



ODZYSK ENERGII Z OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Dr inż. Anna Grosser

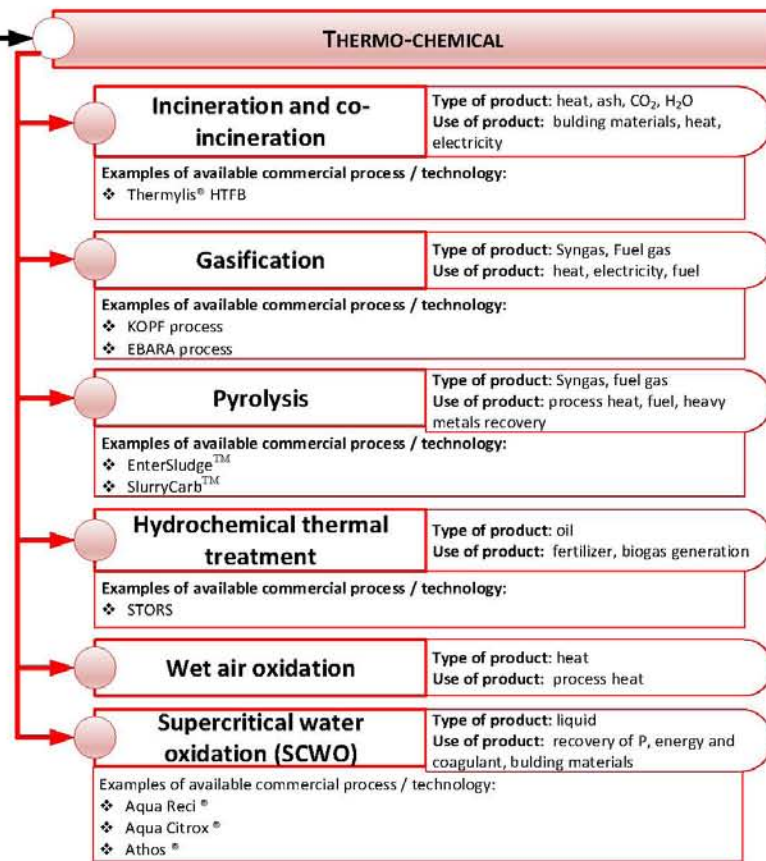
**Instytut Inżynierii
Środowiska**

**Wydział Infrastruktury
i Środowiska**

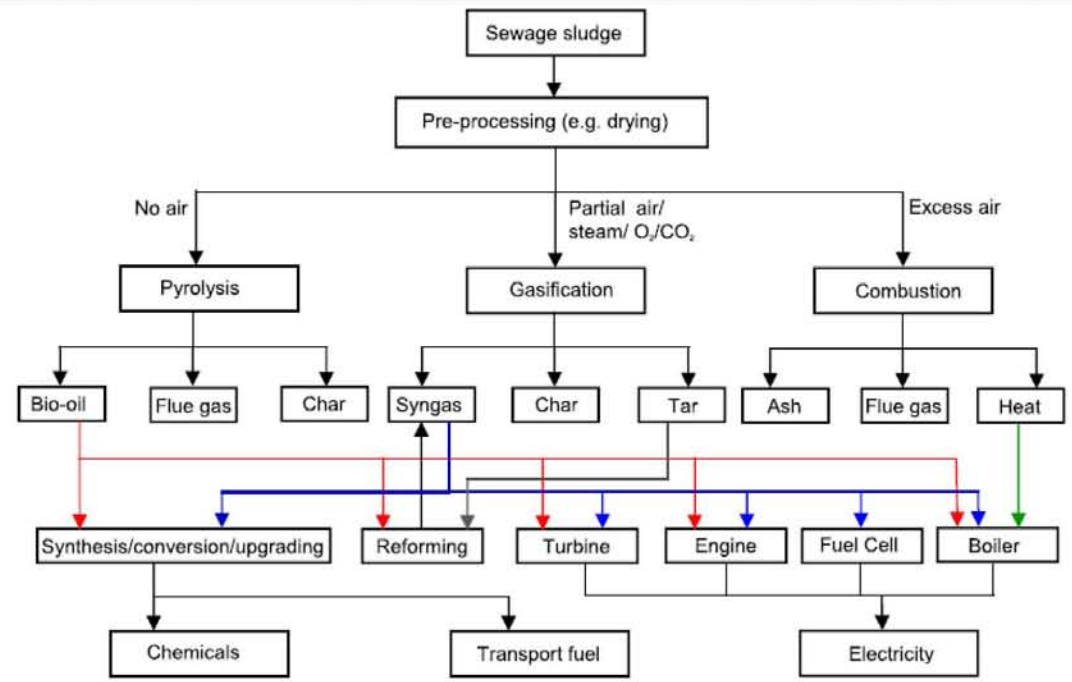
Politechnika Częstochowska



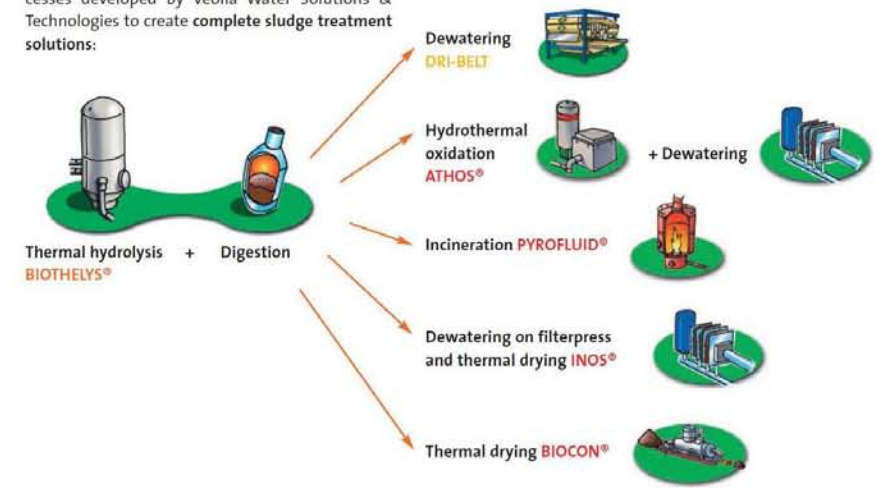
GRUPA 1



Metody odzysku energii z osadów ściekowych



BIOTHELYS® can be combined with the other processes developed by Veolia Water Solutions & Technologies to create complete sludge treatment solutions:



GRUPA 2

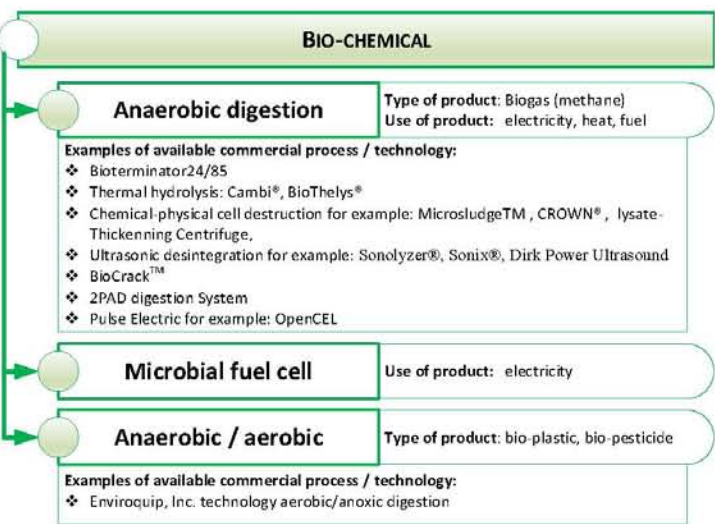


Tabela Odzysk ciepła i energii elektrycznej na oczyszczalniach ścieków (Silvestre i in., 2015)

	Oczyszczalnia 1	Oczyszczalnia 2	Oczyszczalnia 3	Oczyszczalnia 4	Oczyszczalnia 5
RLM	190380	35800	121500	204166	451250
Q (m ³ /d)	26587	29086	21765	21074	27873
OLR (kgBZT/m ³ d)	0,35	0,8	0,56	0,39	1,24
Zagęszczanie osadów	S, W	S, F	S, F	S, F	S, W
Objętość KF (m ³)	7500	7000	8800	8000	7040
HRT (d)	32	30	22	24	19
OW:ON (s.m.o.)	68:32	57:32	46:54	46:54	58:42
OLR KF (kg s.m.o./m ³ d)	0,78	0,86	1,02	0,86	1,23
Biogaz (m ³ /d m ³)	0,3	0,6	0,36	0,61	0,87
EEk (kJ/d)	4,24*10 ⁷	4,61*10 ⁷	4,44*10 ⁷	6,78*10 ⁷	5,88*10 ⁷
EEp (kJ/d)	1,64*10 ⁷	2,89*10 ⁷	2,41	3,13*10 ⁷	4,46*10 ⁷
St. pEE (%)	39	33	56	55	70
Ep (kJ/d)	2,65*10 ⁷	4,18*10 ⁷	3,52*10 ⁷	5,82*10 ⁷	6,67*10 ⁷
Ck (kJ/d) - 1	2,12*10 ⁴	4,13*10 ⁴	3,13*10 ⁴	2,97*10 ⁴	2,59*10 ⁴
St. pC (%) - 1	111	100	113	119	245
Ck (kJ/d) - 2	1,71*10 ⁷	1,7*10 ⁷	2,75*10 ⁷	1,94*10 ⁷	2,21*10 ⁷
St. pC (%) - 2	137	243	128	274	288

Q – objętość ścieków dopływających na oczyszczalnię ścieków; OLR – obciążenie komór osadu czynnego ładunkiem zanieczyszczeń; S –

od 26 do 51% zapotrzebowania na energię tego procesu w przypadku izolowanych komór fermentacyjnych, a przy braku izolacji od 9 do 46%

- kom
ch koc

St.

Założenia osady 92% s.m.
Ilość ciepła niezbędna do suszenia: 2628 kJ/kg

ciepło;



Proces limitowany:

- niskim stopieniem degradacji substancji organicznej (30-52%);
- długim czasem zatrzymania (20-30 dni).



INTENSYFIKACJA PROCESU



KONDYCJONOWANIE WSADU

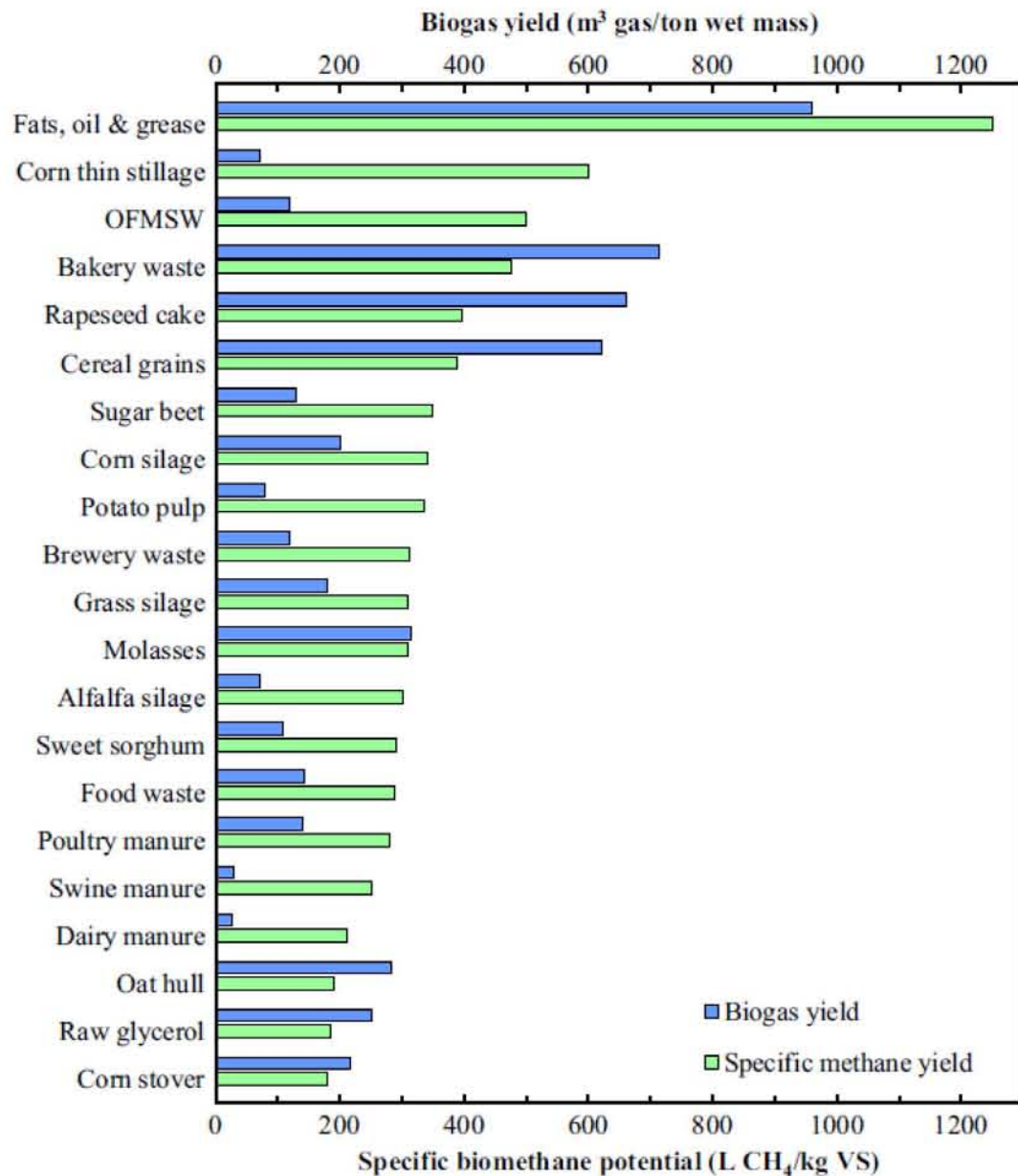
KOFERMENTACJA

	Stopień przefermentowania (%)	Y_M (L/kg s.m.o._{dop})
Davidsson i in. (2008)	45	271
Luostarinen i in. (2009)	52	278
Wan i in. (2011)	40	252
Silvestre i in. (2011)	36	249
Martínez i in. (2012)	-	304
Girault i in. (2012)	29	400
Noutsopoulos i in. (2013)	52	294

