

ПРИСТУПНА  
ПРЕДАВАЊА  
ДОПИСНИХ ЧЛАНОВА

БЕОГРАД • 2019



1841-2019

*Српска академија наука и уметности*  
*178 година*





ПРИСТУПНА ПРЕДАВАЊА  
ДОПИСНИХ ЧЛАНОВА

Књига I

ISSN 2683-4251

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

---

PRESIDENCY

# INAUGURAL LECTURES OF THE CORRESPONDING MEMBERS

Volume 1

The volume is published on account of the SASA  
Presidency resolution adopted at its 1<sup>st</sup> session of 28  
February 2019 and the SASA Executive Board resolution  
adopted at its 18<sup>th</sup> session of 19 September 2019

Editor

academician  
MIRO VUKSANOVIĆ

BELGRADE  
2019

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

---

ПРЕДСЕДНИШТВО

**ПРИСТУПНА ПРЕДАВАЊА  
ДОПИСНИХ ЧЛАНОВА**

Књига 1

Књига је објављена на основу одлуке Председништва  
САНУ са I седнице 28. фебруара 2019. и одлуке  
Извршног одбора САНУ са XVIII седнице  
19. септембра 2019. године

Уредник

академик  
МИРО ВУКСАНОВИЋ

БЕОГРАД  
2019

---

---

## SASA PRESIDENCY

academician Vladimir S. Kostić,  
*President of SASA*

academician Zoran V. Popović,  
*Vice President of SASA for Natural Sciences*

academician Ljubomir Maksimović,  
*Vice President of SASA for Social Sciences*

academician Marko Anđelković,  
*Secretary General of SASA*

academician Stevan Pilipović,  
*President of SASA Branch in Novi SAD*

academician Ninoslav Stojadinović,  
*President of SASA Branch in Niš*

academician Gradimir Milovanović,  
*Secretary of the Department of Mathematics,  
Physics and Geo Sciences*

academician Vladimir Stevanović,  
*Secretary of the Department of Chemical  
and Biological Sciences*

academician Zoran Lj. Petrović,  
*Secretary of the Department of Technical Sciences*

academician Dragan Micić,  
*Secretary of the Department of Medical Sciences*

academician Zlata Bojović,  
*Secretary of the Department of Language and Literature*

academician Kosta Čavoški,  
*Secretary of the Department of Social Sciences*

academician Mihailo Vojvodić,  
*Secretary of the Department of Historical Sciences*

academician Milan Lojanica,  
*Secretary of the Department of Fine Arts and Music*

---

---

ПРЕДСЕДНИШТВО САНУ

академик Владимир С. Костић,  
*п̄редседник САНУ*

академик Зоран В. Поповић,  
*п̄ошп̄редседник САНУ за п̄риродне науке*

академик Љубомир Максимовић,  
*п̄ошп̄редседник САНУ за друшп̄вене науке*

академик Марко Анђелковић,  
*п̄енерални секретар САНУ*

академик Стеван Пилиповић,  
*п̄редседник Опранка САНУ у Новом Саду*

академик Нинослав Стојадиновић,  
*п̄редседник Опранка САНУ у Нишу*

академик Градимир Миловановић,  
*секретар Одељења за математичку,  
физику и тео-науке*

академик Владимир Стевановић,  
*секретар Одељења хемијских  
и биолошких наука*

академик Зоран Љ. Петровић  
*секретар Одељења п̄техничких наука*

академик Драган Мицић,  
*секретар Одељења медицинских наука*

академик Злата Бојовић,  
*секретар Одељења језика и књижевности*

академик Коста Чавошки,  
*секретар Одељења друшп̄вених наука*

академик Михаило Војводић,  
*секретар Одељења историјских наука*

академик Милан Лојаница,  
*секретар Одељења ликовне и музичке уметности*



---

Портретне фотографије су из фототеке Библиотеке САНУ.  
Илустрације на корицама и празним страницама књиге  
представљају детаље са фасаде Палате САНУ.

---

---

## САДРЖАЈ

Академик Миро Вуксановић <i>Три књије чланова САНУ</i> .....	15
<b>Одељење за математику, физику и гео-науке</b>	
Дописни члан Жељко Шљиванчанин <i>Компјутерско моделовање наносструктура на површинама кристала</i> .....	27
<b>Одељење хемијских и биолошких наука</b>	
Дописни члан Тања Ћирковић Величковић <i>Дојринос еројеомике наукама о храни, исхрани и живојној средини: размаирање деградација и модификација хране током обраде и дигестије хране и од утицајем запађења живојне средине</i> .....	51
<b>Одељење техничких наука</b>	
Дописни члан Влада Вељковић <i>Развој и примена вишефазној реактора са вибрационом мешалицом у производњи биодизела</i> .....	81
<b>Одељење медицинских наука</b>	
Дописни члан Татјана Симић <i>Поремећај редокс хомеостазе у хроничној бубрежној слабости</i> .....	109

## Одељење језика и књижевности

- Дописни члан Љубинко Раденковић  
*Источнословенска бојиња Мокош: ишћања  
реконструкције* ..... 131
- Дописни члан Јован Делић  
*Памћење поезије и ујеловљење традиције* ..... 145
- Дописни члан Зоран Пауновић  
*Данило Киш и Џејмс Џојс: случај Уликс* ..... 157

## Одељење друштвених наука

- Дописни члан Павле Петровић  
*Инфлација: ошћуд, како се развија  
и како је зауставиши?* ..... 173
- Дописни члан Алпар Лошонц  
*Да ли су идеје још релевантне?* ..... 201

## Одељење историјских наука

- Дописни члан Вујадин Иванишевић  
*Методолошки ишћуй у ироучавању новца  
средњовековне Србије* ..... 219
- Дописни члан Драган Војводић  
*Оружје с небеса. Иконолоија средњовековних  
ишћјава инвестииуре владара  
војним инсћнијама* ..... 235
- Дописни члан Мира Радојевић  
*Преиензије Централнои комииеиша  
Комунистичке иартије Хрваиске  
на Срем (1941–1944)* ..... 259

## Одељење ликовне и музичке уметности

- Дописни члан Сава Халугин  
*Токови вајареве маіме* ..... 279
- Дописни члан Јелена Јовановић  
*Еиномузиколошки и уеићнички рад у домену  
ишћрадиционалнои фолклорнои вокалнои наслеђа* ..... 289

## Радне биографије предавача

- Желько Шљиванчанин ..... 323

---

Тања Ћирковић Величковић .....	327
Влада Вельковић .....	333
Татјана Симић .....	337
Љубинко Раденковић .....	343
Јован Делић .....	347
Зоран Пауновић .....	349
Павле Петровић .....	353
Алпар Лошонц .....	357
Вујадин Иванишевић .....	361
Драган Војводић .....	365
Мира Радојевић .....	369
Сава Халугин .....	371
Јелена Јовановић .....	375





---

## ОДЕЉЕЊЕ ТЕХНИЧКИХ НАУКА









Влада Вельковић

*Развој и примена вишефазној  
реактора са вибрационом  
мешалицом у производњи  
биодизела*



Предавање одржано на 1. скупу Одељења техничких наука,  
30. јануара 2019. године.

---

---

## 1. Увод

Ово предавање приказује резултате истраживања која су спровођена последњих деценија на Технолошком факултету у Лесковцу Универзитета у Нишу и Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду у циљу развоја вишефазног реактора са вибрационом мешалицом (РВМ) и његове примене у производњи биодизела. После објашњења хемијске природе биодизела, указује се на основне предности и недостатке његове производње и примене као транспортног горива, даје осврт на стање производње у свету и Србији и истичу могућности њеног унапређења коришћењем „напреднијих“ реактора. Затим се даје кратак историјски приказ развоја РВМ-а и његових најважнијих примена као вишефазног контактора (екстрактора течно-течно и апсорбера гасно-течно и гасно-течно-чврсто), биореактора и реактора, с посебним освртом на резултате истраживања и примене у Србији. Посебна пажња се посвећује унапређењу производње биодизела применом РВМ-а у односу на постојеће процесе.

