

ENGINEERING

# Fuel properties of biodiesel produced from beef-tallow and corn oil blends based on the variation in the fatty acid methyl ester composition

Duk Gam Woo<sup>1</sup>, Tae Han Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

<sup>2</sup>Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

\*Corresponding author: [thakim@knu.ac.kr](mailto:thakim@knu.ac.kr)

## Abstract

Biodiesels are being explored as a clean energy alternative to regular diesel, which causes pollution. In this study, the optimum conditions for producing biodiesel (BD) by combining beef tallow, an animal waste resource with a high saturated fatty acid content, and corn oil, a vegetable oil with a high unsaturated fatty acid content, were investigated, and the fuel properties were analyzed. Furthermore, Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) was used to verify the optimum conditions for producing biodiesel. The influences of control factors, such as the oil blend ratio and methanol to oil molar ratio, on the fatty acid methyl ester and biodiesel production yield were investigated. As a result, the optimum condition for producing blended biodiesel was verified to be tallow to corn oil blend ratio of 7 : 3 (TACO7) and a methanol to oil molar ratio of 14 : 1. Moreover, the interaction between the oil blend ratio and the methanol to oil molar ratio has the most crucial effects on the production of oil blended biodiesel. In conclusion, the analysis results of the fuel properties of TACO7 BD satisfied the BD quality standard, and thus, the viability of BD blended with waste tallow as fuel was verified.

**Keywords:** corn oil, fuel properties, oil blend biodiesel, MANOVA, tallow



## OPEN ACCESS

**Citation:** Woo DG, Kim TH. 2019. Fuel properties of biodiesel produced from beef-tallow and corn oil blends based on the variation in the fatty acid methyl ester composition. Korean Journal of Agricultural Science 46:941-953. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20190076>

**Received:** August 27, 2019

**Revised:** October 28, 2019

**Accepted:** November 01, 2019

**Copyright:** © 2019 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Introduction

바이오 디젤은 기존 경유와 물리적으로 유사한 연료로 식물성 오일, 동물성 지방 등 유지계 바이오매스에서 만들어지는 대체연료로 95% 이상이 28일 이내에 생분해 되는 청정에너지이다(Mudge and Pereira, 1999). 바이오 디젤은 함산소 연료로 황 성분, 방향족 성분이 적어 기관에 사용 시 CO, HC, SO<sub>2</sub>, PM 등의 배기 배출물이 기존 경유에 비해 매우 적게 배출된다(Speidel et al., 2000; Tomasevic and Marinkovic, 2003; Ryu and Oh, 2004; Zullaikah et al., 2005). 바이오 디젤의 주원료는 유채유, 대두유, 옥수수유 등의 식물성 유지가 95% 이상 사용됨에 따라 식량 가격 상승, 식량자원의 수요와 공급간의 불균형 발생과 같은 문제가 발생할 수 있다(Körbitz, 1999;

Gui et al., 2008).

일반적인 바이오 디젤의 생산단가는 원료비용이 75 - 88%를 차지한다(Ghayal et al., 2013). 바이오 디젤의 가격은 식물성 오일의 높은 가격으로 인해 경유 가격보다 1.5 - 2배 높아 실제 상용화에 어려움이 있다(Maddikeri et al., 2012). 이와 같은 문제를 해결하기 위해 폐식용유, 비식용 식물성 오일, 우지와 같은 동물성지방 등 비식용 오일을 바이오 디젤 원료로 활용하는 연구가 많이 이루어지고 있다(Demirbas, 2009; Banković-Ilić et al., 2014; Singh et al., 2015). 그 중 우지는 잠재력 있는 바이오 디젤의 원료로 미국 에너지 정보청 (U.S. Energy Information Administration, EIA)의 2018년 바이오 디젤 원료 사용량 통계에 따르면 우지 사용량은 22만 ton으로 2017년 사용량에 비해 약 1.4 배 증가한 것으로 나타났다(EIA, 2019). 이러한 우지를 바이오 디젤의 원료로 사용함에 따라 생산단가를 절감할 수 있고 매립 또는 소각 처리되는 폐자원을 활용하는 환경적 측면의 이익도 얻을 수 있다(Sousa et al., 2017). Banković-Ilić et al. (2014)에 따르면 우지를 원료로 생산한 바이오 디젤의 단가는 0.27 US\$/L로 일반적인 바이오 디젤의 단가인 0.5 US\$/L와 상용 경유의 단가인 0.35 US\$/L에 비해 각각 46, 23% 낮은 것으로 보고하였다. Cunha et al. (2009)은 유리지방산(free fatty acid, FFA) 함량이 0.6 - 0.9%인 우지를 이용한 alkali-catalyzed methanolysis 반응으로 최대 97%의 에스터 전환율이 나타난다고 보고하였다. 일반적인 알칼리 에스테르 교환 반응은 유리지방산 함량이 1% 이하일 때 원활한 전환이 이루어진다(Al-Hamamre et al., 2012). Zhang (1994)에 따르면 우지를 원료로 한 알칼리 트랜스에스테르 반응에서 메탄올/오일 몰비율 6 : 1, NaOH 1 wt% 조건에서 제조된 바이오 디젤의 전환율은 80%로 우지의 높은 유리지방산 함량의 영향으로 인해 전환율이 낮게 나타났다고 보고하였다. 유리지방산 함량이 높을 경우 에스터 교환 반응 시 비누화 현상이 많이 발생하여 지방산의 에스터 전환이 원활하지 않게 된다(Demirbas, 2009). 원활한 에스테르 교환 반응을 위해서는 우지의 유리지방산을 제거하는 전처리 과정이 요구되는데 이러한 전처리 과정은 바이오 디젤의 생산단가를 높이는 원인이 될 수 있다(Hanna et al., 1996; Zullaikah et al., 2005). 이에 본 연구에서는 우지의 유리지방산 제거 과정 없이 식물성 오일인 옥수수유와 우지를 혼합한 오일로 바이오 디젤을 제조하고 생산한 바이오 디젤의 품질을 평가하고자 한다.

