

Rapšu eļļas etilesteru iegūšanas reakcijas ātrumu un esteru saturu ietekmējošie faktori kālija hidroksīda katalīzes apstākļos

Kristaps Malins¹, Valdis Kampars², Kaspars Spalvis³, Zane Shustere⁴,
Janis Brinks⁵, ¹⁻⁵ Riga Technical University

Kopsavilkums. Augu eļļu pāresterificēšanas reakcijas pētījumiem ir liela nozīme jebkuras valsts tautsaimniecības attīstībā. Latvijā, metanola vietā izmantojot etanolu, būtu iespējams paplašināt vietējo izejvielu bāzi, kā arī produkts būtu pilnībā atjaunojams resurss. Izpētot rapšu eļļas etilesteru iegūšanas procesu, būtu iespējams to optimizēt, panākot ievērojumu energoresursu un izejvielu ekonomiju, samazinot gala produkta izmaksas. Samazinoties biodīzeļdegvielas cenai, pieaugtu arī patērētāju interese un pieprasījums, nodrošinot vietējo resursu izmantošanas un ražošanas attīstību tautsaimniecības vajadzībām. Lai noskaidrotu REE (rapšu eļļas etilesteru) iegūšanas reakcijas apstākļus no Latvijā ražotas rapšu eļļas, veiktas eksperimentu virknes, par pamatu izmantojot rūpnieciskajiem procesiem raksturīgus apstākļus un mainot KOH koncentrāciju (0.5 - 2.5 masas % no eļļas), etanola molāro attiecību pret eļļu (4,0 – 8 moli), reakcijas temperatūru (20 - 90°C) un reakcijas laiku (2 – 180 minūtes). Noskaidrots, ka palielinot etanola molāro attiecību pret rapšu eļļu no 4,0 līdz 8,0 moliem, palielinās līdzsvara iestāšanās ātrums un REE iznākums pieaug par ~4%. Palielinot KOH koncentrāciju no 0,5 līdz 2,5 masas % no rapšu eļļas un reakcijas temperatūru no 20 līdz 80°C, palielinās līdzsvara iestāšanās ātrums un REE iznākums pieaug par ~1%. Periodisku procesu realizācijai ieteicamā reakcijas temperatūra ir 20°C, metanola molārā attiecība 7 moli un KOH koncentrāciju 1,5%, izmantojot nepārtrauktus procesus, reakciju efektīvi būtu realizēt augstākā temperatūru ar zemākiem katalizatora un etanola daudzumiem.

Atslēgas vārdi: rapšu eļļas etilesteris, biodīzeļdegviela, pāresterificēšana, optimizācija.

I. IEVADS

Biodīzeļdegviela ir viena no mūsdienu populārākajām alternatīvajām degvielām un tai ir sekojošas priekšrocības salīdzinājumā ar dīzeļdegvielu [1]:

1. biodīzeļdegvielu ražo no atjaunojamiem resursiem, un to iespējams iegūt no visu veidu biomasas, kas satur augstākās taukskābes vai to esterus;
2. biodīzeļdegviela ir dabai draudzīgāka nekā fosilā degviela, jo iekšdedzes dzinēju ekspluatācijas gaitā izdalītais CO₂ rada nelielu siltumnīcas efektu tādēļ, ka ievērojama tā daļa ir patērēta eļļas auga veģetācijas periodā;
3. darbinot dīzeļdzinējus ar biodīzeli, kaitīgo gāzu izmeši ir ievērojami mazāki, nekā darbinot ar fosilo degvielu;
4. palielinot biodegvielu ražošanas un izmantošanas apjomu, pieaug to valstu enerģētiskā neatkarība, kurām ir ierobežoti vai trūkst fosilie enerģijas avoti;

5. biodegvielu ražošana nodrošina līdzsvarotāku tautsaimniecības attīstību.

