

チャレンジ - バイオディーゼルの製造

バイオディーゼルの需要

バイオディーゼル製造者の多くは、現在の需要（消費者および国）を利用して製造設備を立ち上げて、その運転をできるだけ早急に行いたいと考えています。製造プロセスはかなり知られ、また、よく開発されているので、他のプロセスに比べると設計、建設、操作はシンプルです。そこで、大きな関心が集まっているのは、このシミュレーションをいかに厳密に行うかということです。先を見越した多くのバイオディーゼル製造者やプロセス開発グループは、エネルギーの使用と反応の転化を含むプロセスを最適化する機会、というものに大きな価値を見い出しています。

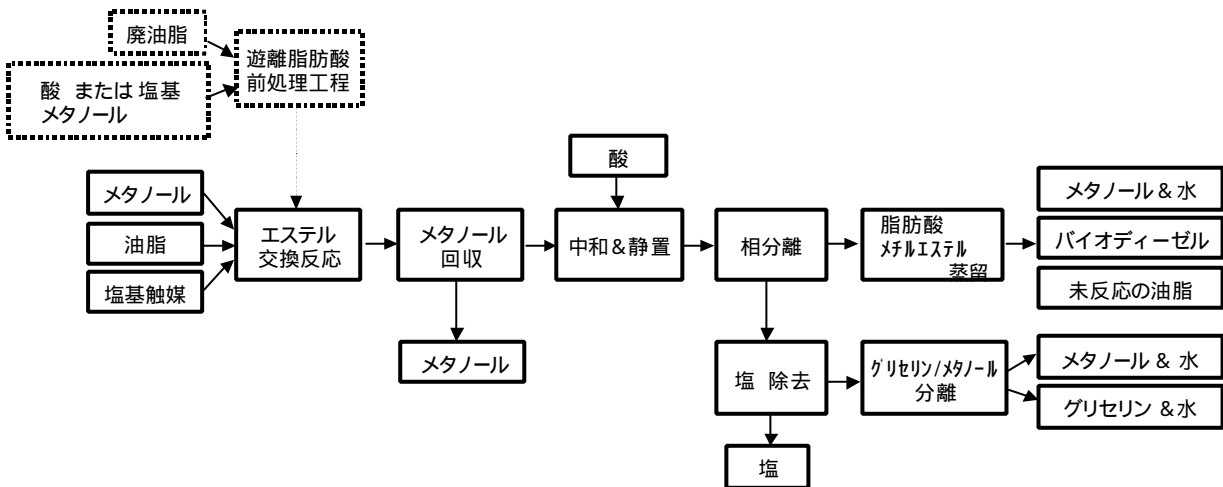
世界中のバイオディーゼル製造者は開発の様々な段階にあります。それは、初期の設計段階であったり、装置の仕様を決める最終段階であったり既にバイオディーゼルの製造している、などです。どの特定プロセスを使うか、どの供給原料（フィードストック）を使うか（そしてそのプロセスが原料の変化に対してどれくらい融通がきくものであるか）、どの装置を使うかという点での決定は、厳密なモデルを用いて「オフライン」で行われます。CHEMCADの熱収支と物質収支を用いたプロセスフローダイアグラム（PFD）を使えば、要求される最適条件や厳守事項がどんなレベルであっても効果的なプロセス設計が可能になります。

バイオディーゼル業界は不安定な状態にあり、化学品製造会社全体に影響を及ぼしている5つの大きな力（世界中の競合相手の増加、短い製品ライフサイクル、燃料や供給原料コストおよび買い手圧力の上昇、エンジニアリングスタッフの減少、規制や世論の増大）によって、最適プロセス、高生産性（ツールとスタッフによる）、ビジネスプロセスに合ったよい計画やスケジュールや統合、クリーンで環境に優しい設備を必要とする生産者たちは、プロセスを検討する必要性に迫られています。CHEMCADシミュレーションは、これらの問題すべてに取り組む際の開始ポイントとなります。

