саду; ^д Пољопривредни факултет Универзитета у Новом Саду; ^е Технолошки факултет у Лесковцу Универзитета у Нишу; и ^в Српска академија наука и уметности и Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

662.758.2(082)

ДОБИЈАЊЕ, употреба и еколошки утицај биодизела као транспортног горива : примљено на VI скупу Одељења техничких наука, одржаном 1. октобра 2025 / уредници Влада Вељковић, Владимир Срдић. - Ниш : САНУ, Огранак ; Нови Сад : САНУ, Огранак, 2026 (Ниш : Unigraf - X-сору). - 137 стр. : илустр. ; 24 cm

На спор. насл. стр.: Production, use, and environmental impact of biodiesel as a transport fuel. - Тираж 200. - Стр. 7-8: Предговор / уредници. - Напомене и библиографске референце уз текст. - Библиографија уз сваки рад. - Summaries.

ISBN 978-86-6184-119-4

а) Биодизел гориво -- Зборници
COBISS.SR-ID 194162185

ISBN 978-86-6184-119-4