

Ewa Klugmann-Radziemska, Witold M. Lewandowski, Krzysztof Ciunel, Piotr Meler, Michał Ryms  
*Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny, Gdańsk*

## Bilans energetyczny cyklu produkcji i eksploatacji RME w indywidualnym gospodarstwie rolnym

### Wstęp

Polska jest jednym z największych producentów rzepaku w Europie – jego produkcja w naszym kraju w ostatnim pięcioleciu utrzymywała się na poziomie ok. 1,8 mln ton, co stanowi ponad 10% produkcji unijnej. Pod względem wysokości plonów rzepaku z hektara Polska ustępuje jedynie Wielkiej Brytanii, Danii i Czechom. Po akcesji Polski do Unii Europejskiej produkcja rzepaku stała się najszybciej rozwijającym się działem produkcji roślinnej. Przed wejściem Polski do Unii Europejskiej w produkcji rzepaku przeważały tendencje spadkowe, a w ostatnim pięcioleciu rozwijała się ona w tempie prawie 28% rocznie, co było efektem strategii UE w zakresie biopaliw i energii odnawialnej. Dało to silny impuls dla rozwoju uprawy i przetwórstwa rzepaku. W latach 2004–2008 powierzchnia upraw wzrosła o prawie o 50%, a plony rzepaku wyniosły 2,75 t/ha i były prawie o 30% wyższe niż w poprzednim pięcioleciu.

Bilans energetyczny jest jednym z instrumentów badawczych służących do oszacowania potencjału ener-

tycznego oraz ekonomicznego inwestycji związanych z indywidualną produkcją estrów oleju rzepakowego. Sporządzenie pełnego bilansu energetycznego produkcji biodiesla wymaga zsumowania nakładów energetycznych wykorzystywanych w każdym etapie tego procesu: w fazie wzrostu rośliny oleistej, w fazie pozyskiwania oleju rzepakowego, transestryfikacji oraz eksploatacji uzyskanych estrów i półproduktów, a także odpadów całego cyklu. Niniejszy bilans energetyczny został opracowany w odniesieniu do rzeczywistych plonów uzyskanych z 1 ha uprawy rzepaku ozimego. Wykorzystano rzepak gatunku Californium, dla którego wielkość zbioru z hektara uprawy w województwie pomorskim wahała się na przestrzeni kilku ostatnich lat w granicach od 41,7 do 55,6 dt/ha. Nasiona zostały wyhodowane przez rolnika w miejscowości Stegna w woj. Pomorskim w sezonie 2007–2008, a dane otrzymane z tego gospodarstwa były podstawą do wyznaczenia nakładów energetycznych zawartych w opracowaniu [2].

### Elementy składowe bilansu energetycznego procesu produkcji biodiesla

#### Uprawa nasion rzepaku

Nakład energetyczny na czynności związane z uprawą nasion rzepaku – od momentu zasiania do otrzymania gotowego produktu, spełniającego wymagania techniczne do wytwarzania oleju – wynosi ok. 21,6 GJ/ha przy plonie rzepaku sięgającym 2500 kg z ha oraz wzrasta o ok. 1 GJ/ha na każde dodatkowe 500 kg rzepaku [1, 3]. Czynności te obejmują m.in. następujące procesy:

- przygotowanie roli – proces ten przewiduje talerzowanie, kultywowanie oraz bronowanie gleb (w większych

gospodarstwach rolnych często stosuje się uprawę bez wstępnego przygotowania),

- siew nasion rzepaku,
- zabiegi pielęgnacyjne, takie jak np. nawożenie, stosowanie środków chwastobójczych, grzybobójczych i szkodnikobójczych,
- zbiór nasion rzepaku,
- suszenie i magazynowanie nasion.

W gospodarstwie rolnym, z którego pozyskano rzepak, ze względu na sprzyjające warunki pogodowe plon w roku 2008 był stosunkowo wysoki i wyniósł ok. 5000 kg rzepaku

z hektara uprawy. Wymagał zatem nakładu energetycznego szacowanego na ok. 26,6 GJ/ha. Wartość ta nie zawiera oczywiście trudnego do przewidzenia wkładu energii słonecznej, której poziom ma jednak znaczący wpływ na wysokość plonów.