この文書には、CHEMCADモデルのさまざまなレベルで必要となる情報の概要と、利点、欠点を記載しました。

バイオディーゼル製造プロセス

代表的な、塩基触媒（後述）のプロセスダイアグラムは下記に示されます。このケースでは、廃油（waste oil）の前処理は、下図の上段左の点線枠で示されます。



化学成分

どんな植物油や動物性油脂でも、バイオディーゼル製造で供給原料として使用できます。これらは自然の産物なので、複数成分の油脂の混合物であります。これらの油脂はトリグリセリド分子（3つの脂肪酸でエステル化されたグリセリン）です。ここで、R×基は、油脂の由来によって変わります。





CHEMCAD バイオディーゼル

大豆、パーム、ラードなど油 (未使用) の、油脂を作り出す脂肪酸成分のパーセントを示す代表的な分析があります。(R_x 基は上段に示される)
以下の表は、一般的な多くの油脂に含まれる脂肪酸の重量パーセントを示します。

	飽和									不飽和 - モノ		不飽和 - 複素	
	カプリル酸	カプリン酸	ラウリン酸	ミリスチン酸	パルミチン酸	ステアリン酸	アラキシン酸	ヘン酸	リグノセリン酸	オレイン酸	エルカ酸	リノール酸	リノール酸
油脂タイプ	C8:0	C10:0	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	C22:0	C24:0	C18:1	C22:1	C18:2	C18:3
CHEMCAD ID	540	545	890	902	912	550	1534	NO	NO	549	NO	548	1529
CAS No.	124-07-2	334-48-5	143-07-7	544-63-8	57-10-3	57-11-4	506-30-9	112-85-6	557-59-5	112-80-1	112-86-7	60-33-3	463-40-1
M.E. CC ID	NO	1673	894	NO	NO	NO	NO	NO	NO	919	NO	NO	NO
M.E. CAS NO	111-11-5	110-42-9	111-82-0	124-10-7	112-39-0	112-61-8	1120-28-1	929-77-1	----	112-62-9	1120-34-9	112-63-0	301-00-8
アモド					7	2				69		17	
牛脂		0.1	0.1	3.3	25.2	19.2				48.9		2.7	0.5
乳脂肪	5.5	3	3.6	11.6	33.4	11.4				27.8		3.1	0.6
キャノーラ				0.1	3.9	3.1				60.2	0.5	21.1	11.1
カカ脂					25	38				32		3	
ココナツ	8.3	6	46.7	18.3	9.2	2.9				6.9		1.7	
タマゴ				8	17					22		5	
トウモロコシ					9.9	3.1				29.1		56.8	1.1
綿種子				0.8	22.9	3.1				18.5		54.2	0.5
ハマナ(アマゾン)					2.07	0.7	2.09	0.8	1.12	18.86	58.51	9	6.85
アマニ					3	7				21		16	53
ブドウ種					8	4				15		73	
H.O.アマニ油				0.34	5.46	1.75	0.23			79.36		12.86	
ラード		0.1	0.1	1.4	25.5	15.8				47.1		8.9	1.1
アマニ油					4.92	2.41				19.7		18.03	54.94
オリーブ					11	3.6				75.3		9.5	0.6
パーム	0.1	0.1	0.9	1.3	43.9	4.9				39		9.5	0.3
パーム核油		4	48	16	8	3				15		2	
パーム(高オレイン)				1	37	4				46		11	
ピーナツ					10.4	8.9				47.1	0.2	32.9	0.5
ナタネ					2.7	2.8				21.9	50.9	13.1	8.6
アマニ油				0.1	6.6	3.3				14.4		75.5	0.1
ユマ					13.1	3.92				52.84		30.14	
大豆				0.1	10.3	4.7				22.5		54.1	8.3
トマツ				0.1	6	5.9				16		71.4	0.6
トマツ(高オレイン)					3	4.4				88.2		4.3	0.1
ウォールナツ					11	5				28		51	5