## 2. Осврт на производњу биодизела

Као последица убрзаног развоја глобалне економије и демографске експанзије, потреба за енергијом се значајно повећава из дана у дан. Тренутно су фосилна горива главни извори енергије, чијим сагоревањем се обезбеђује око 80% од укупно потребне енергије у свету [1]. Нафта и производи од нафте, као, на пример, дизел, најчешће се користи као енергент у транспорту због велике топлотне моћи и релативно

једноставног коришћења. Велика потражња за нафтом и нафтним производима доводи до пораста цене, што може изазвати економску нестабилност. Са друге стране, сагоревањем нафте и њених деривата ослобађа се и велика количина штетних материја, као што су: угљеник(II)-оксид, угљеник(IV)-оксид, сумпор(IV)-оксид, оксиди азота, пепео и чађ, што узрокује загађење атмосфере и повећање ефекта стаклене баште. Еколошки и економски разлози снажно покрећу истраживања у правцу развоја обновљивих извора енергије, који могу да допуне или потпуно замене фосилна горива.

Иако нису најважнија алтернатива, биообновљиви извори енергије привлаче пажњу научника, привредника и влада већине земаља широм света због очигледних техничко-технолошких, економских, еколошких, социјалних и политичких користи, као и проблема изазваних глобалним загревањем и загађењем животне средине употребом фосилних горива [2]. Међу њима, биодизел је врло перспективна алтернатива минералном дизел гориву. По хемијском саставу, биодизел је смеша метил или етил естара виших масних киселина који задовољавају специфициране стандарде, као што су EN14214 и ASTM D6751. Биодизел се обично производи трансестерификацијом (алкохолизом) триацил-глицерола (ТАГ) или естерификацијом слободних масних киселина из различитих биолошких обновљивих извора, најчешће са метанолом или етанолом у вишку у односу на стехиометријски потребну количину, у присуству киселине, базе или ензима као катализатора, иако су могући и некаталитички процеси у надкритичним условима алкохола. На основу растворљивости у реакционој смеси, хемијски катализатори се деле на хомогене (растворне у реакционој смеси) и хетерогене (нерастворне у реакционој смеси).

Важност производње и примене биодизела долази као последица његове: мање токсичности, биоградивости, обновљивости сировина и могућности примене у моторима са унутрашњим сагоревањем без или са минималним модификацијама [2]. Висока производна цена биодизела, која је резултат високог учешћа цене биљних уља (70–95%) у трошковима производње, сматра се главном препреком комерцијалној употреби биодизела [3]. Додатне препреке су, такође, ограничене количине уљних сировина [4] и контроверза да ли уљне сировине користити у производњи хране

или биодизела [5]. Негативна страна биодизела, из угла заштите животне средине, јесте појачана емисија оксида азота у поређењу са дизел горивом [6].

### 3. Хомогена и хетерогена катализа у производњи биодизела: предности и недостаци

У индустријској производњи биодизела још се увек најчешће користе хомогени базни катализатори због њихове велике каталитичке активности при благим реакционим условима, високог приноса метил-естара масних киселина (МЕМК) за релативно кратко време трајања реакције и при малом почетном молском односу метанол-уље (углавном 6:1). Недостаци базних катализатора су захтеви да су реактанти анхидровани, а садржај слободних масних киселина у уљној сировини мањи од 0,5% [7], као и њихова растворљивост у алкохолу, што онемогућава рециклисања. Њихово уклањање из сировог биодизела најчешће се врши неутрализацијом киселином и вишеструким испирањем водом, што отвара проблем отпадних вода и повећава укупне трошкове производње [8]. Додатни проблем је немешљивост реактанта, која ствара масенопреносна ограничења, посебно изражена у почетној фази реакције. Пошто је трансестерификација равнотежна реакција, максимални степен конверзије је лимитиран, па се захтева већи молски однос алкохол-уљна сировина од стехиометријског.

Најпознатији индустријски поступак синтезе биодизела применом хомогеног катализатора је Лурги поступак, у коме се најчешће користе јестива уља и натријум-метоксид као катализатор [9]. Реакција трансестерификације се одиграва у низу од два реактора са умереним механичким мешањем на повишеној температури (60 и 45 °C, редом) и временом задржавања око 3 h. Сирови биодизел и алкохолна фаза одвајају се у гравитационим сепараторима иза реактора. Сирови биодизел се пречишћава испирањем са водом у супротнострујној колони, а заостала вода уклања се сушењем под вакуумом.

Хетерогено катализована трансестерификација се сматра новом, бољом технологијом добијања биодизела због економских и еколошких предности [10]. Позитивне стране

примене хетерогених катализатора су лако издвајање из реакционе смеше, поновна употреба (после или без регенерације), слаба или занемарљива растворљивост у биодизелу, једноставније пречишћавање сировог биодизела са релативно мало отпадне воде и мањи утрошак енергије (до 50%), док су недостаци мања брзина реакције због масено-преносних ограничења у трофазном (чврсто–течно–течно) систему, већи почетни молски однос метанол–уље и виша температура реакције [10]. Као катализатори коришћена су различита једињења: оксиди, хидроксици, алкоксици и соли метала, зеолити, јоноизмењивачке смоле, Mg-Al хидроталцити, импрегниране соли алкалних метала, алкилгуанидини и метали. Један од најчешће испитиваних чврстих катализатора трансестерификације је калцијум-оксид (CaO) због своје релативно велике базности, мале растворљивости у метанолу и етанолу и могућности добијања из јефтених природних или отпадних сировина, као што су кречњак, негашени креч и љуске кокошјих јаја, ракова, шкољки и пужева. С друге стране, релативно мала брзина реакције трансестерификације ограничава комерцијалну примену CaO као катализатора. Реакција трансестерификације се може убрзати побољшањем каталитичке активности CaO калцинацијом, тј. термичком активацијом [11-13], третирањем метанолом, глицеролом [14] или раствором амонијум-карбоната [15], применом мешаног оксида CaO-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [16] и додавањем мале количине воде у метанол [17]. Због низа предности, очекује се да ће се у производњи биодизела ширити примена континуалних процеса који укључују реактор са непокретним слојем честица катализатора [18, 19] и рециркулацијом реакционе смеше [20]. Тако је остварен велики принос МЕМК (>97%) у континуалном реактору са непокретним слојем честица негашеног креча (2–3 mm) при умереним реакционим условима (65 °C; молски однос метанол–уље 18:1 и време контакта 90 min) [21].

Најпознатији индустријски процес добијања биодизела заснованог на хетерогеној катализи је Esterfip-H процес, који је развила француска фирма Axens IFP Group Technologies [22]. Као катализатор користи се мешавина оксида цинка и алуминијума спиналне структуре [23]. Процес се изводи у два реактора са непокретним слојем катализатора на повишеној температури и притиску и уз вишак метанола.

#### 4. Производња биодизела у свету и Србији

Укупна светска производња, односно потрошња нафте у 2016. години износила је 4.382,4, односно 4.418,2 милиона тона [24]. Светске резерве сирове нафте у истој години су процењене на 240 милијарди тона, па је однос резерве–производња нафте 50,6 година. Због тога у развијеним земљама постоји растући тренд коришћења алтернативних извора енергије, при чему се настоји да се традиционално транспортно гориво, дизел, замени биодизелом.