Pieaugot naftas produktu cenām pasaulē un Latvijā, biodīzeļdegvielas ražošanas apjomi un pieprasījums pēc tās pieaug. Līdz ar to pieaug pieprasījums pēc jaunām ražotnēm, tehnoloģijām un resursiem. Pašlaik biodīzeļdegvielu ražotnes Latvijā par pamatizejvielu izmanto vietējo rapšu eļļu un importētu metanolu. Metanola vietā izmantojot etanolu, būtu iespējams paplašināt vietējo izejvielu bāzi, kā arī produkts būtu pilnībā pieskaitāms atjaunojamiem resursiem. Attīstot Latvijā REE (rapšu eļļas etilesteru) ražošanu, ievērojami palielinātos bioetanola ražotņu skaits un apjomi, un bioetanola ražošanai sāktu izmantot lignocelulozes izejvielas. Palielinoties biodīzeļdegvielas un bioetanola ražotņu skaitam un apjomam, pieaugtu pieprasījums pēc darbaspēka, nodrošinot jaunas darbvietas. Palielinātos arī vietējo zemnieku un kokrūpnieku ieņēmumi, jo tiktu racionālāk izmantoti šo nozaru ražošanas pārpalikumi (celulozi un cieti saturošas izejvielas). Minētie faktori ievērojami attīstītu Latvijas tautsaimniecību, samazinot enerģētisko atkarību no citām valstīm, kā arī palielinātos LR budžeta ieņēmumi uz nodokļu rēķina. Lai noskaidrotu REE iegūšanas reakcijas apstākļus no Latvijā ražotas rapšu eļļas, veiktas virknes eksperimentu, par pamatu izmantojot rūpnieciskajiem procesiem raksturīgus apstākļus [2] un mainot KOH koncentrāciju (0.5 - 2.5 masas % no eļļas), metanola molāro attiecību pret eļļu (4.0 – 8.0 moli), reakcijas temperatūru (20 - 90°C) un reakcijas laiku (2 – 180 minūtes).

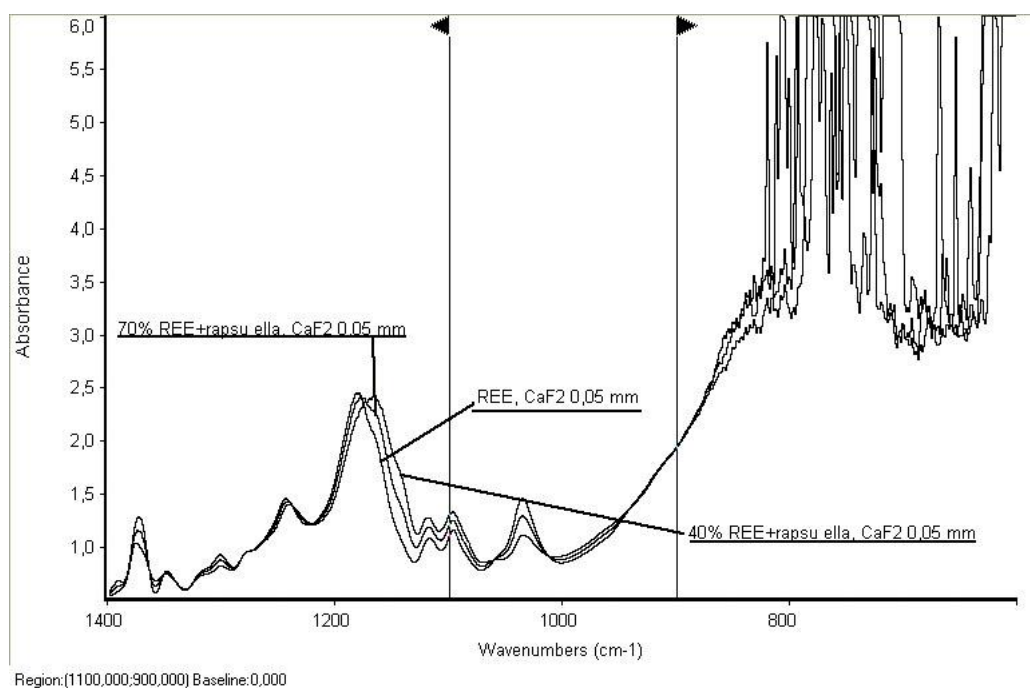
II. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Biodīzeļdegvielas iegūšanas procesu realizējam ar Latvijā izaudzētu rapšu eļļu (no SIA „Iecavnieks”), kura rafinēta Igaunijā. Lai noskaidrotu temperatūras, KOH koncentrācijas un etanola molārās attiecības ietekmi uz rapšu eļļas etilesteru iegūšanas procesu, tika sastādīts eksperimentu plāns atbilstoši 1. tabulai. Eksperimentālajā darbā tika izmantota mainīgo faktoru ietekmes pētīšanas metodika, kura līdzīga publicētajai [3].