さまざまな油脂の組成

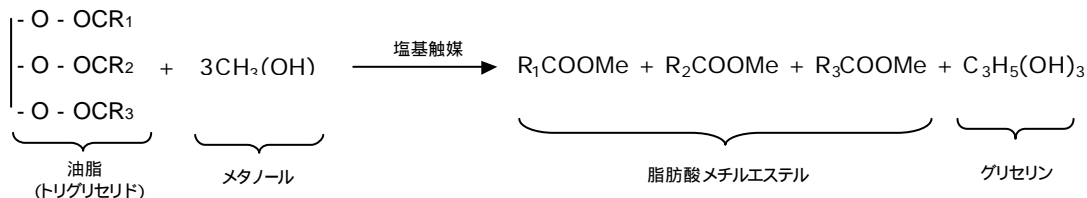
上記の表で分かるように、ユーザーはほとんどの脂肪酸化合物を CHEMCAD の DIPPR データベースから選択して使うことができます。しかしメチルエステルに関して使える物性データは 2、3 だけです。Chemstations 社では、多くのメチルエステルの物性データを文献から入手しており、要望に応じてユーザーに提供しています。それを使えば、ユーザー追加成分をバイオディーゼルのフローシートに加えることができます。

通常、使用後の油 (廃油) には未使用のものよりも遊離脂肪酸が多量に存在します (例えば、料理時の加熱によって)。バイオディーゼル製造では、これらの遊離脂肪酸をエステル交換前に除去して鹸化しないようにする必要があります。これは塩基あるいは酸を用いた前処理によって行います。

バイオディーゼル反応 - 脂 (fat) や油 (oil)

油脂からのエステル製造法は基本的に、(1) 塩基触媒によるエステル交換、(2) 酸触媒によるエステル化、(3) 酵素触媒を用いる 3 つです。反応はどれも、最適な操作パラメータ (温度と圧力) と転化率が関係しますが、利用可能な文献のほとんどは塩基触媒ルートに重点がおかれています。とらのも、最も経済的であることが求められるからです。

塩基触媒の全体反応は、例えば以下に示すとおりです。



反応の進行は、(1) トリグリセリドをアルコールと反応させてジグリセリドと脂肪酸エステルを形成する、(2) ジグリセリドをアルコールと反応させてモノグリセリドと脂肪酸エステルを形成する、(3) モノグリセリドをアルコールと反応させてグリセリンと脂肪酸エステルを形成する、という 3 つの可逆ステップになります。例えば、パーム油 (少なくとも 9 つの異なる脂肪酸グループをもつ) を使う場合、729 の異なるトリグリセリドと、81 の異なるジグリセリド、9 つの異なるモノグリセリドが存在する可能性があります。

開始する特定の油脂の情報に基づいて、バイオディーゼル最終製品内の脂肪酸エステルに関連する情報が分かります。形成されるエステルの種類は、アルコールの種類で決まります。(例えば、メタノールを使うとメチル... が、エタノールを使うとエチル... が作られる、など。)

ソリューション - CHEMCAD シミュレーション

厳密な方法

必要条件：

油脂 (oil, fat) すべての構成成分 (トリグリセリド、ジグリセリド、モノグリセリド)、脂肪酸、脂肪酸エステル製品の物性データ
 全反応での反応速度パラメータすべて (アレニウス定数)
 臨界条件での分離における全成分ベアの気液液 BIPパラメータ

利点：

供給原料 (フィードストック)を変えた場合の (種類や量) プラントパフォーマンスを簡単に比較できる
 反応工程と分離工程を簡単に最適化できる

欠点：

膨大な量のデータが必要。そのほとんどが文献にない、高額の測定資金が必要。
 成分と反応の数が多いためにシミュレーションが遅くなる可能性があり、リアルタイム制御の最適化といった用途での利用は困難

簡単な(簡易的な)方法

必要条件：

油脂を単体の脂肪酸で表す。オレイン酸は多くの植物性油脂の主要成分である。通常は、トリオレインを使ってオレイン酸型のトリグリセリドを表す。
 バイオディーゼル製品を単体の脂肪酸エステルで表す。植物性油脂として使う成分に対しての脂肪酸メチルエステル (FAME: fatty acid methyl ester) 誘導体。例えば、オレイン酸を脂肪酸に使う場合 (トリグリセリドであるトリオレインを用いて)、オレイン酸メチル (C19H36O2) が FAME として使われることになる。
 FAME / グリセリン / メタノール系の気液液 BIPパラメータ(または回帰データ)
 化学量論の強制的な反応での仮定の転化率。供給原料 (フィードストック)をバイオディーゼルへの転化率が 90%+ として反応をモデル化することは普通である。多くのユーザーは、後で反応速度を加える予定であっても、このように仮定してモデルをスタートする。

