

Hanna Gwardiak, Krzysztof Różycki, Monika Ruskarska, Joanna Tylus,
Wiesława Walisiewicz-Niedbalska

Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. I. Mościckiego w Warszawie

Ocena estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME) uzyskanych z wybranych surowców*

Evaluation of fatty acid methyl esters (FAME) obtained from various feedstock

Słowa kluczowe: biodiesel, bioestry, analiza, monoacyloglicerole, diacyloglicerole, triacyloglicerole

Omówiono tłuszcze zwierzęce: łój i smalec jako surowce do produkcji bioestrów w porównaniu do bioestrów z oleju rzepakowego. Przedstawiono wyniki oznaczania produktów pośrednich transestryfikacji mono- i diacylogliceroli oraz nieprzereagowanych triacylogliceroli w produktach transestryfikacji. Reakcję transestryfikacji prowadzono w następujących warunkach: temp. $55\pm 5^{\circ}\text{C}$, czas 3 godz., ilość metanolu 20% (m/m), katalizator — KOH w ilości 0,8% (m/m). Do oznaczeń stosowano technikę kapilarną chromatografii gazowej. Produkty transestryfikacji łożu po pierwszej godzinie reakcji, w przeciwieństwie do oleju rzepakowego, zawierały więcej triacylogliceroli niż monoacylogliceroli. Po trzech godzinach reakcji zawartość produktów transestryfikacji łożu i oleju rzepakowego wykazywała podobne tendencje, tzn. większą zawartość monoacylogliceroli niż triacylogliceroli.

Key words: biodiesel, bioesters, analysis, monoacylglycerols, diacylglycerols, triacylglycerols

This paper describes animal fats: beef tallow and lard as feedstock for biodiesel production in comparison to bioesters derived from rapeseed oil. There are presented results of analytical identification of the transesterification intermediates: mono- and diacylglycerols and unreacted triacylglycerols in the transesterification products. The transesterification reaction was conducted in the following conditions: temp $55\pm 5^{\circ}\text{C}$, time 3 h, methanol quantity 20% (w/w), catalyst — KOH 0,8% (w/w). The analysis was conducted using a capillary gas chromatography. The lard transesterification products during the first reaction hour, contrary to rapeseed oil, contained more triacylglycerols than monoacylglycerols. After 3h reaction, the products of both beef tallow and rapeseed oil transesterification showed similar tendencies – higher concentrations of monoacylglycerols than triacylglycerols.

Wstęp

W ostatnim dwudziestolecu surowce odnawialne są istotnym materiałem do produkcji biopaliw i biokomponentów. Wśród nich ważną pozycję zajmują estry

* Badania przeprowadzono w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 158/R/T02/2007/IT1.

metylowe kwasów tłuszczowych (ang. *fatty acid methyl esters* FAME), tzw. bioestry. Otrzymywane są z olejów roślinnych i stosowane bezpośrednio jako biodiesel lub stanowią domieszkę do oleju napędowego. Wymagania fizykochemiczne dla estrów metylowych kwasów tłuszczowych przeznaczonych do stosowania jako biopaliwo są zawarte w normie PN-EN 14214. Określono w niej wymagania paliwowe (np. liczba cetanowa, lepkość, punkt blokowania zimnego filtra) oraz wymagania chemiczne (np. liczba kwasowa, zawartość kwasu linolenowego, liczba jodowa, zawartość potasu, sodu, wapnia, magnezu, zawartość mono- (MAG), di- (DAG) i triacylogliceroli (TAG), wody, CH₃OH). Niektóre z tych parametrów zależą od zastosowanej technologii (np. zawartość P, K, Na, Ca, Mg, liczba kwasowa, zawartość mono-, di- i triacylogliceroli), inne od sposobu oczyszczania (zawartość CH₃OH, wody, resztek katalizatora, fosforu), a jeszcze inne od rodzaju użytego surowca (zawartość kwasu linolenowego, liczba jodowa). Istotnym parametrem w ocenie bioestrów jest punkt zablokowania zimnego filtra (ang. *Cold Filter Plugging Point* CFPP). Jest to najniższa temperatura, przy której paliwo może przejść przez filtr paliwowy w standardowych warunkach.

