

## **Technologia produkcji biogazu**

### **Energia z biogazu i biomasy - część II**

Zagadnienia:

- czym jest biomasa i biogaz?
- jak powstaje, jak się spala?
- jakie daje korzyści?
- jakie są wady i zalety,?
- czy jest to alternatywa dla klasycznych surowców energetycznych?
- czy może mieć udział w zapewnieniu, częściowo bezpieczeństwa energetycznego?

**dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP-PIB**  
**wałowski.g@gmail.com**

**[g.walowski@itp.edu.pl](mailto:g.walowski@itp.edu.pl)**

W bloku tematycznym – cz. III, przedstawiono :

- Proces faz produkcji biogazu;
- Warianty technologiczne budowy biogazowni rolniczej;
- Eksperymentalną ocenę hydrodynamiki przepływu wielofazowego w reaktorze monosubstratowym ze złożem adhezyjnym przy zastosowaniu immobilizacji mikroorganizmów metanogennych;
- Wykonanie badań doświadczalnych w zakresie oceny pomiarów ilościowo-jakościowych przepływu biogazu;
- Przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników dla produkcji biogazu.



✓ chemicznym (makromolekularna natura)

- o składzie % obj.

(50÷75)  $\text{CH}_4$

(20÷45)  $\text{CO}_2$

(0÷2,1)  $\text{CO}$

(20÷20.000)ppm  $\text{H}_2\text{S}$

<1  $\text{H}_2$

<2  $\text{N}_2$

✓ fizycznym (heterogeniczna natura)

- palna mieszanina gazów, powstała w procesie fermentacji anaerobowej biomasy

**Rys. 1.** Płomienie gazu

dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP.-PIB

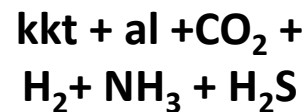
walowski.g@gr



## I. Etap - HYDROLIZA



## II. Etap - KWASOGENEZA



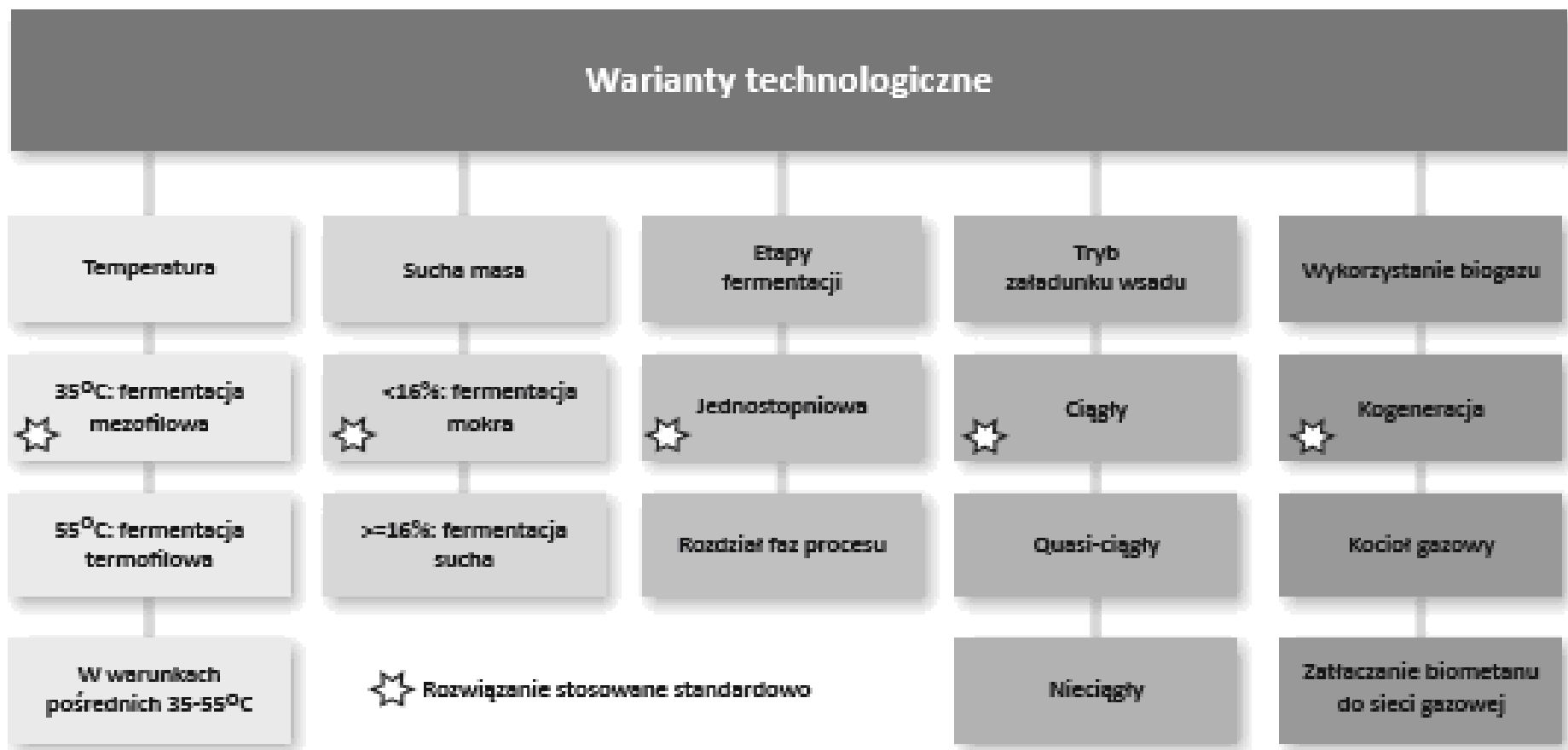
## III. Etap – ACETOGENEZA

## IV. Etap – METANOGENEZA



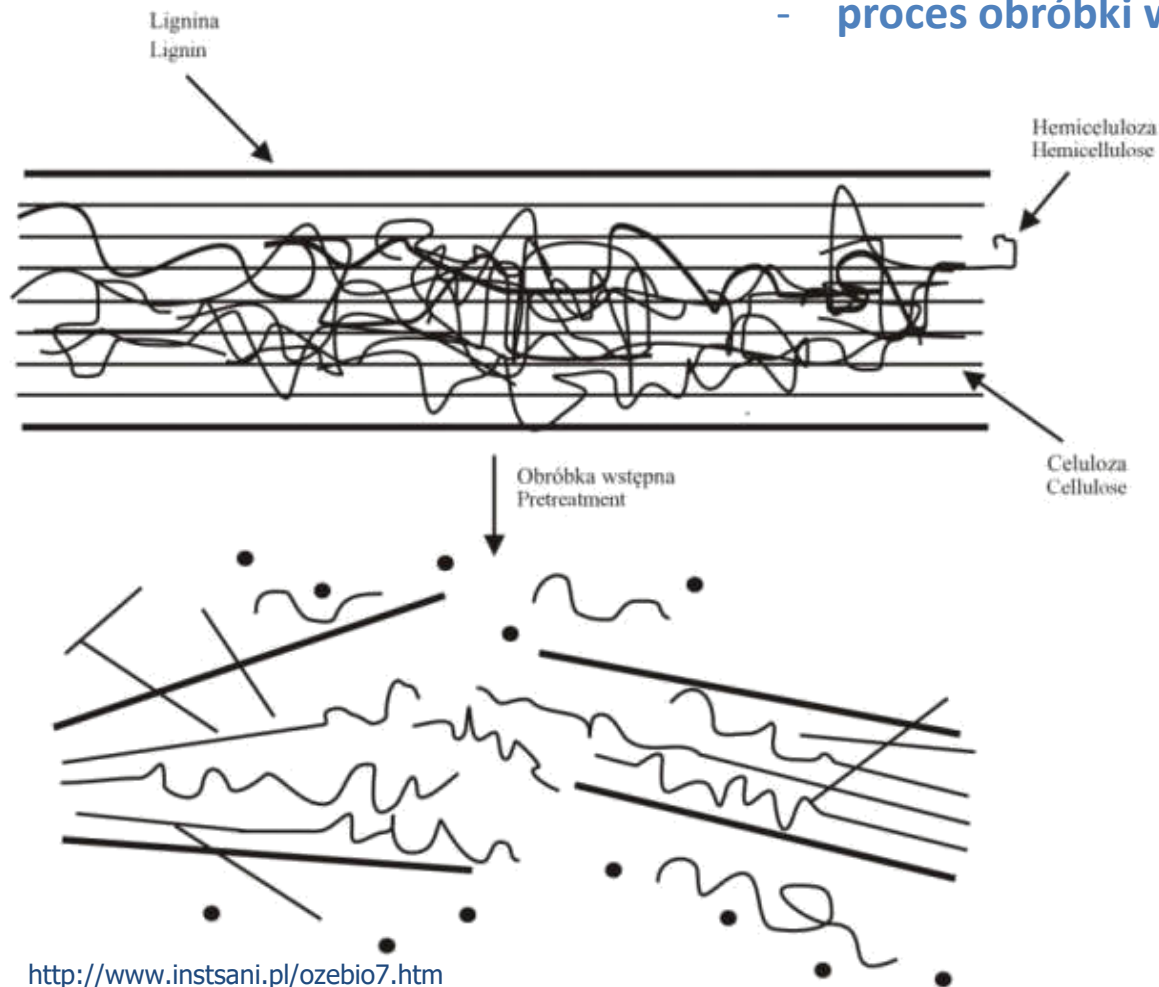
Rys. 2. Etapy produkcji biogazu

Legenda: w – węglowodany, t – tłuszcze, b – białka, cp – cukry proste, a – aminokwasy, kt – kwasy tłuszczowe,  $H_2O$  – woda, kkt -krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe, al – alkohole,  $CO_2$  – dwutlenek węgla;  $H_2$  – wodór,  $NH_3$  – amoniak, o-octany,  $CH_4$  – metan,  $H_2S$  – siarkowodór,  $N_2$  - azot



**Rys. 3. Warianty technologiczne budowy biogazowni rolniczej;** wg A. Oniszk-Popławska, M. Matyka, Raport końcowy z badania dziedzinowego. „Kompleksowa ocena uwarunkowań w zakresie produkcji biogazu w województwie lubelskim”. Regionalny System Zarządzania Zmianą Gospodarczą, 2012 r.

### - proces obróbki wstępnej biomasy

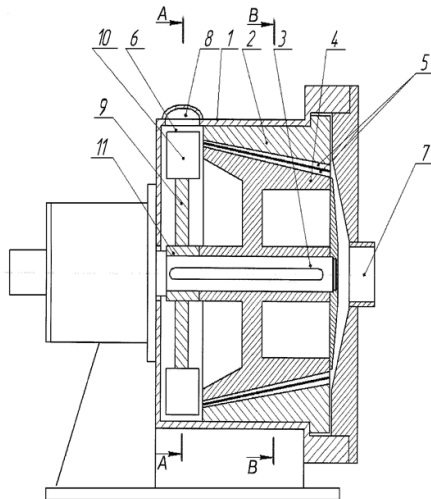


**Rys. 4. Maceracja biomasy**

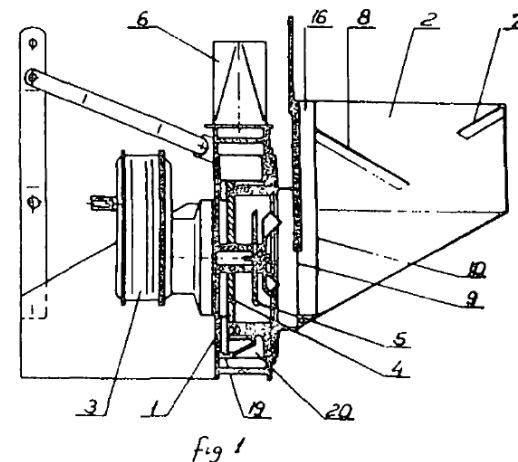
Beztlenowy rozkład biomasy lignocelulozowej na etapie wstępnej hydrolizy fazy fermentacji metanowej, wpływa na lepszą wydajność procesu produkcji biogazu.

Intensyfikację tej fazy można uzyskać w wyniku wstępnego przygotowania substratu, którego celem jest rozdrobnienie fazy stałej oraz uszkodzenie zwartej struktury lignocelulozy.

Ponadto na etapie obróbki wstępnej biomasy dąży się do zwiększenia powierzchni kontaktu surowca z enzymami oraz zmniejszenia stopnia krystalizacji i polimeryzacji celulozy.

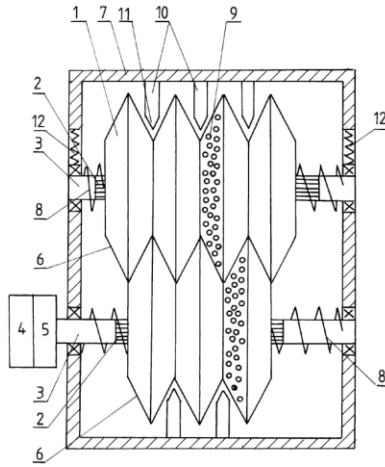


a) Młyn koloidalny

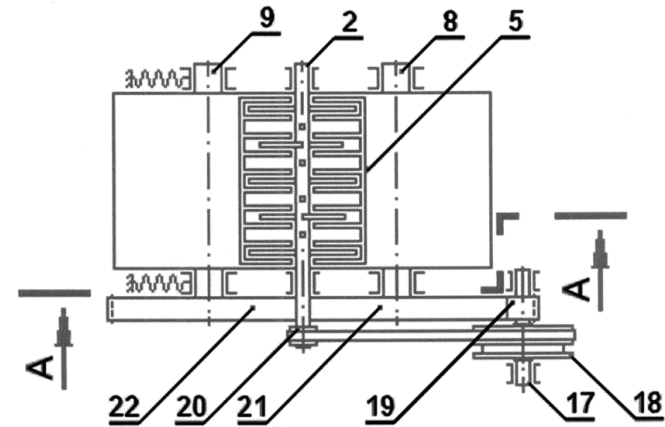


b) Rozdrabniacz

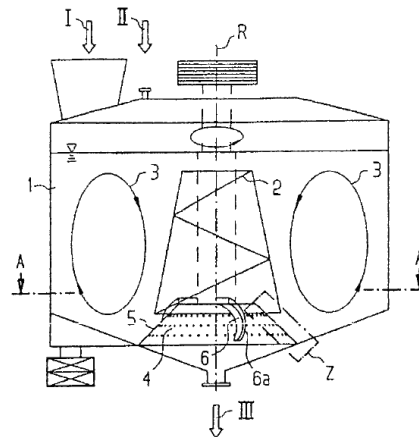
**Rys. 5. Wybrane urządzenia do wstępnej obróbki biomasy wg zgłoszeń patentowych – cz 1:**