Eksperimentu virknes katrs eksperimentālais paraugs tika iegūts, to ik pēc noteikta laika (skatīt 1. tabulu) izsūcot (5ml) no reakcijas masas ar speciālu tam paredzētu vienreiz lietojamu polietilēna pipeti. Visu eksperimentu virkņu reakciju masu maisīšanas ātrums tika saglabāts konstants (1200 apgr./min). Katra eksperimentālā parauga noņemšanas laiks tika mērīts ar hronometru un tā atskaite tika uzsākta,

1. TABULA
REE IEGUŠANAS APSTĀKĻU PĒTĪŠANAS EKSPERIMENTU PLĀNS

	Temperatūra, °C	Etanola molārā attiecība pret eļļu	KOH koncentrācija, masas % no eļļas	REE saturs noteikšanas laiks, min no reakcijas sākuma	REE iznākuma noteikšanas laiks, min no reakcijas sākuma
Etanola ietekme	70	4.0	2.0	2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180	60 un 180
	70	5.0	2.0		
	70	6.0	2.0		
	70	7.0	2.0		
	70	8.0	2.0		
KOH ietekme	70	7.0	0.1	2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180	60 un 180
	70	7.0	1.0		
	70	7.0	1.5		
	70	7.0	2.0		
	70	7.0	2.5		
Temperatūras ietekme	30	7.0	1.5	2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180	60 un 180



1. att. PLS metodē izmantotais spektrālais rajons

kad reakcijas masai tika pievienots viss nepieciešamais sārma šķīdums etanolā. Laika kļūda nepārsniedz 5 sekundes, bet maksimālā temperatūras svārstība $\pm 1^\circ\text{C}$ (izmantots termoregulators ar precizitāti $\pm 0.1^\circ\text{C}$). Pēc parauga noņemšanas to spēcīgi saskalina ar 30 ml destilēta ūdens, kurā izšķīdināta sālsskābe tādā koncentrācijā, lai neitralizētu sārma paliekas līdz neitrālai videi. Šādi tiek nodrošināta pāresterificēšanās reakcijas apstādīšana. Pēc neitralizēšanas emulsiju uz 10 min ievieto termostatā (60°C), lai nostādīnātos slāņi. Kad emulsija nostādīnājusies, nodala augšējo eļļas slāni, tad no tā 10 minūšu laikā izdestilē ūdens un etanola paliekas ar rotācijas ietvaicētāju ar 9 mbar spiedienu 90°C temperatūrā. REE iznākuma noteikšanai tika realizēti atsevišķi eksperimenti, saglabājot nemainīgus visus reakcijas apstākļus, bet palielinot rapšu eļļas daudzumu līdz 100 g (reakcija veikta

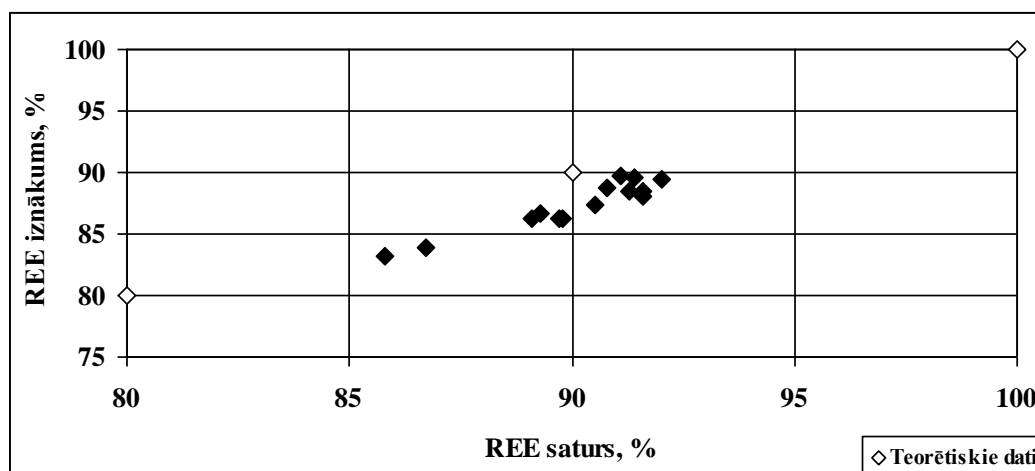
250 ml apaļkolbā). Pēc attīrīšanas tika noteikts REE saturs un eļļas slāņa masa. REE saturu visos gadījumos noteica ar kompānijas *Thermo Electron Company* infrasarkanā spektrometru Nicolet 5700 FT-IR, izmantojot „PLS” metodi *TQ analyst* programmatūrā, lietojot CaF_2 0,05 mm kivetī. Metode izstrādāta, balstoties uz spektrālo apgabalu, kurā REE un rapšu eļļas spektri būtiski atšķiras (skatīt. 1. attēlu).