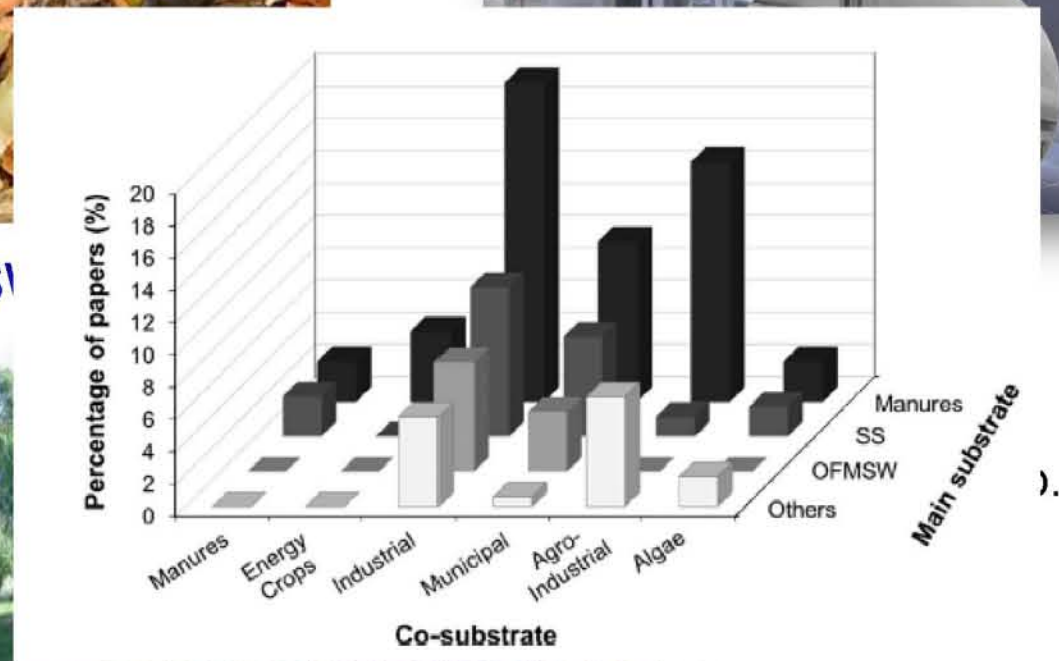
wspólna fermentacja homogenicznej mieszanki co najmniej dwóch odpadów organicznych



KO-SUBSTRATY



SI



SI



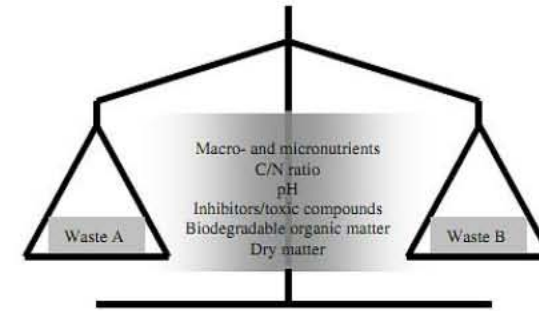
Inne odpady

3. zwiększenie poziom biodegradowalnych
 4. większego rozrzedzenie toksycznych



KLUCZOWE WŁAŚCIWOŚCI JAKIE NALEŻY UWZGLĘDNIĆ PRZY DOBORZE SUBSTRATÓW

- stężenie substancji organicznej powinno być porównywalne z jego zawartością w bioodpadzie;
- powinien składać się z łatwo biodegradowalnej materii organicznej o wysokim potencjale produkcji biogazu;
- nie zawierać substancji w stężeniach, które mogłyby wpłynąć inhibitująco na proces;
- powinien zawierać taką zawartość makro- i mikrośladników, która pozwala na poprawę charakterystyki głównego substratu;
- nie powodować problemów z zatykaniem przewodów, a tym samym umożliwiać zasilanie komór za pomocą automatycznego podajnika;
- dostępny w przystępnej cenie i możliwy do przechowywania



Waste A, Waste B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ



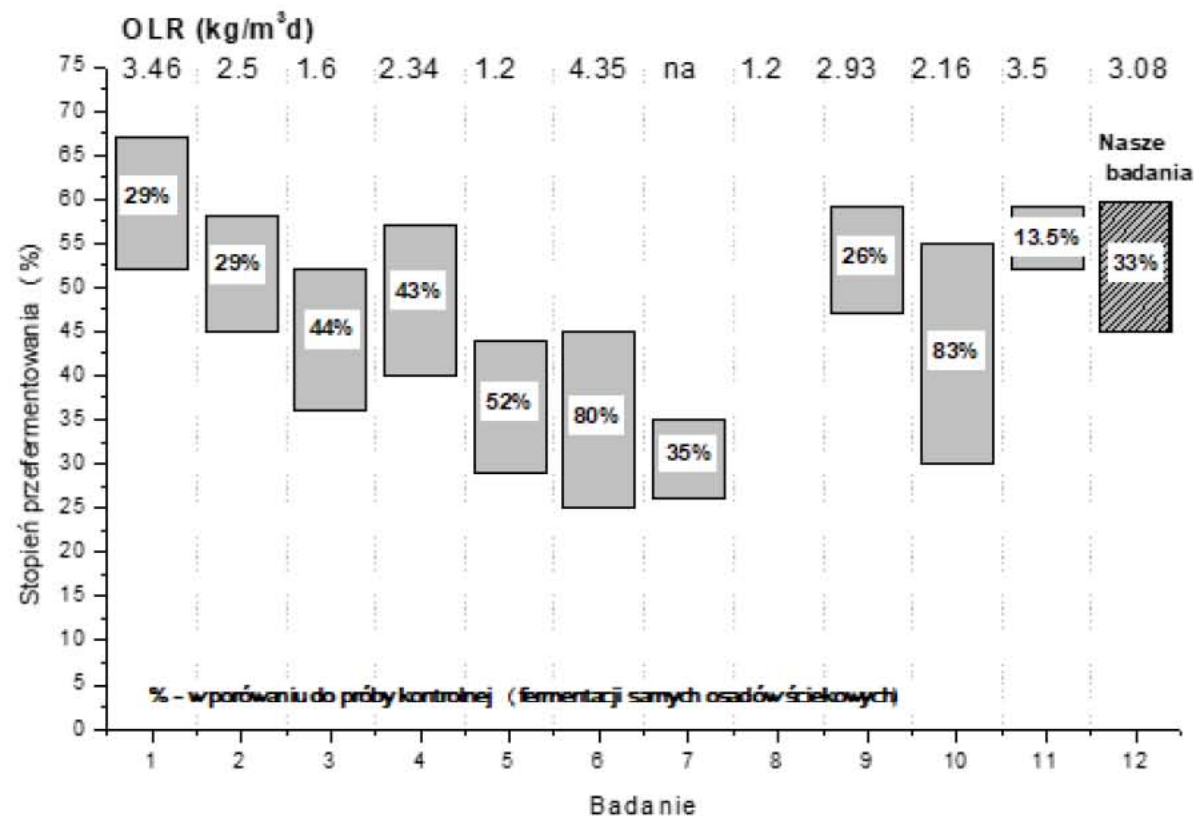
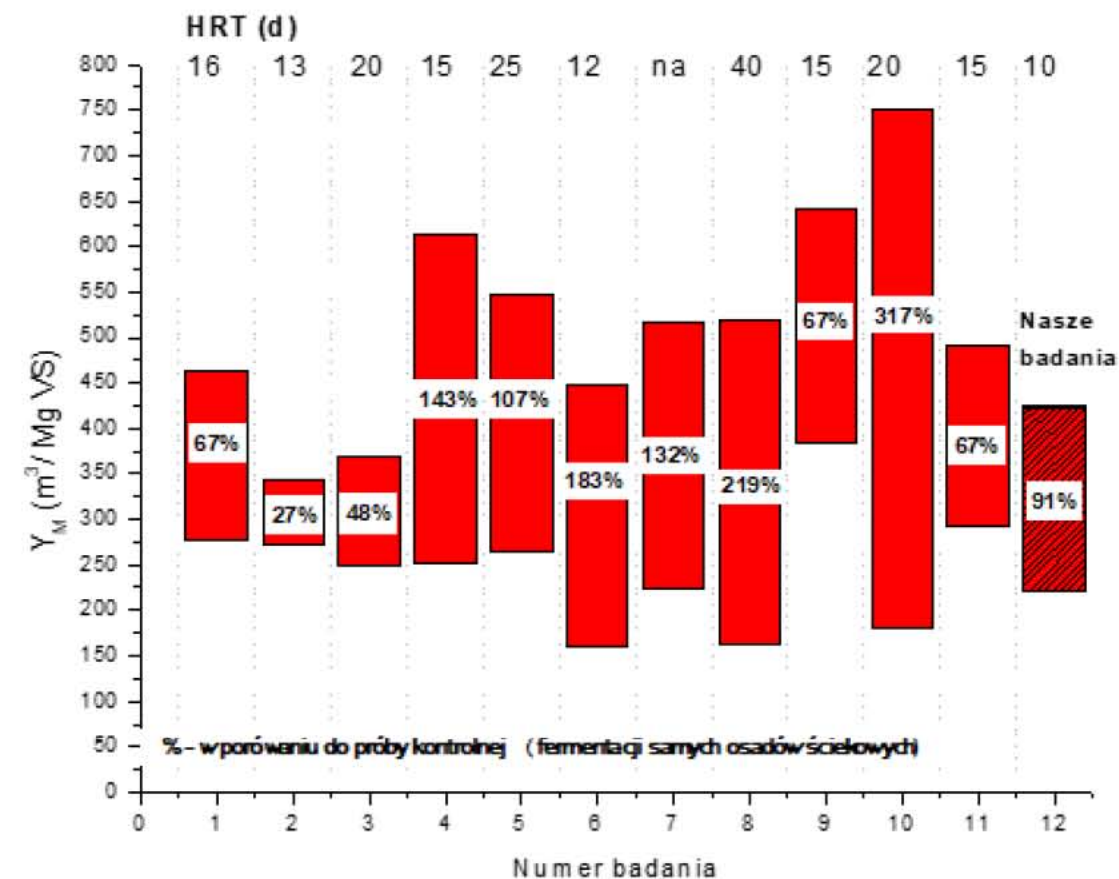
Substrat	Warunki operacyjne	S (%)	Y_B ($m^3/kgs.m.o._{dop}$)	CH ₄ (%)	Źródło
SS:OFMSW	TPAD, 56°C (CSTR), 36°C (UASB), OLR=0,669, 2,76 i 3,084 g s.m.o./dm ³ d, HRT=17,33; 11,1 i 8,9 d (CSTR) i 44,2; 17,3 i 20,9 d (UASB)	BD	0,532 (27%) ^{1, KI}	60	Sosnowski i inni 2003
SS:OFMSW	37°C, HRT=14,5 d, OLR: od 0,56 do 5,0 gChZT/dm ³ d	57	0,6	60	Del Borghi i inni 1999
	55°C, HRT=12 d, OLR: od 0,56 do 5,0 gChZT/dm ³ d	64	0,36	50	
SS:MSW	Od 26 do 37°C, HRT=25 d, OLR= od 0,5 do 4,3 g s.m.o./dm ³ d	88,1	0,13-0,36	68-72	Elango i inni 2007
SS:HS	Średnia dobowo ilość odpadów doprowadzanych do komór fermentacyjnych: 1,0-2,08 m ³ /d HRT=20 d, śr. OLR=0,8 g VSS/dm ³ d	81 (14%) ¹	0,6(1,5x) ¹	BD	Zupancič i inni 2008
AS:FVW	35°C, HRT=10, 20 d, OLR: od 0,3 do 1,87 g VSS/dm ³ d	65,1-88 (M:59%) ¹	0,52-0,72 (M: 38,5) ¹	59-60 (M:3,4%) ¹	Habiba i inni 2009
SS:MSW	32-38°C, reaktor na składowisku odpadów	75,4-83,4 ² (max.4x) ¹	0,17-0,39 ^{K2}	47-59 (M:2x) ¹	Sanphoti i inni 2007
AS:WC	35°C, HRT=30d	63-68 (M:30%) ¹	0,0045-0,072 (M: 63,6%) ¹	BD	Saev i inni 2009
WAS:KS	36°C, HRT=35d	45,8-63,6 (M: 47%) ³	M:0,336 (121%) ¹	BD	Bochdziewicz i inni 2010
PS:SOW	35°C, HRT= 20 d, OLR: od 2,5 do 6,5 g s.m.o./dm ³ d	62,9 (70,5) ¹	0,538 (70,8) ¹	60-65	Purcel i Stentiford 2000
WAS:FVW	35°C, HRT= 10 d, OLR=2,51 g s.m.o./dm ³ d	85,4 (12%) ³	0,49 (58%) ³	BD	Bouallagui i inni 2009
SS:PW	35°C, 55°C OLR =5,0 g ChZT/dm ³ d	BD	0,21 i 0,35 ⁴ (35%, 45%) ¹	60-64	Grasmung i inni 2003

1 – w porównaniu do fermentacji samych osadów ściekowych, 2 – w przeliczeniu na ChZT, 3 – w porównaniu do fermentacji samego kosubstratu, 4 - Y_M

S – stopień przefermentowania, SS - osady ściekowe, OFMSW – organiczna frakcja odpadów komunalnych, TPAD – fermentacja dwustopniowa zmiennotemperaturowa, MSW – stałe odpady komunalne, HS – odpady z gospodarstw domowych, AS –osad czynny, FVW – odpady owoców i warzyw, WC - odpady warzyw, WAS – osad nadmierny, KS – odpady kuchenne, SOW – odpady z supermarketów, PS – osady wstępne, PW – woda po procesowa oddzielona z OFMSW, SGP – specyficzna produkcja biogazu dm³/g VSS, VSS – zawiesina organiczna, M: - max