c) Zespół zgniatająco-ścierający maceratora dezintegrator

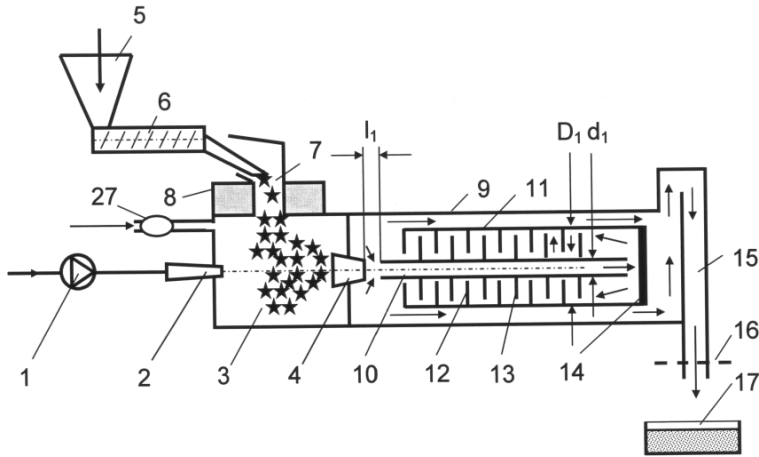


d) Rozdrabniająco-macerujący

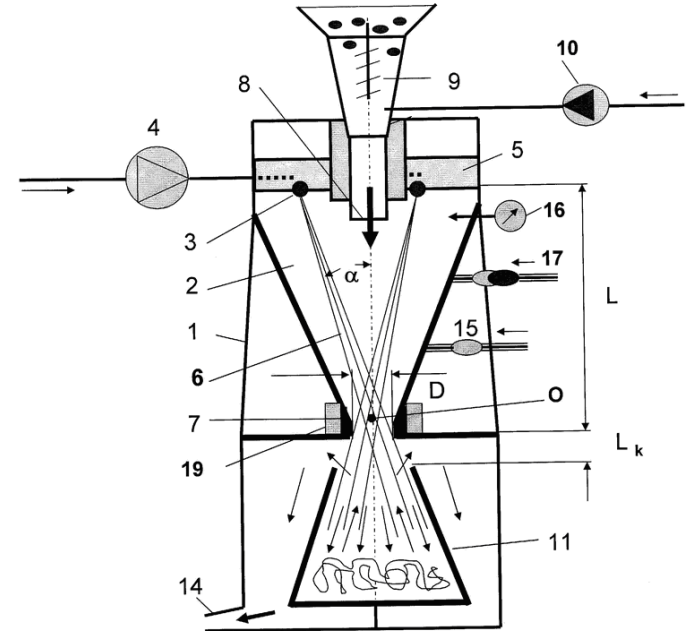


e) Maszyna do rozcierania

**Rys. 5. Wybrane urządzenia do wstępnej obróbki biomasy wg zgłoszeń patentowych – cz. 2:**

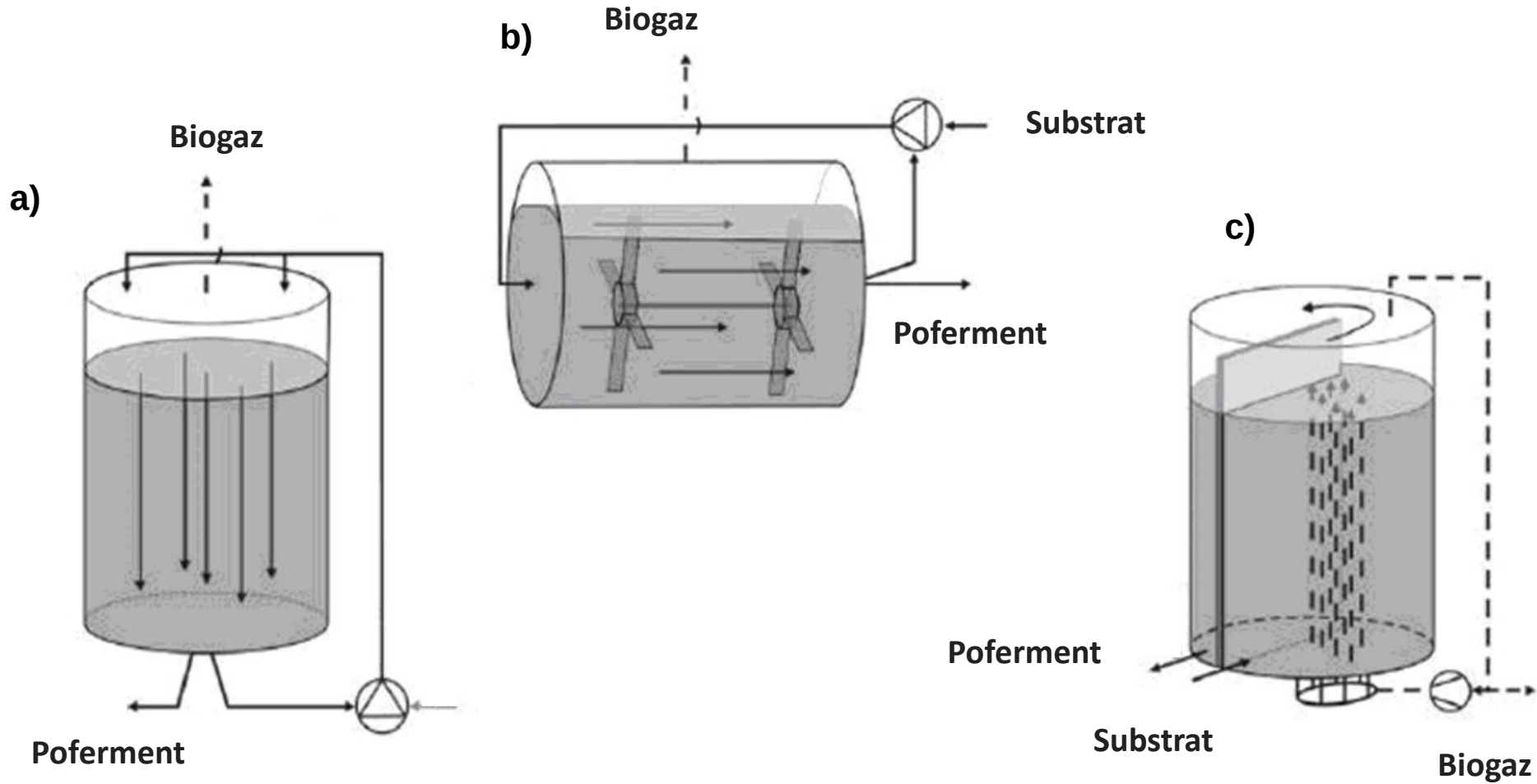


f) Mikronizator



g) Mikronizator iniektorowy

**Rys. 5. Wybrane urządzenia do wstępnej obróbki biomasy wg zgłoszeń patentowych – cz. 3:  
f), g)**



**Rys. 6. Przykładowe techniki fermentacji beztlenowej: a) Dranco, b) Kompogas, c) Valorga;**  
 [A. Jędrzak, Przegląd Komunalny (6) 2001]

### 3.1. Technika produkcji biogazu w fermentatorze przy zastosowaniu immobilizacji mikroorganizmów

Immobilizacja z łac. „*immobilia*”, czyli nieruchomy, polega na częściowym lub całkowitym ograniczeniu swobodnego ruchu drobnoustrojów (mikroorganizmów) przy jednoczesnym zapewnieniu im dostępu do składników odżywczych i odpływu produktów przemiany (gaz i poferment).

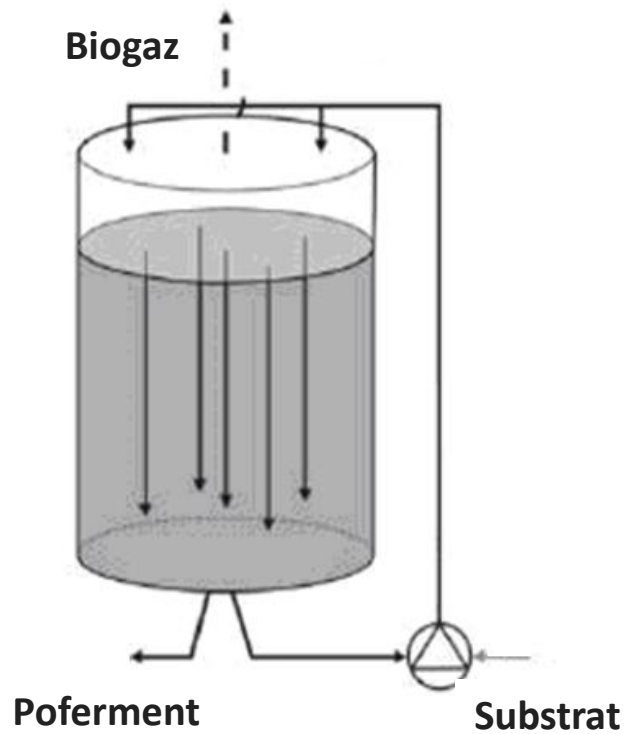


Tabela 1. Unieruchamianie drobnoustrojów [opracowanie własne]

| Metody   | - na powierzchni nośnika | - wewnątrz nośnika                                   | - bez nośnika                                     |
|----------|--------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Techniki | adsorpcja (wiązanie)     | inkluzja (pułapkowanie)                              | sieciowanie przestrzenne                          |
|          | adhezja (przyleganie)    | kapsułowanie:                                        | flokulacja:                                       |
|          | wiązania kowalencyjne    | (i) nano i mikro (kapsułka)<br>(ii) makro (kapilara) | (i) indukowana,<br>(ii) naturalna (samoagregacja) |

Rys. 7. Przykładowa technika fermentacji beztlenowej – Dranco

[Jędrcaz, 2001; Wałowski i in. 2019]:

## 3.2. Intensyfikacja produkcji biogazu rolniczego – stan techniki

**Tabela 2. Metody intensyfikacji produkcji biogazu – cz. 1** [opracowanie własne].

|                 | Metody                                                                                                                                                 |                                                                         |                                                                                                      |                                                                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | mechaniczne                                                                                                                                            | chemiczne                                                               | termiczne                                                                                            | magnetyczne                                                                                                        |
| <b>Obiekt:</b>  | <b><i>Biogazownia współpracująca z komunalną oczyszczalnią ścieków</i></b>                                                                             |                                                                         |                                                                                                      |                                                                                                                    |
| <b>Technika</b> | - obrototy reaktora membranowego [Rogut i in. 1999];                                                                                                   | - rozdeszczowanie octan sodu [Pawłowska i in. 2008];                    | - instalacji z rur plastikowych z ciepłą wodą pod wysypiskiem, [Maślankiewicz i Wojciechowski 2012]; | - oddziaływani a na osad stałego pola magnetyczne go, wytworzoneg o przez megnetyzery monobieguno we [Nogal 2007]; |
|                 | - wprowadzania osadów ściekowych do wysokości 1 m poniżej powierzchni, a następnie przykrywa się warstwą odpadów komunalnych. [Pleczyński i in. 2008]; | dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP.-<br>PIB walowski.g@gmail.com |                                                                                                      | - lanca magnetyczna [Nogal 2015];                                                                                  |

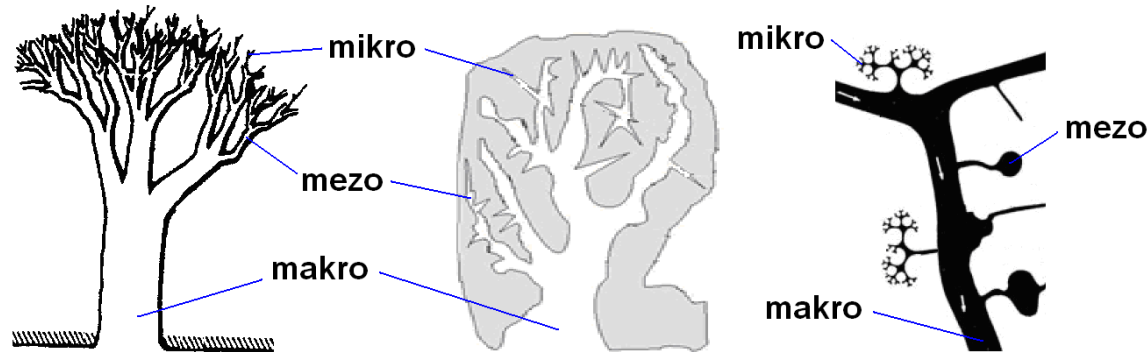
## 3.2. Intensyfikacja produkcji biogazu rolniczego – stan techniki

**Tabela 2. Metody intensyfikacji produkcji biogazu – cz. 2** [opracowanie własne].

|                 | Metody                                                                                                                                                                                      |                                                                                       |           |             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|
|                 | mechaniczne                                                                                                                                                                                 | chemiczne                                                                             | termiczne | magnetyczne |
| <b>Obiekt:</b>  | <b>biogazownia rolnicza</b>                                                                                                                                                                 |                                                                                       |           |             |
| <b>Technika</b> | - prowadzenie fazy hydrolizy w oddzielnym zbiorniku i oddzielenie jej od fazy fermentacji metanowej z jednoczesną recyrkulacją części zawartości fermentatora do zbiornika hydrolitycznego; | - dobór kosubstratów i ich proporcji;                                                 |           |             |
|                 |                                                                                                                                                                                             | - dodawanie mikroelementów i substancji porowatych dla rozwój bakterii;               |           |             |
|                 |                                                                                                                                                                                             | - dodawanie substancji inokulujących zawierających wyselekcjonowane szczepy bakterii; |           |             |
|                 |                                                                                                                                                                                             | - dezintegracja chemiczna lub enzymatyczna;                                           |           |             |

### 3.3. Charakterystyka źróź porowatych

- **Zdolność transportująco-magazynowa** płynów wskutek działania sił zewnętrznych i wewnętrznych



Rys. 8. Fraktalny przepływ i funkcje jego struktury drzewiastej:

a) transportująca [Simons, 1995]; b) magazynująca [Niezgoda i in., 2012]; c) transportująco-magazynująca [Fitzner, 1993]

W odniesieniu do źróź szkieletowych, istotny wpływ na warunki przepływu gazu ma **porowatość złoź** wynikająca z kształtu kanalików i kapilar. Przykładowe modele o kształcie wzajemnych powiązań między kapilarami wg założeń autorów:

#### 1) modele kapilar kołowo-symetrycznych o jednorodnym kształcie – Tabela 3:

| Autor                      | Kształt kapilary                | Schemat |
|----------------------------|---------------------------------|---------|
| Burdine<br>[Burdine, 1953] | cylindryczna o stałym promieniu |         |

dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP.-

PIB\_walowski.g@gmail.com

**Symbole (wykaz ważniejszych oznaczeń):**  $L$  - długość, m;  $r$  - promień, m;

### 3.3. Charakterystyka złóż porowatych

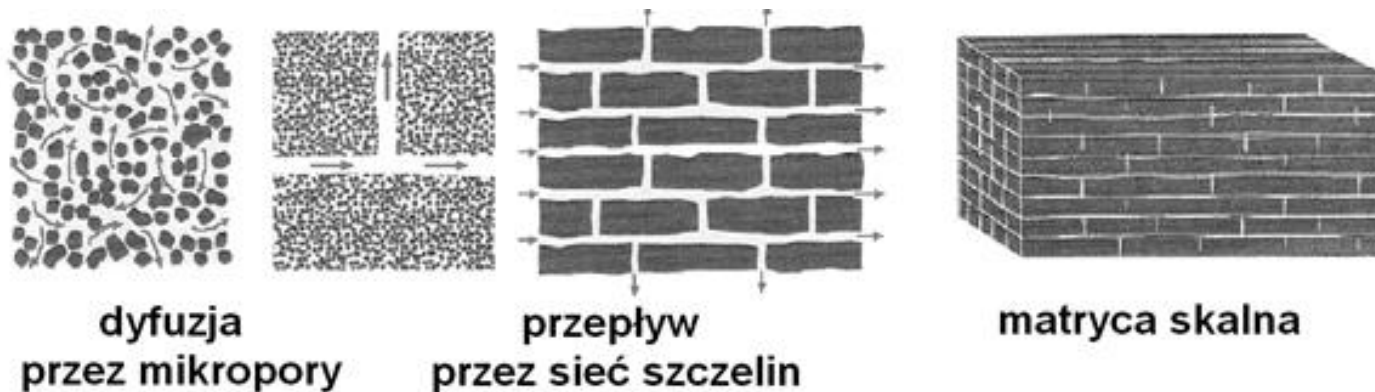
Przykładowe modele o kształcie wzajemnych powiązań między kapilarami wg założeń autorów:

#### 2) model strukturalny jednokrotny – Tabela 4:

| Autor                                                         | Kształt struktury           | Schemat |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|
| <b>Aksielrud i Altszuler</b><br>[Aksielrud i Altszuler, 1987] | kapilarny materiał porowaty |         |

Symbole (wykaz ważniejszych oznaczeń):  $L$  - długość, m;  $r$  - promień, m;

#### 3) modele struktur wielokrotnych, determinujące warunki hydrodynamiczne, w stosunkowo długim okresie czasu (na przestrzeni lat).