利点：

熱収支と物質収支を、簡単に素早く作成できる
 構成成分すべてのデータを探さなくても、単成分を使うことで、単エステル交換反応ができる。オレイン酸 (C18H34O2) はキャノーラ油の主要な脂肪酸である (Lawson, 1995)。オレイン酸型のトリグリセリドをトリオレイン (C57H104O6) で表すとプロセスシミュレータで簡単に利用できる。トリグリセリドは植物性油脂の主要成分である (Zhang, 2003)。Zhang は、ジグリセリドとモノグリセリドの形式は、メタノールと油でメタノールの比率が高い状態で中間体としてのみ見られることに気付いた。

欠点：

供給原料 (フィードストック)を変えた場合の (種類や量) プラントパフォーマンスを比較することができない。
 最適化の実行やリアルタイム最適化で使用するには力不足。

混合した(ハイブリッドな)方法

必要条件：

油脂を表す脂肪酸のリストをひとつ (または要約したもの)。例えば、キャノーラ油はオレイン酸とリノール酸とリノレン酸をブレンドしたものとして表すことができる。
 バイオディーゼル製品を表す脂肪酸エステルの要約リスト。リストのエステルを使って脂肪酸が選ばれる (キャノーラ オレイン酸メチル、リノール酸メチル、リノレン酸メチル)
 脂肪酸 / グリセリン / メタノールの気液液 (VLL) BIPパラメータの要約リスト
 反応速度パラメータの要約リスト。いくつかの油脂は、簡易的な可逆的な反応に対するデータが文献から利用可能。

トリグリセリド (TG) + MeOH ジグリセリド (DG) + FAME
 DG + MeOH モノグリセリド (MG) + FAME
 MG + MeOH グリセリン + FAME

利点：

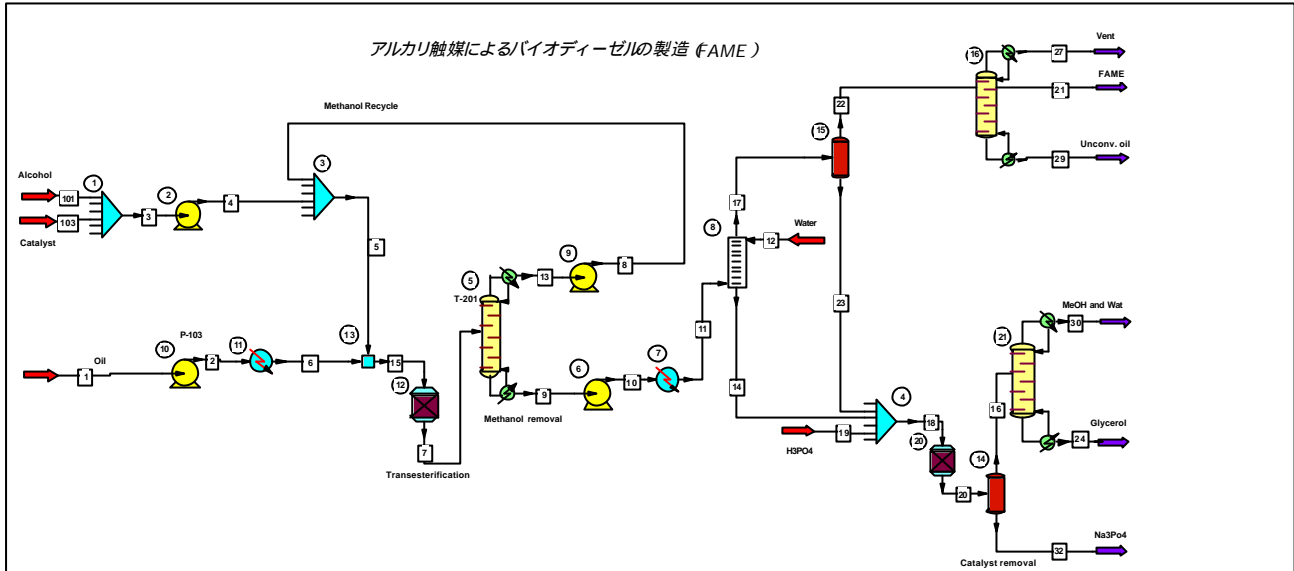
供給原料を変えた場合の (種類や量) プラントパフォーマンスを比較するいくつかの能力。(さまざまな油に対してのフローシートを複数、あるいは、使用される潜在的な油脂ごとの TG、DG、MG、反応速度 のいずれかが必要)
 分離ユニット(蒸留塔、静置(相分離)の単位操作)のより良い条件を探ることができる
 反応工程と分離工程の両方の最適化が可能
 中間の忠実さと、より速いシミュレーション時間でリアルタイム最適化の可能性が与えられる