KI – SGP w porównaniu dofermentacji jednostopniowej,

Wpływ na fermentację osadów ściekowych – badania laboratoryjne



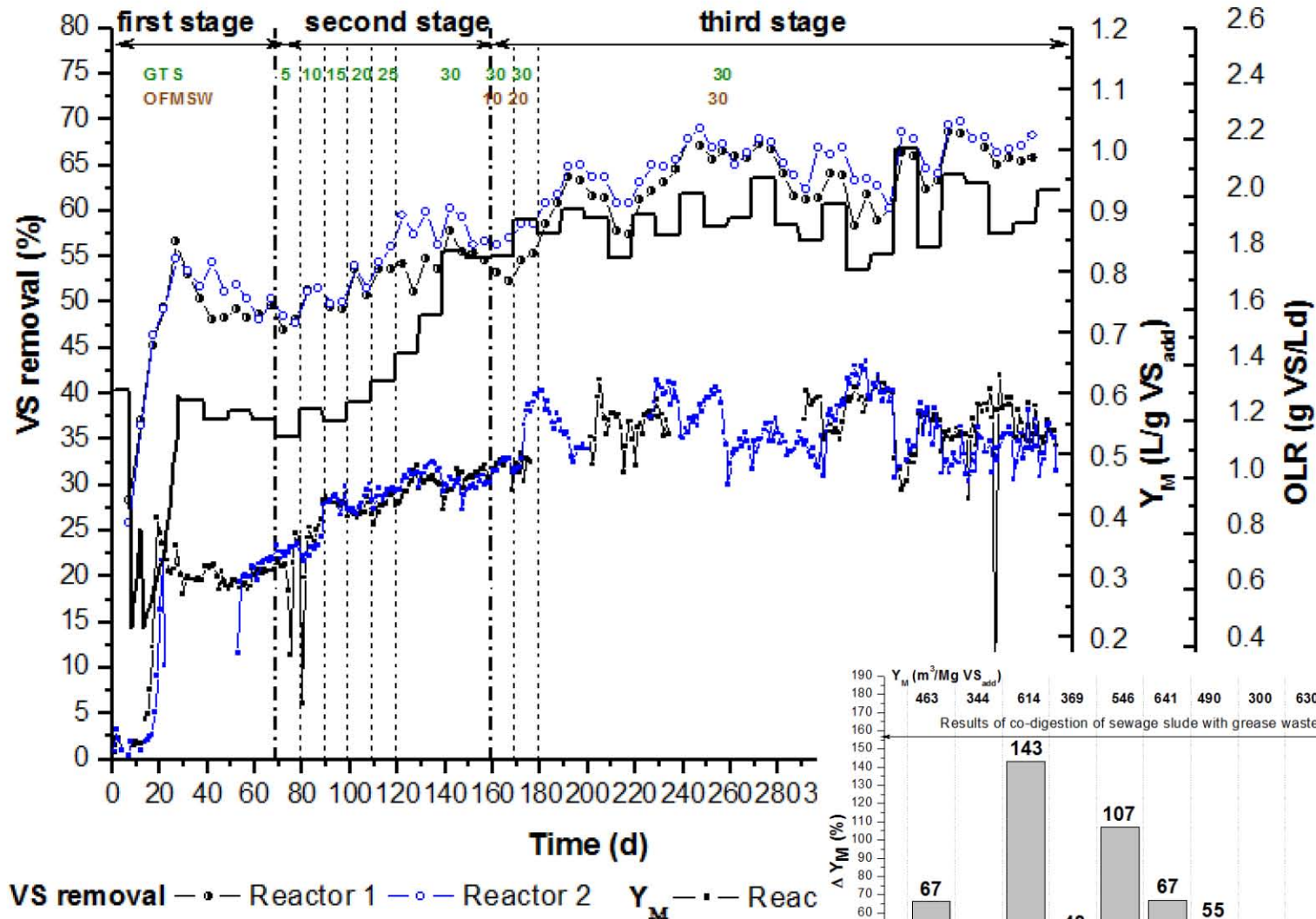
Badanie

1 - Luostarinen et al. (2009); 2- Davidsson et al. (2008); 3- Silvestre et al. (2011); 4 - Wan et al. (2011); 5- Girault et al. (2012); 6 - Kabouris et al. (2009); 7 - Yalcinkaya and Malina (2015s); 8 - Martinez et al. (2016); 9 - Yalcinkaya and Malina (2015b); 10 - Wang et al. (2013); 11- Noutsopoulos et al. (2013); 12 - nasze badania

Source of fat rich material

1	from meat industry	7	receiving facility of a GTW
2	restaurant	8	local butcher's shop
3	the DAF unit of a WWTP	9	the transfer station of a GTW hauler i
4	FOG receiving facility	10	restaurant
5	storage tank of a dissolved air flotation system that processes wastewater from a meat industry (pork processing)	11	From WWTP
6	WWTP polymer-dewatered	12	from meat industry

Wpływ na fermentację osadów ściekowych – badania laboratoryjne



the Polish-Norwegian Research Programme operated by the National Centre for Research and Development "Innovation in recycling technologies of sewage sludge and other biowaste - energy and matter recovery" POL-NOR/201734/76/13.

GTS (Odpady tłuszczowe)

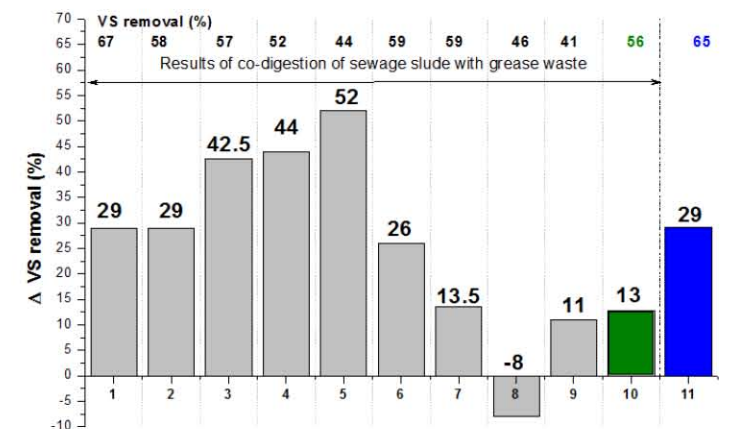
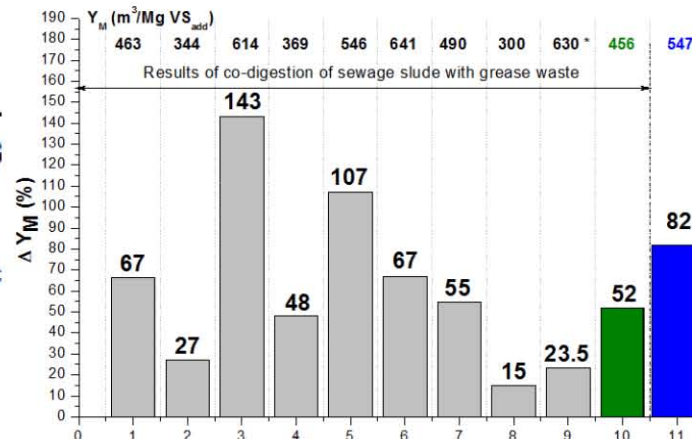
↑ 13% (z 50 to 56,4%)

↑ 52% (z 300 do 456 m³/Mg s.m.o._{dop})

OFMSW

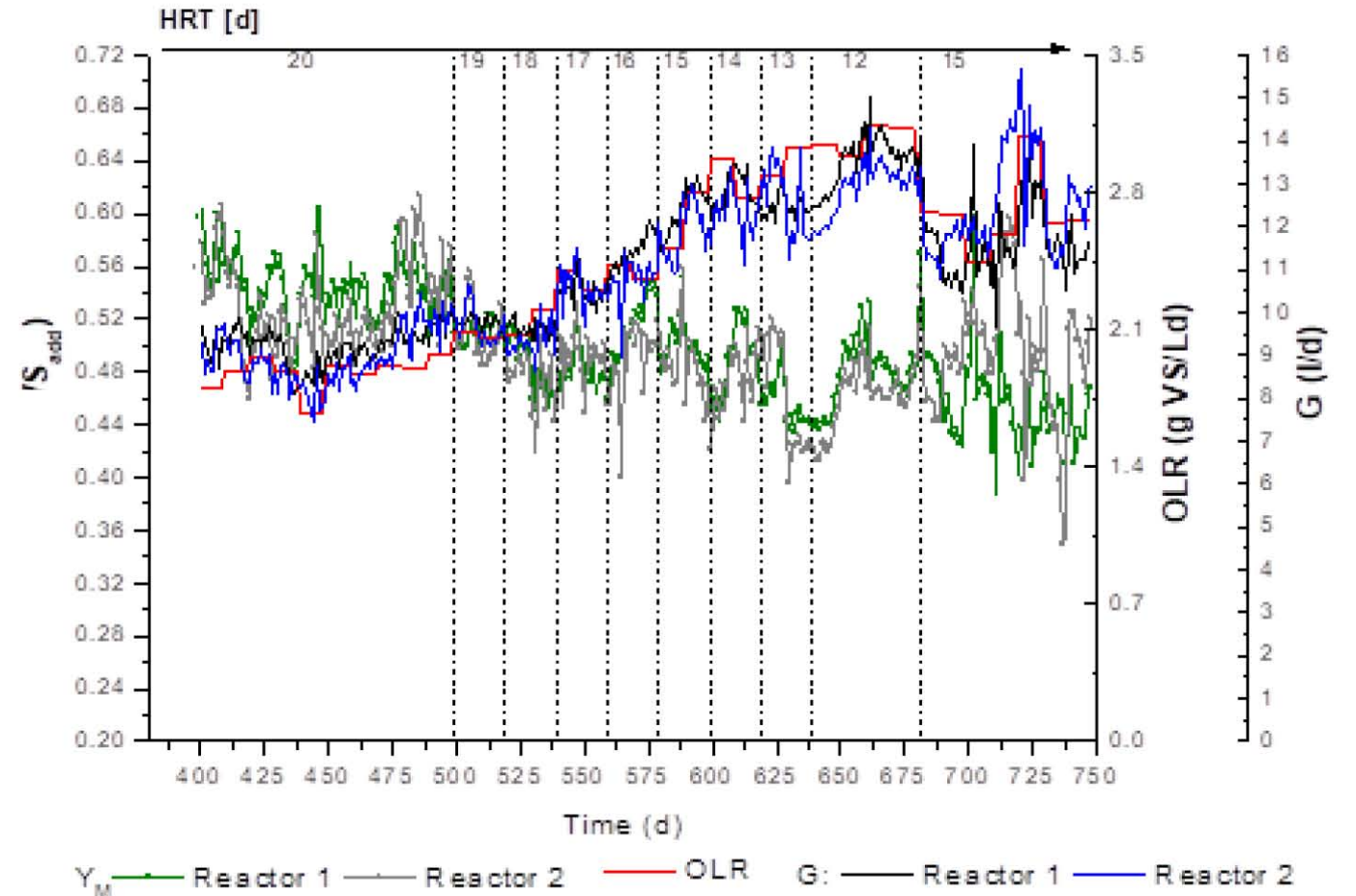
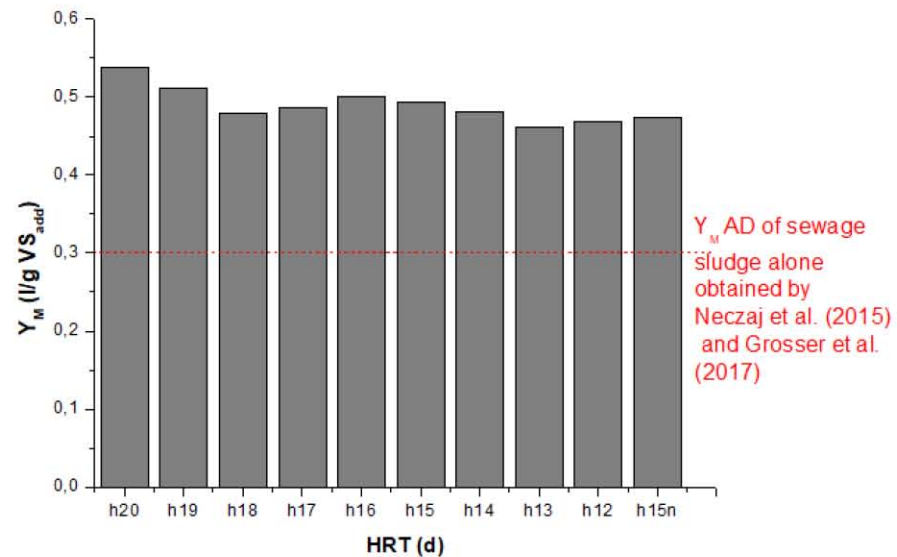
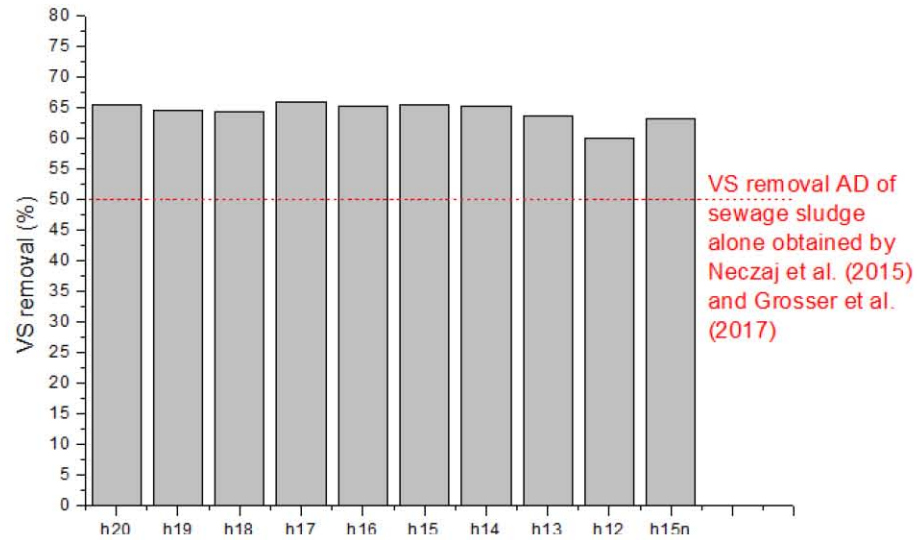
↑ 29% (z 50 do 64.7 %),

↑ 82% (z 300 do 547 m³/Mg s.m.o._{dop})



Wpływ na fermentację osadów ściekowych – badania laboratoryjne

the Polish-Norwegian Research Programme operated by the National Centre for Research and Development "Innovation in recycling technologies of sewage sludge and other biowaste - energy and matter recovery" POL-NOR/201734/76/13.



