

Action B7: Completing, Incorporating and Evaluating the F4F Process as Part of the EU's Wastes Strategy and other Union Policies

Deliverable B7.4 Data and complete evaluations regarding alternative uses of the F4F product



LIFE Project Number

LIFE15 ENV/GR/000257

LIFE PROJECT NAME or Acronym

LIFE-F4F (Food for Feed)



Data

Action:	B7: Completing, Incorporating and Evaluating the F4F Process as Part of the EU's Wastes Strategy and other Union Policies
Partner:	HMU
Deliverable:	B7.4 Data and complete evaluations regarding alternative uses of the F4F product

Table of contents

1. GENERAL INTRODUCTION REGARDING THE ALTERNATIVE USES OF THE F4F PRODUCT.	3
2. ANAEROBIC DIGESTION IN FRESH FOOD WASTE	4
2.1. ABSTRACT	4
2.2. INTRODUCTION	4
2.3. FOOD WASTE RESIDUES AND FEEDSTOCK	5
2.4. LAB-SCALE ANAEROBIC DIGESTER.....	5
2.5. EXPERIMENTAL PROCEDURE.....	6
2.6. ANALYTICAL METHODS	6
2.7. STATISTICAL ANALYSIS OF THE DATA	6
2.8. REACTOR START-UP AND OPERATION	6
2.9. RESULTS AND DISCUSSION ON BIOGAS PRODUCTION	7
REFERENCES.....	10
3. ANAEROBIC DIGESTION IN DRY FOOD WASTE	12
3.1. ABSTRACT	12
3.2. INTRODUCTION	12
3.3. FEEDSTOCK.....	13
3.4. PRE-TREATMENT OF FEEDSTOCK.....	13
3.5. EXPERIMENTAL PROCEDURE.....	14
3.6. ANALYSES	16
3.7. RESULTS AND DISCUSSION	17
REFERENCES.....	23
4. USE OF DRY FOOD WASTE AS FUEL IN INCINERATION AND GASIFICATION UNITS.....	26
4.1. ABSTRACT	26
4.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
4.3. ΠΛΗΡΗΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΙΩΝ (3) ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ-ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	28
4.4. ΜΠΡΙΚΕΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ 2019	32
4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	34
4.5.1. Πρώτη ύλη βιομάζας για τα πειράματα αεριοποίησης	37
4.5.2. Μέτρηση του παραγόμενου αερίου	39
4.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	40
4.6.1. Διεργασία της αεριοποίησης και πειραματικά αποτελέσματα.....	40

1. General introduction regarding the alternative uses of the F4F product.

Within the framework of the project, and in an effort to establish all possible utilisation routes for the produced from the F4F process end product, alternative uses were tested. These uses were mostly related with the energy utilisation of the produced feed.

In this F4F project deliverable three different uses are presented. In the first and second one the produced feed was used as biogas production booster in anaerobic digestion units (used as dried final product in one and as wet food waste in the second) and in the third one it was used as fuel in incineration and gasification unit (the final dried product).

Concerning the anaerobic digestion trials, the overall objective of this research was to check the boosting of biogas production by co-digestion of sewage sludge with wet and dried food waste in order to produce significant amounts of electricity and heat in facilities that they manage sewage sludge. Specifically, co-digestion of SS and wet food waste (FW) and dried FW with other waste in a small ratio of 5-7% (v/v) was investigated. In case of wet food waste and wastewater it is possible to reduce their volume and as a result the transportation and storage cost by using a drying process. Dried FW with other waste addition can improve biogas production by 1.2-2.7 times, while wet FW addition improve biogas production by 148%, 2.5 times.

So the concept of co-digesting a mixture of wet or dried food waste could be a promising perspective at wastewater treatment plants, as it increases methane production significantly such as improvement of the methane yield and the feasibility of the process due to the seasonal production of this type of waste. Therefore, we propose to increase biogas production, by adding a concentration of about 5% v/v of dried FW, in existing digesters at wastewater treatment plants, operating only with sewage sludge without affecting the operation of existing digesters and without requiring additional facilities.

As it concerns gasification trials, the main purpose of the gasification tests and briquetted sample was to determine the optimal values of operating parameters and gasification conditions in case of the f4f product. Two gasification tests of the briquettes from sterile food waste and straw carried out. At the same time, both ensuring the smooth operation of the gasification system through continuous inspections, and the stable and expected results of the test with beech wood chips, lead to the conclusion that any system failure is primarily due to partial or even complete unsuitability of this kind of mixed briquettes for gasification. However, both trials cannot be considered as successful.

These trials are presented in details, in the following paragraphs of the present report.