Производња биодизела у Европи у 2016. години износила је 11,6 милиона тона и дуплирана је у односу на 2007. годину, при чему су највећи произвођачи биодизела Немачка, Француска и Холандија са 3,02, 1,70 и 1,40 милиона тона, редом [25]. Очекује се да ће производња биодизела у свету наставити да расте у наредним годинама, достижући обим од  $39,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  у 2024. години [26]. Нажалост, производња биодизела у Србији није на завидном нивоу, што показују подаци у Табели 1. У ствари, тренутно се биодизел готово не производи и не користи у Србији, упркос сировинском потенцијалу и инсталираним капацитетима. Фабрика са највећим производним капацитетом „Victoria oil – Victoria group“ у Шиду, која тренутно не ради, произвела је у првој години рада (2007) 27.000 t биодизела [27].

Компанија	Сировина	Поступак	Технологија	Капацитет (t/год)	Напомена
Victoria Oil, Шид	Уље репице	Алкалан, хомогено катализован	Lurgi, Немачка	100.000	Тренутно не ради
ФАМ, Крушевац	Сирова и коришћена биљна уља	-	Lubocons Chemicals, Словачка	25.000	Не ради
Прва искра, Барич	Дегумирано биљно уље	Алкалан, хомогено катализован	Сопствена патентна пријава	5000-6000	Радило кратко време 1990-тих
Bioenergy Oil, Сомбор	Коришћено уље	Алкалан, хомогено катализован	Euro Fuel Tech, Енглеска	1.400	Није покренуто
Технолошки факултет, Лесковац	Уље репице, сунцокретоно уље, отпадна свињска маст	Алкалан, хомогено катализован	Сопствени патент	480	Полуиндустријски, не ради

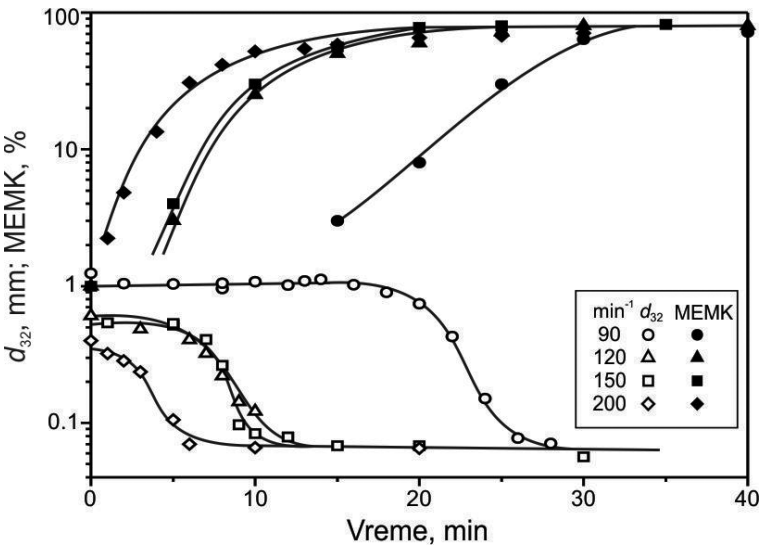
Табела 1. Већи инсталирани капацитети за производњу биодизела у Србији (адаптирано према [27]).

## 5. Унапређење производње биодизела хомогено катализованом трансестерификацијом

Ради побољшања тржишног положаја биодизела, за његову производњу треба користити нејестива уља, посебно оне уљарице које могу да расту на маргиналним земљиштима, споредне производе (на пример, кукурузне клице из производње скроба, цибру из производње етанола и споредне производе из индустрије јестивих уља: сапунске смеше, дезодорисани дестилат и активну земљу за обезбођење уља) и отпад (на пример, коштице воћа из прехранбене индустрије) из постојећих производних процеса. Даље побољшање економике производње биодизела може се постићи развојем и применом једноставније, ефективније и штедљивије технологије, која ће укључити јефтиније, ефикасније и виšekратно употребљиве чврсте катализаторе, континуалне реакторе са побољшаним карактеристикама преноса масе и интеграцију реакционих и сепарационих фаза.

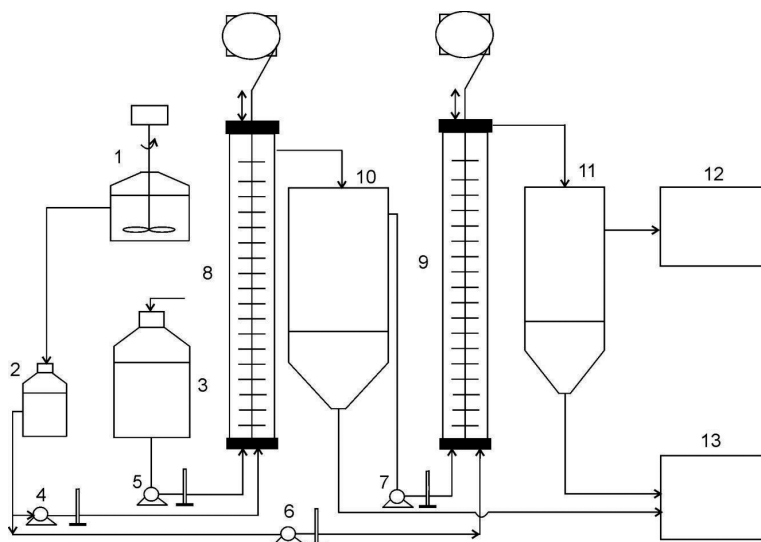
Реакција хомогено катализоване трансестерификације одиграва се на контактної површини уље–алкохол, која је ограничена малом међусобном растворљившћу реактаната. Због тога је брзина реакције у почетном периоду лимитирана брзином преноса масе ТАГ према контактної површини. Да би се брзина трансестерификације повећала, мора се повећати контактна површина уље–алкохол, што се постиже интензивним мешањем реакционе смеше. Овај позитиван утицај мешања илуструје Слика 1, која приказује промену садржаја МЕМК и величине капи алкохолне фазе, изражене преко Саутеровог средњег пречника, у току реакције метанолизе сунцокретовог уља катализоване КОН при различитим брзинама мешања [28, 29]. На почетку реакције, величина капи се готово не мења са временом, док је садржај МЕМК мали. Реакција се убрзава у периоду када се величина капи брзо смањује, а садржај МЕМК нагло повећава. Смањење величине капи се повезује са променом површинског напона због настајања површински активних супстанци, као што су моно и диацилглицероли и сапуни, смањењем вискозитета реакционе смеше због реаговања ТАГ и настајања МЕМК који делује као косолвент, побољшавајући мешљивост реактаната.





Слика 1. Промена средњег Саутеровог пречника капи и садржаја MEMK у току реакције трансестерификације при различитим брзинама мешања: молски однос метанол–уље 6:1; 1% КОН (у односу на масу уља) и 20 °C (преузето из [29]).

Уочене карактеристике реакционог система су искоришћене за избор повољнијег реактора са вибрационом мешалицом (РВМ). У РВМ-у, захваљујући повратно-периодичном кретању вибрационе мешалице кроз реактор, остварује се интензивно мешање реактаната. Вибрационо мешање и вишеструко протицање реакционе смеше кроз отворе плоча мешалице фаворизују ситњење капи алкохолне фазе и смањују отпор преносу масе ТАГ [30]. На Слици 2 дат је шематски приказ постројења за континуалну производњу биодизела које се, по угледу на Лургијеву технологију, састоји из два РВМ-а и два гравитациона сепаратора. Примењени концепт се, међутим, разликује од Лургијеве технологије по интензивном мешању, кратком контактном времену (12 min) и нижој реакционој температури (30 °C). При почетном молском односу метанол–уље 6:1, количини КОН од 1% (рачунато на масу уља) и температури 30 °C, у првом реактору се постиже степен конверзије ТАГ од 80%, док се у другом реактору остварује степен конверзије 100% при времену



Слика 2. Шема континуалног постројења за добијање биодизела: 1 – суд за припрему раствора катализатора у метанолу, 2, 3 – резервоари за метанол и биљно уље, 4, 5, 6, 7 – црпке за транспорт реактаната, 8, 9 – РВМ, 10, 11 – гравитациони сепаратори, 12 – резервоар МЕМК, 13 – резервоар глицеролне фазе (преузето из [32]).