Wpływ na fermentację osadów ściekowych – przykłady

Zakłady MBP – osady ściekowe i biofrakcja

Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej, Sp. z o.o. , Jędrzychowice Zgorzelec, 2

Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. Puławy

Miejskie Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej w Krośnie, Sp. z o.o.

Lokalizacja	Parametry procesowe		Wydajność instalacji, Mg/rok	Dobowa produkcja biogazu, m ³ /udział metanu, %	Roczna produkcja energii, MWh	Proporcja OS:OFMSW	Y [m ³ /kg s.m.o.]
Zgorzelec	t-35°C, HRT=21d V- 2000m ³		10 000	2300/70	1400-2800	1:3	0,40-0,63
Puławy	t-39°C, HRT=21d						
Oczyszczalnie ścieków	Substraty	Skład mieszaniny	Temperatura	OLR [kg ^a /m ³ d]	Y _M [m ³ /kg] ^b	Wzrost ^c	
	OS:FVW	82,3:17,7 (s.m.o.)	M	HRT=20d	0,57 ^d (s.m.o.)	+3%	
	OS:OFMSW	84,3:15,7 (s.m.o.)	M	1,21 (s.m.o.)	0,17 (s.m.o.)	+21%	
	OS:OFMSW	59:41 (s.m.o.)	36,3	0,78 (s.m.o.)	0,28 (s.m.o.)	+97%	
	OS:OFMSW	80:20 (z.o.)	M	1,0 (z.o.)	0,60 ^d (z.o.)	+54%	
	OS:FVW	BD	36	BD	BD	+8-17%	
	OS:OFMSW	BD	37	1,62 (s.m.o.)	0,21 (s.m.o.)	-	
			55	1,28 (s.m.o.)	0,33 (s.m.o.)	-	
OS:zużyty olej	94:6 (s.m.o.)	55	HRT=57d	0,63 ^d (s.m.o.)	+24%		

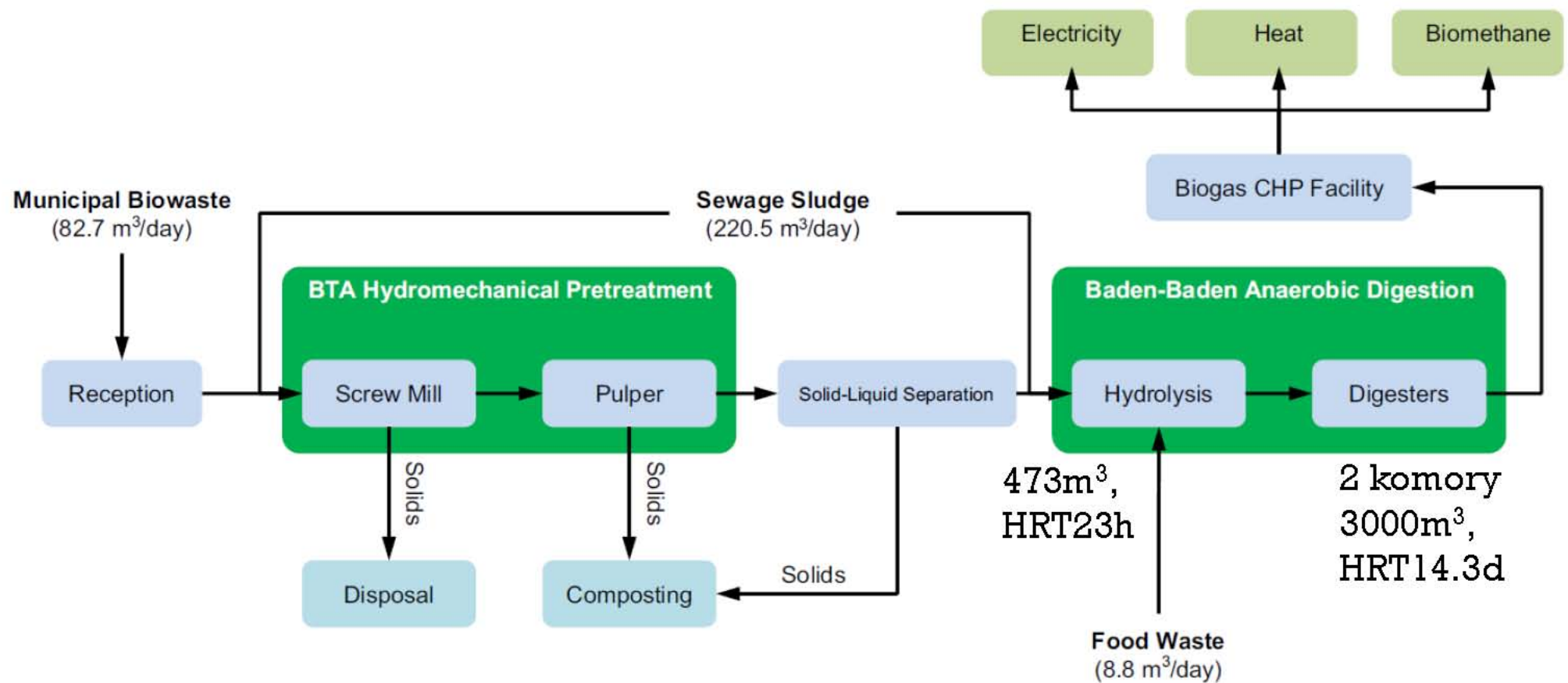
OS – osady ściekowe; FVW - odpadowe warzywa i owoce; BD – brak danych; z.o. – zawiesina organiczna; s.m.o. – sucha masa organiczna

^a) w nawiasie jednostka na którą przeliczono obciążenie komory ładunkiem zanieczyszczeń;

^b) w nawiasie jednostka na którą przeliczono współczynnik produkcji metanu

^c) w porównaniu do próby kontrolnej (fermentacji samych osadów ściekowych)

^d) współczynnik produkcji biogazu



Poprawa zdolności do biodegradacji o 18,5%
 Zmniejszenie o 25% HRT
 Poprawa produkcji biogazu 12,8%

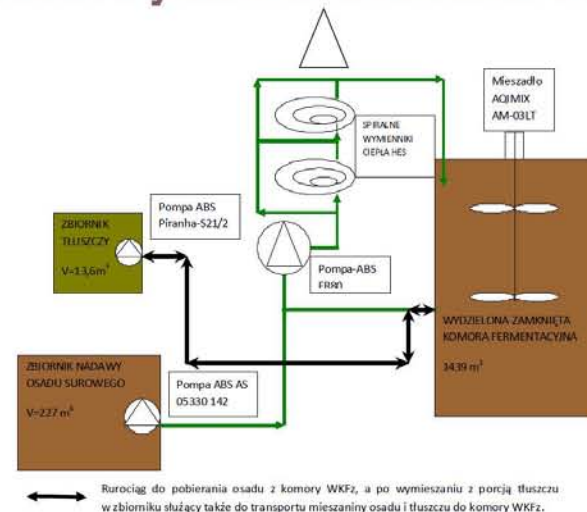


Wpływ na fermentację osadów ściekowych – przykłady oczyszczalni

Oczyszczalnia ścieków w Brzegu - kofermentacji osadów ściekowych z tłuszczami odpadowymi

„Wzrost produkcji biogazu nawet o 80%
107 m³ biogazu na każdą 1 Mg tłuszczu
dozowanego do komór fermentacyjnych. Taka ilość
biogazu pozwala na wyprodukowanie dodatkowo
180 kW energii elektrycznej i około 2,8 kW
odzyskanej ze spalin energii cieplnej”.

Rak A., Sudak M., Gazda M. 2012. *Badania kofermentacji osadów ściekowych z tłuszczami odpadowymi w oczyszczalni ścieków w Brzegu. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Nr 2012/03*



Oczyszczalnia ścieków w Koziegłowach Poznań - kofermentacji osadów ściekowych z odpadami z przemysłu drobiowego

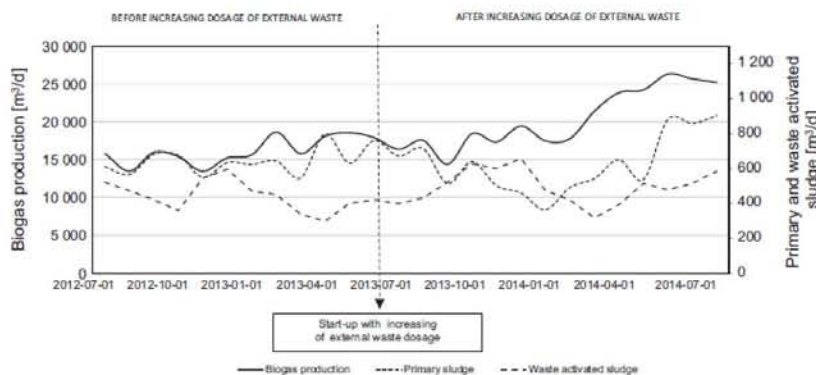


Fig. 4. The biogas production and the sludge volume in the full-scale trial.

„Wzrost produkcji biogazu nawet o 30%
z 0.38 m³/kg VS do 0.49 m³/kg VS
St. pokrycia zapotrzebowania na energię
z 57 do 80%)”

Budyh-Gorzna, M., Smoczynski, M., & Oleskiewicz-Popiel, P. (2016). Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste. *Applied Energy*, 161, 387-394.



Metoda	Technologie komercyjne
(A) Mechaniczne	
Ultradźwięki	Biosonator, Sonix, Iwe.Tec, Smart DMS, Sonolyzer, Hielscher
Mikrofale	-
Pole elektryczne	OpenCEL, PowerMod, BioCrack
Wysoko ciśnieniowa homogenizacja	MicroSludge™, Crown Cellruptor
Mielenie	-
(B) Termiczne	
Termiczna	Cambi (ponad 20 instalacji), Biothelys® (ponad 10 instalacji), Exelys, Turbotec CTH, Lysotherm, Biorefinex
(C) Chemiczne	
Hydroliza kwaśna	-
Hydroliza alkaliczna	-
ozonowanie	Aspal SLUDGE™, Praxair®Lyso™
Fenton	-
(D) Biologiczne	
TPAD	2PAD®
MEC	Skala pilotażowa na oczyszczalniach

CAMBI PLANT LOCATIONS



Model



B2



B6



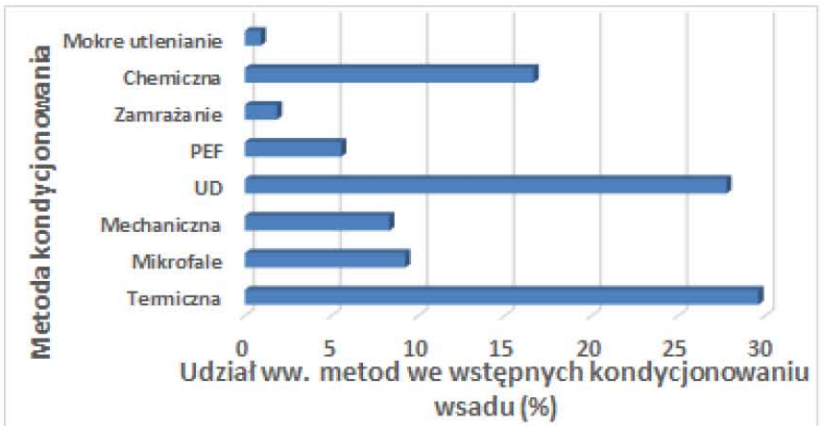
B12



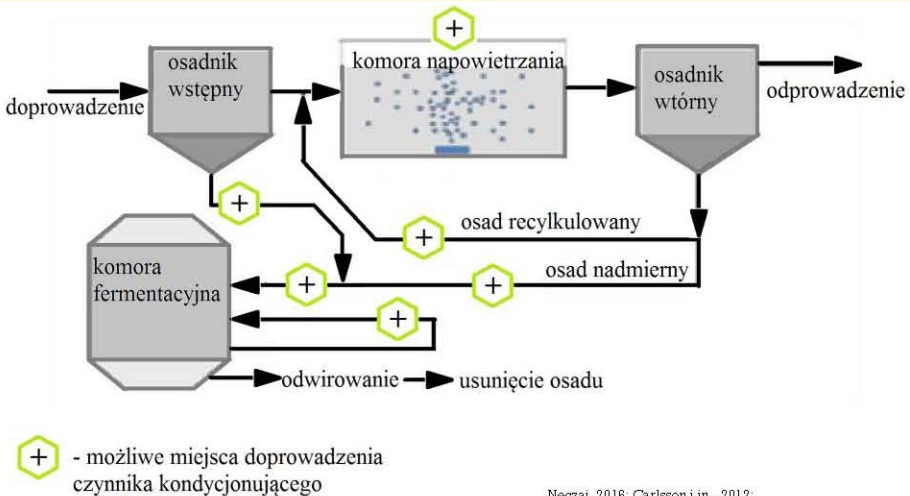
Efekt obróbki wstępnej	UD	Termiczna		Mikrofale	Mechaniczna	Chemiczna			Pole elektryczne	Mokre utlenianie	Zamrażanie/rozmrzanie
		<100°C	>100°C			O ₃ /utlenianie	zasada	kwasy			
Zmniejszenie rozmiarów cząsteczek	+	+	-/+	na	+	0/+	na	na	Na	na	na
Uplynnienie materii	0/+	+	+	+	+	+	+	na	+	+	+
Tworzenie związków refrakcyjnych	na	0	+	0	na	+	+	na	Na	na	na
Poprawa podatności na biodegradację	0/+	+	0/+	0/+	+	0/+	-/+	na	+	-	na
Zmniejszenie zawartości materii organicznej	na	na	+	na	na	na	na	na	Na	+	+