Rajonā $1100\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ REE ir raksturīga izteikta absorbcijas josla pie 1035 cm^{-1} , kas atbilst estera grupas O-C valences svārstībām. Lai veiktu kalibrēšanu tika pagatavoti REE un rapšu eļļas maisījumi ar REE saturu no 40 līdz 100%. FTIR spektroskopijas metode izstrādāta, izmantojot REE ar saturu 89.7%, kurš noteikts saskaņā ar EN14103 standartu un vidējā atgūstamība sastādīja 97.8%.

2. TABULA

REAKCIJAS APSTĀKĻI, REE SATURS UN EĻĻAS SLĀŅA MASA UN TEORĒTISKIE PARAMETRI 80-100% DIAPAZONĀ

REE iznākuma noteikšanas laiks, min no reakcijas sākuma	KOH koncentrācija, % no rapšu eļļas masas	Etanola molārā attiecība pret eļļu	Reakcijas temperatūru, °C	Estera saturs, %	Biodīzeļa slāņa masa, g
Aprēķinātie teorētiskie parametri					
				80.0	103.96
				90.0	104.44
				100.0	104.95
Eksperimentālie rezultāti					
60	2.0	4.0	70	85.8	101.0
180	2.0	4.0	70	86.7	100.9
60	2.0	5.0	70	89.1	101.1
180	2.0	5.0	70	89.8	100.3
60	2.0	6.0 – 8.0	70	89.3	101.3
180	2.0	6.0 – 8.0	70	89.7	100.4
60	0.5 -1.0	7.0	70	91.1	102.9
180	0.5 -1.0	7.0	70	91.6	101,0
60	1.5 -2.5	7.0	70	90.8	102.1
180	1.5 -2.5	7.0	70	91.6	100.5
60	1.5	7.0	20 - 30	92.0	101.7
180	1.5	7.0	20 - 30	91.4	102.4
60	1.5	7.0	40 - 90	90.5	100.9
180	1.5	7.0	40 - 90	91.3	101.2



2. att. REE iznākuma un REE satura eļļas slānī kopsakars

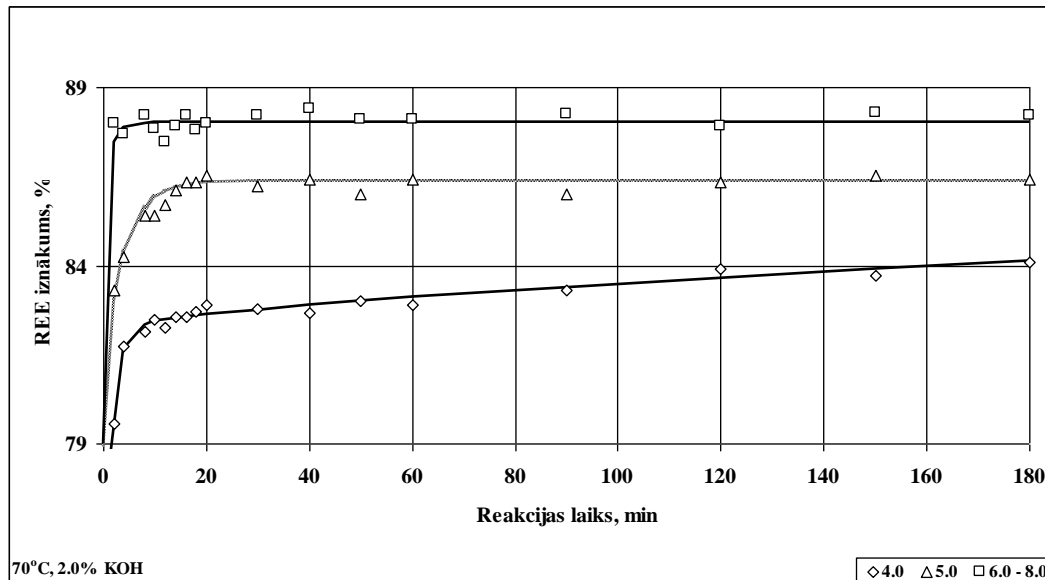
III. REZULTĀTI UN TO IZTIRZĀJUMS

Kā mainīgie faktori tika izvēlēti KOH koncentrācija, etanola molārā attiecība pret eļļu, reakcijas temperatūra un laiks. Par reakcijas norises kontroles parametru tika izvēlēts REE saturs eļļas slānī pēc reakcijas blakusproduktu un citu piemaisījumu atdalīšanas [3].