задржавања од 30 мин; претходно се у гравитационом сепаратору из реакционе смеше издваја глицеролна фаза. У случају коришћења отпадне свињске масти као сировине, висок степен конверзије (>97%) се постиже у континуалном процесу који укључује само један РВМ [31].

## 6. Историја настанка, развоја и примене РВМ-а

РВМ припада групи вишефазних контактних уређаја. Према конструкцији, то је барботажна колона у којој се већи број перфорираних плочица, учвршћених на заједничком носачу (тзв. вибрациона мешалица), креће повратно-периодично („горе-доле“) кроз колону. На рачун енергије механичког мешања, поспешује се ситњење капи или мехура, што води повећању међуфазне површине и брзине међуфазног преноса масе. Такође, РВМ се одликује једноставном

конструкцијом, лакоћом одржавања, могућношћу примене великих протока фаза и једноставним поступком повећања размере [33].

Ван Дијк је још 1935. године патентирао контактни уређај са перфорираним плочицама [34], али је он први пут употребљен тек 1959. године као екстрактор течно–течно, којим је, применом релативно мале спољне енергије, постигнута униформна дисперзија течно–течно, са малим аксијалним мешањем. Седамдесетих година XX века отпочела су истраживања и примена РВМ-а као апсорпционе колоне [35]. У РВМ-у се постиже знатно већи садржај гаса, већа специфична међуфазна површина, мање повратно мешање и дуже задржавање гаса него у барботажној колони и реактору са механичким мешањем [36–41].

У досадашњим истраживањима, коришћене су колоне, пречника 2,5–30 cm, са плочицама са отворима од 0,3–1,5 cm (удео слободне површине отвора 9–61% [33]). Као вибрациони елементи су обично коришћене перфориране плочице, са или без сегментних пролаза и сливника, или дискови, а понекад су у реактор уграђивани статички одбојници. У почетним истраживањима коришћене су „чисте“ течности, а касније системи гасно–течно, гасно–течно–чврсто и течно–течно. Као течна фаза, коришћене су њутновске (најчешће вода) и нењутновске течности, а као чврста фаза куглице и Рашигови прстенови. РВМ је до сада примењиван у процесима аеробног пречишћавања отпадних вода [42], биосинтезе пулулана [42, 43] и декстрана [45], синтезе антибиотика, лимунске киселине и етанола [46], као и у производњи нафтних деривата [47].

Прва истраживања вибрационог екстрактора типа Кагг у Србији обављена су у Институту „Борис Кидрич“ у Винчи [48, 49]. Анализирани су промена притиска и средња корисна снага при једнофазном и двофазном току, механизам кретања, ситњења и коалесценције капи, као и плавање колоне. На Технолошко-металуршком факултету у Београду и фабрици „Здравље“ у Лесковцу осамдесетих година XX века истраживани су двофазни системи гас–теčnost [40, 50]. Наставак истраживања на Технолошком факултету у Лесковцу допринео је разумевању феномена везаних за: струјање флуида у присуству чврсте фазе, пренос масе кисеоника и

утицај реолошких особина течности на хидродинамичке карактеристике РВМ-а различите геометрије [51–57]. У даљим истраживањима, анализирани су системи течно–течно (метанол–уље) од значаја за процес добијања биодизела реакцијом трансестерификације [30].

## 6. Хидродинамичке и масено-преносне карактеристике РВМ-а

Истраживања хидродинамичких и масено-преносних карактеристика РВМ-а су значајна за његово пројектовање и примену у континуалној хомогеној, базно катализованом трансестерификацији биљних уља и масти. Режим струјања утиче на све хидродинамичке и масено-преносне карактеристике РВМ-а. Одступање од идеалног клипног протицања води аксијалној дисперзији која смањује ефективну погонску силу преноса масе. Укупна (максимална) промена притиска на дну реактора значајна су за конструисање реактора и димензионисање транспортних уређаја, док су укупна, односно средња снага мешања потребне ради димензионисања погонског електромотора, односно дефинисања оперативних трошкова. Садржај дисперговане фазе одређује контактано време, а у вези са средњим Саутеровим пречником капи омогућава израчунавање специфичне међуфазне површине, која одређује запремински коефицијент преноса масе. Познавање коефицијената преноса масе и аксијалне дисперзије значајно је за одређивање висине реактора.

Резултати истраживања хидродинамичких и масено-преносних карактеристика РВМ-а са једнофазним („чисте“ течности), двофазним (гасно–течно) и трофазним (гасно–течно–чврсто) системима сумирани су у монографији Банковић-Илић и сарадници [33]. Овде ће бити дискутовани само резултати истраживања система течно–течно који се срећу у производњи биодизела хомогено катализованом трансестерификацијом. Експериментално постројење, које укључује реактор пречника 2,5 cm, са истосмерним током фаза навише, и коришћене методе за мерење притиска, снаге мешања, садржаја дисперговане фазе, величине и расподеле величине капи, Саутеровог средњег пречника капи и

специфичне међуфазне површине описани су у раду Стаменковић и сарадници [30].

При кретању вибрационе мешалице кроз колону стварају се карактеристичне струје у простору између две плочице. У једнофазном систему, при кретању навише, у отворима плочица се индукују млазеви течности који су усмерени наниже и опкољени прстенастим вртлогом; при кретању наниже, мења се смер струјања флуида у млазевима и вртлозима [46]. За време кретања плочица горе-доле размењује се течност између суседних међупростора у вертикалном правцу, захваљујући кретању млазева, и у хоризонталном правцу, због стварања и нестајања вртлога, што изазива интензивно мешање течности у простору између плочица; мешање је појачано смицајним силама које делују на граници између млаза и вртлога. Код вишефазног система, струјање у РВМ-у зависи од кретања плочица, протока течности и гаса и присуства чврсте фазе. У случају двофазног система гасно-течно, са променом смера млаза мехурови гаса присилно крећу са течношћу, изазивајући понављање коалесценције и дисперговања.

Струјање течне фазе кроз РВМ описује се помоћу модела „квази-стационарног“ струјања и модела „акустичног“ струјања [33]. Брзина кретања плочица, притисак на дну колоне и снага мешања мењају се временом током једног циклуса кретања вибрационе мешалице. Модел квази-стационарног струјања [58] претпоставља да су у дужем временском интервалу ове промене стационарне и једнаке одговарајућим средњим вредностима, као и да је струјање течности кроз РВМ потпуно развијено. Овај модел је потврђен за амплитуде вибрације веће од 1 cm [59]. Према моделу „акустичног“ струјања [60], највећи део екстерне енергије расипа се у околини плочица. Овај модел уводи вртложну вискозност, која је пропорционална производу квадрата фреквенције и пута мешања, која, при турбулентном струјању, замењује кинематску вискозност. Модел је применљив на амплитуде вибрације мање од критичне.