+ efekt pozytywny; 0 brak efektu, - efekt negatywny; -/0 efekt negatywny i brak efektu; -/+ efekt negatywny i efekt pozytywny; 0/+ brak efektu i efekt pozytywny; na brak informacji; UD - ultradźwięki

Metody stosowane do kondycjonowania osadów



Potencjalne lokalizacje metody na oczyszczalni ścieków

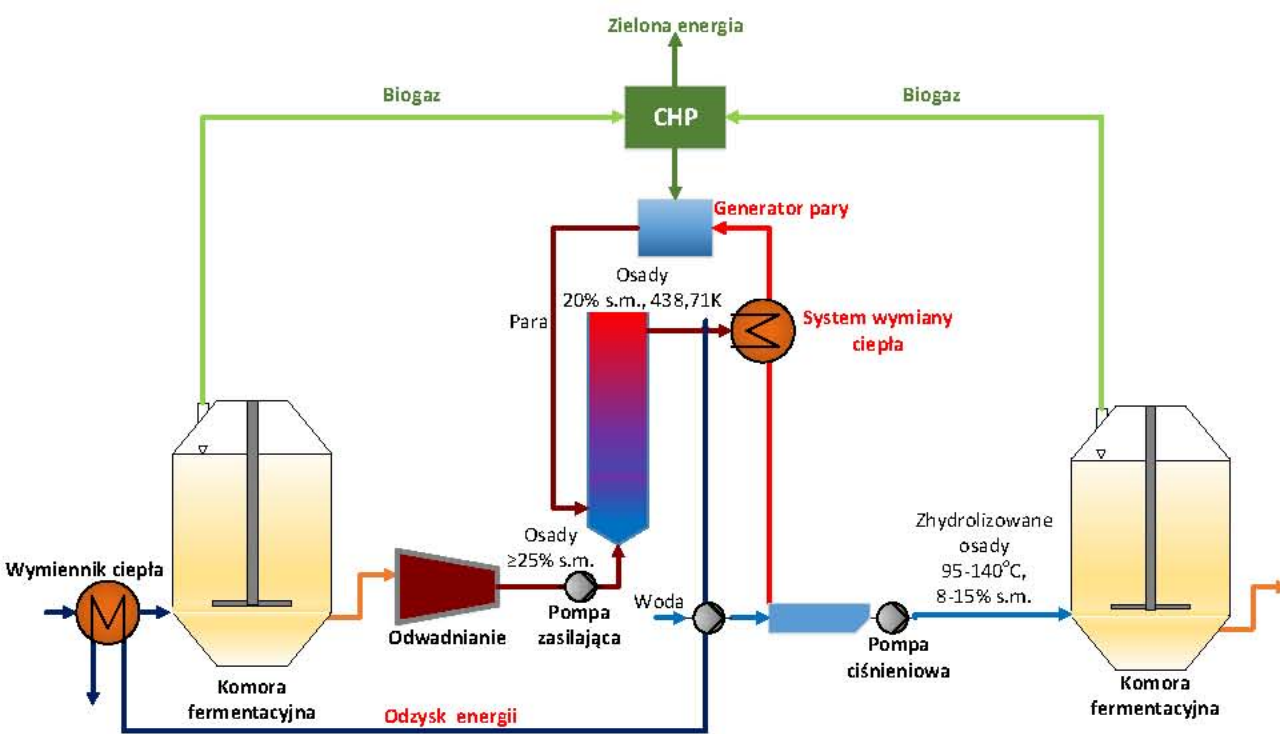


+ - możliwe miejsca doprowadzenia czynnika kondycjonującego

Rodzaj osadów	Warunki kondycjonowania	Parametry procesowe fermentacji	Wzrost produkcji biogazu (Y)	Źródło
Osady mieszane (WAS poddany obróbce)	170°C, HRT 40 min, 7,6 bar	CSTR, 35°C, HRT 10 i 20 d, skala pilotowa	17% przy HRT 20 d, 82% przy HRT 10 d	Souza i in., 2013
Osady mieszane	165-180°C 30-60 min	CSTR, HRT 17 d, pełna skala	20%	Kepp i in., 2000
Osady mieszane	140°C 1 min 0,6 MPa	Proces dwustopniowy, 55-53°C, pełna skala	18%	Zabraska i in., 2006
Osady mieszane	70°C 9-48 h	CSTR, 55°C, HRT 10 d, skala laboratoryjna	20%	Ferrer i in., 2009
Osady mieszane	120°C, 2 atm 5-60 min	CSTR, 35°C, skala laboratoryjna	39%	Serrano i in., 2015
WAS	Mikroareacja, 65°C, 1 d	CSTR, 35°C, HRT 21 i 42 d	Y nie wzrosło, 30% wzrost usunięcia ChZT	Dumas i in., 2010

Osad	Warunki kondycjonowania	Warunki fermentacji	Efekt	Źródło
Osady czynne (43g/l)	300meq NaOH/l 175°C, 60min	Fermentacja okresowa, 25 dni, 35°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 62%	Stuckey i McMarty, 1978
Osady czynne (8,4g/l)	0,3g NaOH/g s.m.o., 130°C, 5min	Fermentacja okresowa, 10 dni, 37°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 31%	Tanaka i in. 1997
Osady czynne (17g/l)	7g NaOH/l 121°C, 30min	Fermentacja okresowa, 7 dni, 37°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 38%	Kim i in., 2003
Osady czynne (30g/l)	45meq NaOH/l, 55°C, 240 min	Fermentacja okresowa, 20 dni, 35°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 88%	Heo i in. 2003
Osady czynne (17g/l)	1,65g KOH/l, pH 10, 130°C, 60min	CSTR, 25 dni, 35°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 75%	Valo i in., 2004
Osady czynne	Promieniowanie mikrofalowe, NaOH (pH 12) 160°C, 16min	Fermentacja półciągła, HRT15 dni 37°C	Wzrost produkcji CH ₄ o 53%	Doğan i Sanin, 2009

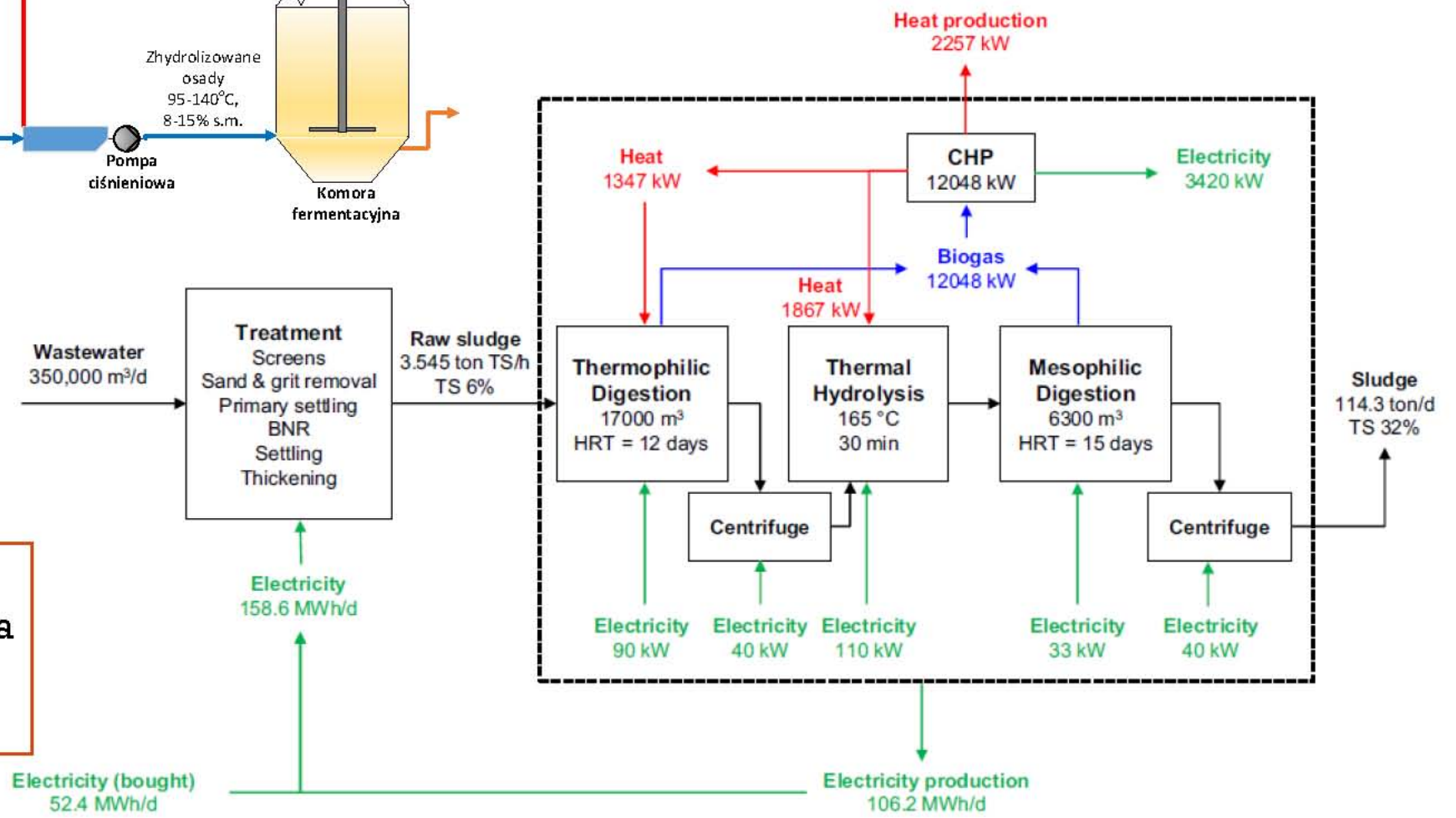




Schemat zmodyfikowanej technologii Exelys- DLD Mode (Digestion - Lysis - Digestion) (Neczaj, 2016)

Przed wprowadzeniem St. pokrycia zapotrzebowania na energię 49%
Po wprowadzeniu 65%

Csepel waste water treatment plant (WWTP) (3.5 million PE) in Budapest, Hungary (Shen i in., 2015)



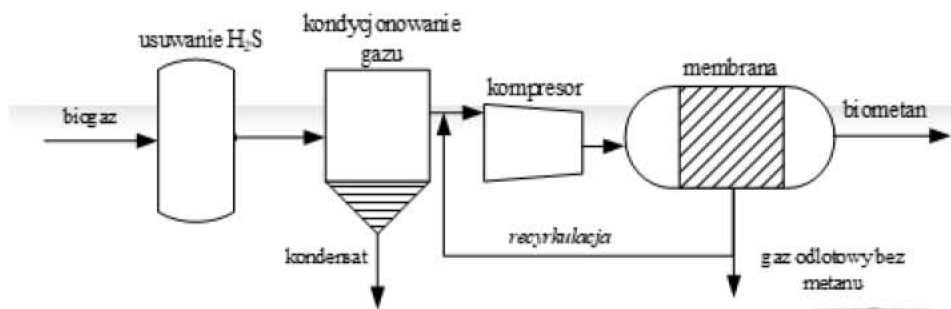
Metoda	Mechanizm	Kontrola procesu	Dezintegracja (%)	Szacunkowy koszt (€/tonę)	Wzrost produkcji biogazu	Zalety	Wady	Technologie komercyjne
(A) Mechaniczne								
Ultradźwięki	Kawitacja	moc, czas ekspozycji	100	8330	↑↑	całkowita dezintegracja; niskie koszty operacyjne, prostota konserwacji, łatwa do implementacji na oczyszczalni, skalowność	duże zapotrzebowanie na energię; wysokie koszty konserwacji, sonda wymaga wymiany co 1,5-2 lat,	Biosonator, Sonix, Iwe.Tec, Smart DMS, Sonolyzer, Hielscher
Mikrofały	Efekt cieplny (ciepło wewnątrzkomórkowe, rozrywanie wiązań wodorowych)	moc, czas ekspozycji, częstotliwość	-	-	↑↑	szybkie i równomierne ogrzewanie; usuwanie patogenów, łatwość obsługi i kontroli	duże zapotrzebowanie na energię, skalowalność	Aspal SLUDGE™, Praxair@Lyso™
Pole elektryczne	Pole elektromagnetyczne	Napięcie, częstotliwość, czas ekspozycji	-	-	↑↑	korzyści ekonomiczne	Wysokie zapotrzebowanie na energię, skomplikowane sprzęt, kompleksowa eksploatacja i konserwacja	OpenCEL, PowerMod, BioCrack
Wysoko ciśnieniowa homogenizacja	Turbulencja, kawitacja, siły ścinające	Ciśnienie, ekspozycja czas, cykl	85	42-146	↑	łatwa obsługa; niski koszt	skomplikowana obsługa i konserwacja; wysokie zapotrzebowanie na energię	MicroSludge™, Crown Cellruptor
Mielenie	Siły ścinające	Czas ekspozycji	90	414-2500	↑	wysoka efektywność; stosunkowo prosta	Energochłonność	-
(B) Termiczne								
Termiczna	Temperatura	Temperatura, czas ekspozycji	30	190	↑↑↑	Sanitacja; usuwanie odorów; redukcja ilości osadów; poprawa odwadniania, skalowność	Wysokie zapotrzebowanie na energię i koszty kapitałowe; ryzyko tworzenia trudnobiodegradowalnych związków; uwalnianie amoniaku	Cambi, Biothelys®, Exelys, Turbotec CTH, Lysotherm, Biorefinex
(C) Chemiczne								
Hydroliza kwaśna	Hydroliza ścian komórkowych	Dawka, czas ekspozycji	-	-	↑	proste urządzenie; łatwa obsługa; niski koszt	Koszty reagentów chemicznych; korozja; specjalne materiały do budowy reaktorów; konieczność neutralizacja przed fermentacją	-
Hydroliza alkaliczna	Solwatacja, saponifikacja	Dawka, czas ekspozycji	-	-	↑		j.w. + ; ryzyko tworzenia trudnobiodegradowalnych związków, toksyczność Na ⁺	-
ozonowanie	Formowanie rodników	Dawka, czas ekspozycji	90	800	↑	elastyczność działania; poprawa odwadniania; redukcja ilości osadów, ; usuwanie patogenów	Wysokie zapotrzebowanie na energię; zwiększenie dawki polimerów przy odwadnianiu; możliwość uwalniania metali do cieczy nadosadowej	Znalazła zastosowanie na oczyszczalni do redukcji ilości osadów
Fenton	Formowanie rodników	j.w. + pH, iloraz Fe ²⁺ /H ₂ O ₂	-	-	-	proste urządzenie; łatwa obsługa, niski zapotrzebowanie na energię	Niskie pH (~3,0); Koszty reagentów chemicznych; osady chemiczne	-
(D) Biologiczne								
TPAD	Warunki termofilowe/mezofilowe	Temp fazy termofilowej, HRT	-	-	↑	Niskie zużycie energii cieplnej; niskie zapotrzebowanie energetyczne	Ograniczone dane w zakresie optymalizacji procesu	2PAD®
MEC	Elektrometanogenezę	Napięcie, pH, temperatura	-	-	↑	Oczyszczanie biogazu, poprawa stabilności procesu	Wolny rozruch, silny wpływ pH, efektywność zależy od materiałów	Skala pilotażowa na oczyszczalniach