Rys. 9. Forma strukturalna i modele ruchu gazu w ośrodku szczelinowo-porowatym [Hagoort, 1988]

### 3.4. Podsumowanie przeglądu literatury

W wyniku analizy przeglądu literatury dotyczącej intensyfikacji produkcji biogazu rolniczego wyprodukowanego w procesie fermentacji beztlenowej stwierdzono, że:

- 1) Techniczne aspekty determinują warianty technologiczne wytwarzania biogazu ;
- 2) W zakresie oceny praktycznej dokonano opisu metod i technik stosowanych w intensyfikacji produkcji biogazu bazujących na biogazowniach współpracujących z komunalnymi oczyszczalniami ścieków - nieliczne natomiast metody odnoszą się do biogazowni rolniczych;
- 4) Kluczowym zagadnieniem związanym z rozwojem sektora biogazowego staje się poszukiwanie nowych i doskonalszych technik umożliwiających intensyfikację procesu produkcji biogazu.
- 5) Metody i techniki stosowane w immobilizacji mikroorganizmów metanogennych, nie wskazują jednoznacznie, że rozpoznane jest zagadnienie zaadoptowania mikroorganizmów do produkcji gazu przy użyciu materiałów porowatych oraz chropowatych uwzględniające kryteria hydrodynamiczne.

a)



#### 4. Biogazownia

- instalacja pilotażowa



**Substrat (gnojowica świńska) :**

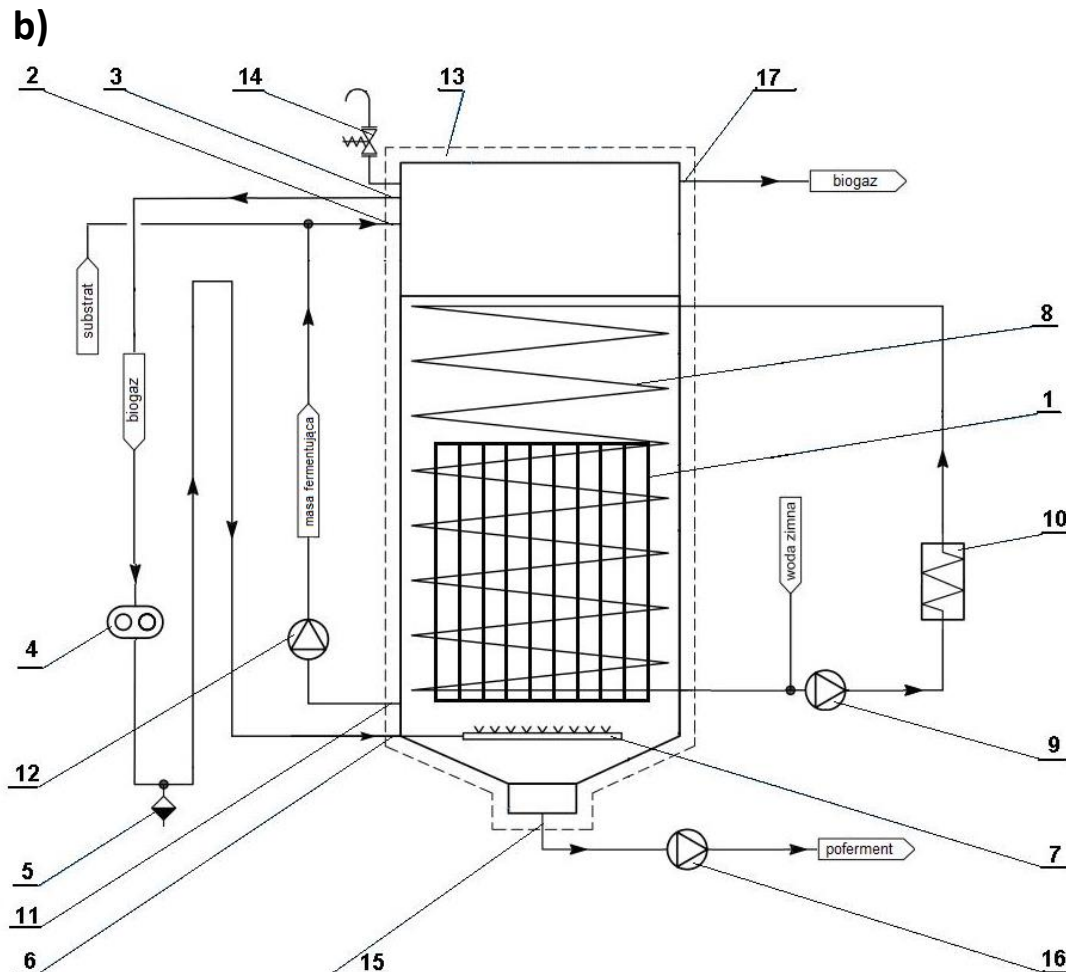
- 1 tucznik produkuje 4,5 litra/24h
- w cyklu 90 dniowym (odchowany 1 tucznik) produkuje 0,4 m<sup>3</sup>
- w cyklu rocznym (4 x 90 dni) 3.500 tuczników produkuje 1400 m<sup>3</sup>

**Rys. 10. Składowe zrównoważone systemu gospodarowania i wytwarzania energii dla mobilnej pilotażowej biogazowni kontenerowej: a) producent substratu, b) model konwersji.**

Oznaczenia:

- 1 – rura,
- 2 – króciec,
- 3 – króciec wylotowy biogazu,
- 4 – dmuchawa,
- 5 – zawór odwadniający biogaz,
- 6 – króciec wylotowy biogazu,
- 7 – barbotka,
- 8 – spirala grzewcza,
- 9 – pompa wody,
- 10 – wymiennik ciepła,
- 11 – króciec wylotowy masy fermentującej,
- 12 – pompa masy fermentującej,
- 13 – izolacja cieplna,
- 14 – zawór bezpieczeństwa,
- 15 – główny króciec wylotowy pofermentu,
- 16 – pompa pofermentu,
- 17 – króciec wylotowy biogazu.

### Układ pomiarowy (P.424291)



Rys. 11. Fragment instalacji - fermentator [archiwum ZOZE]: a) widok, b) schemat.

dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP-  
PIB: wałowski.g@gmail.com

- Instalacja pilotażowa

## Wg zgłoszenia (P.424291)

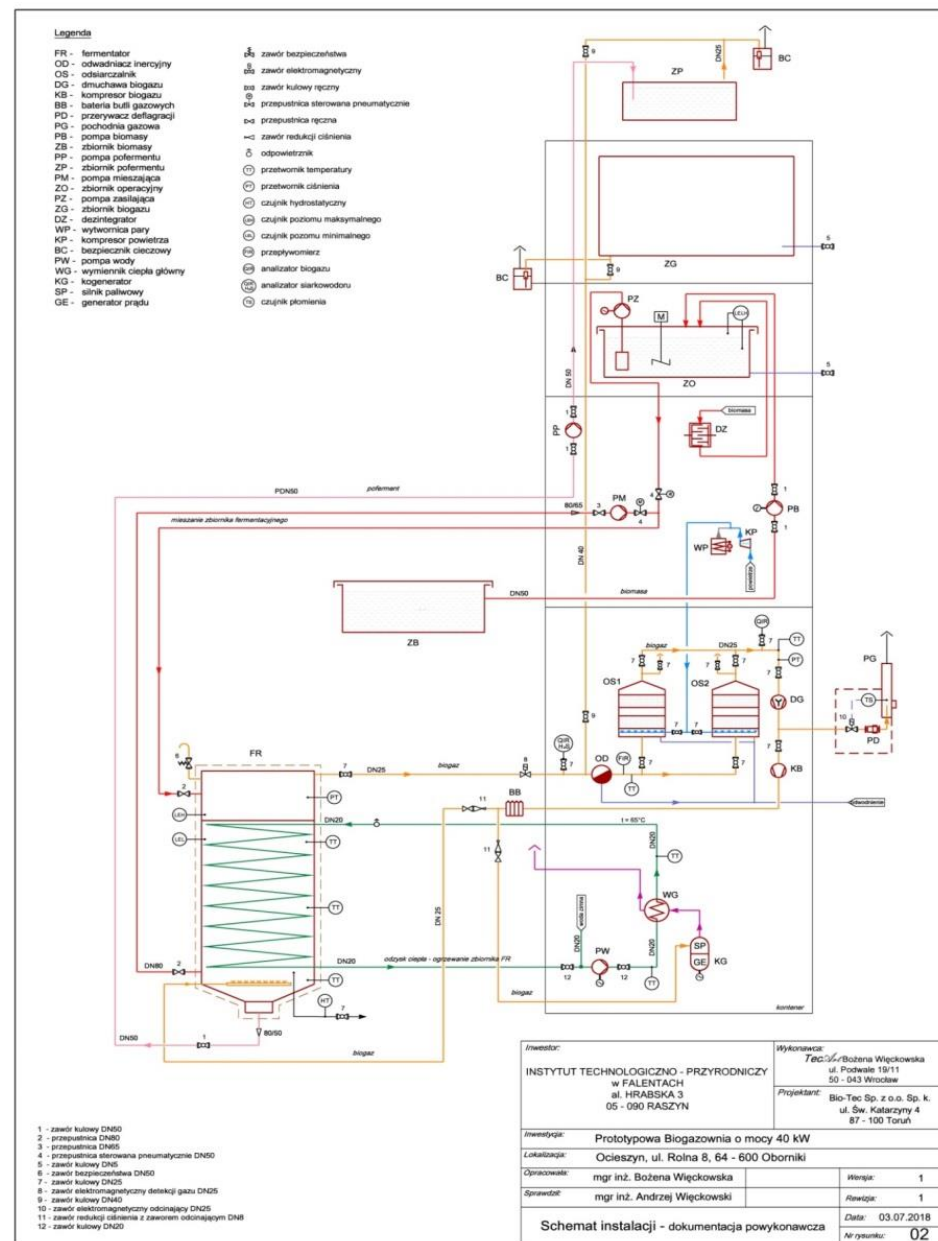
a)



**Rys. 12. Instalacja: a) widok, b) schemat.**

dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP.-PIB

**b)**



walowski.g@gmail.com

### 4.3. Fermentator - reaktor monosubstratowy

Cykl procesu dla substratu:

-mieszanie 4 razy po 2 min. co 6 godz.

-wymiana masy  $1 \text{ m}^3/48 \text{ godz.}$



b)



d)



**Rys. 13. Układ mieszania dla substratu w reaktorze**  
- widok: a) elementy konstrukcyjne do ssania, b) fragment dyszy ssącej,  
c) i d) tłoczenie czynnika inertnego podczas próby szczelności.

# 4.4. Fermentator - złoże adhezyjne

## Wypełnienie fermentatora:

- tzw. „kosz” z rurami typu A PVC-U S4 UD
- chropowatość po piaskowaniu wynosi  $80\text{ }\mu\text{m}$



a)



b)



d)



Rys. 14. Złoże adhezyjne, szkieletowe - widok:

a) wykonane z pionowych rur, b) fragment złoża po piaskowaniu,

c) usytuowane w reaktorze przed próbą ciśnienia, d) zalane wodą dla prób ciśnienia

#### 4.4. Fermentator - złożo adhezyjne

Rura (1 szt. to pozorna elementarna jednostka złoża) :

- wysokość  $h_r=2030$  mm
- średnica  $d_r=160$  mm
- objętość rury (pierścienia)  $V_r=0,00634$  m<sup>3</sup>

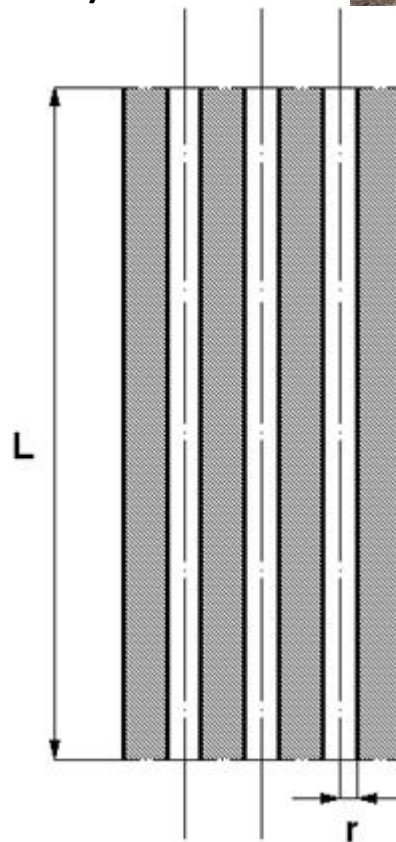
Złożo szkieletowe (72 szt. rur):

- wysokość  $h_z=2030$  mm
- średnica  $d_z=1620$  mm
- objętość złoża  $V_z=0,4564$  m<sup>3</sup>
- porowatość złoża  $\epsilon=10,91\%$ ,  $\epsilon \approx 0,11$
- pole przekroju  $A_z=0,2266$  m<sup>2</sup>

a)



b)



Rys. 15. Złożo szkieletowe - widok:

a) wykonane z pionowych rur, b) schemat modelu strukturalnego materiału porowatego

## 4.5. Fermentator

### - urządzenia pomiarowe

a)



b)



c)



d)



**Rys. 16. Zainstalowane urządzenia pomiarowe dla fermentatora - widok: a) ciśnieniomierz biogazu, b) kamertony do pomiaru poziomu wsadu, c) termometry (ściana), d) termometr (dno).**

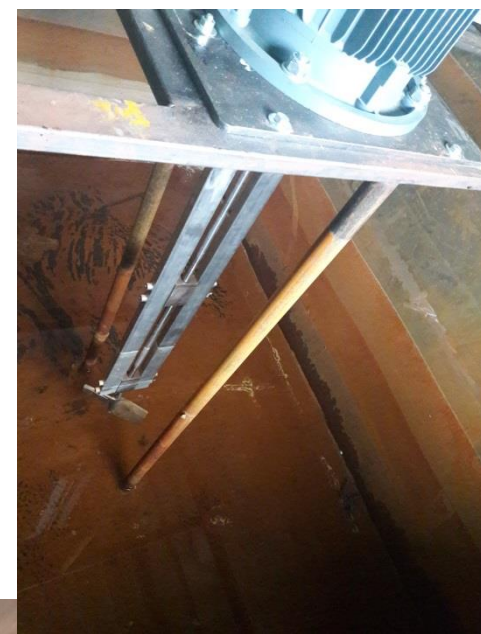
## 4.6. Biogazownia

- „ścieżka gazowa”

a)



c)



d)



b)

**Rys. 17. Elementy instalacji: a) elastyczny zbiornik biogazu, b) układ pomp, c) zbiornik operacyjny z napędem mieszającym, d) mieszadło.**

## 4.7. Biogazownia - kogeneracja

a)