欠点：

反応器に対して、成分リストと反応速度を設ける労力が要る
 BIPを求めるために、VLLデータを探したり回帰したりする労力が要る

例題 (塩基触媒システム) - ケムキャドシミュレーション

ハイブリッドな方法を用いたCHEMCADモデルの概要は以下のとおり:


CHEMCAD フローシート

Stream No.	101	103	1	8	15	7	11	22
Name	Alcohol	Catalyst	Oil	Methanol Rec				
-- Overall --								
Mass flow kg/h	117.20	10.00	1050.00	111.65	1288.82	1288.84	1177.19	1060.14
Temp C	25.00	25.00	25.00	28.51	51.88	60.00	60.00	60.00
Pres kPa	100.00	100.00	100.00	400.00	400.00	400.00	110.00	110.00
Component mass %								
Methyl Oleate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Glycerol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.05	8.81	0.00
Methanol	100.00	0.00	0.00	100.00	17.75	9.35	0.75	0.18
Calcium Oxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcium Sulfate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phosphoric Acid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TriNa Phosphate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Triacylglycerol	0.00	0.00	100.00	0.00	81.47	4.07	4.46	4.95
FAME	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	77.75	85.12	94.52
Sulfuric Acid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
Sodium Hydroxide	0.00	100.00	0.00	0.00	0.78	0.78	0.85	0.00

Stream No.	18	27	21	23	30	24	32
Name		Vent	FAME		MeOH and Wat	Glycerol	Na3Po4
-- Overall --							
Mass flow kg/h	256.06	25.94	990.00	6.39	18.47	104.09	133.50
Temp C	47.05	214.27	214.27	60.00	38.78	112.00	60.00
Pres kPa	100.00	10.00	10.00	110.00	40.00	50.00	100.00
Component mass %							
Methyl Oleate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Glycerol	40.52	0.00	0.00	0.00	0.07	99.66	0.00
Methanol	2.73	7.18	0.00	0.00	37.15	0.12	0.00
Calcium Oxide	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcium Sulfate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phosphoric Acid	49.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.77
TriNa Phosphate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.23
Triacylglycerol	0.00	0.45	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00
FAME	0.00	78.27	99.12	0.00	0.01	0.00	0.00
Sulfuric Acid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water	2.86	14.10	0.00	0.00	62.77	0.22	0.00
Sodium Hydroxide	3.91	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00

主要なストリームの分析

ユーザーはこのフローシート他に、(1) 酸触媒でのプロセス、(2) 廃油の前処理、(3) ヘキサンを用いた廃油からのバイオディーゼルの製造プロセスに関するケムキャドファイルも見たいと思うことでしょう。

よくある質問 (FAQ) - ケムキャドでのバイオディーゼルシミュレーション

Q: バイオディーゼル、オイル (油)、グリセリンを表すために新規成分を作成しています。フラッシュするとこれらの成分が蒸気になるのは何故ですか？

A: ケムキャドで新規成分を作成すると、臨界物性が推算されます。これらの値から、ラフな (荒い) 相関式で蒸気圧が推算されます。特にバイオディーゼルの場合、非現実的な蒸気圧になってもおかしくはありません。これを改善するには、成分の蒸気圧のデータ回帰を行います。蒸気圧の実験データは、これらの成分に対して低い蒸気圧曲線を示すはずで、ツールメニューから純成分回帰を選び、成分の蒸気圧を回帰します。実験データを利用できない場合は、仮定のデータ (低い蒸気圧のもの) を回帰することを検討してください。こうすることで、フラッシュしても成分が蒸気のほうへ行かなくなります。仮定データが標準沸点と矛盾しないようにして下さい。トリオレインの蒸気圧 vs 温度曲線が参考になるかもしれません。