Tabela Skład biogazu wytwarzanego w trakcie fermentacji metanowej oraz wybrane jego właściwości (Grosser, 2017b)

Parametr	Jednostka	
Metan	% obj.	50-75
Wodór	% obj.	<1
Dwutlenek węgla	% obj.	25-45
Tlenek węgla	% obj.	<0,3
Azot	% obj.	<2
Tlen	% obj.	<2
Siarkowodór	mg/l	<1000
Amoniak	mg/l	<100
Typowa wartość opałowa	MJ/Nm ³	23
	kWh/Nm ³	6,5
	MJ/kg	20,2
Ekwiwalent paliwa	0,6-0,65 l oleju/m ³ biogazu	<div data-bbox="1589 822 2262 1282" style="background-color: #ffffcc; padding: 10px; border: 1px solid #ccc;"> <p>Typowa wartość opałowa 16,8 do 23 MJ/m³,</p> <p>maksymalnie 35,7 MJ/m³ gdy CH₄~100% obj.</p> </div>
Granica wybuchowości	6-12% biogazu w powietrzu	
Temperatura zapłonu	650-750°C	
Ciśnienie krytyczne	75-89 bar	
Temperatura krytyczna	-82,5°C	
Gęstość	1,2 kg/Nm ³	



PROCESY MEMBRANOWE

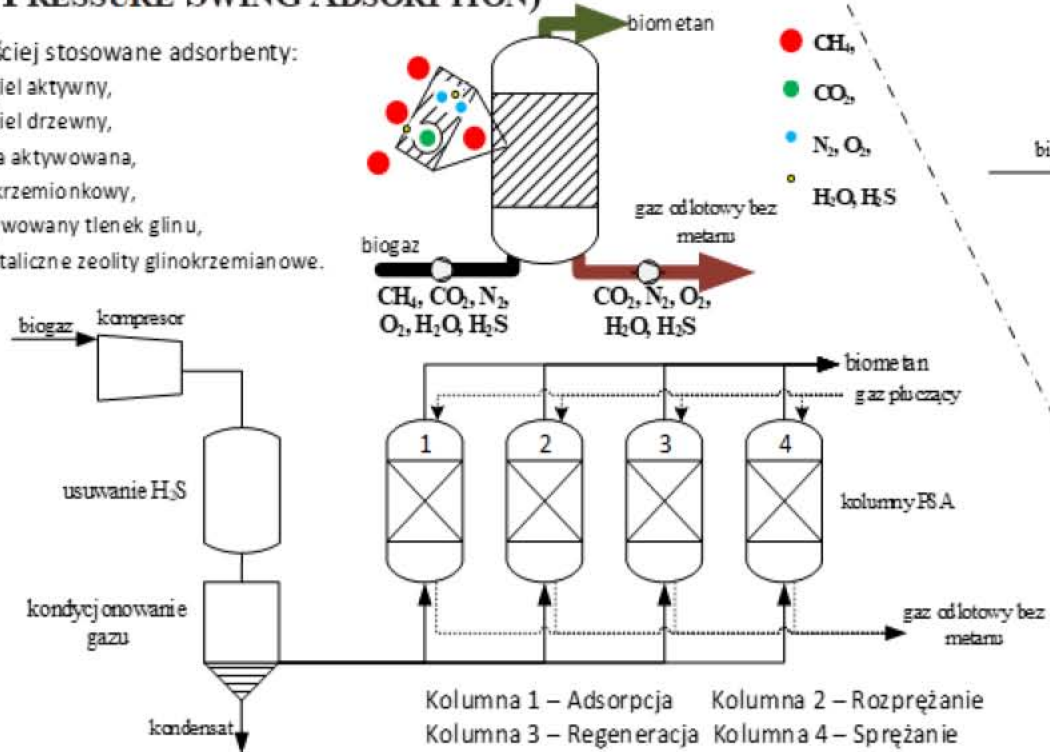


TECHNOLOGIA

ADSORPCJA ZMIENNOCIŚNIENIOWA (PSA - PRESSURE SWING ADSORPTION)

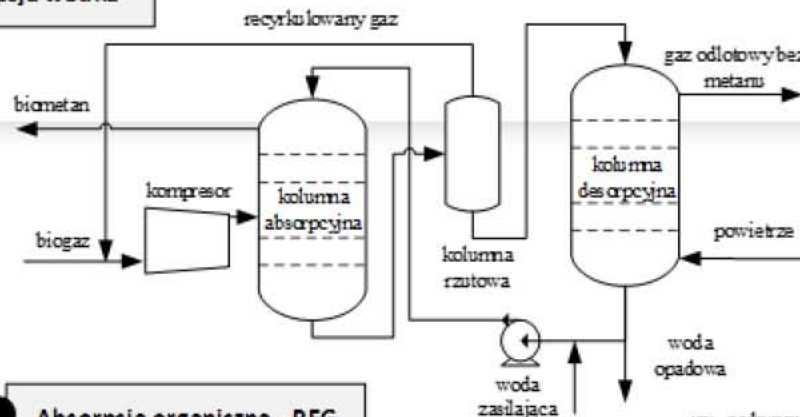
Najczęściej stosowane adsorbenty:

- ❖ węgiel aktywny,
- ❖ węgiel drzewny,
- ❖ glina aktywowana,
- ❖ żel krzemionkowy,
- ❖ aktywowany tlenek glinu,
- ❖ krystaliczne zeolity glinokrzemianowe.

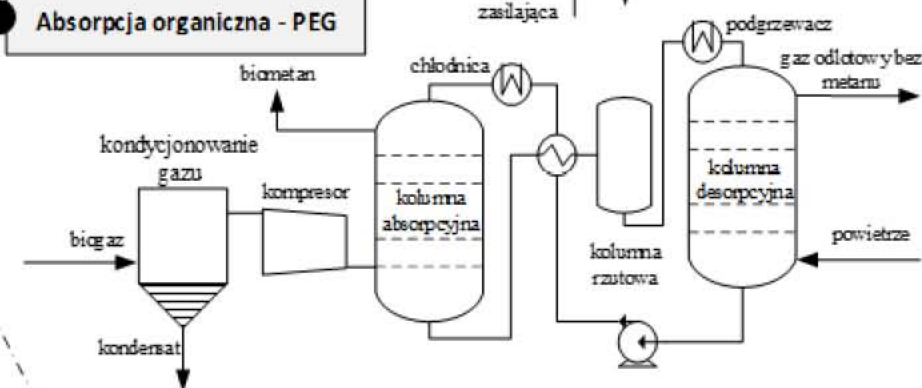


ABSORPCJA

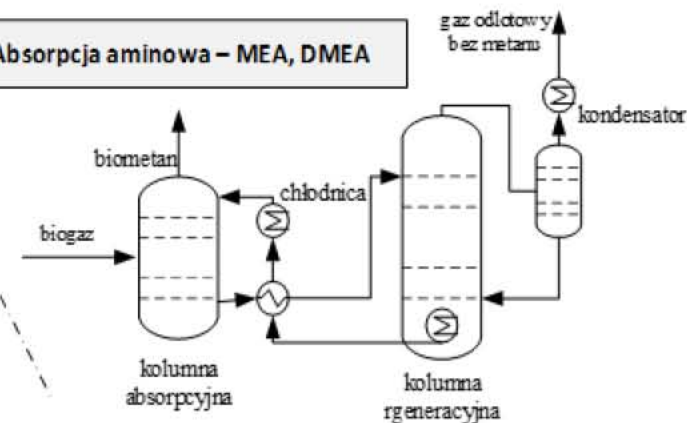
Absorpcja wodna



Absorpcja organiczna - PEG



Absorpcja aminowa - MEA, DMEA



Technologia	Zalety	Wady
Adsorpcja zmiennociśnieniowa (pressure swing adsorption - PSA)	wysoka wydajność 95-99%; niskie zapotrzebowanie na energię z niską emisją zanieczyszczeń oraz możliwością usunięcia z biogazu azotu i tlenu; łatwy i szybki rozruch	wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne ze względu na dużą liczbę kolumn; konieczność usunięcia przed procesem z biogazu siarkowodoru i wody; przy nieprawidłowym działaniu zaworów duże straty metanu
Absorpcja wodna (high pressure water scrubbing)	wysoka wydajność >97%; usunięcie zarówno dwutlenku węgla jak i siarkowodoru; nie wymaga dozowania reagentów chemicznych, niskie straty metanu (<2%); prosta w	wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne; niska efektywność; mniejsza wydajność w porównaniu z innymi metodami; niska elastyczność, długi czas procesu, wysokie zapotrzebowanie na energię; problemy

	Cryogenic	Sabatier process	PSA	Water scrubbing	Physical scrubbing	Chemical absorption	Membrane separation
Consumption for raw biogas (kWh/Nm ³)	0.76	nf	0.23-0.30	0.25-0.3	0.2-0.3	0.05-0.15	0.18-0.20
Consumption for clean biogas (kWh/Nm ³)	nf	nf	0.29-1.00	0.3-0.9	0.4	0.05-0.25	0.14-0.26
Heat consumption (kWh/Nm ³)	nf	nf	None	None	< 0.2	0.5-0.75	None
Heat demand (°C)	- 196	270			55-80	100-180	
Cost	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	High
CH ₄ losses (%)	2	nf	< 4	< 2	2-4	< 0.1	< 0.6
CH ₄ recovery (%)	97-98	97-99	96-98	96-98	96-98	96-99	96-98
Pre-purification	Yes	Recommended	Yes	Recommended	Recommended	Yes	Recommended
H ₂ S co-removal	Yes	No	Possible	Yes	Possible	Contaminant	Possible
N ₂ and O ₂ co-removal	Yes	No	Possible	No	No	No	Partial
Operation pressure (bar)	80	8-10	3-10	4-10	4-8	Atmospheric	5-8
Pressure at outlet (bar)	8-10		4-5	7-10	1.3-7.5	4-5	4-6

Separacja membranowa (membrane separation - MS)	membranowa, elastyczna, szybki rozruch, niski koszt utrzymania; małe zapotrzebowanie na przestrzeń instalacji; łatwa konserwacja i obsługa; brak wytwarzania szkodliwych odpadów	wytwarzanego gazu niż inne metody, wysoka cena membran, dla produktów o wysokiej czystości wymagany jest układ złożony z kilku membran
Separacja kriogeniczna (cryogenic separation - CS)	wysoka czystość biometanu (>98%) oraz wydzielanego w trakcie procesu CO ₂ , który może być używany jako suchy lód; niskie zapotrzebowanie na energię; możliwość uzyskania metanu w postaci płynnej co zmniejsza objętość produktu i ułatwia jego dystrybucję	wysokie koszty inwestycyjne i operacyjne; skomplikowany układ z wieloma urządzeniami procesowymi (sprężarki; wymienniki ciepła, chłodnice); wysokie wymagania energetyczne

Porównanie różnych pilotażowych i komercyjnych instalacji uszlachetniania biogazu (Angelidaki i in., 2018)



Tabela Koszty inwestycyjne (Tamm i in., 2013)

Technologia	Koszt
PSA	0,4 € /Nm ³ Koszty kapitałowe dla 250, 500, 600 i 1000 m ³ /h odpowiednio: 5,5, 3,2, 2,4 i 2,2 kUSD/(m ³ /h)
HWPS	0,13 € /Nm ³ Koszty kapitałowe dla 250, 500, 660 i 1000 m ³ /h odpowiednio: 1,22, 2,7, 2,78 i 2 kUSD/(m ³ /h)
OPS	Koszty kapitałowe dla 250, 500 i 1000 m ³ /h odpowiednio: 4,8, 3,8 i 2,4 kUSD/(m ³ /h)
CSP	0,17 € /Nm ³ Koszty kapitałowe dla 100, 250, 500 i 1000 m ³ /h odpowiednio: 10,5, 5,5, 3,6 i 2,6 kUSD/(m ³ /h)
MS	0,12 € /Nm ³ Koszty kapitałowe dla 100, 600 i 700-1400 m ³ /h odpowiednio: 6,6, 2,5 i 2,2 kUSD/(m ³ /h)