Uzyskano nasiona rzepaku o wartości energetycznej 25,6 MJ/kg [5], co daje wartość energetyczną nieprzetworzonego plonu równą 128 GJ/ha uprawy. Jednocześnie uzyskano słomę rzepakową w ilości ok. 8900 kg, której potencjał energetyczny – przy założeniu wartości opałowej ok. 14,1 MJ/kg – wynosi 125,5 GJ/ha.

Ponieważ bilans energetyczny opiera się na założeniu, że suma przychodów energii jest równa sumie rozchodów, wyznaczono ilość energii dostarczonej do procesu uprawy nasion rzepaku przez panujące warunki klimatyczne (głównie przez nasłonecznienie terenu). Łączny nakład energii wniesionej do uprawy przez działalność człowieka wynosi 26,6 GJ/ha, a suma potencjału energetycznego uzyskiwanych nasion oraz słomy – 253,5 GJ/ha. Założono więc, że różnica tych wartości (czyli 226,9 GJ/ha) to ilość energii dostarczonej do uprawy rzepaku przez panujące w cyklu uprawy warunki klimatyczne (energia fotosyntezy roślin).

Poniżej zestawiono podsumowanie przychodu i rozchodu energii do procesu uprawy nasion:

- **przychód:**
  - nakłady związane z czynnościami rolnymi: **26,6 GJ/ha,**
  - energia dostarczana przez panujące warunki klimatyczne: **226,9 GJ/ha,**
- **rozchód:**
  - nasiona rzepaku: **128 GJ/ha,**
  - słoma rzepakowa: **125,5 GJ/ha.**

#### **Pozyskiwanie oleju rzepakowego**

Kolejnym etapem produkcji RME jest wytlóczenie oleju rzepakowego z nasion. Proces ten odbywa się najczęściej w prasach ślimakowych. Niejednokrotnie ziarno jest wstępnie podgrzewane, co przy dodatkowym zastosowaniu enzymów pozwala osiągnąć uzysk oleju na poziomie 30%, w odniesieniu do masy ziarna. W opisywanych badaniach tłóczenie odbywało się w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem niewielkiej prasy, której pobór mocy podczas tłóczenia oleju wynosił 0,2 kW. Proces tłóczenia oleju z próbki laboratoryjnej trwał 26 godzin, a procesy wstępnego nagrzewania prasy (przeprowadzanego przez tłóczenie ok. 1 kg rzepaku) – ok. 2 godzin. Łącznie urządzenie pracowało więc przez 28 godzin, zużywając w tym czasie 20,2 MJ energii. Pozwoliło to na przetłóczenie

ok. 164 kg rzepaku. Na przetłóczenie 5000 kg rzepaku, uzyskanego z 1 ha uprawy, zużyto by zatem ok. 616 MJ.

Zrezygnowano z filtrowania oleju na rzecz sedymentacyjnego osiadanania resztek nasion w oleju na dnie zbiornika, uzyskując w ten sposób olej o czystości wystarczającej do dalszego przetwarzania.

Założono 50-proc. nadmiar w stosunku do ilości energii wykorzystanej na tłóczenie oleju – nadmiar ten pokrywa zapotrzebowanie energetyczne na operacje związane z czyszczeniem elementów prasy, sedymentacją oraz innymi kosztami dodatkowymi. Nakład energii elektrycznej wykorzystywanej na wytłóczenie oleju oszacowano łącznie na 0,9 GJ/ha uprawy.

Po sedymentacji uzyskano olej rzepakowy w ilości 18,2% masy poddanych tłóczeniu nasion – w przypadku plonu z 1 ha uprawy jest to 910 kg oleju. Założono wartość opałową oleju na poziomie ok. 37,1 MJ/kg [4], zatem jego potencjał energetyczny wynosi ok. 33,3 GJ/ha uprawy rzepaku.

Uzyskuje się również ok. 4000 kg makuchu rzepakowego, o ciepłe spalania 22,98 MJ/kg, co daje potencjał energetyczny makuchu sięgający 91,9 GJ/ha uprawy. Straty związane z emisją ciepła podczas tłóczenia sięgają ok. 3,7 GJ/ha uprawy rzepaku.