Składniki biopaliwa o wysokiej temperaturze topnienia, przy obniżaniu temperatury otoczenia wytrącają się blokując filtr, przez co zmniejsza się ilość paliwa dopływającego do silnika (Walisiewicz-Niedbalska 2004).

Podstawowym surowcem do otrzymywania bioestrów są oleje roślinne, których głównymi składnikami są kwasy tłuszczowe o 18 atomach węgla w łańcuchu i różnym stopniu nienasycenia. Wyjątkiem są m.in. oleje palmowy i kokosowy, w których dominującymi składnikami są kwasy nasycone o 16 (palmitynowy), 12 (laurynowy) i 14 (mirystynowy) atomach węgla w łańcuchu. W koszcie wytwarzania bioestrów otrzymywanych z olejów roślinnych około 80% stanowi koszt surowca (Demirbas 2006). Dlatego prowadzone są badania nad wprowadzaniem surowców tańszych, tj. tłuszczów zwierzęcych: łoju i smalcu (Walisiewicz-Niedbalska i in. 2008, da Cunha i in. 2009).

Tłuszcze zwierzęce zawierają stosunkowo duże ilości kwasów nasyconych, np. w łoju suma kwasów nasyconych wynosi od 45 nawet do 60% (m/m) (Ma, Hanna 1999), podczas gdy w oleju rzepakowym 5–8% (m/m). Właściwości fizykochemiczne kwasów nasyconych znacząco różnią się od nienasyconych. W tabeli 1 podano przykładowo wartości temperatury topnienia kwasów nasyconych i nienasyconych, ich estrów metylowych oraz acylogliceroli według Ma, Hanna 1999.

Jak wynika z tabeli 1 temperatura topnienia estru metylowego kwasu palmitynowego, głównego kwasu nasyconego łoju, wynosi 30,6°C, podczas gdy dla oleju rzepakowego temperatura topnienia głównego składnika (tab. 2), estru metylowego kwasu oleinowego, wynosi –19,8°C. Podobnie jest dla niepełnych acylogliceroli, np. temperatura topnienia 1-monopalmitoglicerolu jest ponad dwukrotnie wyższa niż dla monooleinoglicerolu, a temperatura topnienia 1,3-dipalmityloglicerolu jest ponad trzykrotnie większa niż dla 1,3-dioleiloglicerolu. Natomiast dla triacylo-

gliceroli temperatura topnienia 1,2,3-tripalmitoglicerolu jest już ponad 11-krotnie większa niż 1,2,3-oleinoglicerolu.

Tabela 1

Temperatura topnienia kwasów tłuszczowych i ich pochodnych
Melting point of fatty acids and their derivatives

Kwas / pochodna kwasu <i>Acid / derivatives</i>	Temperatura — <i>Temperature</i> [°C]				
	ilość węgla w łańcuchu — <i>number of carbon in chain</i>				
	nasyconych — <i>saturated</i>			nienasyconych — <i>unsaturated</i>	
	C _{14:0}	C _{16:0}	C _{18:0}	C _{18:1}	C _{18:2}
Kwas — <i>Acid</i>	54,4	62,9	69,6	16,3	-6,5
Ester metyloowy <i>Methyl ester</i>	18,8	30,6	39,1	-19,8	-35,0
1-monoacyloglicerol <i>1-monoacylglycerol</i>	70,5	77,0	81,5	35,2	12,3
1,3-diacyloglicerol <i>1,3-diacylglycerol</i>	66,8	76,3	79,4	21,5	-2,6
Triacyloglicerol <i>Triacylglycerol</i>	57,0	63,5	73,1	5,5	-13,1

Tabela 2

Charakterystyka surowców — *The characteristic of feedstocks*

Oznaczenie — <i>Determination</i>	Surowce — <i>Raw materials</i>		
	łój <i>beef tallow</i>	smalec <i>lard</i>	olej rzepakowy niskoerukowy <i>low erucic acid rapeseed oil</i>
Liczba kwasowa — <i>Amid number</i> [mg KOH/g]	1,5	0,9	0,3
Liczba jodowa — <i>Iodine number</i> [g J ₂ /100 g]	41,1	44,4	111,2
Skład kwasów tłuszczowych <i>Fatty acids composition</i> [% (m/m)]			
mirystynowy C _{14:0}	3,5	1,5	0,1
palmitynowy C _{16:0}	27,0	23,5	4,3
stearynowy C _{18:0}	19,5	16,5	1,7
oleinowy C _{18:1}	36,5	37,5	59,4
linolowy C _{18:2}	1,5	4,0	19,5
linolenowy C _{18:3}	–	–	9,0
inne	12	11	2,4
Temperatura mętnienia — <i>Cloud point CP</i> [°C] *	12	11	-3,9
Temperatura krzepnięcia — <i>Pour point</i> [°C] *	–	–	-31,7
Temperatura topnienia — <i>Melting point</i> [°C] *	48	43	–