За примењене услове струјања и мешања у раду Стаменковић и сарадника [30], режим струјања кроз реактор је ламинаран ( $Re = 0,56$ ), док је струјање кроз отворе плочица ламинарно и прелазно ( $Re = 10-48$ ). Струјање кроз реактор

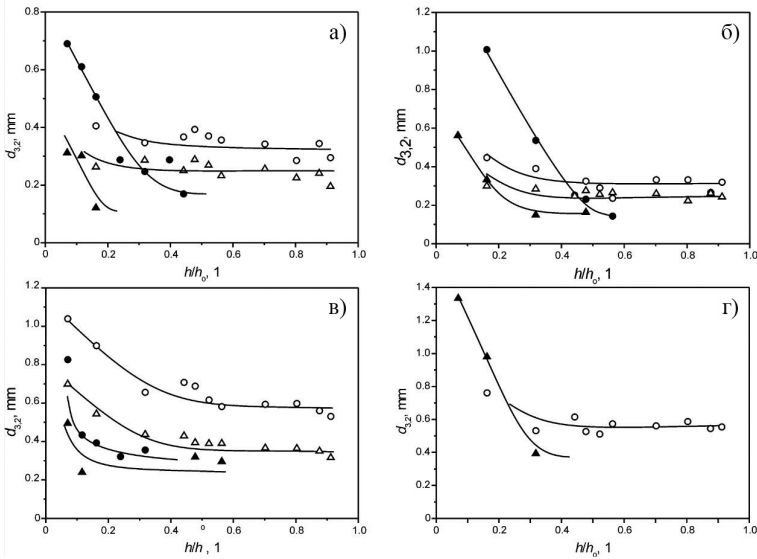
одговара идеалном клипном протицању само при амплитуди вибрације од 1 cm, када је вредност Пеклеовог броја за континуалну фазу у опсегу 15–18 ( $Pe \geq 10$ ).

Укупна и средња промена притиска на дну реактора и укупна и средња снага мешања за шаржни и проточни, једнофазни и двофазни РВМ зависи од густине емулзије ( $\rho_e$ ) и брзине вибрације ( $Af$ ) [30]:

$$\Delta p_{av}, \Delta p^*, P_{av} \text{ или } P^* \propto \rho_e \cdot (Af)^n \quad (1)$$

Нагиби правих линија су око 1.35, односно 2.35 за промену притиска на дну реактора, односно снагу мешања. Према моделу квази-стационарног стања, вредност експонента  $n$  зависи од режима струјања. За стационарно суперпонирано осцилаторно и турбулентно струјање у једнофазном РВМ-у,  $n = 2$ , односно 3 [61, 62, 63], за ламинарно струјање  $n = 1$ , односно 2, док је за прелазни режим транзиционог тока  $1 < n < 2$ , односно  $2 < n < 3$  [64] за промену притиска на дну реактора, односно снагу мешања. Према томе, одређене вредности експонента  $n$  указују на прелазни режим струјања кроз отворе плочица. Промена притиска на дну реактора и снага мешања су мање у двофазном него у једнофазном систему због мањег вискозитета.

Независно да ли је у систему метанол–уље присутан катализатор (КОН) или не, величина капи дисперговане фазе, изражена преко средњег Саутеровог пречника ( $d_{32}$ ), смањује се у доњем делу РВМ-а због интензивирања процеса ситњења капи на рачун екстерне енергије мешања (Слика 3). У горњем, већем делу РВМ-а, постоји стабилна емулзија капи метанола, а средњи Саутеров пречник капи је практично константан. Уочава се да је средњи Саутеров пречник капи у горњем делу реактора мањи у реактивном систему, при истим оперативним условима, што се приписује стабилизацији ситних капи моно и диацилглицеролима и сапунима, који се формирају током реакције, а који делују као емулгатори. Гледано по висини реактора, расподела величине капи постаје ужа и помера се у правцу мање величине капи. Иста појава је раније примећена са одвијањем трансестерификације у шаржном реактору са мешањем [65].



Слика 3. Средњи Саутеров пречник капи дуж реактора на 20 °C и молском односу метанол:уље 3:1 (а) и 6:1 (б), као и на 30 °C и молском односу метанол:уље: 3:1 (в) и 6:1 (г) ( $A$ , см: 1;  $f$ , Hz: 2 – круг и 3 – троугао; систем без реакције – отворени симболи и систем са реакцијом – пуни симболи) (преузето из [30]).

Средњи Саутеров пречник капи је корелисан са снагом мешања, у складу са Колмогоровљевој теоријом хомогене изотропне турбуленције, према којој је максимални пречник капи повезан са специфичном снагом мешања ( $P_{sr}/m_e$ ) на експонент  $-0,4$ . Ова зависност је потврђена за горњи део РВМ-а, тј. за  $h/h_0 \geq 0,16$  [30]:

$$d_{32} = 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{P_{sr}}{m_e} \right)^{-0,4} \quad (2)$$

Ова зависност се добро слаже са корелацијом Кумара и Хартланда [66] која је изведена за екстракционе колоне са супротносмерним током фаза. С обзиром на то да је струјање кроз отворе плочица у прелазном режиму, важење ове једначине је објашњено постојањем интензивно мешане области непосредно око перфорираних плочица и слабо мешане области у простору између перфорираних плочица [30]. Ово практично значи да је брзина дисипације спољне енергије

око сваке перфориране плочице већа него у простору између плочица и довољно је велика да изазове јаче силе смицања од оних које се јављају при „чистом“ ламинарном струјању кроз већи део простора између перфорираних плочица.

Садржај дисперговане фазе ( $\varphi$ ) у систему метанол–уље зависи од брзине вибрације ( $Af$ ) и брзине струјања дисперговане фазе ( $u_d$ ) [30], при чему је за  $Af \leq 5$  cm/s:

$$\varphi = 4.67 \cdot 10^{-5} (Af)^{0.67} u_d^{-1.22} \quad (3)$$

а за  $Af \geq 5$  cm/s

$$\varphi = 4.87 \cdot 10^{-6} u_d^{-1.24} \quad (4)$$

При одређеном молском односу метанол–уље, садржај дисперговане фазе повећава се са повећањем брзине вибрације до 5 cm/s због интензивирања ситњења капи на рачун додате енергије вибрационом мешалицом, а затим остаје константан, што се приписује достизању равнотеже између процеса ситњења и коалесценције капи. Као што се очекује, садржај дисперговане фазе је већи при већем молском односу метанол–уље због веће брзине струјања дисперговане фазе. Исти резултат је запажен код РВМ-а са супротносмерним струјањем фаза [67, 68]. Утицај температуре на садржај дисперговане фазе није запажен због значајног растурања експерименталних тачака.

Специфична међуфазна површина повећава се са повећањем брзине вибрације и брзине струјања дисперговане фазе [33]:

$$a = 3.3 \cdot (Af)^{0.74} u_d^{-1.20} \quad (5)$$

Овај закључак је у складу са утицајем брзине вибрације и брзине струјања дисперговане фазе на садржај дисперговане фазе и средњи Саутеров пречник капи.

## 8. Кинетика трансестерификације у РВМ-у

Реакција трансестерификације се одвија преко три заустопне повратне реакције у којима настају моно и



диацилглицероли (МАГ и ДАГ) као интермедијери. Пошто су концентрације интермедијера мале због много бржег реаговања, у поређењу са триацилглицеролима (ТАГ), или скоро константне, обично се користи укупна реакција трансестерификације биљног уља која се представља следећом стехиометријском једначином:



где је  $A$  – ТАГ,  $B$  – метанол,  $R$  – МЕМК и  $S$  – глицерол. За моделовање кинетике ове реакције у проточном РВМ-у уведене су следеће претпоставке [69]:

а) реакција се одвија у хетерогеном режиму у доњем делу реактора и у псеудо-хомогеном режиму у горњем делу реактора, где пренос масе и хемијска реакција контролишу кинетику реакције, редом. Отпор преносу масе у улазном делу РВМ-а, узрокован немешљивошћу уља и метанола, успорава реакцију;

б) у псеудо-хомогеном режиму, трансестерификација је неповратна реакција другог реда у односу на ТАГ;

в) континуална фаза протиче кроз реактор стационарно и идеално клипно.