Q: 新規成分で他に重要な物性はありますか？

A: 代表的なモデルには蒸留とフラッシュがあります。ユーザー追加成分でより重要な輸送物性は蒸気圧、液体熱容量、蒸発熱、蒸気熱容量です。密度があるとポンプ計算で役立ちます。CCTHERMを使う場合は、熱伝導度と液体粘度が重要になります。

Q: 静置ユニットや洗浄ユニットをどのようにモデル化するのでですか？

A: 静置ユニットは大体、液液分離器です。液液分離の場合は、出口が3つの単位操作「フラッシュ」が使えます。水洗浄をしたい場合は、段数の少ない抽出蒸留塔が使えます。Zhang は、重力沈降を表す液液フラッシュ単位操作のあとに、抽出蒸留塔を4理論段で使用して洗浄を表しています。

Q: 使用できる熱力学は何ですか？

A: これは注意が必要な質問です。このモデルで熱力学はとても重要です。バイオディーゼル、メタノール、水、植物油、グリセリン残留物の熱力学は非理想的です。

普通は、液液抽出を行ってグリセリンからバイオディーゼルの分離します。この分離を行うためにモデルは二液相を予測しなければなりません。塩基性 (または酸性) 触媒によるプロセスでは、中和と溶解熱に対して電解質の熱力学が必要になります。

普通はこのプロセスに、NRTL か UNIQUAC か Modified UNIFAC を使います。我々のモデリング経験から、ベストだったものをここに記載します。

バイオディーゼル、植物油、グリセリンとして使う成分に UNIFAC サブグループを割り当てます。こうすることで、サブグループに基づいて VLE を予測する方法が使えるようになります。

・フローシートのエステル交換とメタノール回収の部分に NRTL を使用します。液液分離と精製塔 (蒸発器) です。

電解質を使用する場合は、フローシート全体に NRTL を使う必要があります。水 / バイオディーゼル、バイオディーゼル / 油、水 / 油、バイオディーゼル / メタノール、バイオディーゼル / グリセリン、各二成分間で足りない BIP を回帰して下さい。

Chiu からのメタノール分離データを、抽出ユニットでのメタノールの分離基準に使って下さい。

実験データを使ってより正確な BIP に回帰して下さい。(ツールメニューの BIP 回帰)

Q: 中和をどのようにモデル化するのでですか？

A: 電解質モデルが中和反応を示すのは、電解質成分に実際の化学種 (true species) を使っている場合のみです。フローシートで実際の化学種を使わない場合は通常、化学量論反応器を等温で用いて中和を行います。この単位操作で見た目の化学種を使っている場合は、電解質をオフにしてください。この単位操作の熱負荷は意味のないものです。もっと厳密な熱負荷計算を必要とする場合には、実際の化学種で中和を行って下さい。