기존 연구에 따르면 바이오 디젤의 연료특성은 원료우지의 지방산 구성에 많은 영향을 받는다고 보고하고 있다(Giakoumis and Sarakatsanis, 2018). 포화지방산이 많으면 세탄가가 높아지고 발열량이 증가하지만 점도와 CFPP (cold-filter plugging points)가 높아진다(Cunha et al., 2009; Ramos et al., 2009; Adewale et al., 2015). 반면 불포화지방산 함량이 많으면 점도는 낮아지지만 산화안정성이 나빠진다(Atabani et al., 2013; Giakoumis and Sarakatsanis, 2018). 우지의 경우 포화지방산 함량이 42 - 51%로 높고 옥수수유는 불포화지방산 함량 85-90%로 매우 높아 식물성 오일 중에서도 저온 유동특성이 우수한 원료이다(Demirbas, 2005, 2008; Patil and Deng, 2009; Bi et al., 2010; Giakoumis and Sarakatsanis, 2018). 우지를 원료로 생산된 바이오 디젤의 경우 동점도는 5 - 5.35 mm<sup>2</sup>/s (Wyatt et al., 2005; Mata et al., 2011)이고, CFPP는 8 - 10°C (Wyatt et al., 2005; Lapuerta et al., 2009) 로 높아 연료 미립화 저하, 연료라인과 필터 막힘 등의 문제가 발생할 수 있어 우지를 원료로 한 바이오 디젤의 상용화는 어려운 실정이다(Teixeira et al., 2009; Teixeira et al., 2010). 이러한 우지를 원료로 한 바이오 디젤의 저온유동특성을 개선하기 위해 식물성 오일과 혼합한 바이오 디젤에 관한 연구가 이루어져 왔다. Perciral et al. (2017)은 대두를 원료로 생산한 바이오 디젤과 우지를 원료로 생산한 바이오 디젤을 혼합한 바이오 디젤 특성을 연구한 결과 산화안정성이 향상되고 저온 유동 특성이 개선된다고 보고하였다. Yaşar et al. (2011)에 따르면 카놀라 오일과 우지를 혼합하여 생산된 바이오 디젤의 경우 우지의 비율이 높을수록 동점도가 높아지고 카놀라 오일 비율이 높을수록 동점도가 낮아진다고 보고하였다. Taravus et al. (2009)는 해바라기 오일과 우지의 혼합 바이오 디젤 제조에서 저온 유동 특성 문제로 사용이 어려운 우지와 해바라기 오일을 혼합한 바이오 디젤은 동점도가 감소하고 CFPP가 낮아져 바이오 디젤의 품질기준을 만족하는 것으로 보고하였다. 그러나, 저온 유동특성이 우수한 옥수수 오일과의 우지를 혼합한 바이오 디젤에 제조 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 동물성 지방인 우지와 식물성 오일인 옥수수유를 혼합한 바이오 디젤의 지방산 조성 and 연료 특성을 분석하고 동식물 혼합 유지 바이오 디젤의 가능성을 확인하고자 한다.

## Materials and Methods

### 공시재료

실험에 사용한 우지는 마이크로웨이브 오븐을 이용한 조사가열의 방법으로 오일을 추출하고 거름필터로 불순물을 제거하여 사용하였고 옥수수유의 경우 시판되고 있는 오일을 사용하였다. Table 1은 실험에 사용한 오일의 혼합비를 나타낸 것으로 우지 오일과 옥수수유 오일을 각각 9:1, 7:3, 5:5, 3:7, 1:9의 중량비로 혼합하였다. 오일의 혼합비율은 기존 혼합오일을 이용한 바이오디젤 연구에서 주로 사용된 오일 혼합비율을 사용하여 우지오일의 비율을 20%씩 늘려 혼합하였다(Dias et al., 2008; Jeong et al., 2008; Park et al., 2008; Albuquerque et al., 2009). 실험에 사용한 알코올은 99.8% 메탄올(Duksan, Korea)을 사용하였고, 촉매는 가격이 저렴하고 반응성이 좋은 알칼리 촉매인 sodium hydroxide (93% GR grade, Duksan, Korea)를 사용하였다(Tubino et al., 2014).

Table 2는 우지와 옥수수오일의 지방산 조성을 나타낸 것으로 우지의 경우 포화지방산 함량이 많고 옥수수 오일의 경우 불포화지방산이 많은 것으로 나타났다(Alcantara et al., 2000; Demirbas, 2005; Dorni et al., 2018; Giakoumis and Sarakatsanis, 2018).

**Table 1.** Names of samples used in experiment.

Blend oils	Nominal name	Tallow oil contents (%)
Tallow : Corn oil	TACO9	90 (45 g)
	TACO7	70 (35 g)
	TACO5	50 (25 g)
	TACO3	30 (15 g)
	TACO1	10 (5 g)

TACO, tallow and corn oil.

**Table 2.** Fatty acid composition for corn oil and tallow.

Oils	Saturated fatty acid (%)			Unsaturated fatty acid (%)			
	C14:0	C16:0	C18:0	C16:1	C18:1	C18:2	C18:3
Corn	-	11.8 - 12.9	2 - 2.13	0.12 - 1.7	24.8 - 31.9	48.9 - 61.3	0 - 0.76
Tallow	2.4 - 5.4	23.3 - 32.8	4.1 - 19.3	0.1 - 4.3	35.1 - 42.4	2.9 - 15.7	-

C14:0, myristic acid; C16:0, palmitic acid; C18:0, stearic acid; C16:1, palmitoleic acid; C18:1, oleic acid; C18:2, linoleic acid; C18:3, linolenic acid.