* wg Ghotra i in. 2002, Ma, Hanna 1999

Temperatura topnienia kwasów nasyconych jest od około 1,8- do niemal 3-krotnie wyższa niż ich odpowiedników estrów metylowych.

Niezwykle istotne jest to, aby bioestry, otrzymane w procesie transestryfikacji triacylogliceroli, z przeznaczeniem do stosowania jako biodiesel, spełniały parametry normy PN-EN 14214, a tym samym nie zawierały wolnych kwasów tłuszczowych (WKT) mając liczbę kwasową (LK) nie większą niż 0,5, a zawartość TAG $\leq 0,02\%$ (m/m), DAG $\leq 0,02\%$ (m/m), MAG $\leq 0,08\%$ (m/m).

Celem przeprowadzonych badań było określenie zawartości mono-, di- i triacylogliceroli w produkcie w czasie syntezy estrów metylowych kwasów tłuszczowych z łożu i smalcu otrzymanych w klasycznej reakcji transestryfikacji badanych tłuszczów z metanolem wobec katalizatora alkalicznego KOH. Wyniki porównano z produktem transestryfikacji oleju rzepakowego otrzymanym w reakcji prowadzonej w takich samych warunkach. Oznaczenia prowadzono w czterech powtórzeniach, a interpretację wyników oparto o średnią arytmetyczną.

Materiały i metody

Do badań stosowano łój i smalec pozyskane z Zakładów Mięśnych oraz olej rzepakowy niskoterukowy zakupiony w sklepie spożywczym. Charakterystykę stosowanych surowców zamieszczono w tabeli 2.

Synteza estrów metylowych kwasów tłuszczowych

FAME otrzymywano metodą transestryfikacji triacylogliceroli tłuszczów (tab. 2) metanolem. Przeprowadzono po 4 doświadczenia dla każdego surowca. Proces prowadzono w reaktorze szklanym o pojemności 2000 ml. Do 1000 g badanego surowca — łój, smalec, olej rzepakowy — dodawano alkohol metylowy w ilości 20% (m/m), co stanowiło 100% nadmiar w stosunku do ilości stechiometrycznej. Stosowano katalizator alkaliczny KOH w ilości 0,8% (m/m), temperatura $55 \pm 5^\circ\text{C}$, czas — 3 godz. Próby do analizy pobierano po 1 i 3 godzinach przebiegu reakcji. Z prób usuwano wolny glicerol przez odmywanie wodą, a następnie nadmiar metanolu i resztki wilgoci oddestylowywano pod próżnią na wyparce obrotowej.

Metody analityczne

Produkty transestryfikacji analizowano metodą chromatografii gazowej według PN-EN 14105. Analizę prowadzono w następujących warunkach:

- aparat — chromatograf gazowy Hewlett Packard model 5890,
- detektor FID — 380°C ,
- dozownik — cool on-column 53– 373°C ,
- kolumna — Zorbax 5, 15 m; temperatura programowana ze wzrostem temperatury pieca 0,32 mm, 0,1 μm ,

- piec — 50°C/3 min/10°C na min/180°C/7°C na min/270°C/15°C na min/370°C,
- przeprowadzenie derywatacji w pochodne silanowe stosując N-metylo-N-trimetylosililtrifluoroacetamid (MSTFA),
- wzorce — monooleina, dioleina, triooleina firmy SIGMA, gliceryna farmaceutyczna,
- standardy wewnętrzne — kwas glutarowy, tridekanoina firmy SIGMA, liczbę jodową określano wg PN-EN 14111:2004,
- liczbę kwasową wg PN-EN 14104:2003.