Poniżej zestawiono podsumowanie przychodu i rozchodu energii do procesu pozyskiwania oleju rzepakowego:

- **przychód:**
  - kaloryczność nasion rzepaku: **128 GJ/ha,**
  - energia elektryczna wykorzystywana do tłóczenia: **0,9 GJ/ha,**
- **rozchód:**
  - potencjał energetyczny oleju rzepakowego: **33,3 GJ/ha,**
  - kaloryczność makuchu rzepakowego: **91,9 GJ/ha,**
  - straty ciepła prasy: **3,7 GJ/ha.**

#### **Pozyskiwanie estrów oleju rzepakowego**

Proces transestryfikacji uzyskanego oleju rzepakowego za pomocą metanolu przeprowadzono w skali półtechnicznej. Z bilansu reakcji estryfikacji oleju rzepakowego oraz z obliczeń średnich mas molowych oleju i RME wynika, że z 881,7 kg oleju z rzepaku Californium, przy 100-proc. wydajności reakcji, można otrzymać 885,6 kg estru oraz 92 kg fazy glicerynowej. Na tej podstawie można wyliczyć, iż z 910 kg oleju można uzyskać ok. 914 kg RME oraz 92,4 kg surowej fazy glicerynowej. Zakładając wartość opałową RME na poziomie 37,1 MJ/kg uzyskuje się potencjał energetyczny sięgający 33,9 GJ/ha uprawy rzepaku. Podczas reakcji zastosowano 100% nadmiaru metanolu,

w celu maksymalizacji stopnia estryfikacji – można założyć, że przynajmniej 40% użytej ilości metanolu ( $0,4 \times 5,94 = 2,38$  kg) przeszło do fazy glicerynowej, zwiększając jej łączną masę do ok. 95 kg. Według danych literaturowych, wartość opałowa fazy glicerynowej bez odparowywania metanolu wynosi 22,84 MJ/kg. Potencjalny uzysk energii z otrzymanej fazy glicerynowej wynosi 2,2 GJ/ha uprawy.

Do produkcji estrów wykorzystano wytwórnię laboratoryjną o wydajności 60 litrów oleju na dobę. Dobowy cykl pracy wytwórni zakłada następujące okresy pracy:

- pompowanie metanolu ze zbiornika do komory mieszanki: ok. 5 minut,
- pompowanie oleju do komory reaktora: ok. 10 minut,
- reakcja estryfikacji: ok. 30 minut,
- rozdzielanie faz poreaekcyjnych: ok. 23 godziny,
- odprowadzenie fazy glicerynowej oraz wypompowywanie estru: ok. 15 minut.

W sumie, w ciągu dobowego cyklu pracy wytwórnia zużywa energię elektryczną przez ok. 1 godzinę. Pobór mocy wytwórni wynosi 3,35 kW – w ciągu doby urządzenie zużywa więc 12,06 MJ energii. Przy zdolności przerobowej 60 litrów oleju/dobę, estryfikacja 910 kg oleju rzepakowego (przy założonej gęstości 0,92 kg/dm<sup>3</sup> daje to ok. 990 litrów) zajmie 16,5 doby – w tym czasie zużywa się 0,20 GJ energii. Założono 50-proc. nadmiar energii na wszelkie czynności dodatkowe, związane np. z konserwacją instalacji, co dało ostatecznie 0,3 GJ energii. Wkład energetyczny odczynników chemicznych stosowanych do estryfikacji można oszacować na 2,72 GJ na tonę stosowanego oleju rzepakowego [5], co w stosunku do uzyskanej ilości oleju daje ok. 2,5 GJ energii.

Poniżej zestawiono podsumowanie przychodu i rozchodu energii do procesu pozyskiwania estrów metylowych oleju rzepakowego:

- **przychód:**
  - potencjał energetyczny oleju rzepakowego: **33,3 GJ/ha**,

- energia substancji chemicznych wykorzystywanych do reakcji: **2,5 GJ/ha**,
- energia elektryczna wykorzystywana do estryfikacji: **0,3 GJ/ha**,
- **rozchód:**
  - kaloryczność RME: **33,9 GJ/ha**,
  - kaloryczność fazy glicerynowej: **2,2 GJ/ha**.