### 에스테르 교환 반응

에스테르 교환 반응은 반응온도를 메탄올의 끓는점 이하인 60°C 로 하고 교반속도 300 rpm, 반응시간 1 h의 조건 (Gryglewicz, 1999) 에서 sodium hydroxide (NaOH) 1 wt% (Tomasevic and Marinkovic, 2003)를 사용하였고 메탄올/혼합 유지 몰비는 우지의 높은 FFA 함량을 고려하여 8:1, 10:1, 12:1, 14:1, 16:1로 변화시켜 실험 하였다(Akhihiero et al., 2013). 에스테르 교환 반응 후 글리세롤 층과 바이오디젤을 분액 깔대기를 이용하여 분리한 후 잔류 불순물을 제거하기 위해 증류수로 세척하였고 잔류 수분과 불순물 제거를 위해 250°C로 60분간 가열하였다. 에스테르 교환 반응은 재료별 각각 5회 반복하였고 그 결과는 평균값으로 나타났다.

## 바이오 디젤 품질분석

제조한 바이오 디젤의 지방산 메틸 에스테르(fatty acid methyl ester, FAME)는 EN 14103의 방법으로 분석하였다. 사용된 장치는 가스크로마토그래피(GC6850, Agilent, USA)이며 불꽃 이온화 검출기를 사용하였다. 바이오 디젤 생산 수율은 식 1로 계산하였다.

$$\text{Biodiesel (BD) production yield (\%)} = \frac{\text{Amount of fatty acid methyl ester (g)}}{\text{Amount of oil (g)}} \times 100 \quad (1)$$

BD production yield: 바이오 디젤 생산수율(%)

Amount of fatty acid methyl ester: 지방산 메틸에스테르 총 중량(g)

Amount of oil: 원료오일 총 중량(g)

오일 혼합비와 메탄올/유지 몰비가 FAME함량과 바이오 디젤 생산수율에 미치는 영향을 검정하기 위해 SPSS 20.0 (IBM Corp., USA)을 사용하여 다변량 분산분석(MANOVA)을 실시하였고 결과값의 유의성을 검정하기 위한 사후검정은 Tukey HSD (honestly Significant Difference)를 사용하였다. 각 실험요인이 FAME 함량과 바이오 디젤 생산 수율에 미치는 영향을 규명하기 위해 식 2, 식 3을 이용하여 실험요인 각각의 기여율(percentage contribution)을 계산하였다. 기여율은 각 실험요인의 영향을 반영하여 결과에 대한 실험요인의 상대적 검정력을 나타낼 수 있다. 기본적으로 기여율의 총 백분율은 100%가 되어야 하며 실험오차의 기여도 비율은 전체 실험의 적절성에 대한 추정치를 제공하므로 15% 이하가 되어야 한다(Wu and Leung, 2011).

$$SS'_i = SS_i - V_e \times df_i \quad (2)$$

Purified sum of squares deviation ( $SS'_i$ ): 실험요인 i의 수정된 편차제곱의 합

Sum of square deviation (SS): 실험요인 i 편차제곱의 합

$V_e$ : 실험 오차의 분산,  $df_i$ : 실험요인 i의 자유도

$$PC_i (\%) = \frac{SS'_i}{SS'_e} \times 100 \quad (3)$$

Percent contribution (PC): 실험요인 i의 기여율(%)

SS: 전체 실험요인의 편차제곱의 합

Table 3는 혼합유지 바이오 디젤의 물리화학적 특성 분석에 대한 내용으로 분석 방법과 품질 기준을 나타낸 것이 다. 바이오 디젤의 연료 특성 분석은 한국석유관리원에 의뢰하여 분석하였다.

**Table 3.** Standards for the quality and testing of the biodiesel.

Specification	Unit	Quality standard	Standards of tests
Content of FAME	Volume %	≥ 96.5	KS M 2413
CFPP	°C	< 0	KS M 2411
Cetane number	-	> 47	ASTM D 6890
Sulfur content	mg/kg	< 10	KS M 2027
Carbon residue	Weight %	< 0.1	KS M ISO 10370
Flash point	°C	> 120	KS M 2010
Kinematic viscosity	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 5.0	KS M ISO 3104
Density	kg/m <sup>3</sup>	860 - 900	KS M ISO 12185
Calorific value	MJ/kg	-	KS M 2057

FAME, fatty acid methyl ester; CFPP, cold filter plugging point.

## Results and Discussion

### 바이오 디젤 전환 특성

Table 4는 우지, 옥수수 오일 혼합(tallow-corn oil, TACO) 바이오 디젤의 오일 혼합비, 메탄올/유지 몰비에 따른 FAME함량과 바이오 디젤 생산수율의 실험 결과를 나타낸 것이다. 오일 혼합비에 따른 FAME 함량과 바이오 디젤 생산 수율은 오일 혼합비 TACO7에서 가장 높게 나타났고 TACO9에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 메탄올/유지 몰비에 따른 FAME 함량과 바이오 디젤 생산수율은 메탄올/유지 몰비 14 : 1에서 가장 높게 나타났고 메탄올/유지 몰비 16 : 1에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 우지, 옥수수 오일 혼합 바이오 디젤 제조 조건 중 오일혼합비 TACO7, 메탄올/유지 몰비 14 : 1에서의 FAME함량과 바이오 디젤 생산수율은 각각 98.1, 82.3%로 가장 우수한 것으로 나타났다. 메탄올/유지 몰비 14 : 1 보다 과다하게 투입된 메탄올은 역반응을 일으키고 용해도를 증가시켜 지방산과 에스테르의 분리를 어렵게 하여 바이오 디젤 전환율을 낮추는 것으로 판단된다(Meher et al., 2006). 또한, 메탄올의 양이 부족하면 에스테르 교환 반응이 충분히 이루어지지 않는 불완전 반응이 나타났다(Encinar et al., 2002). 기존 동물성 지방(돈지, 우지)과 대두유를 혼합한 바이오 디젤 연구에 따르면 FAME함량이 최대 약 95%로 바이오 디젤의 FAME 함량 기준(96.5% 이상)을 만족하지 못하는 것으로 보고되었다(Dias et al., 2008; Pereiral et al., 2017). 바이오 디젤의 순도는 촉매의 농도, 반응온도, 메탄올 양과 같은 반응조건에 따라 변화될 수 있으므로 동·식물성 오일 혼합 바이오 디젤 제조 시 오일의 혼합비율에 따른 적정 메탄올/유지 몰비를 사용하는 것이 중요하다(Meher et al., 2006; Dias et al., 2008).