参考文献

- Alcantara R., J. Amores, L. Canoira, E. Fidalgo, M.J. Franco and A. Navarro, "Catalytic Production of Biodiesel from Soy-bean Oil, Used Frying Oil and Tallow", *Biomass and Bioenergy* 18, 515-527 (2000).
- Al-Widyan M.I., G. Tashtoush and M. Abu-Qudais, "Utilization of Ethyl Ester of Waste Vegetable Oils as Fuel in Diesel Engines", *Fuel Processing Technology* 76, 91-103 (2002).
- ASTM D-6751-03a, "Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels", ASTM International, 1-6 (2003).
- Azam M. M., Amtul Waris and N.M. Nahar, "Prospects and Potential of Fatty Acid Methyl Esters of some non-Traditional Seed Oils for Use as Biodiesel in India", *Biomass & Bioenergy* 29, 293-302 (2005).
- Bastida S. and F.J. Sancez-Muniz, "Thermal Oxidation of Olive Oil, Sunflower Oil and a Mix of Both Oils during Forty Discontinuous Domestic Fryings of Different Foods", *Food Sci. Tech. Int.* 7(1), 15-21 (2001).
- Bender, M., 1999. Economic feasibility review for community-scale farmer cooperatives for biodiesel. *Bioresour. Technol.* 70, 81-87.
- Boocock D.G.B., S.K. Konar, V. Mao and H. Sidi, "Fast One-phase Oil-rich Processes for the Preparation of Vegetable Oil Methyl Esters", *Biomass and Bioenergy* 11(1), 43-50 (1996).
- Boocock D.G.B., S.K. Konar, V. Mao, C. Lee and S. Bulgan, "Fast Formation of High-Purity Methyl Esters from Vegetable Oils", *JAOCS* 75(9), 1167-1172 (1998).
- Canakci M. and J.V. Gerpen, "Biodiesel Production via Acid Catalysis", *Transactions of ASAE* 42(5), 1203-1210 (1999).
- Canakci M. and J.V. Gerpen, "Biodiesel Production from Oils and Fats with High Free Fatty Acids", *Transactions of ASAE* 44(6), 1429-1436 (2001).
- Chaudhari S.T. and N.N. Bakshi, "Steam Gasification from Chars and Bio-oil", Report to Bioenergy Development Program Renewable Energy Branch, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Canada, February, pp 396-436 (2002).
- Connemann, J., Fischer, J., 1998. Biodiesel in Europe 1998: biodiesel processing technologies. Paper presented at the International Liquid Biofuels Congress, Brazil, 15 pp.
- Cuesta C., F.J. Sánchez-Muniz, C. Garrido-Polonio, S. López-Varela and R. Arroyo, "Thermo-oxidative and Hydrolytic Changes in Sunflower Oil Used in Fryings with a Fast Turnover of Fresh Oil", *JAOCS* 70(11), 1069-1073 (1993).
- Cvengroš V. and Z. Cvengrošová, "Used Frying Oils and Fats and Their Utilization in the Production of Methyl Esters of Higher Fatty Acids", *Biomass and Bioenergy* 27, 173-181 (2004).
- Darnoko D. and M. Cheryan, "Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor", *JAOCS* 77(12), 1263-1267 (2000).
- Diasakou M., A. Louloudi and N. Papayannakos, "Kinetics of the Non-catalytic Transesterification of Soybean Oil", *Fuel* 77(12), 1297-1302 (1998).
- Dorado M.P., E. Ballesteros, J.A. Almeida, C. Schellert, H.P. Löhrlin and R. Krause, "An Alkali-catalyzed Transesterification Process for High Free Fatty Acid Waste Oils", *Transactions of the ASAE* 45(3), 525-529 (2002).
- Dmytryshyn S.L., A.K. Dalai, S.T. Chaudhari, H.K. Mishra and M.J. Reaney, "Synthesis and Characterization of Vegetable Oil Derived Esters: Evaluation for Their Diesel Additive Properties", *Bioresource Technology* 92, 55-64 (2004).
- Freedman B., E.H., Pryde and T.L. Mounts, "Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils", *JAOCS* 61(10), 1638-1642 (1984).
- Freedman B., R.O. Butterfield and E.H. Pryde, "Transesterification Kinetics of Soybean Oil", *JAOCS* 63(10), 1375-1380 (1986).
- Gerpen J.V., "Cetane Number Testing of Biodiesel: Liquid Fuels and Industrial Products from Renewable Resources", *Proceedings of the Third Liquid Fuel Conference*, 15-17 September 1996, Nashville, Tennessee.
- Gerpen V. and G. Knothe, "Basics of the Transesterification Reaction", *The Biodiesel Handbook*, Champaign, Ill.: AOCS Press, 26-39 (2005).
- Goodrum J.W., "Volatility and Boiling Points of Biodiesel from Vegetable Oils and Tallow", *Biomass & Bioenergy* 22, 205-211 (2002).
- Komers K., R. Stloukal, J. Machek and F. Skopal, "Biodiesel from Rapeseed Oil, Methanol and KOH 3. Analysis of Composition of Actual Reaction Mixture", *European Journal of Lipid Science and Technology* 103(6), 363-371 (2001).