2. Anaerobic digestion in fresh Food Waste

2.1. Abstract

In this report it is presented the experiments carried out for biogas production of a mixture of fresh food wastes in combination with sewage sludge in anaerobic digestion units, so as to investigate the alternative use of the produced feed from the pilot unit of the LIFE-F4F project. In order to investigate the effect of municipal solid waste composed of food waste in biogas production, anaerobic co-digestions of sewage sludge with food waste were carried out. Continuous experiments at 35°C were carried, with only sewage sludge and with a mix of sewage sludge and food waste. The reactor treating the sewage sludge produced 230±29 ml/l/d biogas before the addition of food waste and 572±44 biogas after the addition of food waste (5% v/v in the feed). These results suggest that methane can be produced very efficiently by co-digesting sewage sludge and food waste.

Two type of influent feedstock were utilized: 100% sewage sludge (SS) and a 5% of food waste (FW) and 95% sewage sludge in order to investigate the biogas production of the food waste – sludge co-digestion. The continuous experiments were carried out in a 3L digester constructed from stainless steel. The digester was operated at 35°C with a total feeding volume of 125ml daily and hydraulic retention time of 24 days. Feedstock was added four times daily (every 6 hours). Biogas was collected by displacement of water. Initially, the reactor was inoculated with anaerobic sludge originating from the Municipal Sewage Treatment Plant (MSTP) of the city of Heraklion. Also sewage sludge (feedstock) was primary sludge from MSTP. Food waste was obtained from restaurant of Technological Educational Institute of Crete, Heraklion. The initial feed was sewage sludge and the bioreactor was operated using this feed for 30 days. Food waste was then added to the feed so that the reactor was fed continuously with 95% sewage sludge and 5% food waste. The use of FW as co-substrate in the anaerobic digestion of SS presents a great improvement of the biogas yield so these organic residues is very promising.

2.2. Introduction

The average amount of municipal solid waste (MSW) generated in Greece is 1.3 kg/person/day with a 50% amount of fermentable organic material such as foodscraps, so food waste (FW) can be attractive renewable substrates for sustainable methane production due to wide economic prospects in industries. The performance of an anaerobic digestion process is much dependent on the type and the composition of the material to be digested. Co-digestion of food waste with sewage sludge is increasingly utilized to increase energy production and make anaerobic digestion more affordable.

Co-digestion of organic wastes with municipal wastewater sludge can increase digester gas production and provide savings in the overall energy costs of plant operations. Methane recovery also helps to reduce the emission of greenhouse gases to the atmosphere. In this way, renewable energy production and waste processing are achieved simultaneously, without requiring additional facilities.

2.3. Food waste residues and feedstock

Sewage sludge (SS) was primary sludge originating from the Municipal Sewage Treatment Plant (MSTP) of the city of Heraklion (population 175,000), Crete. The sludge was stored frozen at -4°C until use. Food waste (FW) used in the present study was collected from the students' restaurant at the Technological Educational Institute of Crete, Heraklion. The FW composition was 50% cooked food (10% meat, 15% potatoes, 20% rice and 5% other), 20% raw-fresh food (vegetables), 10% fruits, 10% salads, 8% bread and 2% dessert (on a wet-weight basis). FW was homogenized using a mechanical mixer, (approximately size 4.0 mm) and diluted with tap water to approximately 3% TS to reduce viscosity for pumping and stirring in the lab-scale experimental equipment. All waste was stored at -20°C during the whole experimentation period, in order to maintain its physicochemical characteristics. The mean composition of raw SS and FW is summarized in Table 1. The characteristics of the feedstock are summarized in Table 2.

2.4. Lab-scale Anaerobic Digester

The continuous experiments were carried out in three 3L and one 1L lab-scale continuous stirred-tank reactors (CSTR) constructed of stainless steel, with a double wall. The reactor operated under mesophilic conditions (35°C) via water bath through water jackets surrounding the reactors. Agitation was ensured by a motor drive unit installed on the top of the reactor. The mixed liquid from the reactor was stirred periodically for 15 min, twice an hour. Biogas was collected by displacement of water. The schematic diagram of the digester is presented in Fig. 1.