**Table 4.** Effect of oil blend ratio and methanol to oil molar ratio on the fatty acid methyl ester (FAME) content and biodiesel (BD) production yield.

Methanol to oil molar ratio	Oil blend ratio	FAME content (%)	BD production yield (%)
8 : 1	TACO 9	84.8	65.8
	TACO 7	89.1	70.2
	TACO 5	90.2	70.9
	TACO 3	92.3	72.9
	TACO 1	95.2	77.6
10 : 1	TACO 9	90.1	70.9
	TACO 7	92.6	73.1
	TACO 5	93.1	73.8
	TACO 3	95.8	77.2
	TACO 1	93.4	74.3
12 : 1	TACO 9	92.3	72.6
	TACO 7	96.8	79.3
	TACO 5	95.2	76.1
	TACO 3	94.9	75.7
	TACO 1	91.7	71.8
14 : 1	TACO 9	96.2	79.1
	TACO 7	98.1	82.3
	TACO 5	97.2	81.4
	TACO 3	93.5	74.4
	TACO 1	90.6	72.0
16 : 1	TACO 9	94.6	76.7
	TACO 7	94.3	74.5
	TACO 5	87.9	68.0
	TACO 3	87.5	68.2
	TACO 1	85.2	65.6

TACO, tallow and corn oil.

원료 유지 내의 FFA 함량과 수분은 에스테르 교환 반응에 악영향을 미치는데 일반적으로 FFA 함량이 높은 유지의 경우 전처리 과정을 통해 FFA를 제거한 후 바이오 디젤로 전환한다. 그러나, 본 연구에서는 FFA 제거 과정 없이 바이오 디젤로 전환함에 따라 보다 많은 양의 메탄올이 요구되는 것으로 판단된다. Ma and Hanna (1999)에 따르면 메탄올/유지 몰비가 높으면 반응 속도와 전환율이 증가되므로 유리지방산 함량이 높은 원료유지의 경우 높은 메탄올/유지 몰비가 요구된다고 보고하였다. Ma et al. (1998)에 따르면 유지에 함유되어 있는 FFA 함량과 수분 함량은 에스테르 교환 반응에 중요한 요인으로 FFA 함량과 수분량이 증가하면 에스테르 수율이 감소한다고 보고하였다. Ding et al. (2011)에 따르면 원료유지의 높은 FFA 함량과 수분 함량은 촉매효과를 감소시키므로 원활한 반응을 위해 촉매와 메탄올의 사용량이 증가한다고 보고하였다. 또한, 일부 연구에서는 고농도의 포화지방산은 비누물질과 반응하여 겔물질로 변하므로 분리가 어렵다고 보고하였다(Muniyappa et al., 1996; Lam et al., 2010). 포화지방산은 불포화지방산에 비해 높은 점도와 밀도를 가지는 있는데 높은 점도와 밀도를 가지는 원료의 경우 보다 많은 메탄올이 요구된다 (Meher et al., 2006).

이상의 결과로 본 연구에서 규명된 최적 메탄올/유지 몰비가 식물성 유지의 알칼리 에스테르 교환반응에 사용되는 메탄올/유지 몰비(Freedman et al., 1984) 보다 높은 것은 유지의 높은 FFA 함량과 원료 유지 내의 수분함량, 고농도의 포화지방산의 영향으로 인한 것으로 판단된다.

### 바이오 디젤 제조 결과의 통계적 분석

Table 5 - Table 8은 메탄올/몰비와 오일 혼합비에 따른 바이오 디젤의 FAME 함량과 바이오 디젤 생산 수율을 각각 다중 비교한 내용이다.

Table 5는 메탄올/유지 몰비에 따른 FAME 함량에 대한 다중비교 결과로 메탄올/유지 몰비 14 : 1에서 FAME 함량이 가장 높게 나타났다. 메탄올/유지 몰비 14 : 1과 나머지 몰비율 간의 FAME 함량 비교 결과, 유의확률이 각각 유의 수준 ( $\alpha = 0.05$ )보다 작은 것으로 나타났다.

**Table 5.** Multiple comparisons of fatty acid methyl ester (FAME) content (%) in accordance with methanol to oil molar ratio.

Methanol to oil molar ratio		Mean difference (I - J)	p-value	95% CI	
I (Mean of FAME content)	J (Mean of FAME content)			Lower bound	Upper bound
14 : 1 (95.1)	8 : 1 (90.3)	4.8	< 0.0001	3.9115	5.6405
	10 : 1 (93)	2.1	< 0.0001	1.2115	2.9405
	12 : 1 (94.2)	0.9	0.028	0.0675	1.7965
	16 : 1 (89.9)	5.2	< 0.0001	4.3678	6.0965

CI, confidence interval.

Table 6은 메탄올/유지 몰비에 따른 바이오 디젤 생산 수율을 다중 비교 결과로 메탄올/유지 몰비 14 : 1의 바이오 디젤 생산 수율은 77.8%로 가장 높게 나타났다. 메탄올/유지 몰비 14 : 1과 나머지 메탄올/유지 몰비 간의 바이오 디젤 생산 수율을 비교한 결과, 모든 결과의 유의확률은 0.0001 미만으로 나타나 높은 유의성을 보였다.

Table 7은 오일 혼합비에 따른 FAME 함량을 비교한 것으로 오일 혼합비TACO7에서의 FAME 평균함량이 94.1%로 가장 높았고 다중 비교 결과의 유의확률은 모두 0.0001 보다 작게 나타나 유의한 것으로 확인되었다.

Table 8은 오일 혼합비에 따른 바이오 디젤 생산 수율을 비교한 것으로 오일 혼합비 TACO7에서의 바이오 디젤 평균 생산 수율은 75.9%로 가장 높게 나타났다. 오일 혼합비에 따른 바이오 디젤 생산 수율 비교 결과는 유의확률이 모두 유의수준( $\alpha = 0.05$ )보다 작게 나타나 결과의 유의성을 확인할 수 있었다.