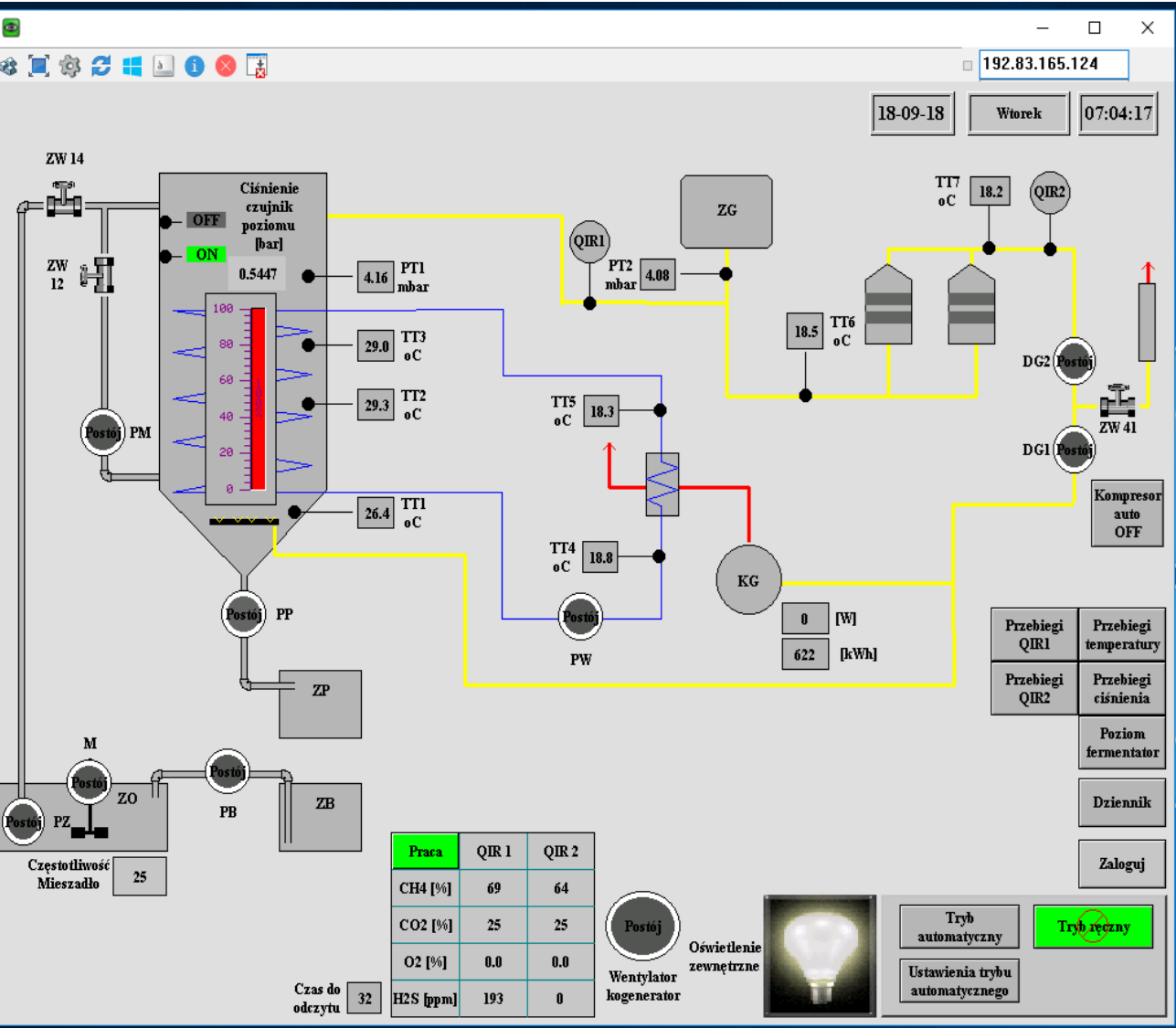
b)



**Rys. 18. Elementy instalacji: a) fragment „ścieżki biogazowej”, b) kogenerator.**

4.8. Biogazownia  
- układ sterowania

a)



b)



Rys. 19. Elementy instalacji -  
układ sterowania biogazowni:  
a) plansza synoptyczna,  
b) sterownia.

4.9. Biogazownia

- proces technologiczny

Inoculacja:

- objętość startowa 10 m<sup>3</sup>
- pH 8

c)



a)



b)



Rys. 20. Rozruch (10 dni) i produkcja biogazu - widok: a) inoculacja, b) mieszanie mechaniczne, c) zbiornik surowego biogazu, d) oczyszczony na rudzie darniowej biogaz sprężony do 100 bar.

## 5. Metody i techniki odsiarczania biogazu rolniczego

- Zawartość poszczególnych składników biogazu rolniczego nie jest stała, lecz zależy od specyfiki realizowanego procesu technologicznego oraz rodzaju materiału wsadowego.
- Szczególne znaczenie ma zawartość metanu ( $\text{CH}_4$ ) w biogazie, która decyduje o wartości opałowej tego paliwa. Istotnym parametrem jest również stężenie siarkowodoru ( $\text{H}_2\text{S}$ ), które stanowi zanieczyszczenie biogazu i utrudnia jego wykorzystanie.

## 5.1. Metody i techniki odsiarczania biogazu rolniczego

**Tabela 5. Metody odsiarczania biogazu – cz.1 [opracowanie własne].**

| Metoda   | Proces lub technika    | Zastosowanie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Zakres wydajności odsiarczania biogazu,                   |
|----------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Fizyczna | Absorpcja (mokra)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- płuczka wodna, wykorzystuje się różnice rozpuszczalności <math>\text{CO}_2</math> i <math>\text{CH}_4</math> w rozpuszczalnikach polarnych;</li> <li>- absorbent:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) metanol (Rectisol),</li> <li>b) eter dimetylowy polietylenoglikolu (Selexol, Genosorb),</li> <li>c) węglan propylenowy (Fluor),</li> <li>d) sulfolan (Sulfinol).</li> </ul> </li> </ul> | do (94÷96) % [PISKOWSKA-WASIAK 2014; POMYKAŁA, ŁYKO 2013] |
|          | Adsorpcja (sucha)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- adsorbent:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) węglowy (węgiel aktywny),</li> <li>b) mineralny,</li> <li>c) mineralno-węglowy.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                         | do 95% [CEBULA 2012; ŻARCZYŃSKI I IN. 2014]               |
|          | Adsorpcja (mokra)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- rozpuszczanie <math>\text{H}_2\text{S}</math> w wodzie lub rozpuszczalnikach organicznych:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Genosorb,</li> <li>b) Rectisol,</li> <li>c) Ifpex.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                      | > 96% [PISKOWSKA-WASIAK, 2014; POMYKAŁA, ŁYKO 2013]       |
|          | Separacja kriogeniczna | - bardzo niskie temperatury do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ i wysokie ciśnienie ok. 40 bar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | do 99% [BIERNAT, SAMSON-BRĘK 2011]                        |

## 5.1. Metody i techniki odsiarczania biogazu rolniczego

Tabela 5. Metody odsiarczania biogazu – cz. 2 [opracowanie własne].

| Metoda      | Proces lub technika                 | Zastosowanie                                                                              | Zakres wydajności odsiarczania biogazu,                                                                                           |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chemiczna   | Absorpcja                           | - związki żelaza:<br>a) ruda darniowa (porowata skała osadowa).                           | do 90%<br>[KOCIOŁEK-BALAJEJDER, WILK 2011;<br>CEBULA 2012; GAJ, CYBULSKA-SZULC<br>2014; ŻARCZYŃSKI I IN. 2014; GAJ I<br>IN. 2008] |
|             | Membranowe (porowate lub dyfuzyjne) | - potencjał chemiczny roztworów lub mieszanin.                                            | do 99% [ŻARCZYŃSKI I IN. 2014;<br>COSOLI I IN. 2008]                                                                              |
|             | Adsorpcja (mokra)                   | - roztwór sody kaustycznej;<br>- wodny roztwór alkanoloamin;<br>- roztwór chlorku żelaza. | (95÷99) % [ALEKSANDROW,<br>STANISZEWSKA 2013; BARBUSIŃSKI<br>2006]                                                                |
| Biologiczna | Utlenianie                          | - dostarczanie powietrza do biogazu.                                                      | powyżej 95% [KOCIOŁEK-<br>BALAJEJDER, WILK 2011;<br>ŻARCZYŃSKI I IN. 2014]                                                        |
|             | Reakcja mikrobiologiczna            | - bakterie z rodziny Thiobacillus wytwarzające siarkę elementarną.                        | (80÷99) % [CEBULA, SOŁTYS 2012]                                                                                                   |

## 5.2. Metody i techniki odsiarczania biogazu rolniczego

**Tabela 6. Metody odsiarczania, szczególnie dla biogazu rolniczego z uwagi na przebieg procesu fermentacji [opracowanie własne].**

| Odsiarczanie | Przebieg procesu   | Zastosowanie                                                                                                                                                                                           | Zakres wydajności odsiarczania biogazu                                                  |
|--------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| chemiczne    | w fermentatorze    | - związki chemiczne, tj. chlorki żelaza III i II;<br>- wodorotlenek sodu;<br>- wodorotlenku żelaza [KUJAWSKI 2010].                                                                                    | (80÷99) % [CEBULA, SOŁTYS 2012]                                                         |
|              | poza fermentatorem | - ług (najczęściej wodorotlenek sodu) [GATTERMANN I IN. 2010].                                                                                                                                         | do 94% [KOCIOŁEK-BALAWIEDER, WILK 2011]                                                 |
| biologiczne  | w fermentatorze    | -w obecności tlenu (który doprowadzany jest do fermentatora poprzez wdmuchiwanie powietrza, np. przy pomocy niewielkiego kompresora) oraz bakterii <i>Sulfobacter oxydans</i> [GATTERMANN I IN. 2010]. | (80÷99) % [CEBULA, SOŁTYS 2012]                                                         |
|              | poza fermentatorem | - bioskrubery;<br>- biofiltry;<br>- biofiltry z warstwą nawadniającą.                                                                                                                                  | (70÷98) % [CEBULA 2009]<br>do 95% [BRUDNIAK I IN. 2013]<br>do 95% [BRUDNIAK I IN. 2013] |

### 5.3. Podsumowanie - odsiarczanie biogazu rolniczego

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych w zakresie odsiarczania biogazu rolniczego na przykładzie średniej dobowej produkcji biogazu rolniczego oraz składu jakościowego biogazu rolniczego wytwarzanego z gnojowicy świńskiej. Wyniki pomiarów wskazują na wyraźny wpływ odsiarczania biogazu surowego na potrzeby oceny przepływu biogazu autorską techniką adsorpcyjno-absorpcyjną w kontekście oczyszczania biogazu rolniczego.

Wykazano, że:

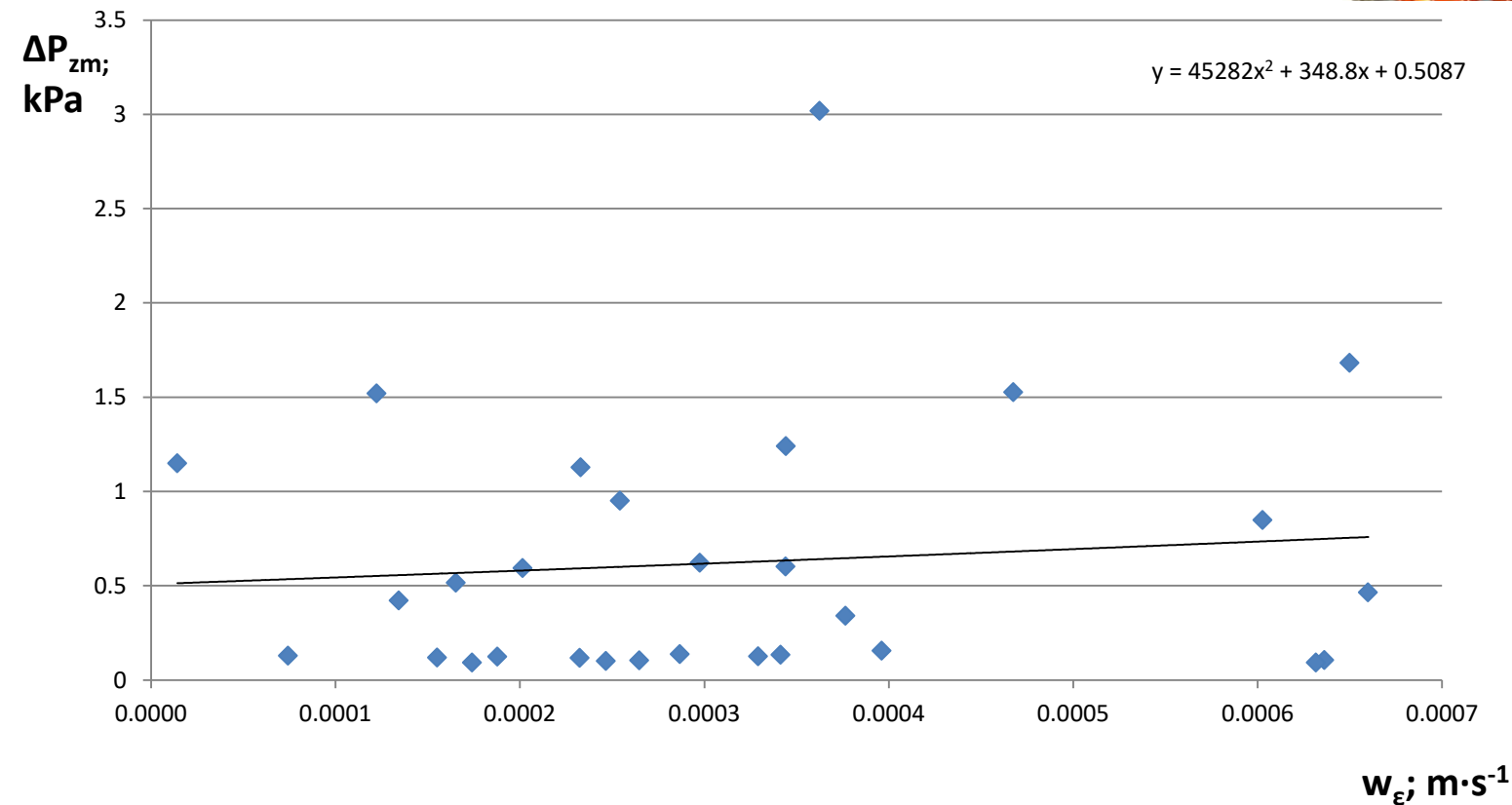
- 1) Zastosowana technika odsiarczania surowego biogazu rolniczego znacząco przyczynia się do oczyszczania oczyszczonego biogazu;
- 2) Sposób wykorzystania złoża ziarnistego w odsiarczaczach znacznie usprawnia proces odsiarczania biogazu surowego, w przypadku biogazu wysokokalorycznego w 100% odsiarczonego oraz w kogeneracji na energię elektryczną i ciepło;
- 3) Surowy biogaz może być łatwo i niezawodnie oczyszczany i produkowany w pobliżu budynków inwentarskich.