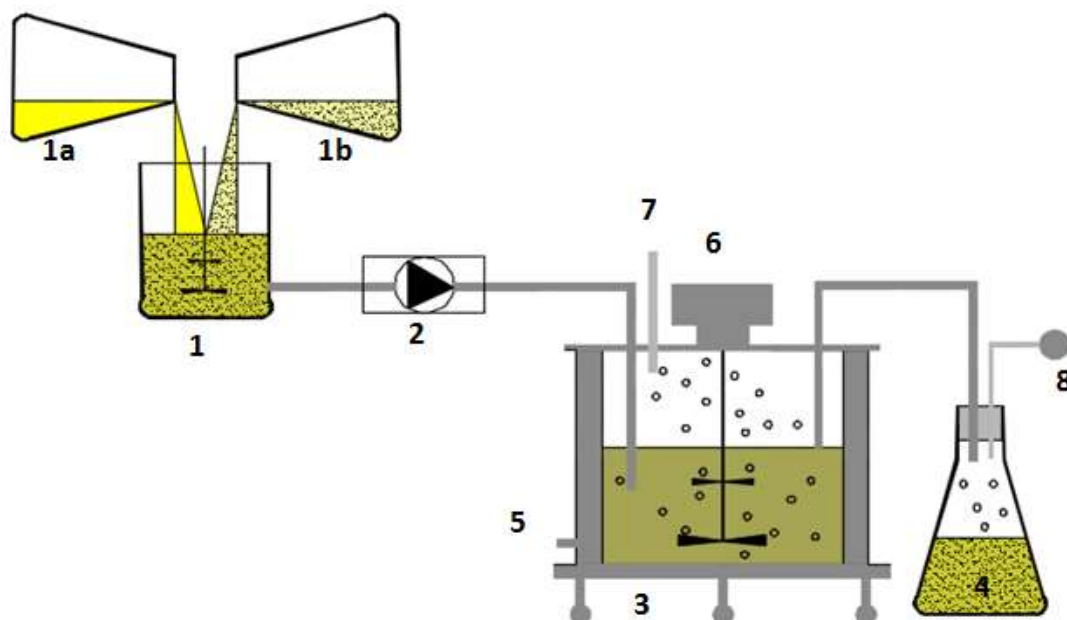


Figure 1. Biogas lab digester schematic diagram: 1 – influent storage vessel, 1a – sewage sludge, 1b – agro-industrial by-products or food waste, 2 – influent pump for reactor, 3 – biogas reactor, 4 – effluent bottle, 5 – heating, 6 – mixer, 7 – gas sampling, and 8 – gas collector.

2.5. Experimental procedure

Two types of influent feedstock were utilized: 100% sewage sludge (SS) and 5% (v/v) food waste, in order to investigate the biogas production of the food waste - sludge co-digestion. The feedstock was stored in a tank placed in a refrigerator at a constant temperature of 4 °C. Feedstock was added four times daily (every 6 hours) with a total feeding volume of 40 ml and 125 ml daily for a 1 L and 3 L digester respectively and hydraulic retention time of 24 days. New influent was prepared every week and stored in 2 L glass vessels, which were stirred for 2 min before feeding.

2.6. Analytical methods

The pH was measured by an electrode (Crison, GLP 21), while total (TS) and volatile (VS) solids, total and dissolved chemical oxygen demand (TCOD and DCOD), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were determined according to standard methods (Apha, 1995). Gas samples were collected in gas-tight syringes and transferred to the gas chromatograph by sealing the needle with a butyl rubber stopper. Twenty microliters were injected into a gas chromatograph (Agilent 6890N GC System) for methane and carbon dioxide analyses. A thermal conductivity detector (TCD) and a capillary column (GS Carbonplot, 30 m x 0.32 mm, 3 μ m) were used. The column was operated isothermally at 80 °C and the detector port was operated at 150 °C. Helium was used as the carrier gas at a flow rate of 15 ml/min.

2.7. Statistical analysis of the data

The statistical analysis of the data and the results in this study (analysis of average values, variance and standards deviation) were performed using Origin 9 (OriginLab, USA). Differences in the biogas production, TCOD and VS removal among results obtained from the co-digestion of SS and different agro-industrial by-products and other wastes were evaluated using one-way analysis of variance (ANOVA). Tukey Analysis was used to identify significant differences ($p < 0.05$) in the average values of the variables that were normally distributed.

2.8. Reactor start-up and operation

Experimental period. Two types of influent feedstock were utilized: 100% SS (D1), 5% (v/v) FW and 95% SS (D2). D1 reactor was operated for 120 days. The initial feed for D2 was sewage sludge and the bioreactor was operated using this feed for 30 days. Food wastes were then added to the feed so that the reactor was fed continuously with 95% SS and 5% FW and an increase in OLR. The reactors were operated under these conditions for 90 days.

Table 1. Composition of Sewage Sludge (SS) & Food Waste (FW)

Table 1 – Composition of Sewage Sludge (SS) & Food Waste (FW)		
Parameters	SS	FW
pH	7.3 \pm 0.3	4.2 \pm 0.1
TS (g/l or g/kg)	30.5 \pm 2.1	122.6 \pm 4.0
VS (g/l or g/kg)	20.7 \pm 1.6	107.0 \pm 4.7
TCOD (g/l)	44.2 \pm 13.5	151.3 \pm 10.0
N (g/l)	1.4 \pm 0	2.8 \pm 0.5

Table 2. Characteristics of experimental materials as feedstock

Table 2 – Characteristics of experimental materials as feedstock		
Parameters	SS (100%)	SS (95%) &FW (5%)
pH	6.9 ± 0.4	6.2 ± 0.30
TS (g/l)	29.4 ± 2.1	30.4 ± 3.3
VS (g/l)	21 ± 1.8	24.1 ± 1.9
TCOD (g/l)	41.5 ± 10.6	42.3 ± 7.4
DCOD (g/l)	0.4 ± 0.2	2.9 ± 0.7
N (g/l)	2.2 ± 0.2	1.9 ± 0.1