Wyniki

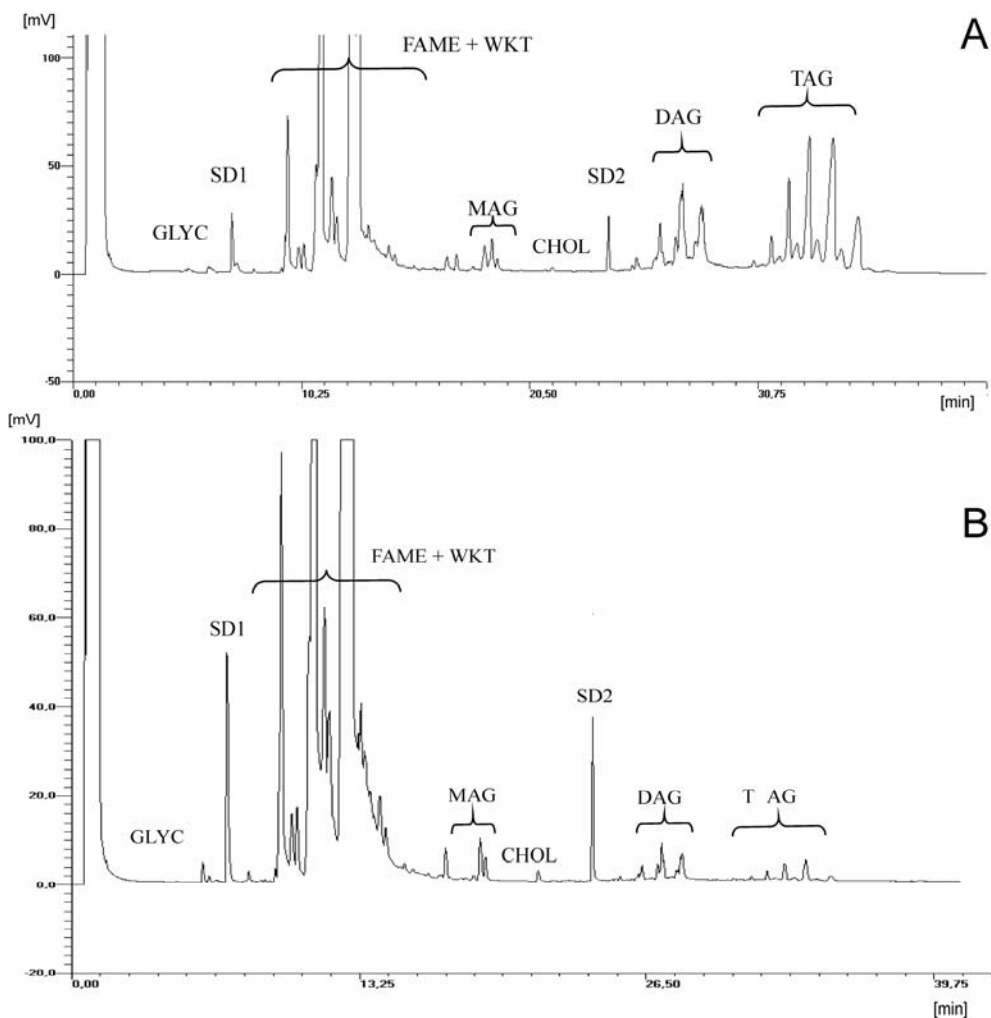
W tabeli 3 przedstawiono wyniki oznaczania zawartości mono-, di- i triacylogliceroli w uzyskanych produktach transestryfikacji łoju, smalcu i oleju rzepakowego niskoerukowego metanolem (100% nadmiaru w stosunku do ilości stechiometrycznej) wobec KOH w ilości 0,8% (m/m).

Tabela 3
Zawartość mono-, di- i triacylogliceroli w produktach transestryfikacji łoju, smalcu i oleju rzepakowego — *Content of mono-, di- and triacylglycerols in transesterification products of beef tallow, lard and rapeseed oil*