**Table 6.** Multiple comparisons of biodiesel (BD) production yield (%) in accordance with methanol to oil molar ratio.

Methanol to oil molar ratio		Mean difference (I - J)	p-value	95% CI	
I (Mean of FAME content)	J (Mean of FAME content)			Lower bound	Upper bound
14 : 1 (77.8)	8 : 1 (71.5)	6.3	< 0.0001	5.0294	7.7146
	10 : 1 (73.9)	3.9	< 0.0001	2.6454	5.3306
	12 : 1 (75.1)	2.7	< 0.0001	1.4094	4.0946
	16 : 1 (70.7)	7.1	< 0.0001	5.8174	8.5026

CI, confidence interval.

**Table 7.** Multiple comparisons of fatty acid methyl ester (FAME) content in accordance with oil blend ratio.

Oil blend ratio		Mean difference (I - J)	p-value	95% CI	
I (Mean of FAME content)	J (Mean of FAME content)			Lower bound	Upper bound
TACO 7 (94.1)	TACO 1 (91.2)	4.8	< 0.0001	2.0715	3.8005
	TACO 3 (92.8)	2.1	< 0.0001	0.4795	2.2085
	TACO 5 (92.7)	0.9	< 0.0001	0.5675	2.2965
	TACO 9 (91.6)	5.2	< 0.0001	1.6595	3.3885

CI, confidence interval; TACO, tallow and corn oil.

**Table 8.** Multiple comparisons of biodiesel (BD) production yield in accordance with oil blend ratio.

Oil blend ratio		Mean difference (I - J)	p-value	95% CI	
I (Mean of BD production yield)	J (Mean of BD production yield)			Lower bound	Upper bound
TACO 7 (75.9)	TACO 1 (72.3)	3.6	< 0.0001	2.2774	4.96
	TACO 3 (73.8)	2.1	< 0.0001	0.7854	3.4706
	TACO 5 (74)	1.9	0.002	0.5134	3.1986
	TACO 9 (73)	2.9	< 0.0001	1.5054	4.1906

CI, confidence interval; TACO, tallow and corn oil.

메탄올/유지 몰비와 오일 혼합비에 따른 FAME 함량, 바이오 디젤 생산 수율을 각각 다중 비교한 결과, 실험을 통해 규명된 동식물 혼합 유지 바이오디젤 제조 조건 중 메탄올/유지 몰비 14 : 1, 오일 혼합비 TACO7가 가장 우수한 조건임을 확인할 수 있었다.

Table 9, 10은 제조 결과를 분산분석한 결과로 각각의 실험 요인들이 FAME 함량과 바이오 디젤 생산 수율에 미치는 영향에 대해 분석한 내용이다.

Table 9는 메탄올/유지 몰비와 오일 혼합비에 따른 FAME 함량을 분산분석한 결과로 실험오차의 기여율이 8.9%로 각 요인이 실험 결과에 미치는 영향의 적절성은 인정되며 각 분석의 신뢰수준은 99% 이상으로 나타났다. 분산분석의 결과로 계산된 요인별 FAME 함량에 대한 기여율(PC)은 몰비율이 31.7%, 오일 혼합비가 7.6%, 몰비율과 오일 혼합비의 교호작용이 51.8%로 나타나 FAME 함량에 몰비율과 오일 혼합비의 교호작용이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 10은 메탄올/유지 몰비와 오일 혼합비에 따른 바이오 디젤 생산수율을 분산분석한 결과로 실험요인별 바이오 디젤 생산수율에 대한 기여율(PC)에 따른 기여율은 몰비율과 오일혼합비의 교호작용이 48.1%, 몰비율은 31.4%, 오일 혼합비는 6.6% 순으로 나타났다. 실험오차의 기여율이 13.9%로 각 요인이 실험 결과에 미치는 영향의 적절성

은 인정되며 분석 결과의 신뢰수준은 모두 99% 이상으로 나타나 바이오 디젤 생산수율에서도 메탄올/유지 몰비와 오일 혼합비의 교호작용이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

**Table 9.** Analysis of variance (ANOVA) of the fatty acid methyl ester (FAME).

Factor	SS	df	V	F	SS'	PC (%)	p-value
A (molar ratio)	536.679	4	134.245	110.906	532.13724	31.7	< 0.0001
B (blend ratio)	132.032	4	33.008	27.269	127.19024	7.6	< 0.0001
A*B	888.584	16	55.536	45.881	869.21698	51.8	< 0.0001
Residuals	121.044	100	1.210	-	150.09	8.9	-
Total	1,678.639	124	-	-	1,678.639	100	-

SS, sum of square deviation; df, degree of freedom; V, variance; F, F-ratio; SS', purified sum of squares deviation; PC (%), the percent contribution.

**Table 10.** Analysis of variance (ANOVA) of the biodiesel (BD) production yield.

Factor	SS	df	V	F	SS'	PC (%)	p-value
A (molar ratio)	828.871	4	207.218	70.978	817.19308	31.4	< 0.0001
B (blend ratio)	183.494	4	45.874	15.713	171.81608	6.6	< 0.0001
A*B	1,298.302	16	81.144	27.794	1,251.59032	48.1	< 0.0001
Residuals	291.948	100	2.919	-	362.01552	13.9	-
Total	2,602.615	124	-	-	2,602.615	100	-

SS, sum of square deviation; df, degree of freedom; V, variance; F, F-ratio; SS', purified sum of squares deviation; PC (%), the percent contribution.