Table 3. Operational parameters

Table 3 – Operational parameters									
Experimenta l Period	Digester characteristics			Initial period			Co-digestion period		
	Digeste r no	Digester working volume (L)	HRT (days)	Time (days)	Feedstock	OLR (kgVS m ⁻³ d ⁻¹)	Days of co- digestion	Feedstock	OLR of feedstock (kgVSm ⁻³ d ⁻¹)
1	1	3	24	1 - 120	SS (100%)	0.9± 0.1	-	-	-
	2	3	24	1 - 30	SS (100%)	0.8± 0.1	31 – 120*	SS (95%) + FW (5%)	1.1±0.1

2.9. Results and Discussion on biogas production

Table 4 shows the results of biogas production and biogas increment in comparison with 100% SS substrate. Furthermore, the results of the chemical composition of biogas (CH₄) are indicated. The daily biogas observed in different co-substrates is illustrated in Fig. 2. Fig. 2 presents biogas production (ml/l/d) for mixtures of 5% FW (D2), compared to biogas production of SS (D1). A mixture of 5% FW increased biogas production at 148%. This is consistent with the literature data of Cecchi et al. (1988) and Hamzawi et al. (1998), who found that cumulative biogas production of mixtures increased with increasing proportions of MSW, although under mesophilic conditions.

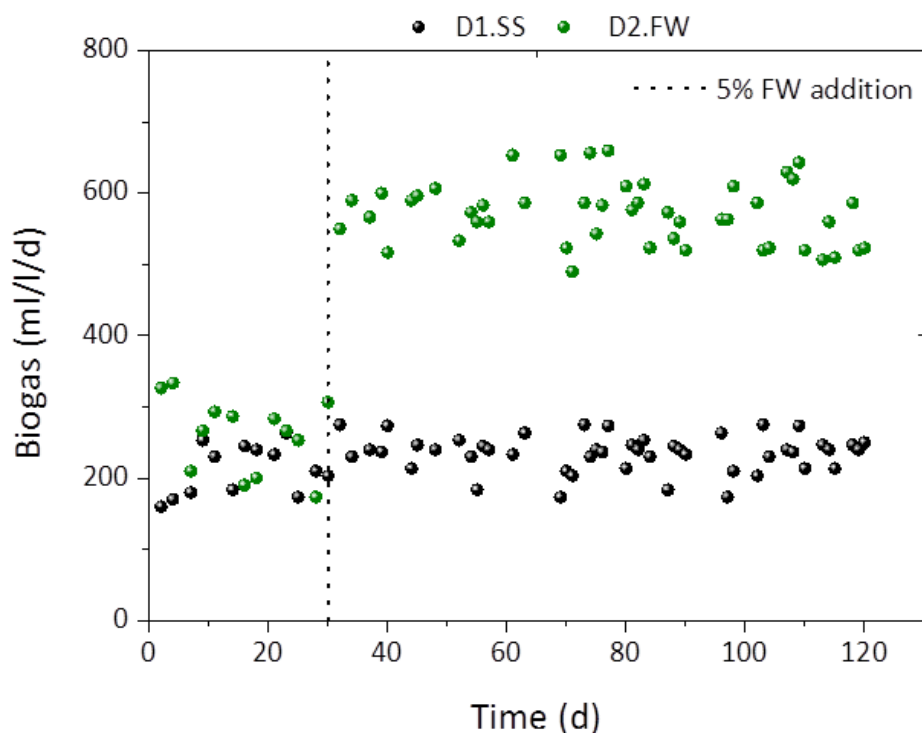


Figure 2. Biogas production during anaerobic digestion of SS and food waste residues. D1: SS (100%); D2: SS (95%) + FW (5%);

1.9.1. TCOD removal efficiency

TCOD was measured both in feeding substrate and in digestate. COD is a parameter representing the extent of solubilization. The removal of COD in conjunction with gas production in the reactor provided evidence of effective microbial activity by methanogenic bacteria. TCOD concentration in the reactor increased after the addition of food waste in the feed. The TCOD reduction (%) was calculated as $(TCOD_{in} - TCOD_{out}) / TCOD_{in} \times 100$, where $TCOD_{in}$, $TCOD_{out}$ are the concentrations of chemical oxygen demand in the feed and digested substrate respectively. Fig. 3 shows the concentration trend of TCODs in each digester and the reduction through the corresponding anaerobic processes. The TCODs reduction percentage was between 55% and 51%, confirming the biomass degradation capability at higher loadings. During the experimentation period of 95% SS & 5% FW the TCOD mean concentration in the reactor was 26.5 ± 5.4 g/L resulting in 55% TCOD average removal efficiency respectively.

Comparable compositional analysis has been reported by Chu et al. (2008) and Lee et al. (2010). During a continuous experiment treating organic fraction of municipal solid wastes and sewage sludge, 76.5% of the influent TCOD was converted to methane gas in the mesophilic methane production reactor (Chu et al., 2008). Throughout higher biogas production was achieved in the reactor after the supplementation of food wastes in the feed. This effect may be explained by the additional COD of the wastes added. This is consistent with the literature data of Cecchi et al. (1988) and Hamzawi et al. (1998), who found that cumulative biogas production of mixtures increased with increasing proportions of SS, although under mesophilic conditions. The rapid increase in biogas production was supported by a simultaneous decrease in TCOD (Fig. 3).