Tabela Dostępność techniczna, koszty konserwacji i zapotrzebowanie na energię (Tamm i in., 2013)

Technologia	Koszty konserwacji (euro/rok)	Koszty (euro/m ³)	zapotrzebowanie na energię (kWh/m ³ biogazu)
PSA	56 000	0,26	0,285-0,6
HWPS	15 000	0,15	0,20-0,43
OPS	39 000	-	0,40-0,51
CSP	59 000	-	0,12-0,65
MS	25 000	0,22	0,19-0,77
CS	-	0,40	0,42

Adsorpcja zmiennociśnieniowa (pressure swing adsorption - PSA)

Absorpcja wodna (high pressure water scrubbing - HPWS)

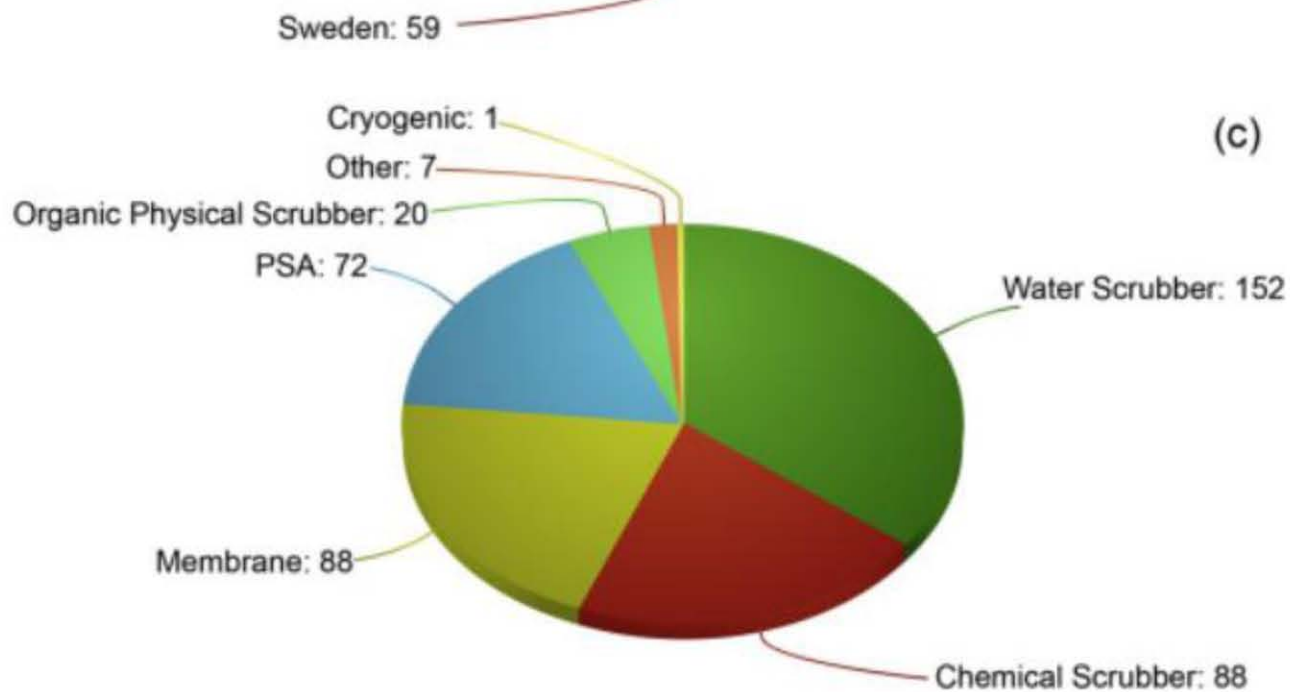
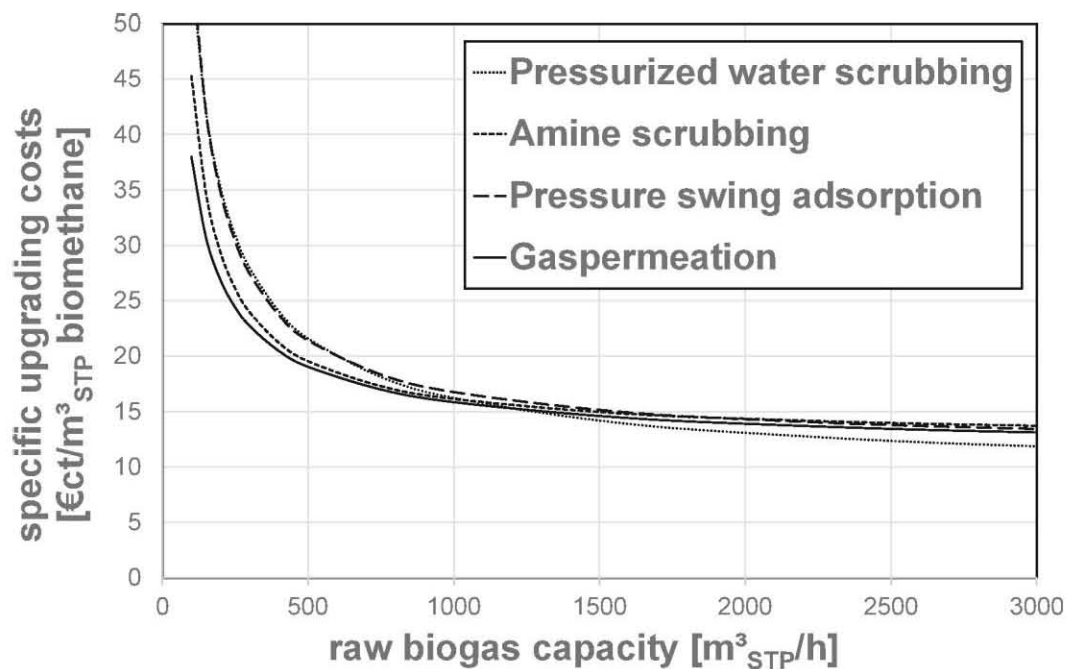
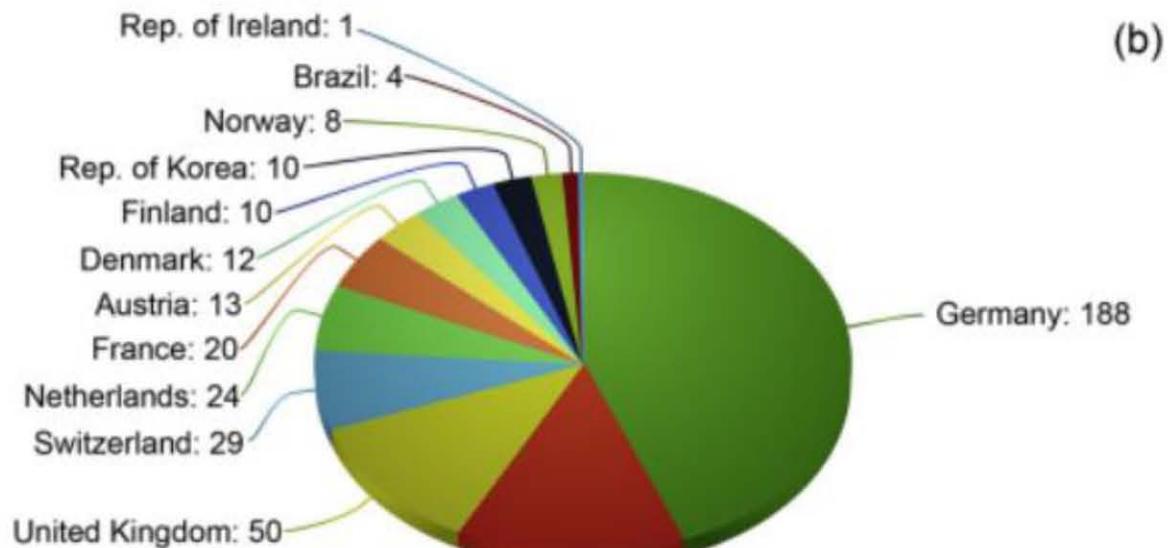
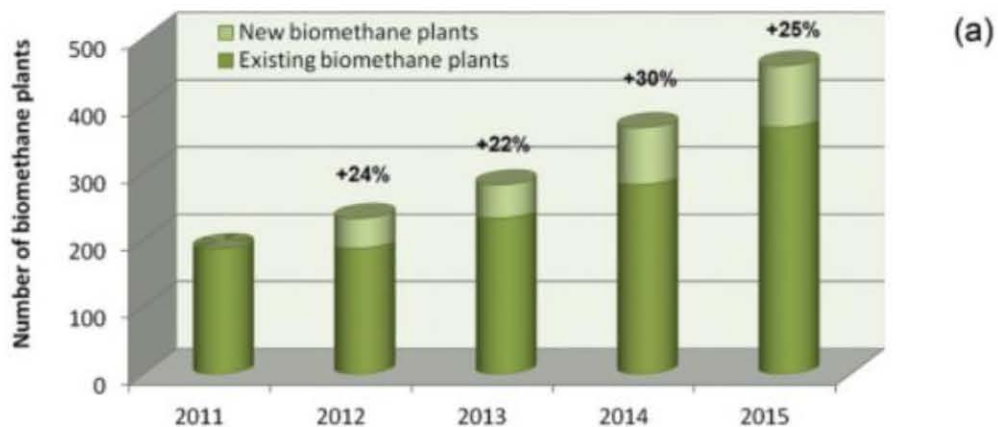
Absorpcja organiczna (organic physical scrubbing - OPS)

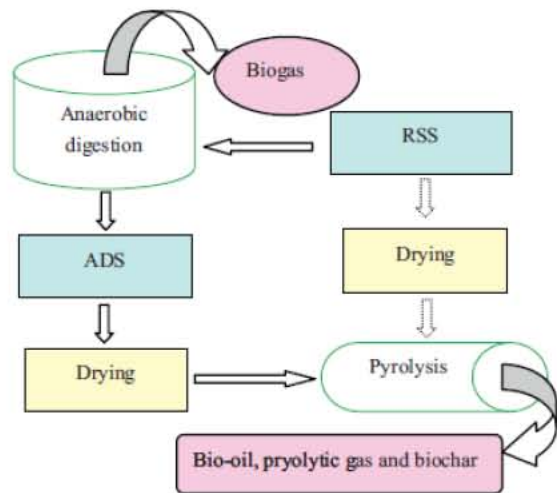
Absorpcja aminowa (chemical scrubbing process - CSP)

Separacja membranowa (membrane separation - MS)

Separacja kriogeniczna (cryogenic separation - CS)







CP
SP

Pathway	Bio-fuel products	Residue
Pathway 1: SS => AD => Pyrolysis	Biogas+ bio-oil + pyrolytic gas	Biochar
Pathway 2: SS => Pyrolysis	Bio-oil + pyrolytic gas	Biochar

Table 3

Summary of life cycle energy and GHG emission input and output for the two systems (FU = treatment of 500 m³ liquid sewage sludge per day).

Unit phase	CP system		SP system	
	Energy use (GJ)	GHG emissions (t CO ₂ eq)	Energy use (GJ)	GHG emissions (t CO ₂ eq)
<i>Energy use and GHG emissions</i>				
Plants construction	1.29	0.12	0.61	0.05
Sludge dewatering	8.39	0.29	14.75	0.65
Sludge drying	168.03	9.19	277.76	20.89
AD operation	110.04	6.01		
Pyrolysis operation	26.84	1.49	44.41	3.34
Biochar transport	1.50	0.02	1.07	0.02
Total	316.21	17.09	339.50	24.96
<i>Energy output and GHG emissions avoided</i>				
	Energy output (GJ)	GHG emissions avoided (t CO ₂ eq)	Energy output (GJ)	GHG emissions avoided (t CO ₂ eq)
Natural gas substitution	312.77	16.95		
Crude oil substitution	135.20	9.80	348.01	25.24
Fertilizer substitution	0.63	0.42	0.78	0.51
Biochar soil N ₂ O reduction	2.38		2.95	
Biochar carbon storage	2.35		8.07	
Total	448.60	32.90	348.79	36.76

Results of mass and energy analysis for the two pathways.