Брзина нестајања ТАГ у почетном делу реактора је једнака брзини преноса масе ТАГ из уљне фазе у капи метанола, па је кинетичка једначина у области хетерогеног режима [69]:

$$-\ln(1 - x_A) = \frac{h_0 S}{v_0} k_c a \left( \frac{h}{h_0} \right) \quad (7)$$

где је:  $x_A$  – степен конверзије ТАГ,  $h$  – висина реактора,  $h_0$  – укупна висина реактора,  $S$  – површина попречног пресека реактора,  $v_0$  – запремински проток,  $k_c$  – коефицијент преноса масе ТАГ и  $a$  – специфична контактна површина. За-

висност  $-\ln(1 - x_A)$  од  $(h/h_0)$  је линеарна са нагибом  $\frac{h_0 S}{v_0} k_c a$  на

основу којег се може израчунати запремински коефицијент

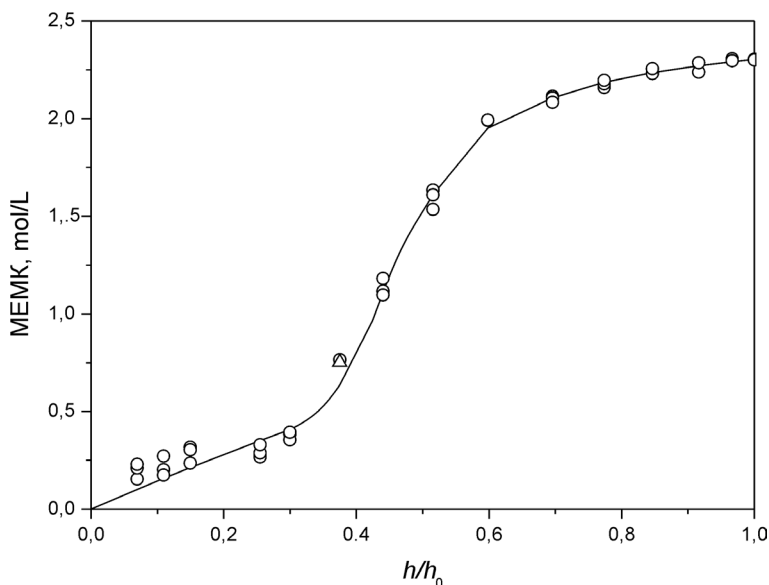
преноса масе ТАГ ( $k_c a$ ).

У псеудо-хомогеном режиму, брзина реакције одређује брзину укупног процеса, па кинетичка једначина има следећи облик [69]:

$$\frac{1}{1-x_A} = \frac{h_0 S}{v_0} k_2 c_{A_0} \left( \frac{h}{h_0} \right) + C_1 \quad (8)$$

где је  $C_1$  – интеграциона константа и  $k_2$  – константа брзине реакције, које се могу одредити из нагиба и одсечка линеарне зависности  $1/(1-x_A)$  од  $(h/h_0)$ . Вредности кинетичких параметара су:  $k_c a = 0,044 \text{ min}^{-1}$  и  $k_2 = 1,551 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

Постављени кинетички модел је потврђен за реакцију трансестерификације сунцокретовог уља у присуству КОН (Слика 4). Капи метанола у улазном делу РВМ-а су велике а специфична међуфазна површина релативно мала, узрокујући спор пренос масе ТАГ, који ограничава брзину реакције трансестерификације. Интензивирање процеса ситњења



Слика 4. Поређење концентрације MEMK израчунате на основу кинетичких модела са експерименталним подацима ( $A = 1 \text{ cm}$ ,  $f = 2 \text{ Hz}$ , молски проток уља  $61 \text{ ml/min}$ , молски однос метанол–уље  $6:1$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $1\%$  КОН у односу на уље) (адаптирано према [69]).

капи метанола у улазном делу РВМ-а може побољшати перформансе РВМ-а. На пример, убацивање инертног паковања између перфорираних плочица ће појачати мешање, потпомоћи ситњење капи метанола и ублажити отпор преносу масе. Овај приступ је потврђен за трансестерификацију уља улане репице у РВМ-у, пречника 16 cm, са сферним паковањем смештеним у просторе између перфорираних плочица када је постигнут садржај ФАМЕ од 98% [32].

Недавно је показано да и за пренос масе и за реакцију при трансестерификацији отпадне свињске масти, катализовану КОН, у РВМ-у важи закон брзине првог реда, као и да је применљив и модел који укључује променљив механизам реакције и пренос маса ТАГ [31]. Оба кинетичка модела се слажу са концентрацијама ТАГ и МЕМК експериментално одређених по висини РВМ-а. Модел који укључује променљив механизам реакције и пренос маса је, такође, верификован за трансестерификацију сунцокретовог уља изведену у истом РВМ-у (6.0:1, 20 °C и 1.0% КОН).

## 9. Поређење перформанси РВМ-а са другим проточним реакторима

Ради поређења перформанси РВМ-а [31, 32, 70] и других типова проточних реактора [71–74], као и каталитичке способности КОН и других типова катализатора (NaOH, негашени креч) примењених у трансестерификацији различитих сировина под сличним процесним условима, Табела 2 даје преглед конверзије (или приноса естара), капацитета и радних услова у неколико типова реактора. Иако ултразвучни цевни реактор [71] има предност ниже температуре, трансестерификација сунцокретовог уља захтева већи молски однос метанол–уље и дуже контактено време у односу на процес у РВМ-у [31, 32, 70], да би се постигао садржај МЕМК преко 95%. Зиг-заг микроканални реактор [72] има већу ефикасност у односу на РВМ, што је резултат интензивнијег преноса масе [73], али је његов капацитет много мањи. Други зиг-заг реактор од металне пене скраћује, такође, контактено време за постизање високог приноса естара, али при већем молском односу метанол–уље и мањем капацитету. Краће контактено време и већи производни капацитет су

предности РВМ-а у односу на реактор са пакованим слојем честица негашеног креча у случају трансестерификације отпадне свињске масти [74].

Реактор (cm)	Сировина	Метанол/ сировина mol/mol	Катализатор/ %	Температура, оС	Принос %/ Време, min	Капацитет kg/ дан	Референца
РВМ (2,54)	Отпадна маст	4,5:1	КОН/1,0	60	96,2/10	120	[31]
РВМ (2,54), два у низу	Сунцокретово уље	6:1	КОН/1,0	30	100/30	42	[32]
РВМ (16)	Сунцокретово уље	6:1	КОН/1,0	30	84,4/13	98	[70]
Ултразвучни цевни	Палмино уље	6:1	КОН/-	38-40	95/30	-	[71]
Зиг-заг, микро- канали/ континуални	Сојино уље	9:1	NaOH/1,2	56	99,5/ 0.5	0,28	[72]
Зиг-заг, метална пена	Сојино уље	10:1	NaOH/ 1,0	55	95,2/3.26	13,2	[73]
Паковани слој	Отпадна маст	6:1	Негашени креч	60	>96,5/60	9	[74]

Табела 2. Поређење перформанси различитих проточних реактора у реакцији трансестерификације (адаптирано према [31]).

## 10. Закључак

Употреба РВМ-а у континуалној производњи биодизела унапређује процес повећањем и честом обновом контактне површине између немешљивих реактаната са релативно малом потрошњом енергије међуфазне контактне површине на собној температури. Такође, његове предности су готово идеално клипно протицање и брза реакција трансестерификације катализоване КОН. Верује се да се једноставна методологија scale-up-а, која генерално одликује уређаје овог типа, може успешно користити за повећање величине РВМ-а који ће се применити у континуалној хомогеној, базно катализованој трансестерификацији биљних уља и масти. Треба нагласити да независно од сировине, главни проблем остаје

отпор преноса масе у доњем делу колоне. Убацавање инертног паковања у почетне међуплоче може ублажити отпор преноса масе интензивирањем мешања реактаната који се не мешају.