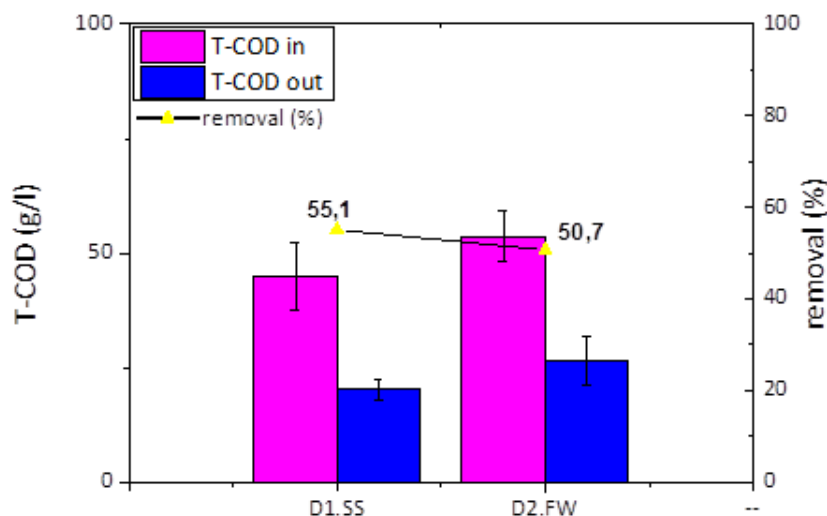


Figure 3. TCOD removal and TCOD concentrations in the influent (in) and effluent stage (out). Error bars indicate standard deviation. D1: SS (100%); D2: SS (95%) + FW (5%)

1.9.2. VS removal efficiency

Another way of assessing the performance of a digester is to examine the efficiency of the Volatile Solids (VS) reduction. During the digestion process, volatile solids are degraded to a certain extent and converted into biogas. Volatile solids reduction % = $(VS_{in} - VS_{out} / VS_{in}) \times 100$, where VS_{in} , VS_{out} are the concentrations of volatile solids in the feed and digested substrate respectively. The VS concentration in the influent mixture increased when solid wastes were added to sewage sludge, as a result the VS values registered in the digestate output remained in a range of 12 g/l to 25 g/l during all the different phases. This underlined the good adaptability of the biomass to treat more concentrated loads. The removal efficiency in VS concentration for all examined scenarios ranged between 46% and 53% as shown in Fig. 4.

During the experimentation period of SS & 5%FW, the VS mean concentration in the reactor was 11.9 ± 1.0 g/L, resulting in 53.5% VS average removal efficiency, respectively. Similar results are reported in literature (Capela et al., 2008; Liu et al., 2012) showed a VS reduction rate above 60% (from 61.7 to 69.9), using as feed substrate a mixture composed of 50% food waste, 25% fruit and vegetable waste and 25% waste activated sludge.

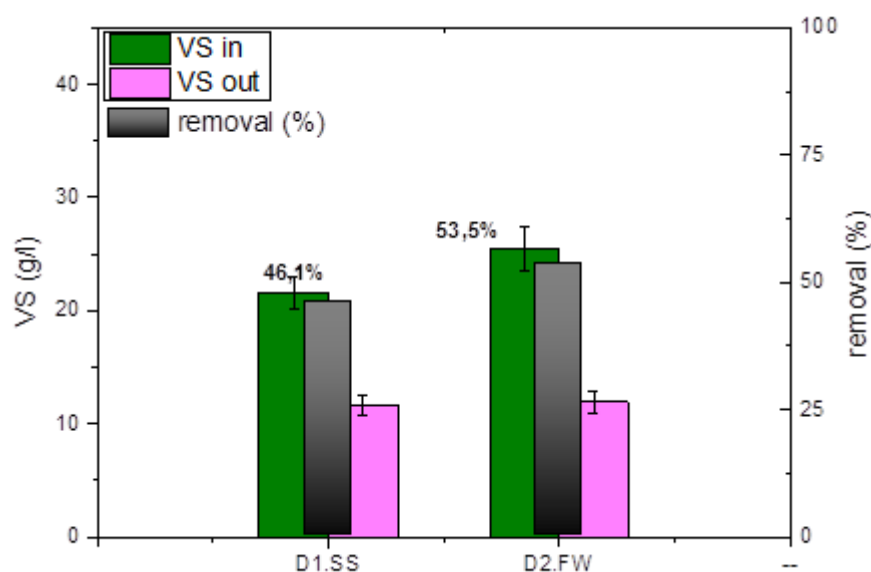


Figure 4. VS removal and VS concentrations in the influent (in) and effluent stage (out). Error bars indicate standard deviation. D1: SS (100%); D2: SS (95%) + FW (5%)

1.9.3. VFAs

VFAs measurement was chosen to predict process instability (Ahring et al., 1995). VFA concentrations of acetic, propionic, iso-butyric, butyric, iso-valeric and valeric acid were measured. In all cases, VFAs in the effluent were negligible. Therefore, there was no presence of VFAs due to their total conversion to biogas. The absence of VFAs demonstrates that the methanogenic stage was not disturbed and the formation of methane from these intermediates was quick.