- Piskowska-Wasiak, J. 2014. Uzdatnianie biogazu do parametrów gazu wysokometanowego [Treatment of biogas to the parameters of high-methane gas]. *Nafta-Gaz*, 2,70, 94-105.
- Kociotek-Balawejder, E.; Wilk, Ł. 2011. Przegląd metod usuwania siarkowodoru z biogazu [Review of methods for removing hydrogen sulphide from biogas]. *Przemysł Chemiczny*, (3)90, 389-397.
- Cebula, J. 2012. Wybrane metody oczyszczania biogazu rolniczego i wysypiskowego [Selected methods of agricultural and landfill biogas treatment]. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice. ISBN 978-83-7335-983-3.
- Aleksandrow, S.; Staniszevska, M. 2013. Znaczenie odnawialnych źródeł energii w globalnej gospodarce oraz ich wpływ na rynek pracy [The importance of renewable energy sources in the global economy and their impact on the labor market]. *Acta Innovations*, 6, 41-45.
- Pomykała, R.; Łyko, P. 2013. Biogaz z odpadów biopaliwem dla transportu - bariery i perspektywy [Biogas from waste as biofuel for transport - barriers and prospects]. *Chemik*, 5, 454-457.
- Gaj, K.; Cybulska-Szulc, H. 2014. Time changeability model of the bog ore sorption ability. *Ecological Chemistry and Engineering S*, (1)21, 113-123.
- Żarczyński, A.; Rosiak, K.; Anielak, P.; Wolf, W. 2014. Praktyczne metody oczyszczania biogazu z siarkowodoru. Cz. 1. Zastosowanie sorbentów stałych [Practical methods of purifying biogas from hydrogen sulphide. Part. 1. Application of solid sorbents]. *Acta Innovations*, 12, 24-35; [http://www.proakademia.eu/gfx/baza\\_wiedzy/255/praktyczne\\_metody\\_oczyszczania\\_biogazu\\_z\\_siarkowodoru.pdf](http://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/255/praktyczne_metody_oczyszczania_biogazu_z_siarkowodoru.pdf).
- Biernat, K.; Samson-Bręk, I. 2011. Przegląd technologii oczyszczania biogazu do jakości gazu ziemnego [Review of biogas purification technology to natural gas quality]. *CHEMIK*, 65, 5, 435-444
- Gaj, K.; Cybulska-Szulc, H.; Knop, F.; Steininger, M. 2008. Examination of biogas hydrogen sulphide sorption on a layer of activated bog ore. *Environment Protection Engineering*, 4(34), 33-41.
- Cosoli, P.; Ferrone, M.; Pricl, S.; Fermeglia, M. Hydrogen sulphide removal from biogas by zeolite adsorption. Part I. GCMC molecular simulations, *Chemical Engineering Journal* **2008**, 145, 86-92.

- Barbusiński, K. 2006. Nadtlenki wapnia i magnezu – zastosowanie do celów komercyjnych i w ochronie środowiska [Calcium and magnesium peroxides - application for commercial purposes and in environmental protection]. Chemik, 9, 433-438.
- Cebula, J.; Sołtys, J. 2012. Usuwanie lotnych związków siarki z biogazu wytwarzanego w mikrobiogazowni rolniczej z wykorzystaniem sorbentu haloizytowego [Removal of volatile sulfur compounds from biogas produced in an agricultural micro biogas plant with the use of halloysite sorbent]. Bałtyckie Forum Biogazu, referat, wrzesień, <http://www.imp.gda.pl/BF2012/prezentacje/p254.pdf>
- Kujawski, O. 2010. Przegląd technologii produkcji biogazu (część trzecia) [Overview of biogas production technology (part three)]. Czysta Energia, nr 102.
- Gattermann, H.; Kaltschmitt, M.; Niebaum, A.; Schattauer, A.; Scholwin, F.; Weiland, P. 2010. Produkcja i wykorzystanie biogazu. Institut für Energetik und Umwelt GmbH, <http://www.ieo.pl/pl/aktualnosci/183-produkcjabiogazu.html>, 10.12.2014
- Cebula, J. 2009. Biogaz purification by sorption techniques. Architecture Civil Engineering Environment, 2, 95-103.
- Brudniak, A.; Dębowski, M.; Zieliński, M. 2013. Oczyszczanie i wzbogacanie biogazu w zawiesinie popiołowodnej [Purification and enrichment of biogas in ash-water suspension]. Inżynieria Ekologiczna, 32, 7-16.



## Rozkład punktów doświadczalnych

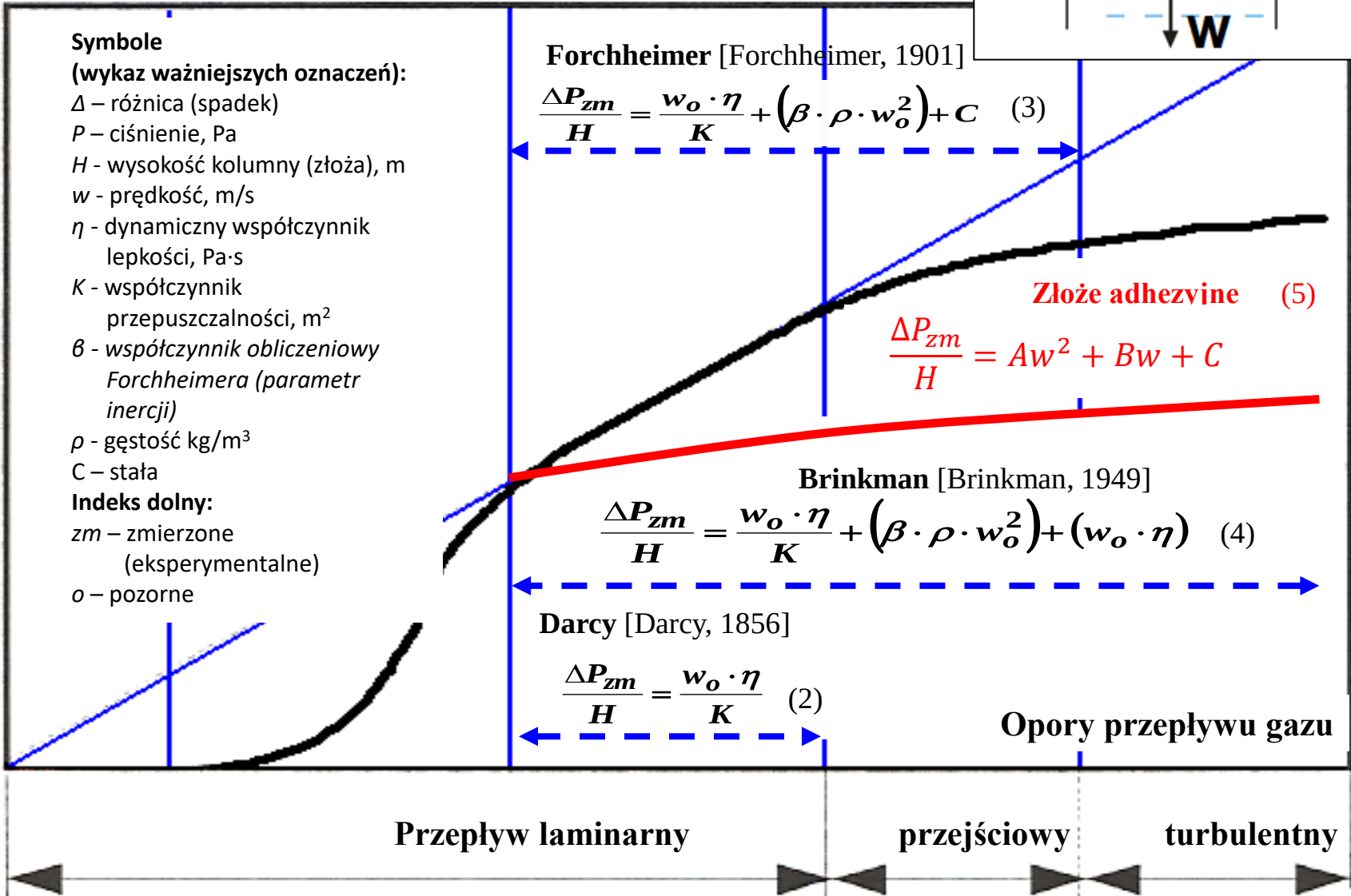


$$w_{\epsilon} = \frac{\dot{Q}_g}{A_{\epsilon}} \quad (1)$$

Rys. 21. Wpływ prędkości pozornej ( $w_{\epsilon}$ ) na opory przepływu ( $\Delta P$ ) biogazu dla złoża adhezyjnego [opracowanie własne]

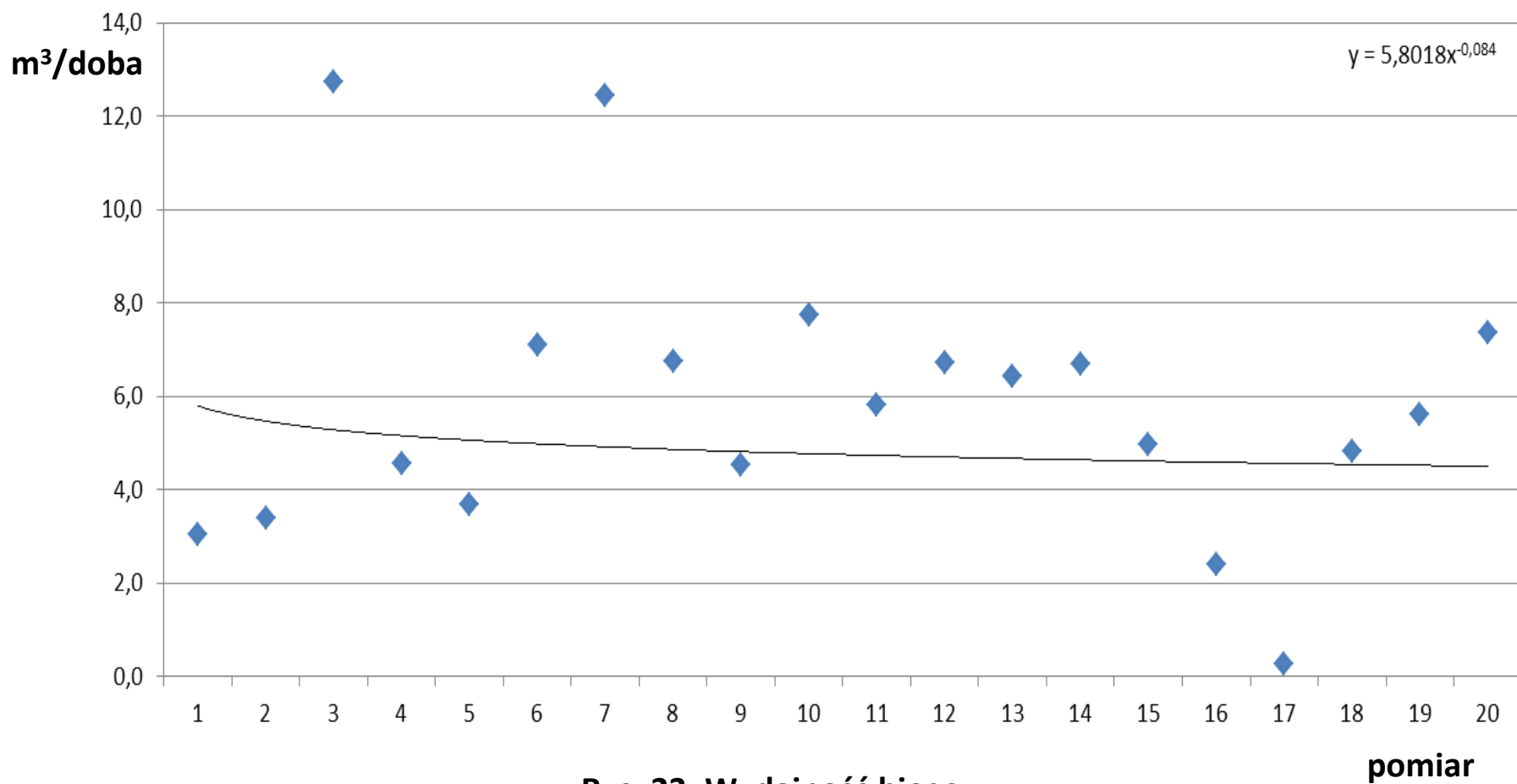
# 6.1. Interpretacja hydrodynamiki przepływu gazu w ujęciu matematycznym

Strumień gazu



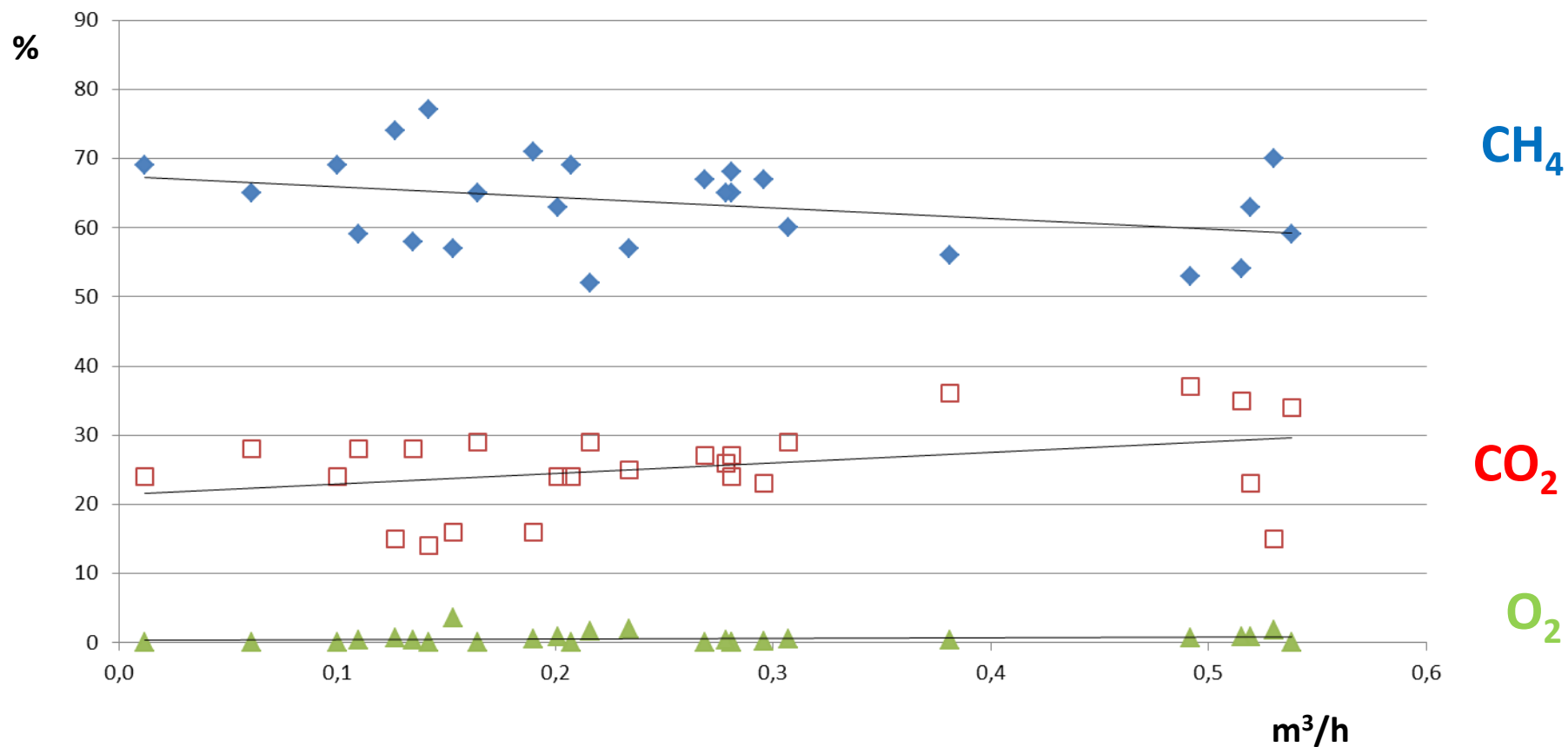
Rys. 12. Strumień gazu w funkcji oporów przepływu gazu w ośrodku ziarnistym [opracowanie własne]