- Korus, R.A., Hoffman, D.S., Bam, N., Peterson, C.L., Drown, C., 1993. Transesterification process to manufacture ethyl ester of rape oil. In: *The Proceedings of the First Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture, and Industry*, vol. II. National Renewable Energy Laboratory, Golden Co., pp. 815-826.
- Krawczyk, T., 1996. Biodiesel. *INFORM* 7 (8), 801-822.
- Krisnangkura K., "A Simple Method for Estimation of Cetane Index of Vegetable Oil Methyl Esters", *JAOCS* 63(4), 552-553 (1986).
- Lang X., A.K. Dalai, N.N. Bakhshi, M.J. Reaney and P.B. Hertz, "Preparation and Characterization of Bio-diesels from Various Bio-oils", *Bioresource Technology* 80, 53-62 (2001a).
- Lang X., A.K. Dalai, N.N. Bakhshi, M.J. Reaney and P.B. Hertz, "Biodiesel esters as lubricity additives: effects of process variables and evaluation of low-temperature properties", *Fuels International*, 207-227 (2001b).
- Lee K.T., T.A. Foglia and K.S. Chang, "Production of Akyil Ester as Biodiesel from Fractionated Lard and Restaurant Grease", *JAOCS* 79(2), 191-195 (2002).
- Lifka J. and B. Ondruschka, "Influence of Mass Transfer on the Production of Biodiesel", *Chem. Eng. Technol.* 27 (11), 1156-1159 (2004).
- Ma F. and M.A. Hanna, "Biodiesel Production: A Review", *Bioresource Technology* 70, 1-15 (1999).
- Mehner L.C., V.S.S. Dharmagadda and S.N. Naik, "Optimization of Alkali-catalyzed Transesterification of Pongamia Pinnata Oil for Production of Biodiesel", *Bioresource Technology*, article in press, (2005).
- Mehner L.C., D.V. Sagar and S.N. Naik, "Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification - A Review", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 1-21 (2004).
- Mittelbach M. and H. Enzelsberger, "Transesterification of Heated Rapeseed Oil for Extending Diesel Fuel", *JAOCS* 76(5), 545-550 (1999).
- Mittelbach M. and P. Tritthart, "Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, III. Emission Tests Using Methyl Esters of Used Frying Oil", *JAOCS* 65(7), 1185-1187 (1988).
- Nawar W.W., "Chemical Changes in Lipids Produced by Thermal Processing", *Journal of Chemical Education* 61(4), 299-302 (1984).
- Nelson, R.G., Howell, S.A., Weber, J.A., 1994. Potential feedstock supply and costs for biodiesel production. In: *Bioenergy94, Proceedings of the Sixth National Bioenergy Conference*. Reno/Sparks, Nevada.
- Noordam, M., Withers, R., 1996. Producing biodiesel from canola in the inland northwest: an economic feasibility study. *Idaho Agricultural Experiment Station Bulletin No. 785*. University of Idaho College of Agriculture, Moscow, Idaho, p. 12.
- Noureddini H. and D. Zhu, "Kinetics of Transesterification of Soybean Oil", *JAOCS* 74(11), 1457-1463 (1997).
- Obibuzor J.U., R.D. Abigor and D.A. Okiy, "Recovery of Oil via Acid-Catalyzed Transesterification", *JAOCS* 80(1), 77-80 (2003).
- Pimentel D. and T. W. Patzek, "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower", *Natural Resources Research* 14 (1), 65-76 (2005).
- S&T Consultants Inc. and Meyers Norris Penny LLP. Economic, Financial, Social Analysis and Public Policies for Biodiesel: A Report. (2004).
- Sridharan R. and I.M. Mathai, "Transesterification Reactions", *J. Scient. Ind. Res.* 33, 178-187 (1974).
- Tomasevic A.V. and S.S. Siler-Marinkovic, "Methanolysis of Used Frying Oil", *Fuel Processing Technology* 81, 1-6 (2003).
- U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, "Biodiesel Handling and Use Guidelines", October 2004.
- Vicente G., M. Martinez, J. Araçil and A. Esteban, "Kinetics of Sunflower Oil Methanolysis", *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 5447-5454 (2005).
- Zhang, Y., 2002. Design and economic assessment of biodiesel production from waste cooking oil. M.A.Sc. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Ottawa.
- Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., Kates, M., 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technology assessment. *Bioresour. Technol.* 89 (1), 1-16.
- Zhou W., S.K. Konar and D.G. Boocock, "Ethyl Esters from the Single-Phase Base-Catalyzed Ethanolysis of Vegetable Oils", *JAOCS* 80(4), 367-371 (2003).