Table 4. Biogas and Biomethane production, biogas composition, TCOD and VS removal for different co-digestions

Table 4 – Biogas and Biomethane production, biogas composition, TCOD and VS removal for different co-digestions		
Parameter	D1	D2
Biogas production (ml/l/d)	230±29	572±44
Biogas increment (ml/l/d) & (%)	-	342 (148%)
Biogas composition (%) CH ₄	66.4±2.1	71.3±4
Biomethane production (ml/l/d)	153	408
TCOD removal (%)	55.1	50.7
VS removal (%)	46.1	53.5

D= anaerobic digester; D1: SS (100%); D2: SS (95%) + FW (5%)

REFERENCES

Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I., 1995. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 43, 559–565.

APHA, 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed. American Public Health Association, Washington DC, USA.

Capela, I., Rodrigues, A., Silva, F., Nadais, H., Arroja, L., 2008. Impact of industrial sludge and cattle manure on anaerobic digestion of the OFMSW under mesophilic conditions. *Biomass Bioenergy* 32, 245–251.

Cecchi, F., Fraverro, P.G., Perin, G., Vallini, G., 1998. Comparison of co-digestion performance of two differently collected organic fractions of municipal solid wastes with sewage sludges. *Environ. Technol. Lett.* 9, 391–400.

Chu, C.F., Li, Y.Y., Xu, K.Q., Ebie, Y., Inamori, Y., Kong, H.N., 2008. A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 4739-4746.

Hamzawi, N., Kennedy, K.J., Mc Lean, D.D., 1998. Technical feasibility of anaerobic co-digestion of sewage sludge and municipal solid waste. *Environ. Technol.* 19, 993–1003.

Lee, D.Y., Ebie, Y., Xu, K.Q., Li, Y.Y., Inamori, Y., 2010. Continuous H₂ and CH₄ production from high-solid food waste in the two-stage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. *Bioresourc. Technol.* 101, S42-S47.

Liu, X., Wang, W., Shi, Y., Shi, Y., Zheng, L., Gao, X., Qiao, W., Zhou, Y., 2012. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: effect of organic loading rate. *Waste Manage.* 32, 2056–2060.

3. Anaerobic digestion in dry Food Waste

3.1. Abstract

In this report it is presented the experiments carried out for biogas production of a thermal dried mixture of food wastes in combination with sewage sludge and other agro-industrial wastes in anaerobic digestion units, so as to investigate the alternative use of the produced feed from the pilot unit of the LIFE-F4F project.

For these experiments, it was attempted by co-digesting the biogas production from sewage sludge (SS) with a dried mixture of food waste, cheese whey and olive mill wastewater (FCO). A series of laboratory (in TEIC facilities) experiments were performed in continuously-operating reactors at 37°C, fed with thermal dried mixtures of FCO at concentrations of 3%, 5% and 7%. The overall process was designed with a hydraulic retention time (HRT) of 24 days.

It has been occurred that FCO addition on sewage sludge can boost biogas yields if the mixture exceeds 3% (v/v) concentration in the feed. Any further increase of 5% FCO causes a small increase in biogas production. The reactor treating the sewage sludge produced 287 ml CH₄/L reactor/d before the addition of FCO and 815 ml CH₄/L reactor/d (5% v/v in the feed). The extra FCO-COD added (7% FCO v/v) to the feed did not have a negative effect on reactor performance, but seemed to have the same results. In all cases, the estimated biodegradability of mixtures was over 80%, while the VS removal was 22% for the maximum biomethane production (5% v/v). Moreover, co-digestion with FCO improved biogas production by 1.2-2.7 times.

3.2. Introduction

Some studies pointed out that the digestion of food waste (FW) alone may lead to the accumulation of abundant volatile fatty acids (VFA), especially at high organic loading rate (OLR), which could inhibit the methanogenesis and even destabilize the anaerobic process (El-Mashad et al., 2008). These findings led to the investigation of its co-digestion with sewage sludge (SS) as an alternative. Moreover, co-digestion of SS and FW could be a strategic and cross-sectorial solution to deliver beneficial synergies for the water industry and FW management authorities (Iacovidou et al., 2012).