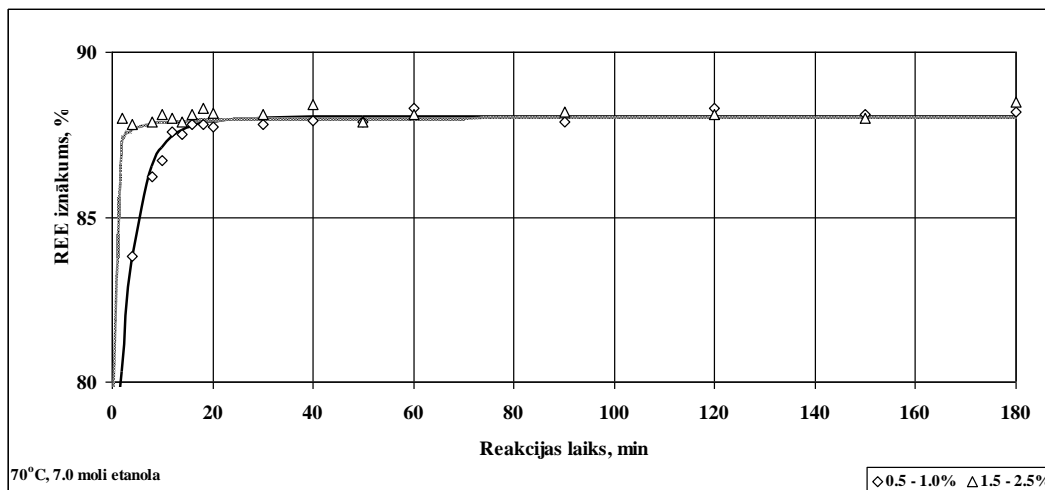
Lai noskaidrotu, vai REE saturs eļļas slānī adekvāti reprezentē reakcijas norisi, tika veikta REE iznākuma noteikšanas rezultātu analīze. Tā kā eļļas slāņa masas precīza noteikšana ir ļoti darbietilpīgs, sarežģīts un potenciāli kļūdas radošs process, tad ļoti svarīgi bija noskaidrot, vai reakcijas

norisi laika intervālā līdz 180 minūtēm nevar raksturot, nosakot tikai REE saturu eļļas slānī, ko ātri var izdarīt ar izstrādātās FTIR metodes palīdzību. 2. tabulā apkopoti dati par teorētiski aprēķināto un eksperimentāli divos izvēlētajos punktos (ar reakcijas laiku 60 un 180 min) noteikto REE saturu eļļas slānī un šī slāņa masu. Aprēķinos izmantotā rapšu eļļas molmasa tika noteikta eksperimentāli pēc pārziepjošanas skaitļa un sastādīja 932 g/mol.

Reakcijas norises raksturošanai būtu jāizmanto REE iznākums %, kuru var atrast, reizinot biodīzeļa slāņa masu ar REE saturu % tajā un dalot ar teorētiski sagaidāmo iznākumu pie attiecīgās rapšu eļļas konversijas pakāpes:



3. att. Etanola molārās attiecības ietekme uz REE iegūšanas procesu



4. att. KOH koncentrācijas ietekme uz REE iegūšanas procesu

$$Y = \frac{100}{Y_{teor}} \cdot M \cdot C \quad (1)$$

vienādojumu), kas ļauj no eksperimentāli noteiktajām C vērtībām izrēķināt Y vērtības.

$$Y = 1.0417 \cdot C - 6.49 \quad (2)$$

kur

Y – REE iznākums, %;

M – eļļas slāņa masa, g;