이와 같은 결과는 혼합유지 바이오 디젤의 오일 혼합비율에 따라 지방산 조성비가 변화되고 FFA 함량과 수분함량 등의 변화로 반응에 요구되는 적정 메탄올/유지 몰비의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 이에 우지, 옥수수유 혼합유지를 이용한 바이오 디젤 제조 시 오일 혼합비율에 따른 적정량의 메탄올을 사용하는 것이 혼합유지 바이오 디젤 제조에서 주요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 바이오디젤 연료특성 분석

Table 11은 TACO7 바이오 디젤, 옥수수오일 바이오 디젤(corn oil biodiesel, CO BD) (Guan et al., 2009), 우지 바이오 디젤(tallow biodiesel, TA BD) (Cunha et al., 2009)를 구성하고 있는 지방산 메틸 에스터를 나타낸 것으로 TACO7 BD의 포화지방산과 불포화지방산 함량은 각각 41.2, 53.9%로 나타나 CO BD에 비해 포화지방산 함량은 증가하였고 불포화지방산 함량은 감소하였다. 바이오 디젤을 구성하고 있는 지방산 메틸 에스터의 조성은 세탄가, 발열량, 동점도 같은 연료특성에 많은 영향을 준다(Hoekman et al., 2012).

Table 12는 TACO7 BD와 CD, CO BD (Aydın et al., 2011; Serqueira et al., 2014), TA BD (Demirbas, 2005; Wyatt et al., 2005; Öner and Altun, 2009; Mata et al., 2010, 2011; Fadhil, 2013)의 연료특성을 나타낸 것이다. 연료 특성 중 세탄가는 연소지연과 같은 연소품질에 관계가 있는 특성으로 세탄가가 높을 경우 연소품질이 향상된다(Meher et al., 2006). TACO7 BD의 경우 CO BD에 비해 *Palmitic* (C16 : 0) acids, *Stearic* (C18 : 0) acids와 같은 포화지방산의 함량이 증가하였고 불포화지방산인 *Linoleic* (C18 : 2) acids, *Linolenic* (C18 : 3) acids 등이 낮아 세탄가가 증가한 것으로 판단된다 (Knothe et al., 2003).

**Table 11.** Fatty acid methyl esters composition for various biodiesels.

Biodiesels	Saturated fatty acid (%)				Unsaturated fatty acid (%)				
	C14 : 0	C16 : 0	C18 : 0	Total (%)	C16 : 1	C18 : 1	C18 : 2	C18 : 3	Total (%)
TACO7 BD	2.1	20.5	18.6	41.2	0.9	32.1	23.5	0.4	56.9
CO BD	-	9.1	-	9.1	-	33.9	53.5	3	90.4
TA BD	2.7	25.3	34.7	62.7	2.0	31.7	0.8	-	34.5

C14 : 0, myristic acid; C16 : 0, palmitic acid; C18 : 0, stearic acid; C16 : 1, palmitoleic acid; C18 : 1, oleic acid; C18 : 2, linoleic acid; C18 : 3, linolenic acid; TACO, tallow and corn oil; BD, biodiesel; CO, corn oil; TA, tallow.

**Table 12.** Fuel properties of conventional diesel and various biodiesels.

Description	Cetane number	Calorific value (MJ/Kg)	Kinematic viscosity at 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	CFPP (°C)	Density at 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	Flash Point (°C)	Carbon residue (m/m) %	Sulfur (mg/kg)
CD	48	45	2.35	- 33	820	60	0.12	11.7
TACO7 BD	59	40.1	4.16	- 1.7	872.4	158	0.0042	1
CO BD	52.4	39.9	3.9 - 4.06	- 15	864 - 865	168 - 188	-	-
TA BD	58 - 59	39.9 - 41.9	4.1 - 5.35	8 - 10	870 - 877	150 - 172	0.05	-

CFPP, cold filter plugging point; CD, conventional diesel; TACO, tallow and corn oil; BD, biodiesel; CO, corn oil; TA, tallow.

TACO7 BD의 발열량은 40.1 MJ/kg으로 TA BD의 발열량에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 이는 *Stearic* (C18 : 0) acids과 같은 분자량이 큰 포화지방산의 감소함에 따른 것으로 판단된다. 또한, 일반적으로 바이오 디젤의 발열량은 10 - 12% 정도 함유되어 있는 산소함량으로 인해 기존 경유의 발열량에 비해 낮게 나타난다(Giakoumis and Sarakatsanis, 2018).

CFPP는 저온에서의 연료유동성을 나타내는 지표로 높은 CFPP는 저온에서의 연료 결정화로 인해 연료라인과 연료필터 막힘과 같은 문제를 일으킨다(Boshui et al., 2010). TACO7 BD의 CFPP는 - 1.7°C로 TA BD의 8 - 10°C에 비해 크게 향상된 것으로 나타나 바이오 디젤 품질기준인 CFPP 0°C이하를 충족하였다. 하지만, CO BD의 CFPP보다는 높게 나타났다. CFPP의 경우 긴 사슬을 가지는 포화지방산에 많은 영향을 받는데 TACO7 BD는 CO BD에 비해 *Palmitic* (C16 : 0) acids, *Stearic* (C18 : 0) acids의 포화지방산이 증가함에 따라 CO BD에 비해 CFPP가 높아진 것으로 판단된다 (Ramos et al., 2009).

동점도는 포화지방산과 탄소원자수가 많을수록 증가한다(Lin et al., 2014). TACO7 BD의 포화지방산 함량은 TA BD에 비해 낮아 동점도가 4.16 mm<sup>2</sup>/s로 나타나 최대 5.35 mm<sup>2</sup>/s인 TA BD의 동점도에 비해 낮은 것으로 나타났다. 동점도가 높은 경우 연료 미립화 저하, 불완전 연소, 연료분사장치에 카본 퇴적 등 기관에 여러 문제를 발생시킬 수 있으므로 바이오 디젤의 동점도를 감소시키는 것은 바이오 디젤의 실제 사용을 위해 매우 중요하다(Teixeira et al., 2009).

TACO7 BD의 잔류 탄소분과 황분은 경유에 매우 적은 것으로 나타나 기관 적용시 유독가스가 적게 배출될 것으로 판단된다. 기존 연구에서도 바이오 디젤은 황분, 방향족 성분이 적게 함유되어 있어 유독가스의 배출이 경유에 비해 적은 것으로 보고되었다(Leung et al., 2010).