### *Eksploracja uzyskanych estrów*

Przeprowadzone testy zasilania stosowanego agregatu prądotwórczego czystym estrem metylowym pokazały, że do wyprodukowania 4,18 kW mocy agregat zużywa średnio 30,7 mililitrów paliwa na minutę pracy silnika. Według tego założenia, w ciągu godziny pracy agregat zużywa 1,84 litra czystego RME, produkując energię elektryczną w ilości 15,05 MJ. Zastosowana technologia produkcji RME pozwala na uzyskanie ok. 914 kg RME, co przy uwzględnieniu gęstości 0,87 kg/dm<sup>3</sup> daje objętość 1050 litrów. Zatem przy zastosowaniu identycznego agregatu, ta ilość estru zostanie zużyta w ciągu ok. 570 godzin na wytworzenie 8,6 GJ użytkowej energii elektrycznej. Ponieważ potencjał energetyczny estrów oszacowano na 33,9 GJ/ha uprawy, reszta to straty ciepła (spaliny, przewody dostarczające prąd), wynoszące ok. 25,3 GJ/ha uprawy rzepaku. Na tej podstawie łączną sprawność pracy agregatu prądotwórczego (silnika Diesla i prądnic) można oszacować na  $\eta = 25,4\%$ .

Poniżej zestawiono podsumowanie przychodu i rozchodu energii do procesu pozyskiwania do eksploatacji uzyskanych estrów:

- **przychód:**
  - kaloryczność RME: **33,9 GJ/ha**,
- **rozchód:**
  - energia użytkowa otrzymana ze spalania estrów: **8,6 GJ/ha**,
  - straty ciepła (spaliny, przewody): **25,3 GJ/ha**.

### **Sumaryczny bilans energetyczny cyklu produkcji RME**

Poniżej zestawiono podsumowanie energetycznego bilansu cyklu życia uprawy rzepaku na cele energetyczne, rozliczonego w GJ/ha uprawy. Przy tworzeniu poniższego zestawienia pominięte zostały nakłady energetyczne półproduktów procesu otrzymywania energii z rzepaku (nasiona rzepaku, olej rzepakowy, estry) oraz nakłady warunków klimatycznych panujących w czasie uprawy.

**Sumaryczny wkład energetyczny [GJ/ha uprawy]:**

- czynności rolnicze związane z rocznym cyklem upraw: **26,6 GJ/ha**,
- substancje chemiczne wykorzystane przy estryfikacji: **2,5 GJ/ha**,
- energia elektryczna zużyta na zasilanie urządzeń (prasa, wytwórnia): **1,2 GJ/ha**,
- **$\Sigma = 30,3$  GJ/ha**.

**Sumaryczne zyski energetyczne [GJ/ha uprawy]:**

- słoma rzepakowa: **125,5 GJ/ha**,

- makuch rzepakowy: **91,9 GJ/ha**,
- energia pozyskana ze spalania estru: **8,6 GJ/ha**,
- faza glicerynowa: **2,2 GJ/ha**,
- $\Sigma = 228,2 \text{ GJ/ha}$ .

#### Sumaryczne straty energii [GJ/ha uprawy]:

- straty ciepła prasy do tłoczenia oleju: **3,7 GJ/ha**,
- straty ciepła podczas eksploatacji estru w silniku: **25,3 GJ/ha**,
- $\Sigma = 29,0 \text{ GJ/ha}$ .