## Rozkład punktów doświadczalnych



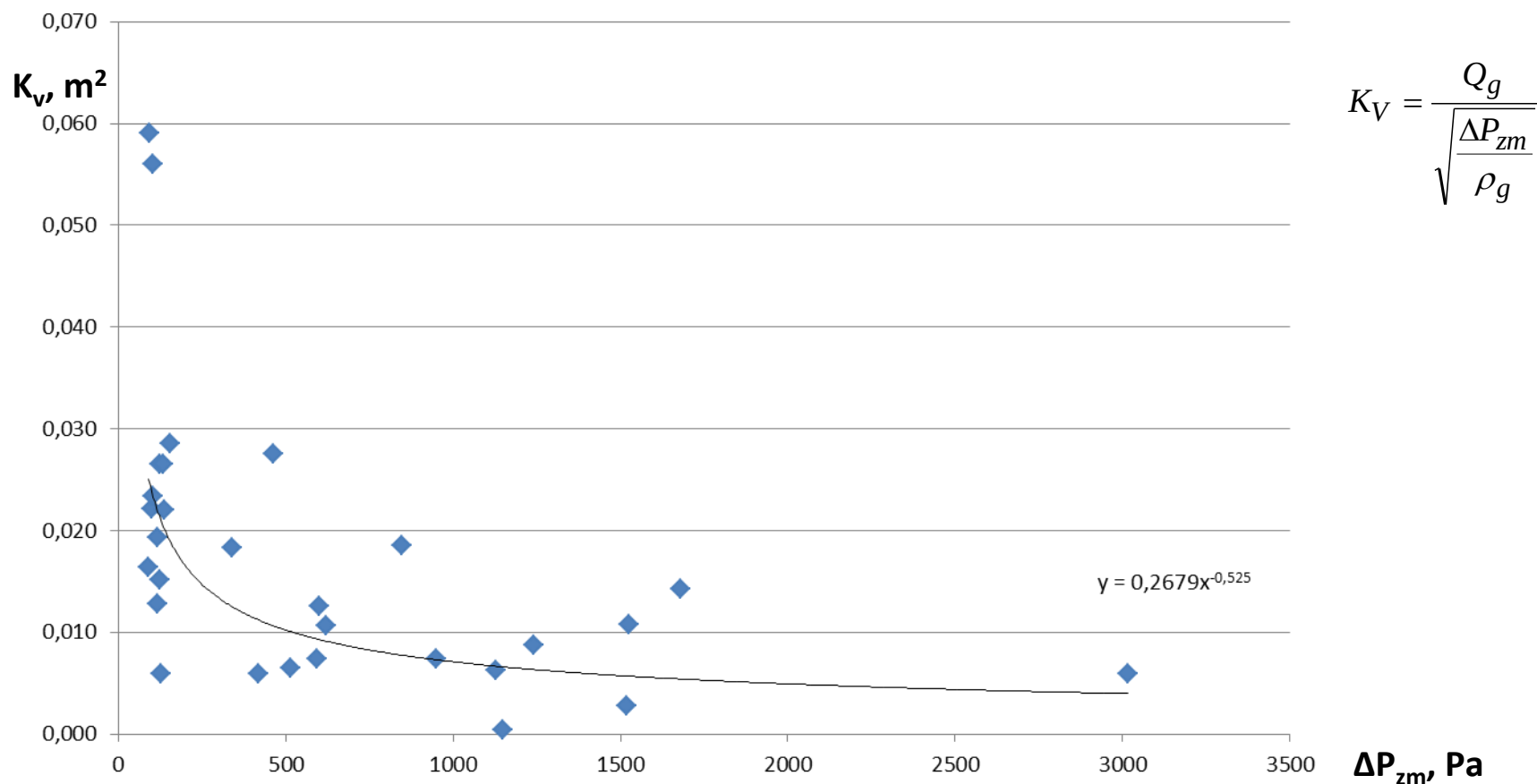
Rys. 23. Wydajność biogazu

## 6.2. Biogaz wyniki badań i ich analiza



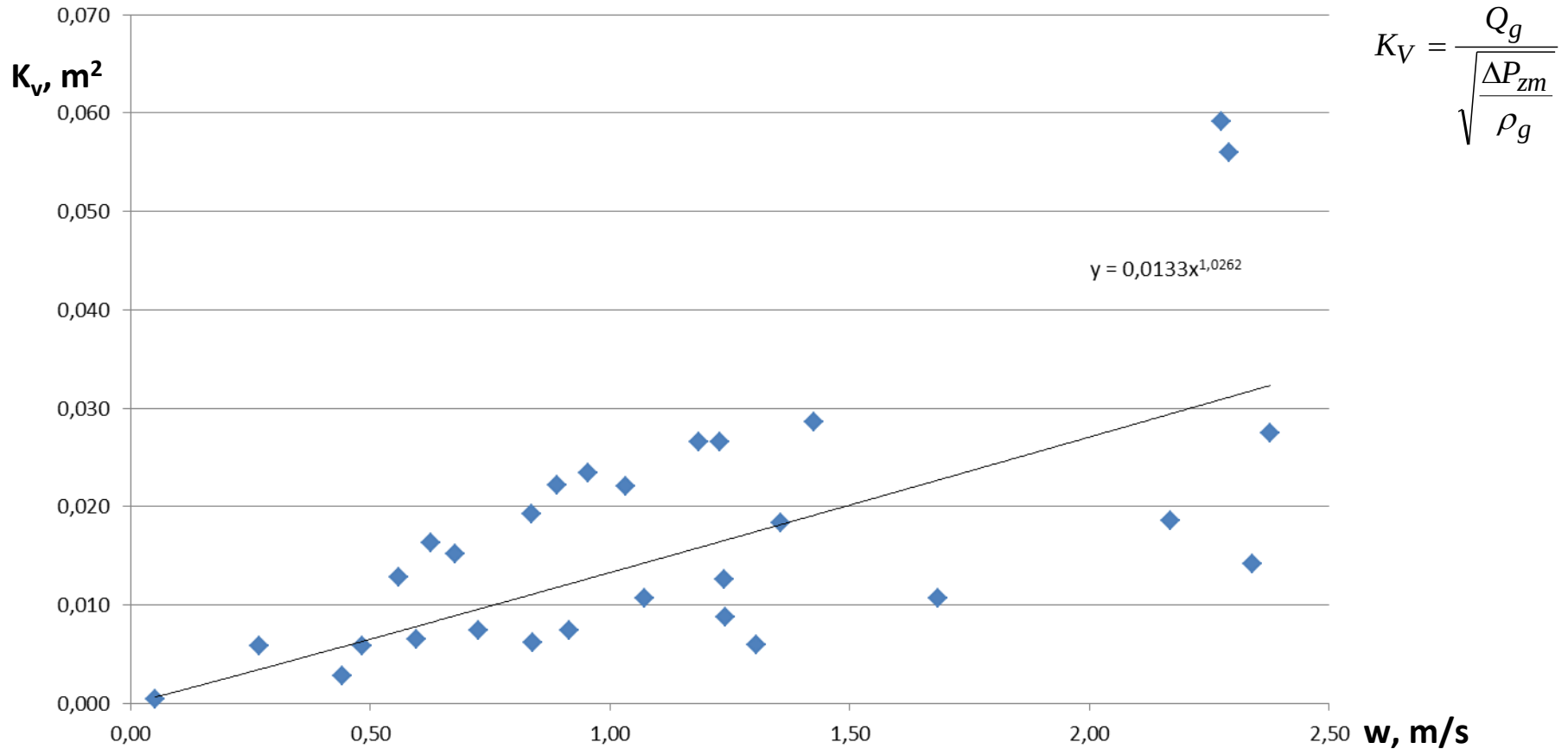
**Rys. 24. Wydajność biogazu w odniesieniu do składu biogazu**

## 6.2. Biogaz wyniki badań i ich analiza



**Rys. 25. Wpływ oporów przepływu na współczynnik gazoprzepuszczalności złoża**

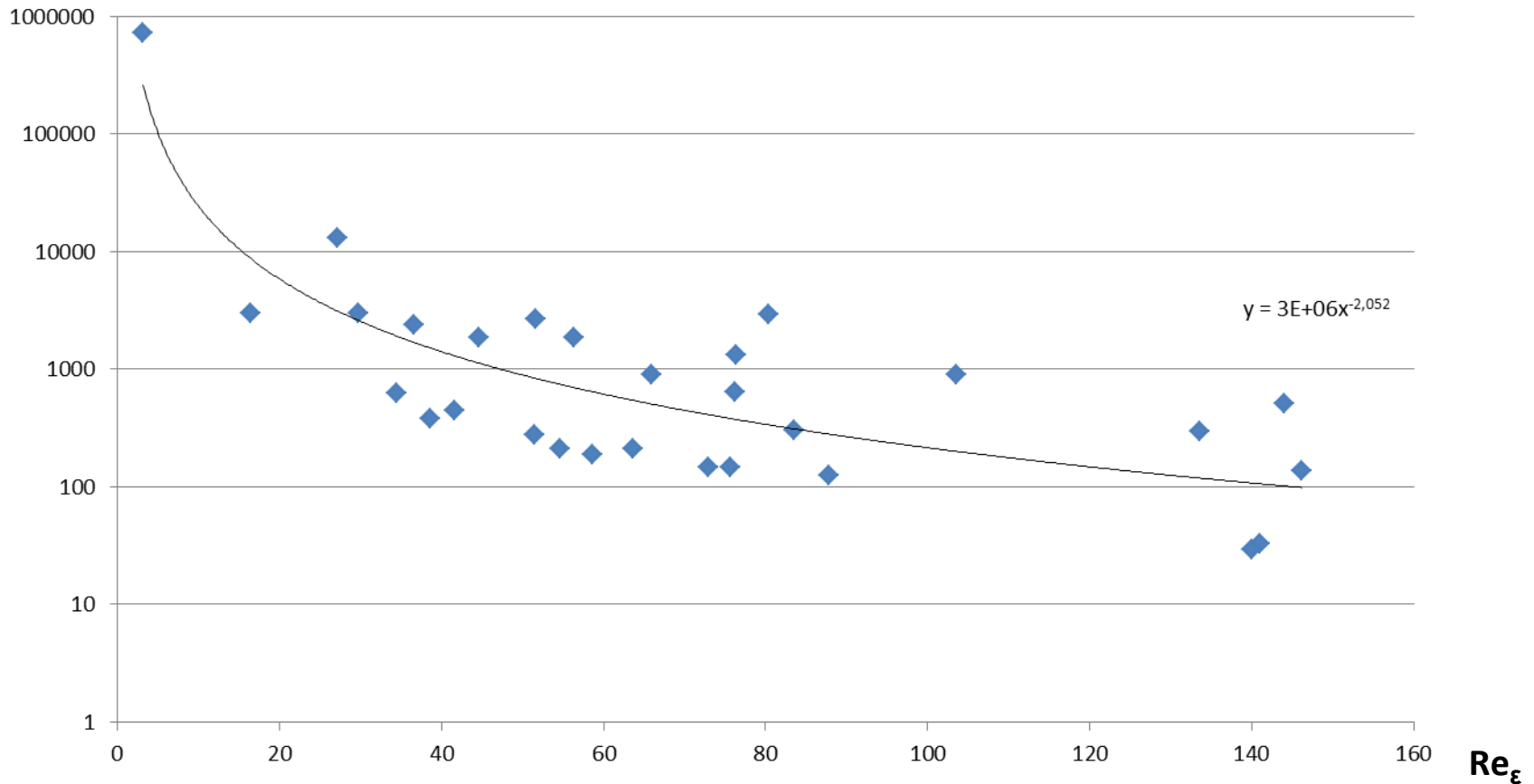
## 6.2. Biogaz - wyniki badań i ich analiza



**Rys. 26. Wpływ prędkości biogazu na intensywność gazoprzepuszczalności złoża szkieletowego**

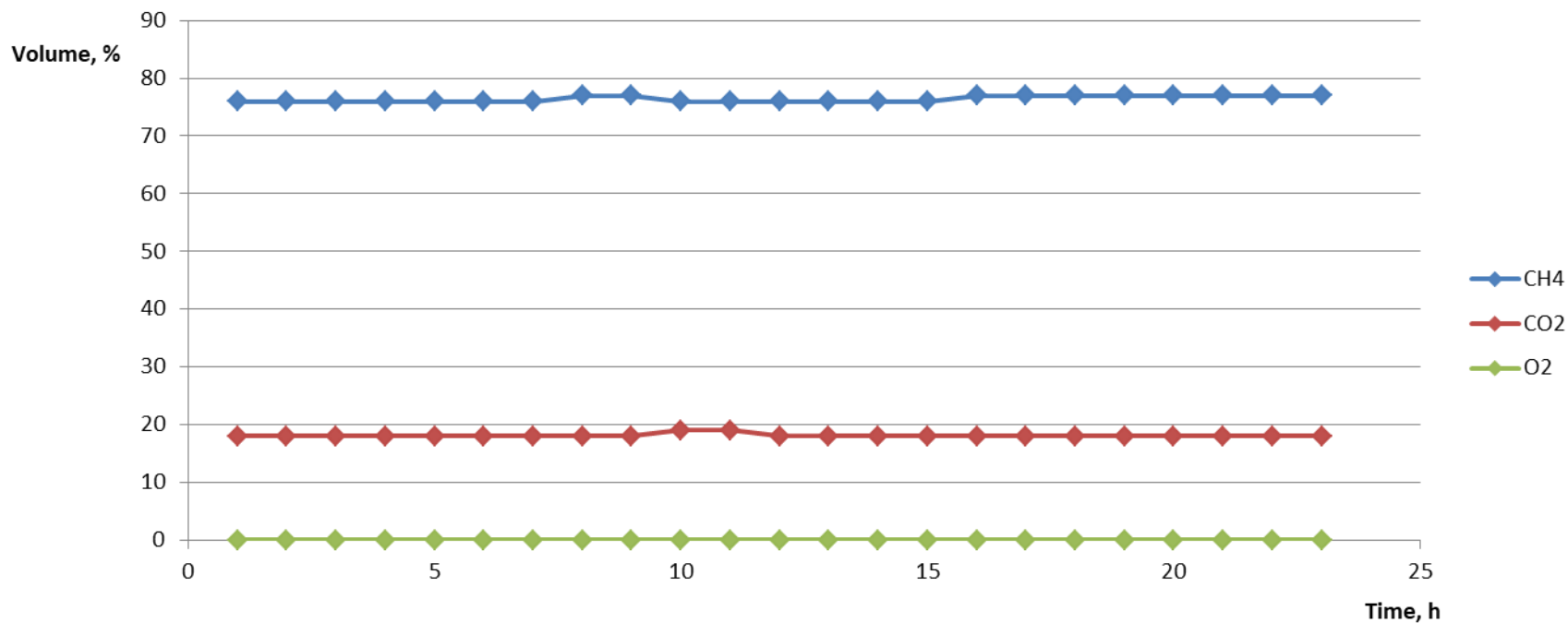
## 6.2. Biogaz - wyniki badań i ich analiza

$$\xi_{\varepsilon} = \frac{2}{\rho_g w_{\varepsilon}^2} \Delta P_{zm} \quad \text{Re}_{\varepsilon} = \frac{w_{\varepsilon} d_{\varepsilon}^* \rho_g}{\eta}$$