TACO7 BD의 연료특성 분석 결과 포화지방산 메틸 에스테르와 불포화지방산 메틸 에스테르의 조화로운 구성을 통해 바이오 디젤 품질 기준을 모두 만족하는 연료임을 확인할 수 있었다. 특히, TACO 7 BD의 CFPP와 동점도는 TA BD에 비해 크게 개선되었고 기존의 우지와 식물성 오일(해바라기유, 대두유, 카놀라유) 혼합 바이오디젤의 동점도

와 CFPP에 비해 동점도의 경우 최대 31% 감소하였고 CFPP는 최대 약 6°C 더 낮아진 것으로 나타나 TACO7 BD의 저온유동특성이 더욱 우수한 것으로 나타났다(Taravus et al., 2009; Yaşar et al., 2011; Pereira et al., 2017). 이상의 결과를 통해 우지를 옥수수오일과 혼합하여 바이오디젤을 제조함에 따라 저온유동성 문제로 사용에 어려움이 있는 우지의 바이오디젤 원료로서의 사용 가능성을 확인하였다.

## Conclusion

우지, 옥수수유 혼합 유지 바이오 디젤 생산의 전환특성을 규명한 결과 TACO7, 메탄올/유지 몰비 14에서 FAME 함량 98.1%, 바이오 디젤 생산수율 82.3%로 나타나 가장 우수한 전환율을 보였다. 분산분석을 이용해 혼합비, 메탄올 몰비율 등 실험요인의 기여율을 계산한 결과 혼합비와 메탄올/유지 몰비의 상호작용이 FAME 함량과 바이오 디젤 생산수율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. TACO7 BD의 연료특성 분석 결과 바이오 디젤의 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 특히, 동점도와 CFPP 같은 연료특성의 개선이 뚜렷함에 따라 저온유동성 문제로 상용화가 어려운 폐자원인 우지를 연료로 활용할 수 있음을 확인하였다.

## Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품 기술기획평가원의 농림축산식품 연구센터지원사업의 지원을 받아 수행된 연구이다(과제번호:716001-7).

## Authors Information

Duk Gam Woo, <https://orcid.org/0000-0003-0281-4342>

Tae Han Kim, <http://orcid.org/0000-0001-8881-8429>

## References

- Adewale P, Dumont MJ, Ngadi M. 2015. Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45:574-588.
- Akhihero ET, Oghenejoboh KM, Umukoro PO. 2013. Effects of process variables on transesterification reaction of jatropha curcas seed oil for the production of biodiesel. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2013:388-393.
- Albuquerque MCG, Machado YL, Torres AEB, Azevedo DCS, Cavalcante CL, Firmiano LR, Parente Jr. EJS. 2009. Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends. *Renewable Energy* 34:857-859.
- Alcantara R, Amores J, Canoira L, Fidalgo E, Franco MJ, Navarro A. 2000. Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow. *Biomass and Bioenergy* 18:515-527.
- Al-Hamamre Z, Foerster S, Hartmann F, Kröger M, Kaltschmitt M. 2012. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel* 96:70-76.
- Atabani AE, Silitonga AS, Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, Fayaz H. 2013. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production,

- characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18:211-245.
- Aydin F, Kafadar AB, Erdogan S, Saydut A, Kaya C, Hamamci C. 2011. Basic properties of transesterified corn oil and biodiesel-diesel blends. *Energy Source Part A* 33:745-751.
- Banković-Ilić IB, Stojković IJ, Stamenković OS, Veljković VB, Hung YT. 2014. Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32:238-254.
- Bi Y, Ding D, Wang D. 2010. Low-melting-point biodiesel derived from corn oil via urea complexation. *Bioresource Technology* 101:1220-1226.
- Boshui C, Yuqiu S, Jianhua F, Jiu W, Jiang W. 2010. Effect of cold flow improvers on flow properties of soybean biodiesel. *Biomass Bioenergy* 34:1309-1313.
- Cunha ME, Krause LC, Moraes MSA, Faccini CS, Jacques RA, Almeida SR, Rodrigues MRA, Caramao EB. 2009. Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology* 90:570-575.
- Demirbas A. 2005. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science* 31:466-487.
- Demirbas A. 2008. New liquid biofuels from vegetable oils via catalytic pyrolysis. *Energy, Education, Science and Technology* 21:1-59.
- Demirbas A. 2009. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management* 50:923-927.
- Dias JM, Alvim-Ferraz MCM, Almeida MF. 2008. Mixtures of vegetable oils and animal fat for biodiesel production: Influence on product composition and quality. *Energy and Fuels* 22:3889-3893.
- Ding J, He B, Li J. 2011. Biodiesel production from acidified oils via supercritical methanol. *Energies* 4:2212-2223.
- Dorni C, Sharma P, Saikia G, Longvah T. 2018. Fatty acid profile of edible oils and fats consumed in India. *Food Chemistry* 238:9-15.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2019. Inputs to biodiesel production. Accessed in <https://www.eia.gov/biofuels/biodiesel/production/> on 1 August 2019.
- Encinar JM, Gonzalez JF, Rodriguez JJ, Tajedor A. 2002. Biodiesels fuel from vegetable oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. oils with ethanol. *Energy and Fuels* 16:443-450.
- Fadhil AB. 2013. Biodiesel production from beef tallow using alkali-catalyzed transesterification. *Arabian Journal for Science and Engineering* 38:41-47.
- Freedman B, Pryde EH, Mounts TL. 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 61:1638-1643.
- Ghayal D, Pandit AB, Rathod VK. 2013. Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry* 20:322-328.
- Giakoumis EG, Sarakatsanis CK. 2018. Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition. *Fuel* 222:574-585.
- Gryglewicz S. 1999. Rapeseed oil methyl esters preparation using heterogeneous catalysts. *Bioresource Technology* 70:249-253.
- Guan G, Kusakabe K, Sakurai N, Moriyama K. 2009. Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether. *Fuel* 88:81-86.
- Gui MM, Lee KT, Bhatia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy* 33:1646-1653.
- Hanna MA, Ali Y, Cuppett SL, Zheng D. 1996. Crystallization characteristics of methyl tallowate and its blends with ethanol and diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 93:759-763.
- Hoekman SK, Broch A, Robbins C, Cenicerros E, Natarajan M. 2012. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:143-169.