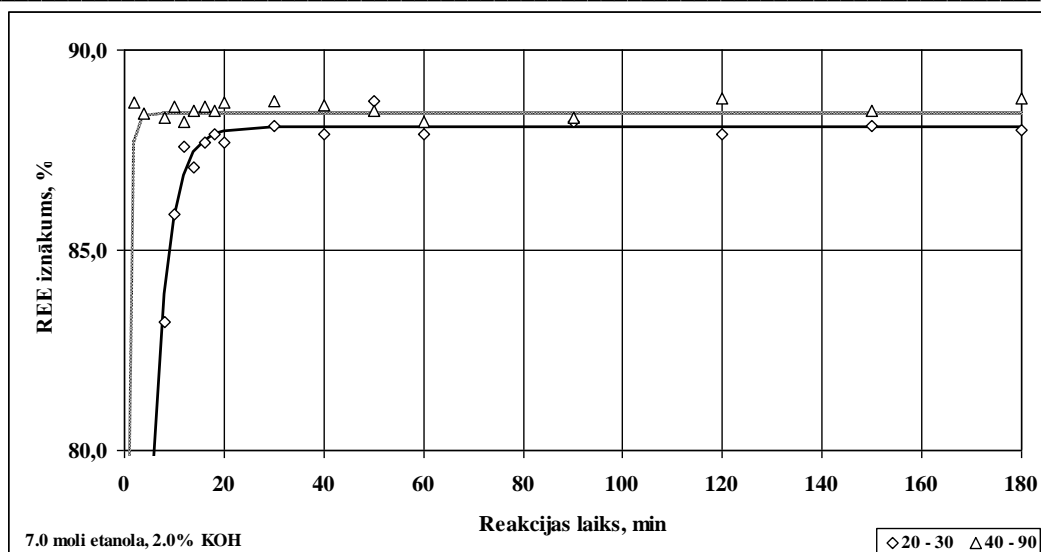
C – REE saturs biodīzeļa slānī, %;

Y_{teor} – Rapšu eļļas konversijas pakāpe par biodīzeli.

Kā liecina 2.attēls, eksistē pietiekami laba lineāra korelācija ($R=0.951$) starp REE iznākumu un REE saturu eļļas slānī, pie kam eksperimentālie punkti novietojas zem līnijas, ko veido trīs teorētiski aprēķinātie punkti pie 80, 90 un 100% lielas rapšu eļļas konversijas. Tādējādi var uzskatīt par pirmoreiz eksperimentāli viennozīmīgi pierādītu faktu to, ka reakcijas norisi vismaz dotajos reakcijas apstākļos var reprezentēt tikai ar biodīzeļa saturu eļļas slānī. Lai spriestu par iegūtās linearitātes vispārīgo raksturu vai izmantošanas ierobežojumiem nepieciešami papildus pētījumi, taču eksperimenta apstākļos eksistē lineāra sakarība (skatīt 2.

Izmantojot šo vienādojumu, var aprēķināt, ka rapšu eļļas 80-100 % konversijas apgalā REE saturs slānī ir augstāks par REE iznākumu un šī starpība pakāpeniski samazinās no 2.8 līdz 2.6 %, kas praktiski neizmaina ar C vērtību palīdzību iegūto kinētisko līkņu formu.

3. Attēls ataino etanola molārās attiecības ietekmi uz rapšu eļļas pārēsterificēšanās procesu. Dotajos apstākļos, ņemot 4 molus etanola pret 1 molu eļļas, 2 minūšu laikā REE iznākums sasniedz ~79.5%, bet, iestājoties līdzsvaram, nepārsniedz ~84.1%. Ja tiek ņemti 5 moli etanola, tad 2 minūšu laikā REE iznākums sasniedz ~83.3%, bet kad sistēmā iestājas līdzsvars, REE iznākums palielinās līdz ~86.5%. Ņemot 6 – 8 molus etanola, pārēsterificēšanās reakcija sākuma stadijā noris ļoti strauji un jau pēc 2 minūtēm sistēmā tiek sasniegts līdzsvars, un REE iznākums sastāda no ~87.5 līdz ~88.4%.