**Rys. 27. Wpływ liczby Reynoldsa na zstępczy współczynnik oporów dla przepływu biogazu**

## 6.3. Biogaz - wyniki badań i ich analiza



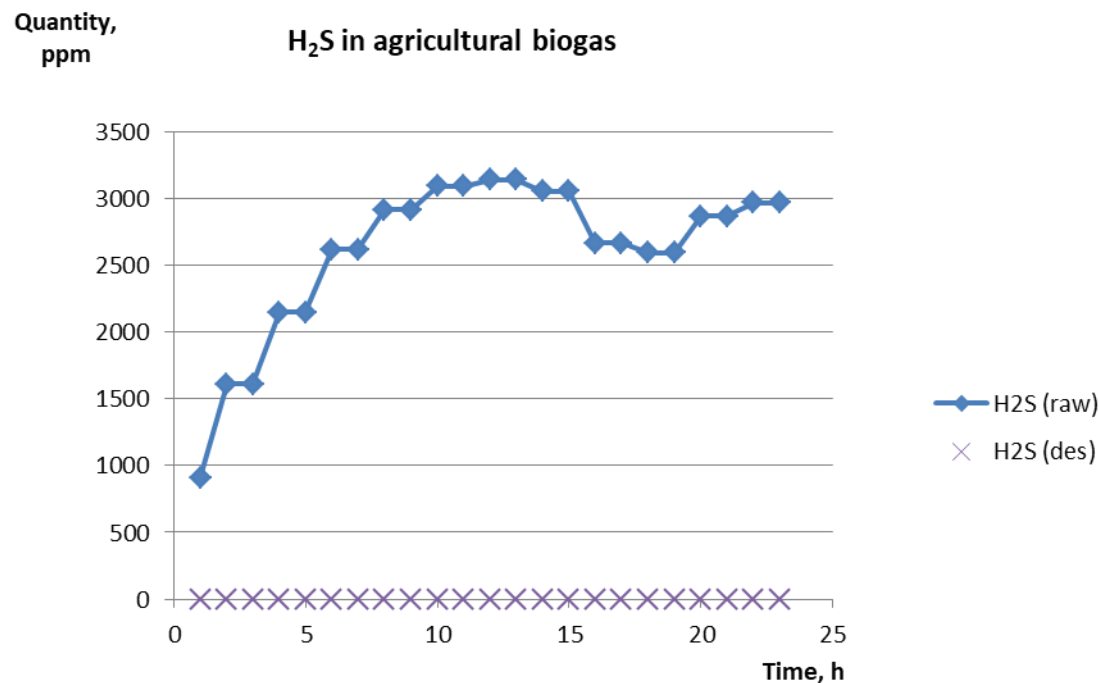
**Rys. 28. Skład biogazu rolniczego wyprodukowanego z substratu polidispersyjnego (gnojowicy świńskiej) [opracowanie własne] - objętość CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>**

## 6.3. Biogaz - wyniki badań i ich analiza

a)

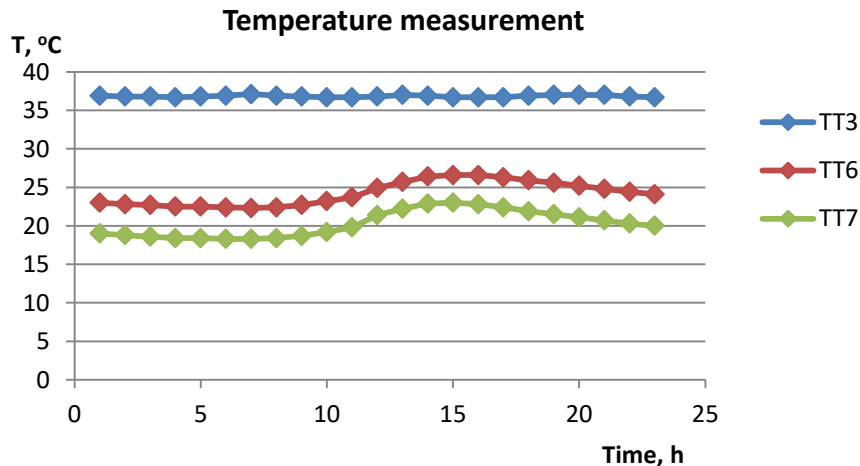


b)

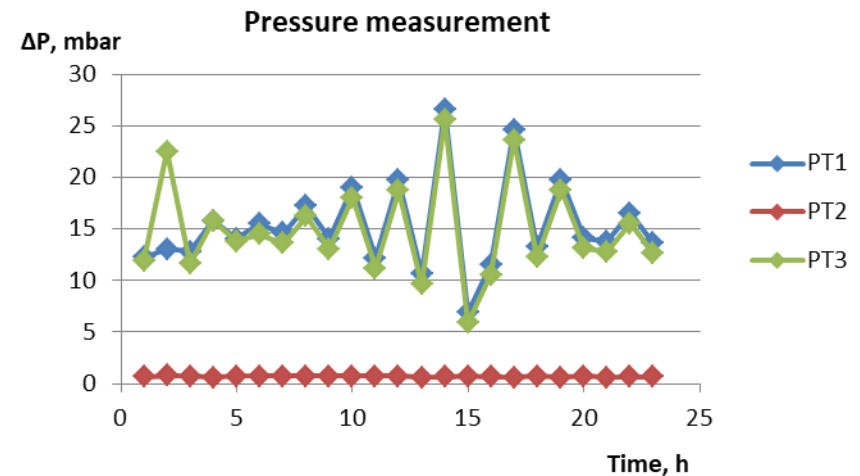


Rys. 29. Odsiarczanie surowego biogazu: a) odsiarczalniki – wnętrze (fotografia G. Wałowski); b) wykres obrazujący ilość H<sub>2</sub>S w biogazie rolniczym wyprodukowanym z substratu polidispersyjnego (gnojowicy świńskiej) [opracowanie własne]: H<sub>2</sub>S (raw) – dla surowego biogazu; H<sub>2</sub>S (des) – dla odsiarczonego biogazu.

a)



b)



**Rys. 30. Parametry procesowe biogazu rolniczego:**

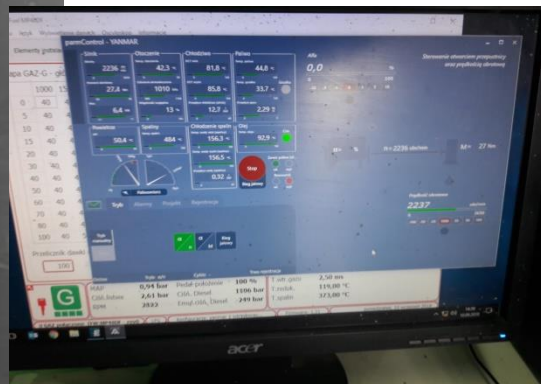
- a) temperature measurement - measurement points in accordance with the process diagram- necessary for the production and desulphurization of agricultural biogas produced from a polydisperse substrate (pig slurry) [own elaboration]: TT3 - measurement inside the fermentor; TT6 - measurement before desulphurizer; TT7 - measurement after desulfurizer;
- b) pressure measurement - measuring points according to the process diagram - necessary for the production and desulphurization of agricultural biogas produced from a polydisperse substrate (pig slurry) [own elaboration]: PT1 - measurement inside the fermentor; PT2 - measurement before desulfurizer; PT7 - measurement after desulphurizer.

## 7. Ocena funkcjonalności układ sterowania i kontroli pracy agregatu kogeneracyjnego

a)



b)



c)



**Rys. 31.** Kogenerator wielopaliwowy [fotografia G. Wałowski]: a) widok w kontenerze, b) sterowanie - widok , widok po demontażu kogeneratora.

## 7.1. Ocena funkcjonalności układ sterowania i kontroli pracy agregatu kogeneracyjnego

a)



b)



**Rys. 32.** Kogenerator na biogaz [fotografia G. Wałowski]: a) widok przed montażem, b) widok po montażu.

b)

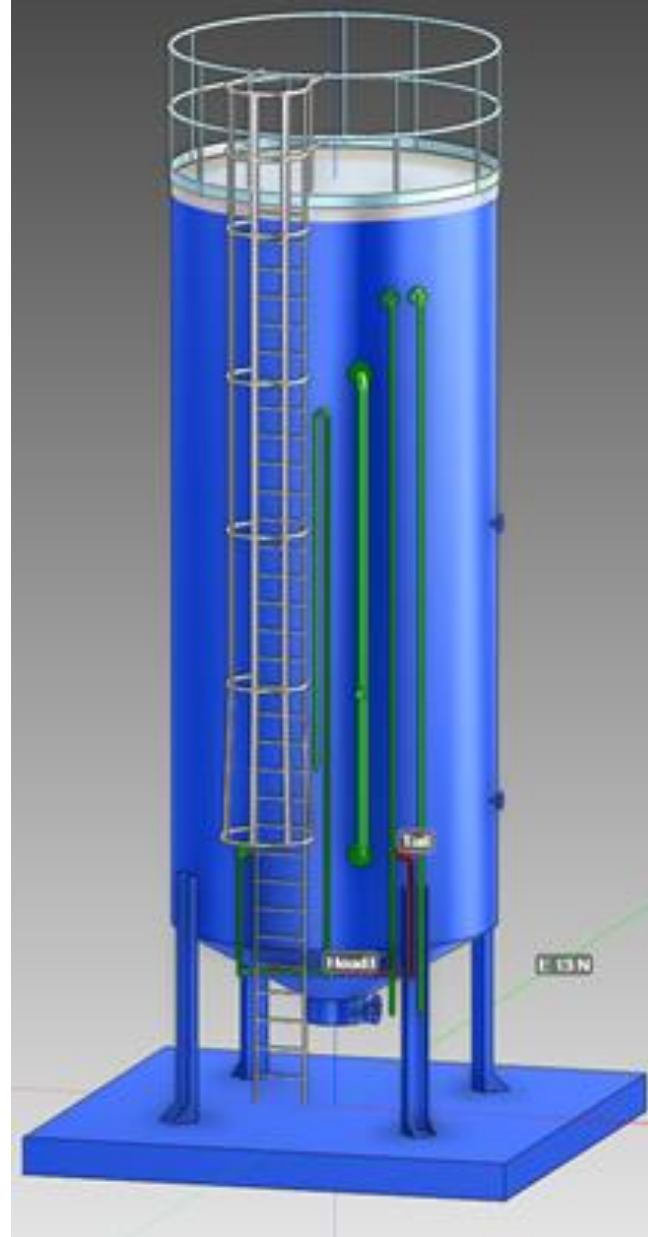
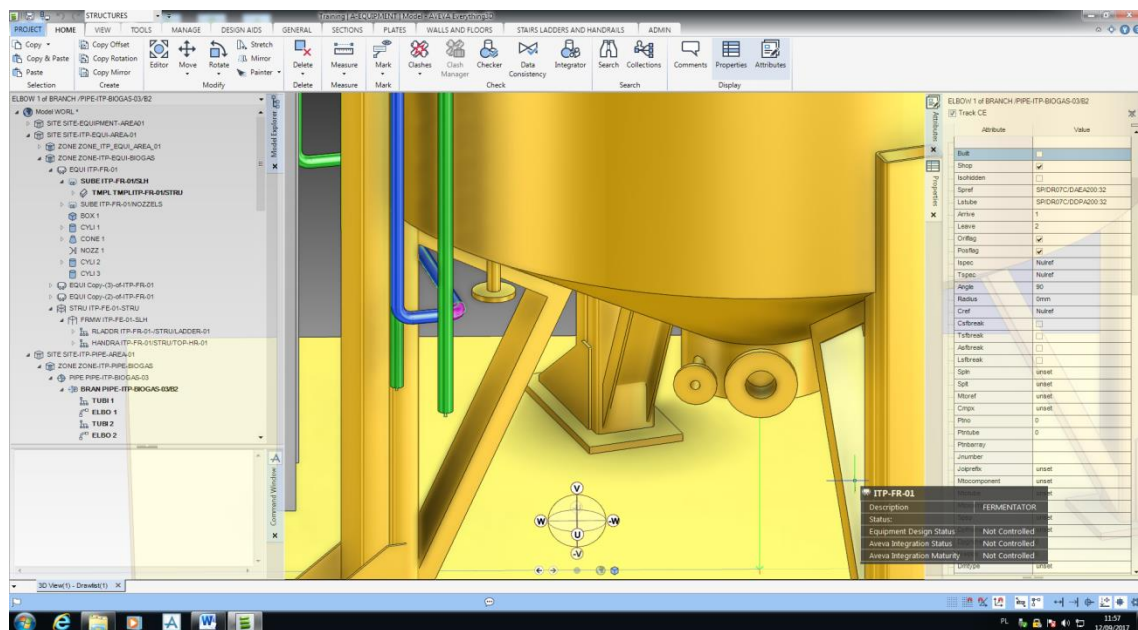
## 8. Biogazownia

### - wizualizacja fermentatora

Opracowano:

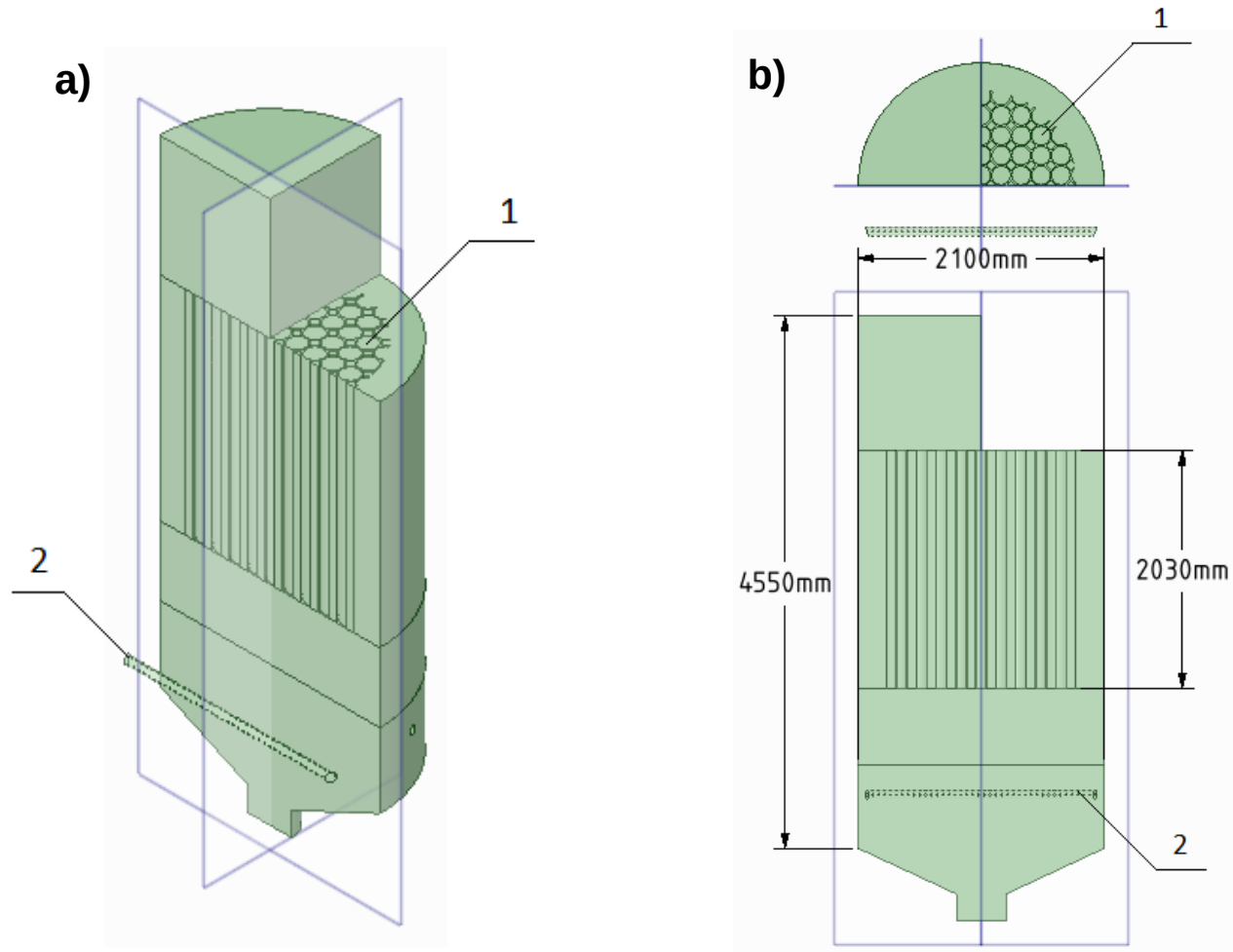
- schemat P&ID i model 3D;
- integrację schematu ze środowiskiem modelu i tworzenie rurociągów mechanizmami Integratora dla reaktora monosubstratowego.

a)



Rys. 33. Wizualizacja - AVEVA 3D Integrator: a) fragment dna, b) reaktor monosubstratowy.