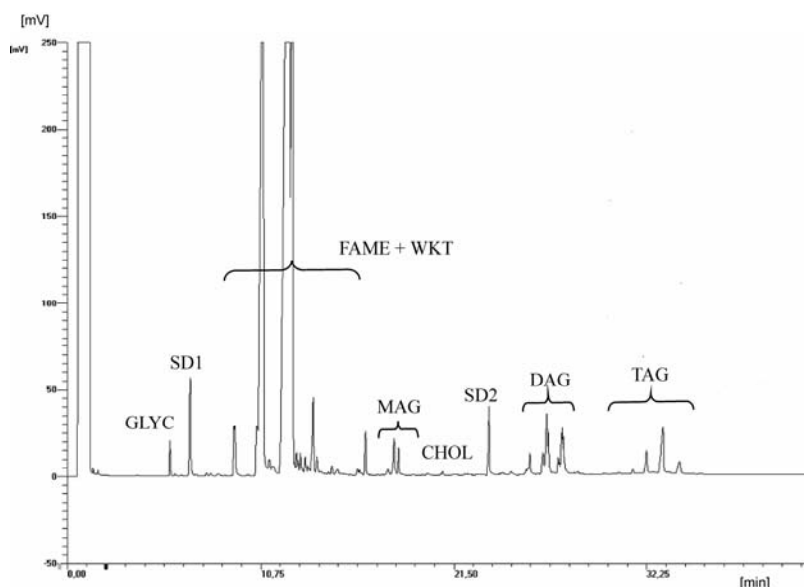
Oznaczenie / czas procesu — <i>Determination / time</i>											
monoacyloglicerole <i>monoacylglycerols</i> % (m/m)				diacyloglicerole <i>diacylglycerols</i> % (m/m)				triacyloglicerole <i>triacylglycerols</i> % (m/m)			
1 h		3 h		1 h		3 h		1 h		3 h	
średnia <i>mean</i>	SD	średnia <i>mean</i>	SD	średnia <i>mean</i>	SD	średnia <i>mean</i>	SD	średnia <i>mean</i>	SD	średnia <i>mean</i>	SD
<i>Łój — Beef Tallow</i>											
0,79	0,096	0,60	0,07	0,84	0,032	0,49	0,019	1,15	0,088	0,35	0,014
<i>Smalec — Lard</i>											
0,81	0,015	0,78	0,01	0,82	0,01	0,50	0,005	1,04	0,065	0,33	0,036
<i>Olej rzepakowy niskoerukowy — Low erucic acid rapeseed oil</i>											
0,80	0,01	0,60	0,01	0,35	0,02	0,15	0,014	0,50	0,017	0,10	0,01

SD — odchylenie standardowe — *standard deviation*

Na rysunkach 1–3 przedstawiono przykładowe chromatogramy produktów transestryfikacji łoju, smalcu i porównawczo dla oleju rzepakowego.



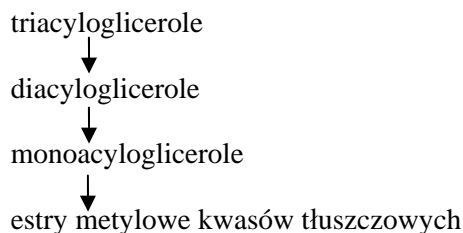
Rys. 1. Przykładowe chromatogramy GC produktu transestryfikacji łożu w czasie (A — 1 h) i po zakończeniu reakcji transestryfikacji (B — 3 h). Oznaczenia: SD1 — standard wewnętrzny — kwas glutarowy, SD2 — standard wewnętrzny — tridekanoina, GLYC — gliceryna, MAG — monoacyloglicerole, DAG — diacyloglicerole, TAG — triacyloglicerole, CHOL — cholesterol — *Sample GC chromatograms of tallow: by time (A — 1 h) and after completing the transesterification reaction (B — 3 h). Notation: SD1 — internal standard — glutaric acid, SD2 — internal standard — tridecanoin, GLYC — glycerin, MAG — monoacylglycerols, DAG — diacylglycerols, TAG — triacylglycerols, CHOL — cholesterol*