5. att. Temperatūras ietekme uz REE iegūšanas procesu

3. TABULA

GALVENIE REZULTĀTI NO IEGŪTAJIEM EKSPERIMENTĀLAJIEM DATIEM UN IZVEIDOTAJĀM APROKSIMĒTAJĀM KINĒTISKAJĀM LĪKNĒM

KOH koncentrācija % no rapšu eļļas masas	Etanola molārā attiecība pret eļļu	Reakcijas temperatūru, °C	Reakcijas līdzsvara iestāšanās laiks, min	Maksimālais REE iznākums reakcijas laikā no 2 līdz 180 min, %
2.0	4	70	>180	84,1
2.0	5	70	≥20	86.5
2.0	6 - 8	70	≥2	88.4
0.5 – 1.0	7	70	≥20	88.2
1.5 – 2.5	7	70	≥2	88.5
1.5	7	20 - 30	≥20	88.1
1.5	7	40 - 90	≥2	88.8

4. Attēls ataino katalizatora (KOH) koncentrācijas ietekmi uz rapšu eļļas pāresterificēšanās procesu. Ņemot 0.5 – 1.0% KOH no eļļas masas 2 minūšu laikā REE iznākums sasniedz ~78.5%, bet, iestājoties līdzsvaram, nepārsniedz ~88.2%. Ņemot 1.5 – 2.5% KOH, pāresterificēšanās reakcija sākuma stadijā noris ļoti strauji un jau pēc 2 minūtēm sistēmā tiek sasniegts līdzsvars, un REE sastāda no ~87.8 līdz ~88.5%.

5. Attēls ataino temperatūras ietekmi uz rapšu eļļas pāresterificēšanās procesu. Reakciju veicot 20 - 30°C, 2 minūšu laikā REE iznākums sasniedz ~69.9%, bet, iestājoties līdzsvaram, nepārsniedz ~88.1%. Ja reakciju realizē 40 – 90°C, jau pēc 2 minūtēm sistēmā tiek sasniegts līdzsvars un REE sastāda no ~88.2 līdz ~88.8%.

IV. SECINĀJUMI

1. Eksperimenta apstākļos laika intervālā līdz 180 min REE koncentrācija eļļas slānī ir tieši proporcionāla REE iznākumam. Sakarību raksturo vienādojums $Y = 1.0417 \cdot C - 6.49$ ($R=0.951$), kur Y – REE iznākums, bet C – REE saturs eļļas slānī. Pāresterificēšanas reakcijas norisi eksperimenta apstākļos klūdu robežās pareizi var raksturot ar REE koncentrāciju eļļas slānī, neveicot šī slāņa masas noteikšanu.

2. Palielinot etanola molāro attiecību pret rapšu eļļu no 4.0 līdz 8.0 moliem, palielinās līdzsvara iestāšanās ātrums un REE iznākums pieaug par ~5%.
3. Palielinot KOH koncentrāciju no 0.5 līdz 2.5 masas % no rapšu eļļas, palielinās līdzsvara iestāšanās ātrums un REE iznākums pieaug par ~0.3%.
4. Palielinot reakcijas temperatūru no 20 līdz 90°C, palielinās līdzsvara iestāšanās ātrums un REE iznākums pieaug par ~0,8%.
6. Periodisku procesu realizācijai ieteicamā reakcijas temperatūra ir 20 - 30°C, metanola molārā attiecība 7 moli un KOH koncentrācija 1.5%, izmantojot nepārtrauktus procesus, reakciju efektīvi būtu realizēt augstākā temperatūrā ar zemākiem katalizatora un etanola daudzumiem.

Uzskatāmā veidā galvenie rezultāti apkopoti 3. tabulā.

LITERATŪRA

1. A.A.Apostolaku, I.K.Kookos, C.Marazioti, K.C.Angelopoulos. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. *Fuel Proces. Technol.*, **2009**, 7-8(90), 1023-1031.
2. A.Bouaid, M.Martinez, J.Aracil. A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design. *Chem. Eng. J.*, **2007**, 134,93-99.

3. K.Komers, F.Skopal, R.Stloukal, J.Machek. Kinetics and mechanism of the KOH – catalyzed methanolysis of rapeseed oil for biodiesel production. Eur. J. Lipid Sci. Technol., **2002**, 104, 728–737.