## 8.1. Ocena hydrodynamiki przepływu płynu w fermentatorze przez strukturę szkieletową, w aspekcie numerycznego modelowania - *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

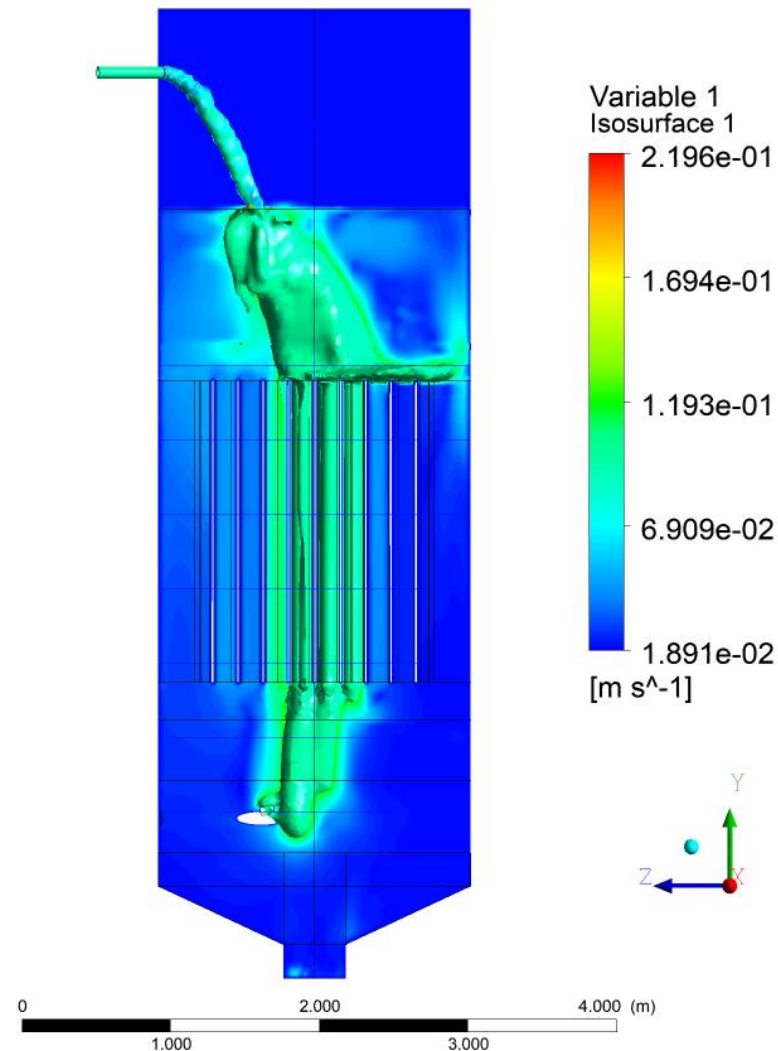


**Rys. 34. Geometria analizowanego fermentatora, 1- złożenie szkieletowe, 2 - barbotka [opracowanie własne]:**

dr hab. inż. Grzegorz W. Kowalski, prof. UTB, P.D. walczyński@gmail.com

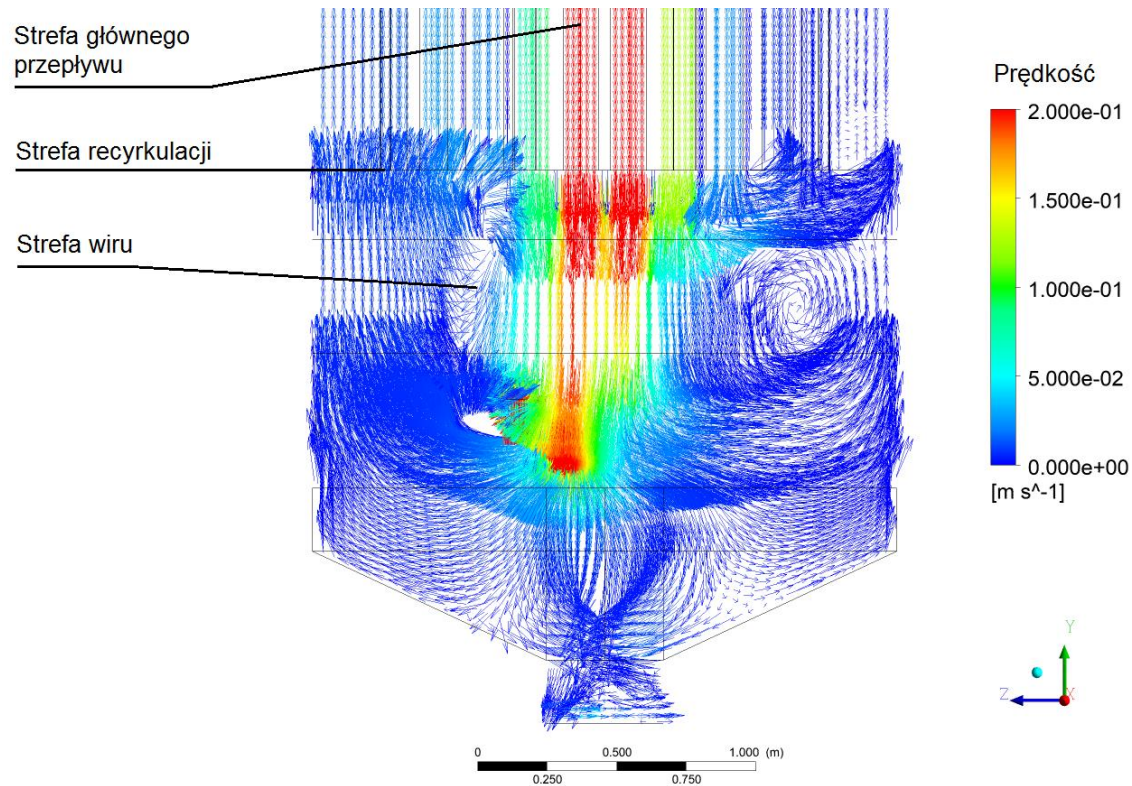
a) widok przekroju w osi pionowej dla 3D, b) rzut w przekroju w osi pionowej.

## 8.2. Rezultaty z badań - numerycznych Computational Fluid Dynamics (CFD)



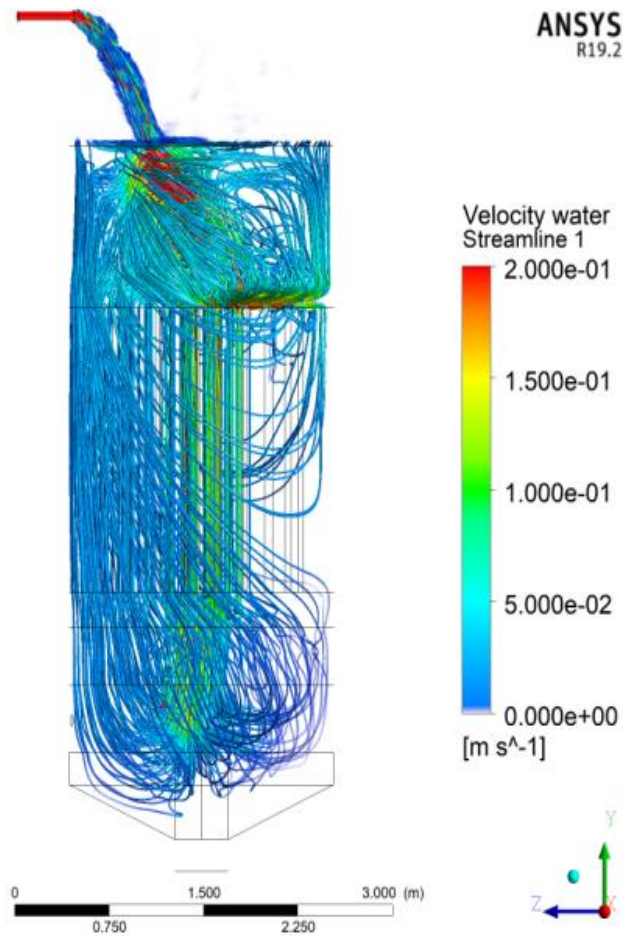
Rys. 35. Izopowierzchnia – widok jakości głównego obszar mieszania i miejsca występowania największych prędkości [opracowanie własne].

### 8.3. Rezultaty z badań – numerycznych *Computational Fluid Dynamics (CFD)* wizualizacja mieszania



**Rys. 36. Wektory prędkości na przekroju Y-Z, widok strefy recyrkulacji [opracowanie własne].**

### 8.3. Rezultaty z badań – numerycznych Computational Fluid Dynamics (CFD) - wizualizacja mieszania



**Rys. 37. Linie prądu – widok strefy recyrkulacji [opracowanie własne].**

- 1) Uwzględniając fazę rozruchu trwającą 10 dób otrzymano 80% metanu co stanowi o bardzo wysokiej jakości biogazu .
- 2) Dużym wyzwaniem jest adoptowanie mikroorganizmów dla produkcji biogazu w warunkach procesowych dla instalacji demonstracyjnych, które związane są z bardzo zróżnicowaną strukturą materiałów o powierzchni chropowatej, zwłaszcza w kontekście kształtu złożeń adhezyjnego, które umożliwia immobilizację mikroorganizmów metanogennych.
- 3) Obecnie trwa proces fermentacji beztlenowej, gdzie przeprowadzana jest optymalizacja instalacji pilotażowej .
- 4) Stwierdzono, że na hydrodynamikę przepływu gazu przez złoża porowate wpływ mają tak charakterystyczne parametry jak chropowatość (porowatość) złoża oraz jego struktura – w tym przypadku „model kapilarny”.

- 5) Uwzględniając parametry procesowe płynu: ciśnienie i prędkość przepływu, wskazano na kryteria przepływu biogazu w złożu dokonując interpretacji hydrodynamiki przepływu gazu w ujęciu matematycznym.
- 6) Opracowano model geometrii fermentatora beztlenowego, dla którego zasymulowano przepływ w strukturalnie porowatej (kapilarnej) przy użyciu narzędzia do modelowania 3D (oprogramowanie ANSYS Fluent).
- 7) Wskazano na główny przepływ tylko w tzw. „rdzeniu złoża kapilarnego”, natomiast zaobserwowano recyrkulację przepływu poza „rdzeniem”, czyli w większości objętości fermentatora.

- Aksielrud G.A., Altszuler M.A., 1987. *Ruch masy w ciałach porowatych*, WNT, Warszawa
- Brinkman H. C., 1949. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Applied Scientific Research*, 1, 27-34
- Burdine N.T., 1953. *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, 198, 71
- Darcy H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Valmont
- Fitzner B., 1993. Porosity properties and weathering behaviour of natural stones-Methodology and examples, In: *Papers collection of the Second Course Stone material in monuments, diagnosis and conservation*, Heraklion-Crete, Scuola Universitaria C.U.M., Bari, 43
- Forchheimer P., 1901. Wasserbewegung durch Boden. [Water movement through soil]. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieuer*, 5(5), 1781-1788
- Hagoort J., 1988. *Fundamentals of Gas Reservoir Enginnering*, *Developments in Petroleum Science* 23, Elsevier, Amsterdam.
- Jędrzak A., 2001, *Przegląd Komunalny*, 6
- Maślankiewicz P., Wojciechowski H., 2012. Sposób intensyfikacji przemian biochemicznych we wnętrzu składowiska odpadów komunalnych i/lub przemysłowych i urządzenie do intensyfikacji przemian biochemicznych we wnętrzu składowiska odpadów komunalnych i/lub przemysłowych. Polska. Zgłoszenie patentowe P.399417 z dnia 04.06.2012 r.
- Niezgoda T., Miedzińska D., Sławiński G., Gieleta R., Derewońko A., Morka A., Kędziński P., 2012. *Mat. I Krajowej Konferencji nt Propozycje wdrożeń odnawialnych źródeł energii na obszarze Polski*, Białystok
- Nogal M., 2007. Sposób intensyfikacji procesu fermentacji metanowej osadów ściekowych w zamkniętych komorach fermentacyjnych i układ konstrukcyjny do stosowania tego sposobu. Polska. Zgłoszenie patentowe P.383234 z dnia 31.08.2007 r.
- Nogal M., 2015. Lanca magnetyczna do intensyfikacji pracy zamkniętych komór fermentacyjnych. Polska. Zgłoszenie patentowe P. 415295 z dnia 14.12.2015 r.
- Oniszk-Popławska A., Matyka M., 2012. Raport końcowy z badania dziedzinowego. „Kompleksowa ocena uwarunkowań w zakresie produkcji biogazu w województwie lubelskim”. Regionalny System Zarządzania Zmianą Gospodarczą

- Pawłowska M., Siepak J., Pawłowski L., Pleczyński J., 2008. Sposób intensyfikacji produkcji metanu na składowiskach odpadów komunalnych. Zgłoszenie patentowe P. 385337 z dnia 02.06.2008 r.
- Pleczyński J., Pawłowska M., Siepak J., Pawłowski L., 2008. Sposób wykorzystania osadów ściekowych do intensyfikacji produkcji biogazu na składowiskach odpadów komunalnych. Polska. Zgłoszenie patentowe P.385336 z dnia 02.06.2008 r.
- Rogut J., Wiatowski M., Grzelak A., 1999. Sposób intensyfikacji procesów fermentacji anaerobowej do biogazu i amoniaku stężonych ścieków organicznych, zwłaszcza gnojowicy. Polska. Zgłoszenie patentowe P.335309 z dnia 06.09.1999 r.
- Romaniuk W., Biskupska K. 2014. Biogazownia rolnicza krok po kroku. Warszawa. Hortpress. ISBN 978-83-61574-58-3, 3-32.
- Romaniuk W., Głazczka A., Biskupska K. 2012. Analiza rozwiązań instalacji biogazowych dla gospodarstw rodzinnych i farmerskich. Inżynieria w rolnictwie, Monografie nr 9, Falenty, wyd. ITP, 94.
- Simons G.A., 1995. Pore structure model for water and contaminant transport in soil. Report 19951101-095, 1
- Wałowski G., Borek K., Romaniuk W., Wardal W.J., Borusiewicz A. 2019. Nowoczesne systemy pozyskania energii - biogazu. MONOGRAFIA pod redakcją naukową prof. dr hab. inż. Wacława Romaniuka. Warszawa, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Agrobiznesu w Łomży, ISBN 978-83-947669-9-3

## **Technologia produkcji biogazu**

### **Energia z biogazu i biomasy - część II**

Zagadnienia:

- czym jest biomasa i biogaz?
- jak powstaje, jak się spala?
- jakie daje korzyści?
- jakie są wady i zalety?
- czy jest to alternatywa dla klasycznych surowców energetycznych?
- czy może mieć udział w zapewnieniu, częściowo bezpieczeństwa energetycznego?

**Dziękuję za uwagę**