*Литература*

- [1] Demirbas, A. *Biodisel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. London: Springer-Verlag, 2008.
- [2] Živković, S. B., Veljković, M. V., Banković-Ilić, I. B., Krstić, I. M., Konstantinović, S. S., Ilić, S. B., Avramović, J. M., Stamenković, O. S., Veljković, V. B. “Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use”. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79 (2017): 222–247.
- [3] Banković-Ilić, I. B., Stamenković, O. S., Veljković, V. B. “Biodiesel production from nonedible plant oils”. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012): 3621–3647.
- [4] Moser, B. R., Vaughn, S. F. “Biodiesel from corn distillers dried grains with solubles: preparation, evaluation, and properties”. *Bioenergy Res.* 5 (2012): 439–449.
- [5] Kansedo, J., Lee K. T. “Process optimization and kinetic study for biodiesel production from non-edible sea mango (*Cerbera odollam*) oil using response surface methodology”. *Chem. Eng. J.* 214 (2013): 157–164.
- [6] Lujan, J. M., Bermudez, V., Tormos, B., Pla, B. “Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: performance and emissions (II)”. *Biomass Bioenergy* 33 (2009): 948–956.
- [7] Ma, F., Hanna, M. A. “Biodiesel production: a review”. *Bioresource Technol.* 70 (1999): 1–15.
- [8] Sharma, Y. C., Singh, B. “Development of biodiesel: current scenario”. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13 (2009): 1646–1651.
- [9] <http://www.lurgi.com> (assessed on September 2012).
- [10] Veljković, V., Stamenković, O., „Perspektivne tehnologije dobijanja biodizela”. *Zaštita materijala* 53 (2012): 281–291.
- [11] Chen, Y-W., Chen, H-Y., Lin, W-F. “Basicities of alumina-supported alkaline earth metal oxides”. *React. Kinet. Catal. L.* 65 (1998): 83–86.
- [12] Granados, M. L., Zafra Poves, M. D., Martin Alonso, D., Mariscal, R., Cabelo Galisteo, F., Moreno-Tost, R., Santamaria, J., Fierro, J. L. G. “Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide”. *Appl. Catal. B: Environ.* 73 (2007): 327–336.

- [13] Veljković, V. B., Stamenković, O. S., Todorović, Z. B., Lazić, M. L., Skala, D. U. "Kinetics of sunflower oil methanolysis catalyzed by calcium oxide". *Fuel* 88 (2009): 1554–1562.
- [14] Kawashima, A., Matsubara, K., Honda, K. "Acceleration of catalytic activity of calcium oxide for biodiesel production". *Bioresource Technol.* 100 (2009): 696–700.
- [15] Huaping, Z., Zongbin, W., Yuanxiong, C., Ping, Z., Shijie, D., Xiaohua, L., Zongqiang, M. "Preparation of biodiesel catalyzed by solid super base of calcium oxide and its refining process". *Chinese J. Catal.* 27 (2006): 391–396.
- [16] Yan, S., Kim, M., Salley, S. O., Ng, K. Y. S. "Oil transesterification over calcium oxides modified with lanthanum". *Appl. Catal. A: Gen.* 360 (2009): 163–170.
- [17] Liu, X., He, H., Wang, Y., Zhu, S., Piao, X. "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst". *Fuel* 87 (2008): 216–221.
- [18] Miladinović, M. R., Stamenković, O. S., Veljković, V. B., Skala, D. U. "Continuous sunflower oil methanolysis over quicklime in a packed-bed tubular reactor". *Fuel* 154 (2015): 301–307.
- [19] Miladinović, M. R., Stamenković, O. S., Banković, P. T., Milutinović-Nikolić, A. D., Jovanović, D. M., Veljković, V. B. "Modeling and optimization of sunflower oil methanolysis over quicklime bits in a packed bed tubular reactor using the response surface methodology". *Energ. Conv. Manage.* 130 (2016): 25–33.
- [20] Kouzu, M., Hidaka, J., Komichi, Y., Nakano, H., Yamamoto, M. "Process to transesterify vegetable oil with methanol in the presense of quick lime bit fuctioning as solid base catalyst". *Fuel* 88 (2009): 1983–1990.
- [21] Stamenković, O., Miladinović, M., Veljković, V., Stemenković, I., Todorović, Z., Lazić, M., Skala, D. *Dobijanje metil estara masnih kiselina biljnih ulja kontinualnim postupkom heterogeno katalizovane metanolize biljnih ulja*. RS 53484-B, 2014.
- [22] <http://www.axens.net> (assessed on Septembar 2012)
- [23] Bournay, L., Casanave, D., Delfort, B., Hillion, G., Chodorge, J. A. "New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants". *Catal. Today* 106 (2005): 190–192.
- [24] British Petroleum, BP Statistical review of World Energy 2010. BP plc, London; <http://www.bp.com> (assessed March 2019).
- [25] <http://www.ebb-eu.org> (assessed March 2019).
- [26] Biofuels, in OECD-FAO Agricultural Outlook 2015, OECD Publishing, Paris; 2015. pp. 126–42 ([http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2015-13-en](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-13-en), assessed March 2019).
- [27] Radovanović, D. „Proizvodni kapaciteti biogoriva u regionu“. VII Međunarodni forum o čistim energetskeim tehnologijama – Energetika

- Srbije 2013: Budućnost i perspektive, Novi Sad; 24–25. septembar 2013.
- [28] Stamenković, O. S., Lazić, M. L., Todorović, Z. B., Veljković, V. B., Skala, D. U. “The effect of agitation intensity on alkali-catalyzed methanolysis of sunflower oil”. *Bioresource Technol.* 98 (2007): 2688–2699.
- [29] Stamenković, O. S. *Kinetika bazno-katalizovane metanolize suncokretovog ulja*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2008.
- [30] Stamenković, I. S., Banković-Ilić, I. B., Jovanić, P. B., Veljković, V. B., Skala, D. U. “Hydrodynamics of a cocurrent upflow liquid-liquid reciprocating plate reactor for homogeneously base-catalyzed methanolysis of vegetable oils”. *Fuel* 89 (2010): 3971–3984.
- [31] Miladinović, M. R., Stojković, I. J., Veličković, A. V., Stamenković, O. S., Banković-Ilić, I. B., Veljković, V. B. “Optimization and kinetic modeling of waste lard methanolysis in a continuous reciprocating plate reactor”. *Chinese J. Chem. Eng.* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.02.019>.
- [32] Stamenković, I., Stamenković, O., Banković-Ilić, I., Todorović, Z., Lazić, M., Veljković, V., Skala, D. *Dobijanje estara masnih kiselina postupkom alkoholize biljnih ulja*. RS 52398 B, 2013.
- [33] Banković Ilić, I., Veljković, V., Skala, D. *Hidrodinamičke i maseno-prenosne karakteristike kolone sa vibracionom mešalicom za sisteme gas-tečnost i gas-tečnost-čvrsta faza*. Leskovac: Tehnološki fakultet, 2009.
- [34] Van Dijk, W. J. D. *Tower with internal perforated suitable for extracting liquids by treatment with other liquids and for similar cocurrent processes*. US Patent 2,011,186, 1935.
- [35] Miyanami, K., Tojo, K., Yano, T. “Liquid-phase mixing in a multistage vibrating-disk column with cocurrent gas-liquid flow”. *J. Chem. Eng. Jpn.* 6 (1973): 518–522.
- [36] Boyle, J. *Gas-Liquid contacting in a reciprocating plate column*. Ph.D. Thesis, Univ. New Brunswick, Canada, 1975.
- [37] Gomaa, H. G., Landau, J., Al Taweel, A. M. “Gas-liquid contacting in reciprocating plate columns: I. Hydrodynamics”. *Can. J. Chem. Eng.* 69 (1991): 228–239.
- [38] Al Taweel, A. M., Landau, J., Boyle, J., Gomaa, H. G. “Operational characteristics of a novel reciprocating plate multi-phase contactor”. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 73 (1995): 707–712.
- [39] Yang, N. S., Shen, Z. Q., Chen, B. H., Mc Millan, A.F. “Pressure drop, gas holdup and interfacial area for gas-liquid contact in Karr-columns”. *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.* 25 (1986): 660–664.
- [40] Skala, D. *Analiza sistema gas-tečnost u koloni sa vibracionom mešalicom*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški