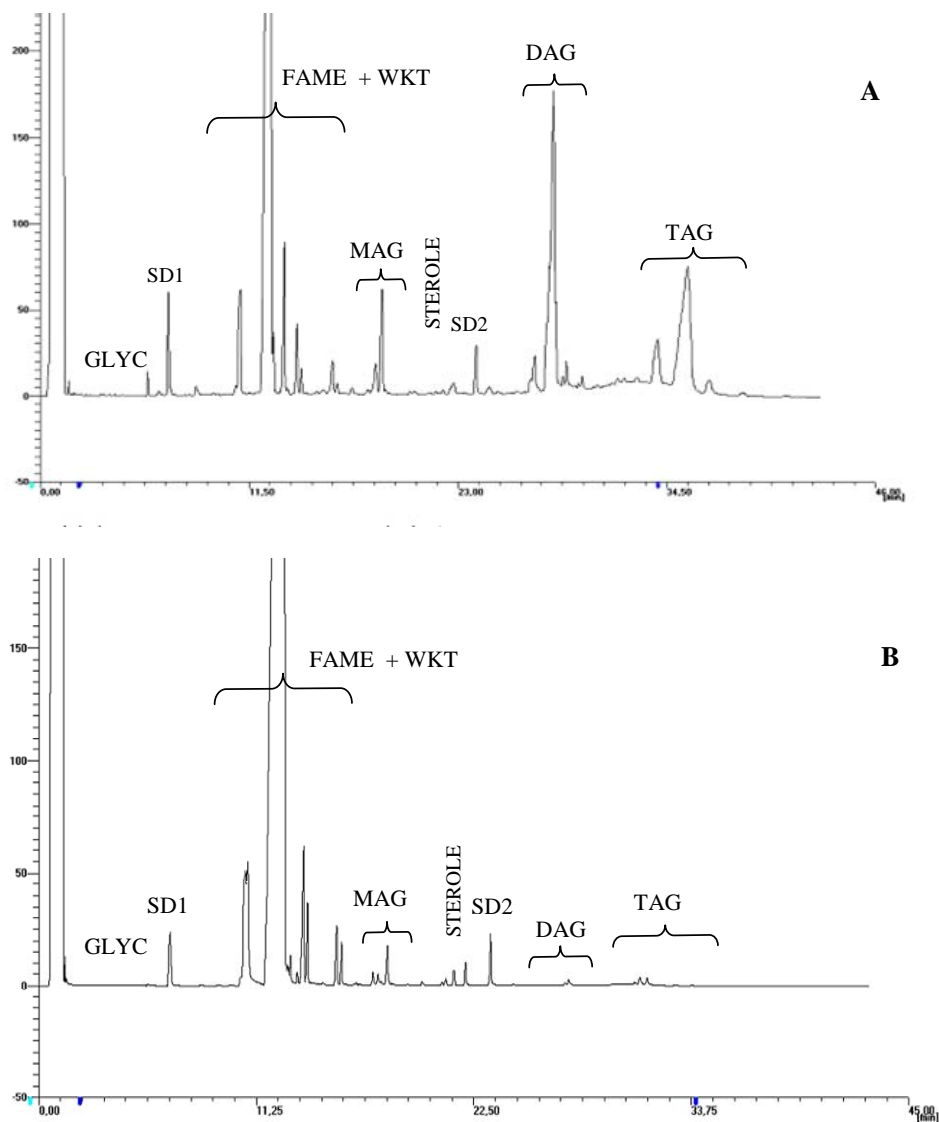
Rys. 2. Przykładowy chromatogram GC produktu transestryfikacji smalcu po zakończeniu reakcji transestryfikacji (3 h). Oznaczenia: SD1 — standard wewnętrzny – kwas glutarowy, SD2 — standard wewnętrzny – tridekanoina, GLYC — gliceryna, MAG — monoacyloglicerole, DAG — diacyloglicerole, TAG — triacyloglicerole, CHOL — cholesterol — *Sample GC chromatograms of lard after the transesterification reaction (3 h). Notation: SD1 — internal standard – glutaric acid, SD2 — internal standard – tridecanoin, GLYC — glycerin, MAG — monoacylglycerols, DAG — diacylglycerols, TAG — triacylglycerols, CHOL — cholesterol*

Estry metylowe kwasów tłuszczowych można otrzymywać metodą transestryfikacji łoju i smalcu, jednak produkty zawierają nieco większe ilości mono-, di- i triacylogliceroli niż produkty transestryfikacji oleju rzepakowego oraz przekraczają wymagania normy PN-EN 14214.

Reakcja transestryfikacji triacylogliceroli przebiega przez stadia pośrednie według następującego schematu:



Po 1 godzinie reakcji w produkcie transestryfikacji łoju oznaczono łącznie 2,85% produktów pośrednich (MAG i DAG) i surowca (TAG) z czego około 42% stanowiły triacyloglicerole a około 28% monoacyloglicerole. Dla produktu transestryfikacji oleju rzepakowego suma ta wynosiła tylko 1,65%, z czego TAG stanowiły około 30% a MAG około 48%.