	Pathway 1: RSS ^a → AD ^a → Pyrolysis		Pathway 2: RSS → Pyrolysis
	RSS → AD	ADS ^a → Pyrolysis	
For conversion of 100 kg PS (VS ^a in the PS ^a = 84%; VS in the ADS = 59%)			
Process yields	61.0 m ³ (biogas) 39.0 kg (ADS)	10.2 kg (bio-oil) 20.7 kg (biochar)	42 kg (bio-oil) 33 kg (biochar)
Energy output (MJ)	1573.2 (biogas)	375.4 (bio-oil) 206.8 (biochar)	1554 (bio-oil) 561 (biochar)
AEE ^b (%)	84.7		67.6
GEE ^b (%)	93.7		92.0
For conversion of 100 kg WAS ^a (VS in the WAS = 69%; VS in the ADS = 59%)			
Process yields	24.4 m ³ (biogas) 75.6 kg (ADS)	19.7 kg (bio-oil) 40.1 kg (biochar)	31 kg (bio-oil) 43 kg (biochar)
Energy output (MJ)	629.3 (biogas)	727.4 (bio-oil) 400.7 (biochar)	1147 (bio-oil) 559 (biochar)
AEE ^b (%)	71.4		60.4
GEE ^b (%)	92.5		89.8

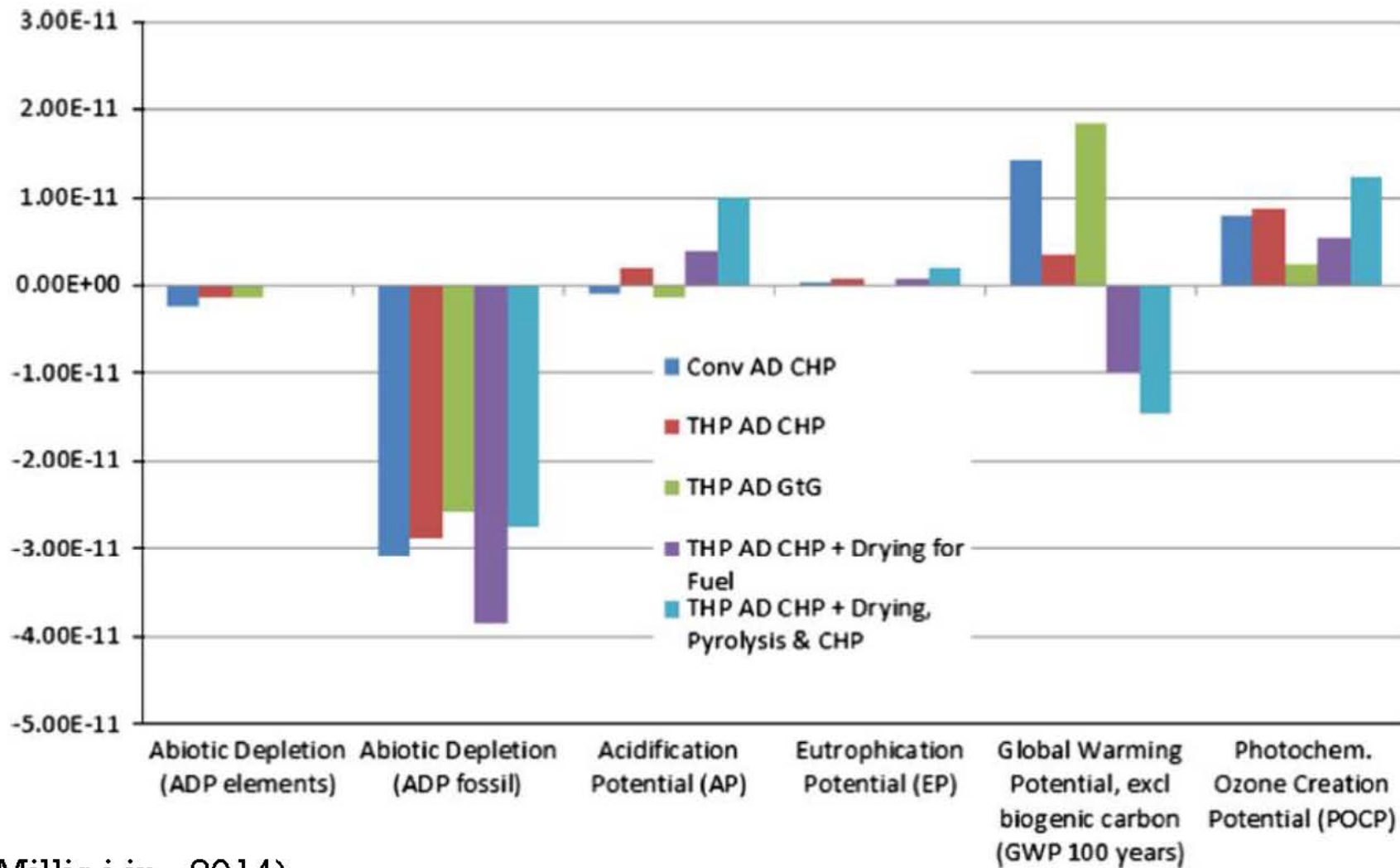
^a RSS = raw sewage sludge, PS = primary sludge, WAS = waste activated sludge, ADS = anaerobically digested sludge.

^b AEE = the apparent energy efficiency, GEE = the gross energy efficiency (see Section 4.2.3).

Układy łączące różne metody

(Cao i Pawłowski, 2012, 2013)





(Millis i in., 2014)

- 1 – conventional AD with CHP,
- 2 – Thermal Hydrolysis Process (THP) AD with CHP,
- 3 – THP AD with bio-methane grid injection,
- 4 – THP AD with CHP followed by drying of digested sludge for solid fuel production,
- 5 – THP AD followed by drying, pyrolysis of the digested sludge and use of the both the biogas and the pyrolysis

Wyczerpywanie zasobów naturalnych
(Abiotic Depletion Potential, ADP zasoby nieodnawialne i ADP zasoby kopalne)

Potencjał zakwaszania
(Acidification Potential AP)

Potencjał eutrofizacji
(Eutrophication Potential EP)

Potencjał globalnego ocieplenia (Global Warming Potential GWP)

Potencjał niszczenia warstwy ozonowej
(Ozone Depletion Potential ODP),



Dziękuję za uwagę



- Neczaj E., 2016, Metody intensyfikacji produkcji biogazu z komunalnych osadów ściekowych, Częstochowa : Wydaw. Politechniki Częstochowskiej.
- Silvestre, G., Fernández, B., Bonmatí, A., 2015, Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 101, s. 255-262.
- Tyagi, V. K., Lo, S. L., 2013, Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, s. 708-728.
- Cano, R., Pérez-Elvira, S. I., Fdz-Polanco, F., 2015, Energy feasibility study of sludge pretreatments: a review. *Applied Energy*, 149, s. 176-185.
- Gupta, P., Singh, R. S., Sachan, A., Vidyarthi, A. S., Gupta, A., 2012, A re-appraisal on intensification of biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), s. 4908-4916.
- Athanasoulia, E., Melidis, P., Aivasidis, A., 2012, Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. *Renewable Energy*, 47, s. 147-151.
- Grosser, A., 2017, The influence of decreased hydraulic retention time on the performance and stability of co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge and organic fraction of municipal waste. *Journal of environmental management*.
- Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., Ferrer, I., 2016, Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: from lab-scale research to full-scale application. *Bioresource technology*, 199, s. 386-397.
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., Li, Y. Y., 2017, Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, s. 559-577.
- Hanjie, Z., 2010, Sludge treatment to increase biogas production. *Trita-LWR Degree Project*, 10-20.
- Carlsson M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F., 2012, The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: a review. *Waste Management*, 32(9), s. 1634-1650.
- Grosser A., Neczaj E., Grobelak A., Milczareka M., Worwag M., 2011, Methods for Intensification of Biogas Production from Sewage Sludge, International Conference Environmental (Bio) Technologies and EU-FP7 Environment Brokerage Event. Proceedings of the Conference. 05-08 September. Gdańsk, 2011
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., Lens, P. N., 2014, Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied energy*, 123, s. 143-156.
- Jędrczak A., 2008, Biologiczne przetwarzanie odpadów, Warszawa, wyd. Naukowe PWN.
- Bień J., Grosser A., Neczaj E., Worwag M., Celary P., 2010, Co-digestion of sewage sludge with different organic wastes: a review, *Polish journal of environmental studies*, 2, s. 24-30.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S., 2014, A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, s. 412-427.
- Long, J. H., Aziz, T. N., Francis, L., & Ducoste, J. J. (2012). Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): a review of gas production and process limitations. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(3), 231-245.
- Kim, M., Chowdhury, M. M. I., Nakhla, G., Keleman, M., 2017, Synergism of co-digestion of food wastes with municipal wastewater treatment biosolids. *Waste Management*, 61, s. 473-483.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X., 2017, Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 s. 1485-1496.
- Shah, F. A., Mahmood, Q., Rashid, N., Pervez, A., Raja, I. A., Shah, M. M., 2015, Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, s. 627-642.
- Grosser, A., Neczaj, E., 2016, Enhancement of biogas production from sewage sludge by addition of grease trap sludge. *Energy Conversion and Management*, 125, s. 301-308.
- Tandukar, M., Pavlostathis, S. G., 2015, Co-digestion of municipal sludge and external organic wastes for enhanced biogas production under realistic plant constraints. *Water research*, 87, s. 432-445.
- Nayono S.E., 2010, Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production, KIT Scientific Publishing, Demand.
- Grosser A., 2013, Kofermentacja osadów ściekowych i odpadów tłuszczowych, rozprawa doktorska
- Budyh-Gorzna, M., Smoczyński, M., & Oleskiewicz-Popiel, P. (2016). Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste. *Applied Energy*, 161, 387-394.
- Rak A., Sudak M., Gazda M., 2012. Badania kofermentacji osadów ściekowych z tłuszczami odpadowymi w oczyszczalni ścieków w Brzegu. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr 2012/ 03
- Grosser, A., Neczaj, E., Singh, B. R., Almås, Å. R., Brattebø, H., Kacprzak, M., 2017, Anaerobic digestion of sewage sludge with grease trap sludge and municipal solid waste as co-substrates. *Environmental research*, 155, s. 249-260.
- Wójtowicz A., Strategia inwestycyjna współczesnych przedsiębiorstw komunalnych wykorzystujących środki funduszy ochrony środowiska, <http://www.wodociagi.slupsk.pl/wp-content/uploads/2015/11/Prezentacja-Prezesa-Zarządu-Andrzeja-Wójtowicza.pdf>
- Andriani, D., Wresta, A., Atmaja, T. D., Saepudin, A., 2014, A review on optimization production and upgrading biogas through CO2 removal using various techniques. *Applied biochemistry and biotechnology*, 172(4), s. 1909-1928.
- Khan, I. U., Othman, M. H. D., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., Azelee, I. W., 2017, Biogas as a renewable energy fuel—A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, s. 277-294..
- Tamm, D., Persson, T., Hultberg, C., Bauer, F., 2013, Biogas upgrading-Review of commercial technologies. *SGC Rapport*, 270.
- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., & Li, Y. Y. (2017). Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 559-577.
- Tyagi VK, Lo SL. Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review. *Rev Environ Sci Bio* 2011;10(215):42.
- Chu LB, Yan ST, Xing XH, Yu AF, Sun XL, Jurcik B. Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation. *Chemosphere* 2008;72:205–12.
- Pilli S, Yan S, Tyagi RD, Surampalli RY. Overview of Fenton pre-treatment of sludge aiming to enhance anaerobic digestion. *Rev Environ Sci Bio* 2015;14:453–72.
- Zhen GY, Lu XQ, Wang BY, Zhao YC, Chai XL, Niu DJ, et al. Enhanced dewatering characteristics of waste activated sludge with Fenton pretreatment: effectiveness and statistical optimization. *Front Environ Sci Eng* 2014;8:267–76.
- Tony MA, Zhao YQ, Fu JF, Tayeb AM. Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: effectiveness and optimising study to improve dewaterability. *Chemosphere* 2008;72:673–7.
- Neyens E, Baeyens J, Weemaes M, De Heyder B. Advanced biosolids treatment using H2O2-oxidation. *Environ Eng Sci* 2002;19:27–35.
- Liu H, Yang JK, Zhu NR, Zhang H, Li Y, He S, et al. A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance. *J Hazard Mater* 2013;258:144–50.
- Erden G, Filibeli A. Improving anaerobic biodegradability of biological sludges by Fenton pre-treatment: effects on single stage and two-stage anaerobic digestion. *Desalination* 2010;251:58–63.
- Dewil R, Appels L, Baeyens J, Degrève J. Peroxidation enhances the biogas production in the anaerobic digestion of biosolids. *J Hazard Mater* 2007;146:577–81.
- Pilli S, More TT, Yan S, Tyagi RD, Surampalli RY. Fenton pre-treatment of secondary sludge to enhance anaerobic digestion: energy balance and greenhouse gas emissions. *Chem Eng J* 2016;283:285–92.
- Sahinkaya S, Kalipci E, Aras S. Disintegration of waste activated sludge by different applications of Fenton process. *Process Saf Environ* 2015;93:274–81.
- Zhou X, Wang QL, Jiang GM. Enhancing methane production from waste activated sludge using a novel indigenous iron activated peroxidation pretreatment process. *Bioresour Technol* 2015;182:267–71.
- Zhen GY, Lu XQ, Li YY, Zhao YC, Wang B, Song Y, et al. Novel insights into enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated persulfate oxidation. *Bioresour Technol* 2012;119:7–14.
- Zhen GY, Lu XQ, Zhao YC, Chai XL, Niu DJ. Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of Fe(II)-activated persulfate oxidation. *Bioresour Technol* 2012;116:259–65.
- Lv W, Schanbacher FL, Yu ZT. Putting microbes to work in sequence: recent advances in temperature-phased anaerobic digestion processes. *Bioresour Technol* 2010;101:9409–14.
- Han Y, Dague RR. Laboratory studies on the temperature phased anaerobic digestion of domestic primary sludge. *Water Environ Res* 1997;69:1139–43.
- Riau V, De la Rubia MA, Perez M, Martin A, Borja R. Modelling of the temperature-phased batch anaerobic digestion of raw sludge from an urban wastewater treatment plant. *J Environ Sci Heal A* 2012;47:221–7.
- Ce HQ, Jensen PD, Batstone DJ. Pre-treatment mechanisms during thermophilic/psychrophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge. *Water Res* 2010;44:123–30.
- Bolzonella D, Pavan P, Zanette M, Cecchi F. Two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: effect of an extreme thermophilic prefermentation. *Ind Eng Chem Res* 2007;46:6650–5.
- Skias IV, Cavala HN, Lu J, Ahning BK. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70 degrees C prior to anaerobic digestion. *Water Sci Technol* 2005;52:161–6.
- Riau V, De la Rubia MA, Perez M. Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) to obtain class A biosolids: a semi-continuous study. *Bioresour Technol* 2010;101:2706–12.
- Schröder U, Harnisch F, Angenent L. Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification. *Energy Environ Sci* 2015;8:513–9.
- Selembo PA, Perez JM, Lloyd WA, Logan BE. High hydrogen production from glycerol or glucose by electrohydrogenesis using microbial electrolysis cells. *Int J Hydrog Energy* 2009;34:5373–81.
- Montpart N, Rago L, Baeza JA, Guisasaola A. Hydrogen production in single chamber microbial electrolysis cells with different complex substrates. *Water Res* 2015;68:601–15.