The anaerobic co-treatment of organic wastes, known as co-digestion, is not often found in SS treatment facilities even though is a common practice with agro-industrial wastes (Long et al., 2012; Mata-Alvarez et al., 2014). The objective of improved gas yield is based on an improved composition of the influent, since the co-substrates are usually complementary to the major waste in most cases, or due to an increased organic loading rate without changing the retention time. It is a well-recorded fact that biogas productivity in an anaerobic digestion unit is significantly increased when a mixture of wastes is used, compared to a single source influent (Aichinger et al. 2015, Xie et al., 2017, Khoufi et al., 2015, Liu et al., 2016). What this means is that, even though the single feed/substrate might be at its optimum for the whole range of characteristics, productivity increases when a mixture of substrates is used, and this increase is far greater than that which the stoichiometric decomposition should deliver (Astals et al., 2014, Xie et al., 2016). This is due to the co-digestion phenomenon, well recorded in all biological decomposition process (Fountoulakis et al., 2010, Zheng et al., 2015).

In many cases, co-digestion projects involve high costs to transport feedstock which renders logistics optimization crucial for determining project viability (Mayerle, 2016). For this reason, biomass densification was examined in the past in order to solve the extra high cost of logistic issues (Wang et al., 2016). In addition, CW and OMW are produced seasonally, so there is a need for storage facilities during design of the project. Similar design problems would arise for FW in holiday resorts, where the population also can increase by an order of magnitude. The drying of these materials would have as a result a significant reduction of volume of feedstock reducing significantly transportation and storage cost. However, is still unknown the effect of drying on downstream processes, particularly the biogas production from anaerobic digestion.

3.3. Feedstock

Food waste (FW) used in the present study was collected from the pilot unit of the F4F project, after hand sorting. The FW composition was 80% raw fresh food (vegetables), 10% fruits and 10% salads (on a wet weight basis). FW was homogenized using a mechanical mixer (approximately 4.0 mm). Sewage sludge (SS) was the primary sludge originating from the Municipal Sewage Treatment Plant (MSTP) of the city of Heraklion (population 175,000), Crete. The sludge was stored frozen at 4°C until use. The cheese whey (CW) was obtained from a local cheese-producing factory located in the same region, which uses traditional cheese manufacture technologies. Wastes were characterized and immediately frozen to avoid biological activity. All Feedstock was stored at -20°C, during the whole experimentation period in order to maintain its physicochemical characteristics. The mean composition of raw SS, FW, CW and OMW is summarized in Table 5.

Table 5. Composition of Sewage Sludge (SS), Food Waste (FW), Cheese Whey (CW), Olive Mill Wastewater (OMW).

Composition of Sewage Sludge (SS), Food Waste (FW), Cheese Whey (CW), Olive Mill Wastewater (OMW)				
Parameters	SS	FW	CW	OMW
pH	7.4 ± 0.3	4.2 ± 0.1	3.9 ± 1.2	5.1 ± 0.1
TS (g/l)	31.6 ± 6.9	122.6 ± 4.0	44.1 ± 2	62.3 ± 2.3
VS (g/l)	24 ± 4.1	107.0 ± 4.7	35.4 ± 1.4	52 ± 1.6
t-COD (g/l)	43.6 ± 5.8	151.3 ± 10.0	61.8 ± 2.3	97 ± 7.2