Rys. 3. Przykładowe chromatogramy GC produktu transestryfikacji oleju rzepakowego w czasie reakcji transestryfikacji (A — 1 h) i po reakcji (B — 3 h). Oznaczenia: SD1 — standard wewnętrzny — kwas glutarowy, SD2 — standard wewnętrzny — tridekanoina, GLYC — gliceryna, MAG — monoacyloglicerole, DAG — diacyloglicerole, TAG — triacyloglicerole, STEROLE — sterole — *Sample GC chromatograms of fatty acid methyl esters of rapeseed oil during the transesterification reaction (A — 1 h) and after the reaction (B — 3 h). Notation: SD1 — internal standard — glutaric acid, SD2 — internal standard — tridecanoin, GLYC — glycerin, MAG — monoacylglycerols, DAG — diacylglycerols, TAG — triacylglycerols, STEROLE — phytosterols*

Po 3 godzinach reakcji dla łoju związki pośrednie (MAG i DAG) oraz TAG łącznie stanowiły 1,45%, z czego TAG stanowiły około 24% a MAG około 41%. Podobne wyniki uzyskano dla smalcu. Dla oleju rzepakowego suma ta wynosiła 0,85%, z czego TAG stanowiły około 12% (m/m) a MAG około 70% (m/m).

Produkty uzyskane po 3 godzinach procesu zarówno dla łoju, jak i dla oleju rzepakowego zawierały większe ilości MAG niż TAG, chociaż dla oleju rzepakowego zawartość MAG wynosiła około 70% (m/m) wszystkich produktów pośrednich i TAG, a dla łoju tylko 41% (m/m).

Na chromatogramie produktu transestryfikacji łoju po 1 godzinie obserwuje się więcej pików TAG niż dla oleju rzepakowego. Zakresy pików dla DAG i MAG są bardzo podobne dla łoju i smalcu, ale różnią się od wielkości pików oznaczonych dla oleju rzepakowego. Zawierają większą liczbę pików niż dla oleju rzepakowego i różnią się stosunkiem wysokości poszczególnych pików. W produktach transestryfikacji prowadzonej w czasie 3 godzin występują podobne zróżnicowania.

Łój i smalec zawierają w ilościach porównywalnych kwasy nasycone, głównie kwas palmitynowy (C₁₆) 23,5–27,0% (m/m) i stearynowy (C₁₈) 16,5–19,7 (m/m) oraz kwas oleinowy 36,5–37,5% (m/m), a nie zawierają kwasu linolenowego (C_{18:3}). Natomiast olej rzepakowy zawiera bardzo małe ilości kwasów nasyconych (1,7–4,3% m/m), zawiera kwasy 18-węglowe w łańcuchu, głównie oleinowy C_{18:1} 59,4% (m/m), linolowy 19,5% (m/m) oraz linolenowy 9,0% (m/m). Badane surowce zawierają więc trzy główne triacyloglicerole, co jest zgodne z danymi przedstawionymi w tabeli 4. Według Jina (Jin i in. 2007) w łoju występuje dodatkowy triacyloglicerol SOO w ilości porównywalnej do POP i POS.

Tabela 4

Struktura triacylogliceroli w badanych tłuszczach — *Triacylglycerol structure in used fats*

Tłuszcz <i>Fat</i>	Struktura triacylogliceroli <i>Triacylglycerols structure</i>			Źródło <i>Source</i>
Łój — <i>Beef tallow</i>	POO	POP	OPO	Kubow 1996
	POO	POP	POS	Mu, Høy 2004
	POO	POP	POS i SOO	Jin i in. 2007
Smalec — <i>Lard</i>	SPO	OPL	OPO	Kubow 1996 Mu, Høy 2004
Olej rzepakowy niskoerukowy <i>Low erucic rape seed oil</i>	OOO	LOO	OOLn	Mu, Høy 2004

P — kwas palmitynowy — *palmitic acid*, S — kwas stearynowy — *stearic acid*,

O — kwas oleinowy — *oleic acid*, L — kwas linolowy — *linoleic acid*,

Ln — kwas linolenowy — *linolenic acid*

Zarówno skład kwasów tłuszczowych jak i struktura triacylogliceroli wpływają na zmiany stanu skupienia tłuszczów, a tym samym ich lepkości.