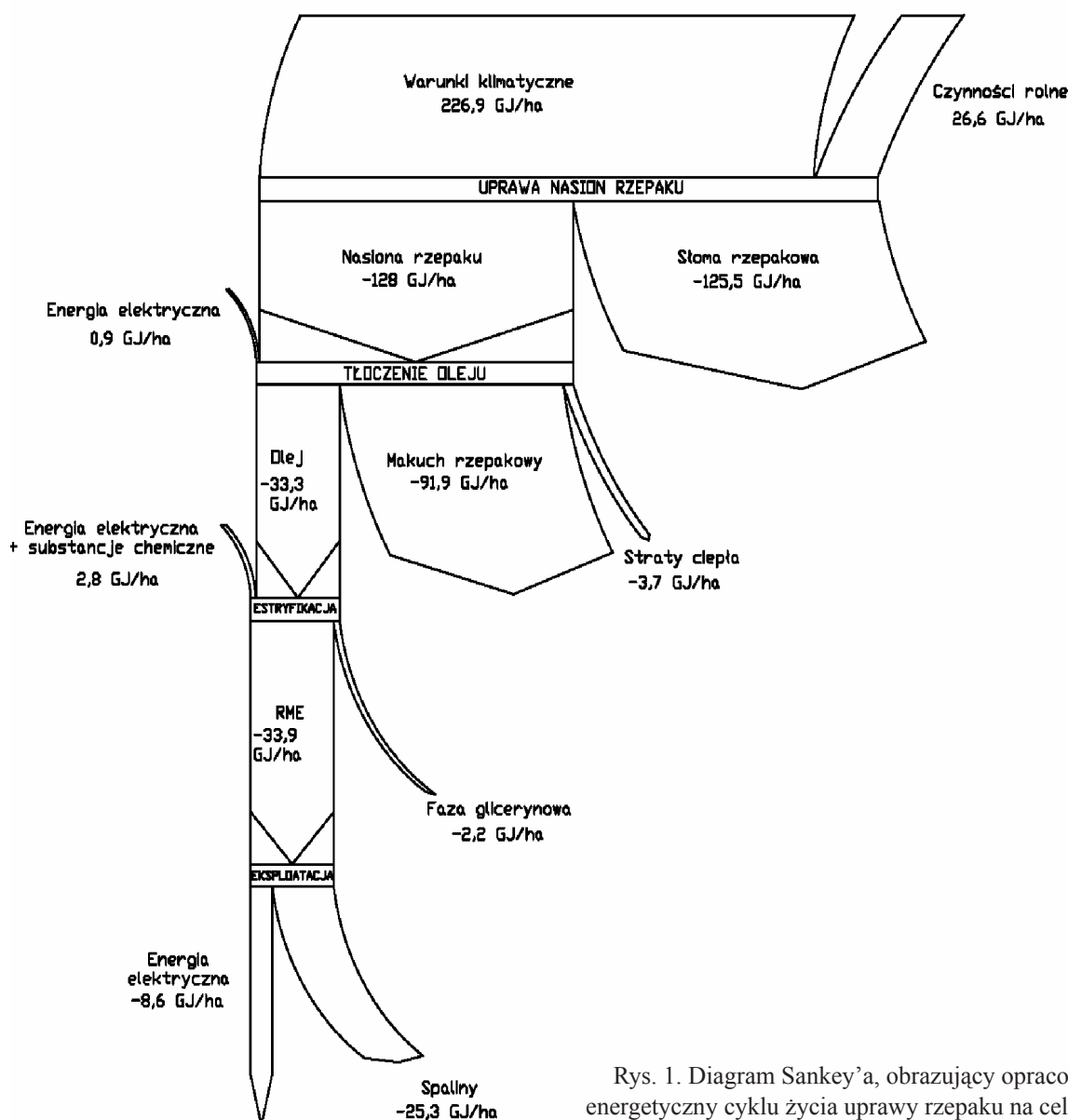
Analiza bilansu energetycznego pokazała, że przy zastosowaniu tej technologii z 1 hektara uprawy rzepaku można uzyskać energię (w postaci biomasy, energii mechanicznej lub elektrycznej) o łącznej wartości ok. 197,9 GJ. Na podstawie sumarycznych strat energii, wynoszących 29,0 GJ/ha, oszacowano sumaryczną sprawność pozyskiwania energii w cyklu życia 1 ha uprawy rzepaku

(poprzez porównanie energii uzyskanej, z energią możliwą do uzyskania przy 100-proc. wydajności spalania estru oraz braku strat ciepła prasy). Sprawność ta wynosi:  $\eta = (197,9/226,9) \times 100\% = 87,2\%$ .

W opracowanym zestawieniu należy zwrócić uwagę na dwa czynniki. Po pierwsze, aż 95% potencjału energetycznego uprawy rzepaku pochodzi z potencjalnego zagospodarowania biomasy (słoma, makuchy). Należy więc zastosować możliwie wydajną technologię pozyskiwania energii z biomasy, w celu minimalizacji strat tego potencjału.

Po drugie, charakterystyka pracy zastosowanej prasy do wyciskania oleju wpływa na obniżenie ilości energii pozyskiwanej w postaci paliwa rzepakowego.

Uzyskano niskie wartości wydajności tłoczenia oleju, przez co – kosztem spadku ilości uzyskiwanego estru –



Rys. 1. Diagram Sankey'a, obrazujący opracowany bilans energetyczny cyklu życia uprawy rzepaku na cele energetyczne

wzrósł potencjał energetyczny makuchu rzepakowego. Dodatkowo, w procesie tłoczenia stosunkowo duża ilość energii jest bezpowrotnie tracona przez nagrzewanie się prasy.