- fakultet, Beograd, 1980.
- [41] Lo, T. C., Prochazka, J. "Reciprocating plate extraction column". U: *Handbook of Solvent Extraction*, TC Lo, MHI. Baird, C Hanson, (Eds.). New York : Wiley, 1983. Pp. 373–389.
- [42] Brauer, H., Sucker, D. "Biological waste water treatment in a high efficiency reactor". *Ger. Chem. Eng.* 2 (1979): 77–86.
- [43] Audet, J., Lounes, M., Thibault, J. "Pullulan fermentation in a reciprocating plate bioreactor". *Bioproc. Eng.* 15 (1996): 209–214.
- [44] Lounes, M., Audet, J., Thibault, J., LeDuy, A. "Description and evaluation of a reciprocating plate bioreactors". *Bioproc. Eng.* 13 (1995): 1–11.
- [45] Veljković, V., Lazić, M., Rutić, D., Jovanović, S., Skala, D. "Selection of a bioreactor and the optimal aerobic conditions for dextransucrase fermentation by *Leuconostoc mesenteroides*". *J. Serb. Chem. Soc.* 35 (1990): 483–490.
- [46] Brauer, H. "Growth of fungi and bacteria in the reciprocating jet bioreactor". *Bioproc. Eng.* 6 (1991): 1–15.
- [47] Harvey, A., Mackley, M., Selinger, T. "Process intensification of biodiesel production using a continuous oscillatory flow reactor". *J. Chem. Technol. Biotech.* 78 (2003): 338–341.
- [48] Kažić, N. *Proučavanje promene pritiska u cilju definisanja hidromehaničkih sila u vibracionom ekstraktoru*. Magistarska teza. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 1979.
- [49] Pavasović, V. *Ispitivanje hidrodinamike u vibracionom ekstraktoru*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1975.
- [50] Veljković, V. *Ispitivanje hidrodinamičkih i maseno-prenosnih karakteristika različitih reaktora i izbor optimalnog tipa za biosintezu dekstransaharaze*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1985.
- [51] Banković-Ilić, I. *Ispitivanje snage mešanja i sadržaja gasa u trofaznoj koloni sa vibracionom mešalicom*. Magistarska teza. Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1993.
- [52] Banković-Ilić, I. *Hidrodinamika i prenos mase u sistemima gas-tečnost-čvrsto u koloni s vibracionom mešalicom*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 1999.
- [53] Naseva, O. *Uticaj reoloških osobina tečne faze na snagumešanja u biorektoru sa vibracionom mešalicom*. Magistarska teza. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2003.
- [54] Nikolić, Lj. *Povratno mešanje tečne faze i kinetika procesa alkoholne fermentacije u trofaznom biorektoru sa vibracionom mešalicom*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2003.



- [55] Stamenković, I. *Uticaj reoloških osobina tečne faze na sadržaj gasa i promenu pritiska na dnu reaktora sa vibracionom mešalicom*. Magistarska teza. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2005.
- [56] Vasić, Lj. *Brzina prenosa mase kiseonika kao kriterijum za povećanje razmere kolone sa vibracionom mešalicom*. Magistarska teza. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2006.
- [57] Aleksić, M. *Hidrodinamičke i maseno-prenosne karakteristike višefaznog reaktora sa vibracionom mešalicom*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2006.
- [58] Jealous, A. C., Johnson, H. F. "Power requirements for pulse generation in pulse column". *Ind. Eng. Chem.* 47 (1955): 1159–1166.
- [59] Baird, M. H. I., Rama Rao, N. V., Stonestreet, P. "Power dissipation and holdup in a gassed reciprocating baffle-plate column". *Trans. Inst. Chem. Eng.* 74 (1996): 463–470.
- [60] Baird, M. H. I., Rama Rao, N. V. "Power dissipation and flow patterns in reciprocating baffle-plate columns". *Can. J. Chem. Eng.* 73 (1995): 417–425.
- [61] Banković-Ilić, I., Veljković, V., Lazić, M., Skala, D. "Power consumption and gas holdup in a gas-liquid reciprocating plate column". *Chem. Eng. Commun.* 134 (1995): 17–32.
- [62] Hafez, M. M., Baird, M. H. I. "Power consumption in a reciprocating plate extraction columns". *Trans. Inst. Chem. Eng.* 56 (1978): 229–238.
- [63] Veljković, V., Skala, D. "Hydrodynamic investigation of gas-liquid contacting in a reciprocating plate column". *Can. J. Chem. Eng.* 64 (1986): 906–914.
- [64] Aleksić, M. Đ., Veljković, V. B., Banković-Ilić, I., Lazić, M. L., Skala, D. U. "Gas holdup in a gassed reciprocating plate column with rashig rings placed in interplate spaces". *Can. J. Chem. Eng.* 80 (2002): 485–490.
- [65] Stamenković, O. S., Lazić, M. L., Todorović, Z. B., Veljković, V. B., Skala, D. U. "The effect of agitation intensity on alkali-catalyzed methanolysis of sunflower oil". *Bioresource Technol.* 98 (2007): 2688–2699.
- [66] Kumar, A., Hartland, S. "Unified correlations for the prediction of drop size in liquid-liquid extraction columns". *Ind. Eng. Chem. Res.* 35 (1996): 2682–2695.
- [67] Stella, A., Mensforth, K. H., Bowser, T., Stevens, G. W., Pratt, H. R. C. "Mass transfer performance in Karr reciprocating plate extraction columns". *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008): 3996–4007.
- [68] Stella, A., Pratt, H. R. C., Mensforth, K. H., Stevens, G. W., Bowser, T. "Backmixing in Karr reciprocating-plate extraction columns". *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006): 6555–6562.

- [69] Banković-Ilić, I. B., Todorović, Z. B., Avramović, J. M., Veličković, A. V., Veljković, V. B. “The effect of tetrahydrofuran on the base-catalyzed sunflower oil methanolysis in a continuous reciprocating plate reactor”. *Fuel Process. Technol.* 137 (2015): 339–350.
- [70] Stamenković, I. *Kontinualna homogena bazno katalizovana alkoholiza biljnih ulja u reaktoru sa vibracionom mešalicom*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2014.
- [71] Stavarache, C., Vinatoru, M., Maeda, Y., Bandow, H. “Ultrasonically driven continuous process for vegetable oil transesterification”. *Ultrason. Sonochem.* 14 (2007): 413–417.
- [72] Wen, Z., Yu, X., Tu, S–T., Yan, J., Dahlquist, E. “Intensification of biodiesel synthesis using zigzag micro–channel reactors”. *Bioresource Technol.* 100 (2009): 3054–3060.
- [73] Yu, X., Wen, Z., Lin, Y., Tu, S–T., Wang, Z., Yan, J. “Intensification of biodiesel synthesis using metal foam reactors”. *Fuel* 89 (2010): 450–456.
- [74] Stojković, I. J., Miladinović, M. R., Stamenković, O. S., Banković–Ilić, I. B., Povrenović, D. S., Veljković, V. B. “Biodiesel production by methanolysis of waste lard from piglet roasting over quicklime”. *Fuel* 182 (2016): 454–466.