Kristaps Malins, Mg. chem.
Institute of Applied Chemistry, Riga Technical University,
Address: 14/24 Azenes St., LV-1048, Riga, Latvia
e-mail: kristaps@ktf.rtu.lv

Valdis Kampars, Dr. hab. chem., Professor
at the Institute of Applied Chemistry, Riga Technical University,
Address: 14/24 Azenes St., LV-1048, Riga, Latvia
e-mail: kampars@ktf.rtu.lv

Kaspars Spalvis, Research Assistant
at the Institute of Applied Chemistry, Riga Technical University,
Address: 14/24 Azenes St., LV-1048, Riga, Latvia
e-mail: spooks@inbox.lv

Zane Shustere, Mg. chem.
Institute of Applied Chemistry, Riga Technical University,
Address: 14/24 Azenes St., LV-1048, Riga, Latvia
e-mail: zanesustere@ktf.rtu.lv

Janis Brinks, Research Assistant
Institute of Applied Chemistry, Riga Technical University,
Address: 14/24 Azenes St., LV-1048, Riga, Latvia
e-mail: janisbrin@gmail.com

Kristaps Malins, Valdis Kampars, Kaspars Spalvis, Zane Shustere, Janis Brinks. The Factors Affecting the Rate of Formation and the Content of Rapeseed Oil Ethyl Esters by Using Potassium Hydroxide as Catalyst

Studies of the transesterification reaction of vegetable oils are of key importance in the development of a country's national economy. In Latvia, the use of ethanol instead of methanol should enable the domestic raw material base to be extended, and the product would be a fully renewable resource. It is expected that through research, the rapeseed oil ethyl ester (REE) extraction process can be optimized to achieve significant savings of energy resources and raw materials, thereby reducing the end product cost. The decrease in the price of biodiesel would encourage consumer interest and demand, ensuring the development of domestic resources and production to meet transportation requirements. To determine suitable reaction conditions for the extraction of REE (rapeseed oil ethyl esters) from rapeseed oil produced in Latvia, a series of experiments was conducted, using conditions characteristic of industrial processes. The main variables were the concentration of KOH (0.5 - 2.5 weight % of oil), the molar ratio of ethanol to oil (4.0 - 8 moles), reaction temperature (20 - 90°C) and reaction time (2 - 180 minutes). It has been determined that by increasing the molar proportion of ethanol to rapeseed oil from 4.0 to 8.0 moles, the time to reaching equilibrium is shortened, while the REE yield increases by ~4%. When the KOH concentration is increased from 0.5 to 2.5 wt % of rapeseed oil and the reaction temperature is raised from 20 to 80°C, the time to equilibrium is reduced and the REE yield increases by ~1%. For implementation of batch processes, the preferred reaction temperature is 20°C, the molar ratio ethanol is 7 moles and the KOH concentration is 1.5%. However, when using continuous processes, the reaction would be more efficient at a higher temperature with lower quantities of catalyst and ethanol.

Кристанс Малиньш, Валдис Кампарс, Каспарс Спалвис, Зане Шустере, Янис Бринкс. Факторы, влияющие на скорость реакции получения и содержания этилового эфира рапсового масла в условиях катализа гидроксида калия

Исследования реакции превращения растительных масел в сложные эфиры имеют важное значение для развития народного хозяйства любого государства. В Латвии, используя этанол вместо метанола, можно было бы расширить местную сырьевую базу, кроме того, продукт стал бы полностью восстанавливаемым ресурсом. Исследование процесса получения этилового эфира из рапсового масла позволило бы его оптимизировать, добившись значительной экономии энергоресурсов и сырья, снизив, таким образом, расходы на готовый продукт. За счёт снижения цены на биодизельное топливо возрос бы также интерес и спрос потребителей на него, обеспечив тем самым использование и развитие производства местных ресурсов для нужд народного хозяйства. Чтобы выяснить условия реакции получения ЭЭРМ (этиловые эфиры рапсового масла) из производимого в Латвии рапсового масла, был проведён целый ряд экспериментов, в основе которых были использованы условия, характерные для производственных процессов, с изменением концентрации КОН (0,5 – 2,5% от содержания растительного масла), молярного отношения этанола к растительному маслу (4,0 – 8 молей), температуры реакции (20 - 90°C) и времени реакции (2 – 180 минут). Было выяснено, что при увеличении молярного отношения этанола к рапсовому маслу с 4,0 до 8,0 моль, увеличивается скорость наступления равновесия и выход ЭЭРМ на ~ 4%. С увеличением концентрации КОН от 0,5 до 2,5 % массы от содержания рапсового масла и температуры реакции от 20 до 80°C, увеличивается скорость наступления равновесия и выход ЭЭРМ на ~ 1%. При реализации периодических процессов рекомендуемая температура реакции 20°C, молярное отношение метанола - 7 молей и концентрация КОН - 1,5%, при использовании непрерывных процессов реакцию эффективнее было бы реализовывать при более высокой температуре с более низким количеством катализатора и этанола.