- Jeong GT, Park JH, Park SH, Park DH. 2008. Estimating and improving cold filter plugging points by blending biodiesels with different fatty acid contents. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 13:505-510.
- K€orbitz W. 1999. Biodiesel production in Europe and North American, an encouraging prospect. *Renewable Energy* 16:1078-1083.
- Knothe G, Matheus AC, Ryan III TW. 2003. Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. *Fuel* 82:971-975.
- Lam MK, Lee KT, Mohamed AR. 2010. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances* 28:500-518.
- Lapuerta M, Fernandez JR, Oliva F, Canoira L. 2009. Biodiesel from low-grade animal fats: Diesel engine performance and emissions. *Energy and Fuels* 23:121-129.
- Leung DY, Wu X, Leung MKH. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy* 87:1083-1095.
- Lin R, Zhu Y, Tavlarides LL. 2014. Effect of thermal decomposition on biodiesel viscosity and cold flow property. *Fuel* 17:981-988.
- Maddikeri GL, Pandit AB, Gogate PR. 2012. Intensification approaches for biodiesel synthesis from waste cooking oil: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 51:14610-14628.
- Ma F, Clements LD, Hanna MA. 1998. The effect of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 41:1261-1264.
- Ma F, Hanna MA. 1999. Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology* 70:1-15.
- Mata TM, Cardoso N, Ornelas M, Neves S, Caetano NS. 2010. Sustainable production of biodiesel from tallow, lard and poultry fat and its quality evaluation. *Chemical Engineering Transactions* 19:13-18.
- Mata TM, Cardoso N, Ornelas M, Neves S, Caetano NS. 2011. Evaluation of two purification methods of biodiesel from beef tallow, pork lard, and chicken fat. *Energy and Fuels* 25:4756-4762.
- Meher LC, Sagar DV, Naik SN. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10:248-268.
- Mudge SM, Pereira G. 1999. Stimulating the biodegradation of crude oil with biodiesel preliminary results. *Spill Science & Technology Bulletin* 5:353-355.
- Muniyappa PR, Brammer SC, Nouredini H. 1996. Improved conversion of plant oils and animal fats into biodiesel and co-product. *Bioresource Technology* 56:19-24.
- Öner C, Altun S. 2009. Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. *Applied Energy* 86:2114-2120.
- Park JY, Kim DK, Lee JP, Park SC, Kim YJ, Lee JS. 2008. Blending effects of biodiesels on oxidation stability and low temperature flow properties. *Bioresource Technology* 99:1196-1203.
- Patil PD, Deng S. 2009. Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils. *Fuel* 88:1302-1306.
- Pereiral GG, Garcia RKA, Ferreira LL, Arellano DB. 2017. Soybean and soybean/beef-tallow Biodiesel: A comparative study on oxidative degradation during long-term storage. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 94:587-593.
- Ramos MJ, Fernández CM, Casas A, Rodríguez L, Pérez Á. 2009. Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology* 100:261-268.
- Ryu KH, Oh YT. 2004. Combustion characteristics of an agricultural diesel engine using biodiesel fuel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 18:709-717.
- Serqueira DS, Fernandes DM, Cunha RR, Squizzato AL, Santos DQ, Richter EM, Munoz RAA. 2014. Influence

- of blending soybean, sunflower, colza, corn, cottonseed, and residual cooking oil methyl biodiesels on the oxidation stability. *Fuel* 118:16-20.
- Singh D, Ganesh A, Mahajani S. 2015. Heterogeneous catalysis for biodiesel synthesis and valorization of glycerol. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17:1103-1110.
- Sousa VM, Luz SM, Caldeira-Pires A, Machado FS, Silveira CM. 2017. Life cycle assessment of biodiesel production from beef tallow in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment* 22:1837-1850.
- Speidel HK, Lightner RL, Ahmed I. 2000. Biodegradability of new engineered fuels compared to conventional petroleum fuels and alternative fuels in current use. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 84-86:879-897.
- Taravus S, Temur H, Yartasi A. 2009. Alkali-catalyzed biodiesel production from mixtures of sunflower oil and beef tallow. *Energy and Fuels* 23:4112-4115.
- Teixeira LSG, Assis JCR, Mendonça DR. 2009. Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel. *Fuel Processing Technology* 90:1164-1166.
- Teixeira LSG, Couto MB, Souza GS, Filho MA, Assis JCR, Guimaraes PRB, Pontes LAM, Almeida SQ, Teixeira JSR. 2010. Characterization of beef tallow biodiesel and their mixtures with soybean biodiesel and mineral diesel fuel. *Biomass and Bioenergy* 34:438-441.
- Tomasevic AV, Marinkovic SS. 2003. Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology* 81:1-6.
- Tubino M, Junior JGR, Bauerfeldt GF. 2014. Biodiesel synthesis with alkaline catalysts: A new refractometric monitoring and kinetic study. *Fuel* 125:164-172.
- Wu X, Leung NYC. 2011. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment. *Applied Energy* 88:3615-3624.
- Wyatt VT, Hess MA, Dunn RO, Foglia TA, Hass MJ, Marmer WN. 2005. Fuel properties and nitrogen oxide emission levels of biodiesel produced from animal fats. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 82:585-591.
- Yaşar F, Altun S, Adin H. 2011. Fuel properties of biodiesels produced from blends of canola oil and animal tallow. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 27:199-208.
- Zhang D. 1994. Crystallization characteristics and fuel properties of tallow methyl esters. Ph. D. dissertation, University of Nebraska-Lincoln, Nebraska, USA.
- Zullaikah S, Lai CC, Vali SR, Ju YH. 2005. A two-step acid-catalyzed process for the production of biodiesel from rice bran oil. *Bioresource Technology* 96:1889-1896.