W czasie procesu transestryfikacji łoju pod koniec reakcji w produkcie zaobserwowano cztery główne triacyloglicerole (rys. 1A) w przeciwieństwie do triacylogliceroli produktu transestryfikacji oleju rzepakowego, gdzie dominuje jeden TAG (rys. 3A). Obecność kilku triacylogliceroli w produkcie transestryfikacji może wpływać na temperaturę topnienia, krzepnięcia i mętnienia bioestrów. Celem usunięcia nieprzereagowanych TAG, jak i produktów niepełnej reakcji, tzn. mono- i diacylogliceroli prowadzi się proces destylacji surowych estrów kwasów tłuszczowych (Wadumesthrige i in. 2009).

Wnioski

Przeprowadzone doświadczenia dowiodły, że przyjęta metodyka umożliwia ocenę przebiegu procesu transestryfikacji dla substratów o bardzo zróżnicowanym profilu kwasów tłuszczowych oraz zmiennej zawartości i proporcjach TAG, DAG i MAG. Na podstawie wyników można wnioskować, że dla łoju i smalcu w pierwszej godzinie reakcji stopień przemiany TAG do MAG jest mniejszy niż dla oleju rzepakowego.

Po 3 godzinach reakcji dla łoju i smalcu stopień przemiany TAG do MAG zwiększa się, natomiast dla oleju rzepakowego jest on znacząco większy.

Ocena analityczna otrzymanych produktów pokazuje, iż w przyjętych warunkach reakcji z oleju rzepakowego uzyskano FAME w takim stopniu, że w produkcie zawartość TAG i MAG spełnia normę PN-EN 14214. W przypadku smalcu i łoju te same warunki okazują się niewystarczające, aby spełnić wymagania tej normy i konieczna byłaby modyfikacja procesu syntezy w celu zwiększenia konwersji acylogliceroli w kierunku FAME.

Literatura

- da Cunha M.E., Krause L.C., Moraes M.S.A., Faccini C.S., Jacques R.A., Almeida S.R., Rodrigues M.R.A., Caramão E.B. 2009. Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 90: 570-575.
- Demirbas A. 2006. Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. *Energy Conversion Management*, 47: 2271-2282.
- Ghotra B.S., Dyal S.D., Narine S.S. 2002. Lipid shortenings: a review. *Food Research International*, 35: 1015-1048.
- Jin Q., Gao H., Liang S., Liu Y., Wang X. 2007. Study on grainy crystals in edible beef tallow shortening. *Food Research International*, 40: 909-914.
- Kubow S. 1996. The influence of positional distribution of fatty acids in native, interesterified and structure-specific lipids on lipoprotein metabolism and atherogenesis. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 7: 530-541.

- Ma F., Hanna M.A. 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70: 1-15.
- Mu H., Høy C-E. 2004. The digestion of dietary triacylglycerols. *Progress in Lipid Research*, 43: 105-133.
- PN-EN 14103 Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metyloowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczanie zawartości estrów i estru metyloowego kwasu linolenowego.
- PN-EN 14104 Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metyloowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczanie liczby kwasowej.
- PN-EN 14105 Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metyloowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczanie zawartości wolnego i ogólnego glicerolu oraz mono-, di- i triacylogliceroli.
- PN-EN 14111 Produkty przetwarzania olejów i tłuszczów. Estry metyloowe kwasów tłuszczowych (FAME). Oznaczanie liczby jodowej.
- PN-EN 14214 Paliwo do pojazdów samochodowych. Estry metyloowe kwasów tłuszczowych (FAME) do silników o zapłonie samoczynnym (Diesla). Wymagania i metody badań.
- Wadumesthrige K., Salley S.O., Ng K.Y.S. 2009. Effects of partial hydrogenation, epoxidation, and hydroxylation on the fuel properties of fatty acid methyl esters. *Fuel Processing Technology*, 90: 1292–1299.
- Walisiewicz-Niebalska W., Lipkowski A.W., Kijeński J., Różycki K., Gwardiak H. 2008. Tłuszcze zwierzęce – surowiec do otrzymywania bioestrów. *Chemicz*, 61: 236-238.
- Walisiewicz-Niebalska W. 2004. Biopaliwo. Gliceryna. Pasza z rzepaku. Praca zbiorowa pod red. W. PodkóWKi. Wydawnictwo Uczelniane ATR Bydgoszcz.