Niezwykle ważnym czynnikiem jest też znaczna ilość energii tracona w spalinach podczas eksploatacji silnika testowego. Zastosowany agregat miał na celu modelowanie silnika stosowanego w maszynach rolniczych, w których

nie ma możliwości zagospodarowania spalin. Gdyby jednak uzyskiwany ester przeznaczyć na zasilanie stacjonarnego generatora prądotwórczego w indywidualnym gospodarstwie, otwierają się zupełnie nowe możliwości zagospodarowania potencjału energetycznego spalin (25,3 GJ/ha uprawy), np. poprzez wybudowanie wymiennika ciepła, służącego do ogrzewania wody wykorzystywanej przez gospodarstwo.

Artykuł nadesłano do Redakcji 18.02.2010 r. Przyjęto do druku 27.04.2010 r.

Recenzent: doc. dr inż. Andrzej Froński

„Praca współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.  
Projekt systemowy Województwa Pomorskiego pn.: „InnoDoktorant – stypendia dla doktorantów, II edycja.”  
„This research work was supported by the European Union in the framework of the European Social Fund.  
The system project of the Pomorskie Voivodeship „InnoDoktorant – Scholarships for PhD students, II edition”.



**HUMAN CAPITAL**  
NATIONAL COHESION STRATEGY



POMORSKIE  
VOIVODESHIP

EUROPEAN  
SOCIAL FUND



## Literatura

- [1] Batchelor S.E., Booth E.J., Walker K.C.: *Industrial Crops and Products*. 4, 193–202, 1995.
- [2] Informacje pozyskane od producenta nasion rzepaku.
- [3] Lewandowski W.M.: *Proekologiczne Odnawialne Źródła Energii*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s. 322–347, Warszawa 2007.
- [4] Materiały Krajowego Zrzeszenia Producentów Rzepaku.
- [5] Podkówka W.: *Kierunki wykorzystania rzepaku*. [w:] *Biopaliwa, pasza, gliceryna z rzepaku*. Praca zbiorowa pod redakcją W. Podkówki, Wydawnictwa Uczelniane

Akademii Rolniczo-Technicznej w Bydgoszczy, s. 36–42, Bydgoszcz 2004.



Dr hab. Ewa KLUGMANN-RADZIEMSKA – prof. nadzw. Politechniki Gdańskiej; autor/współautor 137 prac naukowych (8 monografii, 2 patentów i 3 zgłoszeń pat.). Prodziekan do spraw Rozwoju Wydz. Chem. Polit. Gdańskiej. Kierownik Katedry Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego. Prowadzi badania dotyczące odnawialnych źródeł energii, recyklingu materiałowego i wymiany ciepła.



Prof. Witold M. Lewandowski – ukończył Wydział Chemiczny i B.M. Politechniki Gdańskiej. Przewodniczący Rady Programowej Fundacji Poszanowania Energii w Gdańsku, członek Sekcji Termodynamiki Komitetu Termodyn. i Spalania PAN i Polskiego Towarzystwa Pomp Ciepła. Autor: 8 książek, 73 publikacji, 20 patentów, 111 referatów i 115 opracowań przemysłowych.



Mgr inż. Krzysztof CIUNEL – ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Obecnie słuchacz studium doktoranckiego przy tymże wydziale. Autor 2 rozdziałów w książkach, 8 publikacji i referatów, dwukrotnie nagrodzony medalem podczas Targów TECHNICON – INNOWACJE. Zainteresowania naukowe związane głównie z biopaliwami.



Mgr inż. Piotr MELER – absolwent Wydz. Budownictwa Lądowego oraz Wydz. Oceanotech. i Okrętown. Politechniki Gdańskiej. Pracownik oraz doktorant na Wydziale Chemicznym PG. Współautor 4 rozdziałów w książkach, 14 publikacji i referatów oraz zgłoszenia patentowego. Stypendysta projektu InnoDoktorant. Zainteresowania: OZE, informatyka, innowacje.



Mgr inż. Michał RYMS – ukończył studia na Wydziale Fizyki Techn. i Matem. Stosow. Politechniki Gdańskiej. Obecnie doktorant na Wydz. Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Stypendysta programu InnoDoktorant – II edycja. Autor: 3 rozdz. w książkach, 20 publik. i referatów, 2 prac badawczych zleconych i 1 zgłoszenia patentowego. Zainteresowania: głównie alternatywne źródła energii.