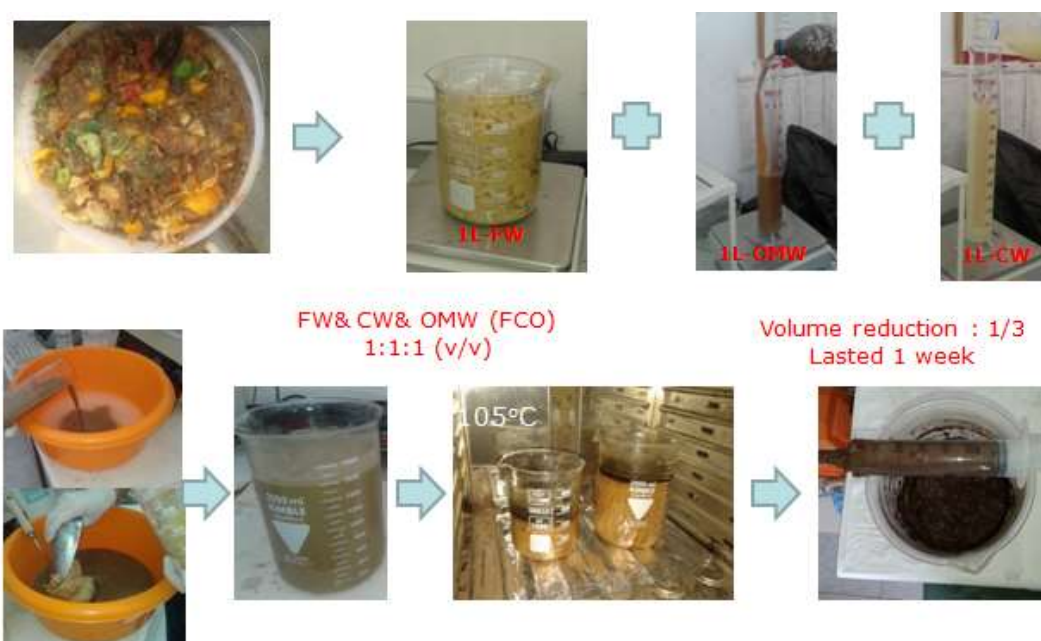
3.4. Pre-treatment of feedstock

The FW in this study was homogenized using a mechanical mixer, (approximately 4.0 mm). In order to create a 1:1:1 (v/v) mixture of FW, CW and OMW (FCO), 1 L of FW (1.040 g), 1 L of CW (1.020 g) and 1 L of OMW (1.000 g) were mixed and dried at a temperature of 105°C to reduce the initial volume of the mixture to 1/3. The 1:1:1 (v/v) FCO mixture was placed in a beaker in a lab oven. The reduction of volume lasted for approximately 1 week. After the treatment, the feed was cooled down to room temperature and three different SS and FCO mixtures were prepared on a volume (v/v) basis. The characteristics of the mixed substrates were used as feedstock are summarized in Table 6.

Table 6. Characteristics of experimental materials as feedstock

Parameters	SS & 3% FCO	SS & 5% FCO	SS & 7% FCO
pH	6.4 ± 0.4	6.3 ± 0.4	6.0 ± 0.4
TS (g/l)	38.2 ± 4.2	42.6 ± 6.0	47 ± 5.9
VS (g/l)	26.6 ± 3.4	30.7 ± 4.9	32.7 ± 6.1
t-COD (g/l)	47.7 ± 9.7	59.6 ± 13.3	69.5 ± 23.8
d-COD (g/l)	6.0 ± 1.4	9.2 ± 2.1	13.9 ± 4.5

Some photos from this pre-treatment procedure are presenting below.



Picture 1. Pre-treatment procedure

3.5. Experimental procedure

Laboratory experiments were performed at the Laboratory of Natural Resources Management & Agricultural Engineering of the School of Agricultural Technology, Technological Educational Institute of Crete (Fig. 5).

Four types of influent feedstock were utilized, in order to investigate the biogas production of this mixture in different concentrations and sludge co-digestion:

- ✓ D1: 100% sewage sludge (SS)(v/v)
- ✓ D2: 3% FCO and 97% (SS)
- ✓ D3: 5% FCO and 95% (SS)
- ✓ D4: 7% FCO and 93% (SS)

The continuous experiments (D1-D4) were carried out in three 4L (3L working volume) and one 2L (1L working volume) lab-scale continuous stirred-tank reactors (CSTR) constructed from stainless steel, with a double wall. The reactor operated under mesophilic conditions ($37\pm 2^\circ\text{C}$) via water bath through water jackets surrounding the reactors. Agitation was ensured by a motor drive unit installed on the top of the reactor. The mixed liquid from the reactor was stirred periodically for 15 min, twice an hour.

Biogas was collected by displacement of water. Specifically, the produced biogas was collected in special 2-liter bags connected to the effluent bottle (Fig. 1). The biogas recording takes place daily using the volumetric water displacement method. The incoming biogas enters through a tube mounted in a conical flask with stopper effect of the quantity of biogas generated and collected in a special bag, displacing an equal amount of water. The water displacement takes place in a plastic measuring tube in order to record the biogas production. In the flask the water was acidified (pH <2) with sulfuric acid (H₂SO₄), to minimize the dissolution of the produced CH₄.

The SS and FCO mixtures were prepared on a volume (v/v) basis. The continuous experiments of 3% FCO were carried out in a 2 L digester and the experiments on the other materials were carried out in a 4 L digester. Initially, the reactor was inoculated with anaerobic sludge originating from MSTP of the city of Heraklion, and contained 19.6 g/L TS, 10.8 g/L VS and 17.5 g/L COD. The feedstock was stored in a tank placed in a refrigerator to maintain its temperature constant at 4 °C. Feedstock was added four times daily (every 6 hours) with a total feeding volume of 40 ml and 125 ml daily for a 2 L (1 L working volume) and 4 L (3 L working volume) digester respectively and a hydraulic retention time of 24 days. New influent was prepared every week and stored in 2 L glass vessels, which were stirred for 2 min before feeding. The digesters were operated for at least 3 subsequent HRTs under steady state conditions characterized by stable biogas production and relatively constant pH throughout the run. Influent and effluent samples were analyzed for TS, VS, pH, TCOD, d-COD and methane content in biogas. Volumetric biogas production was also measured for all reactors studied. The digester characteristics and operating parameters are summarized in Table 7.

Table 7. Operational parameters - Digester characteristics.

Operational parameters - Digester characteristics					
Digester no	Digester working volume (L)	HRT (days)	Time (days)	Feedstock	OLR (kgVSm ⁻³ d ⁻¹)
1	3	24	1 – 90	SS (100%)	1±0.2
2	1	24	1 – 90	3% FCO	1.1±0.1
3	3	24	1 – 90	5% FCO	1.3±0.2
4	3	24	1 - 90	7% FCO	1.4±0.3

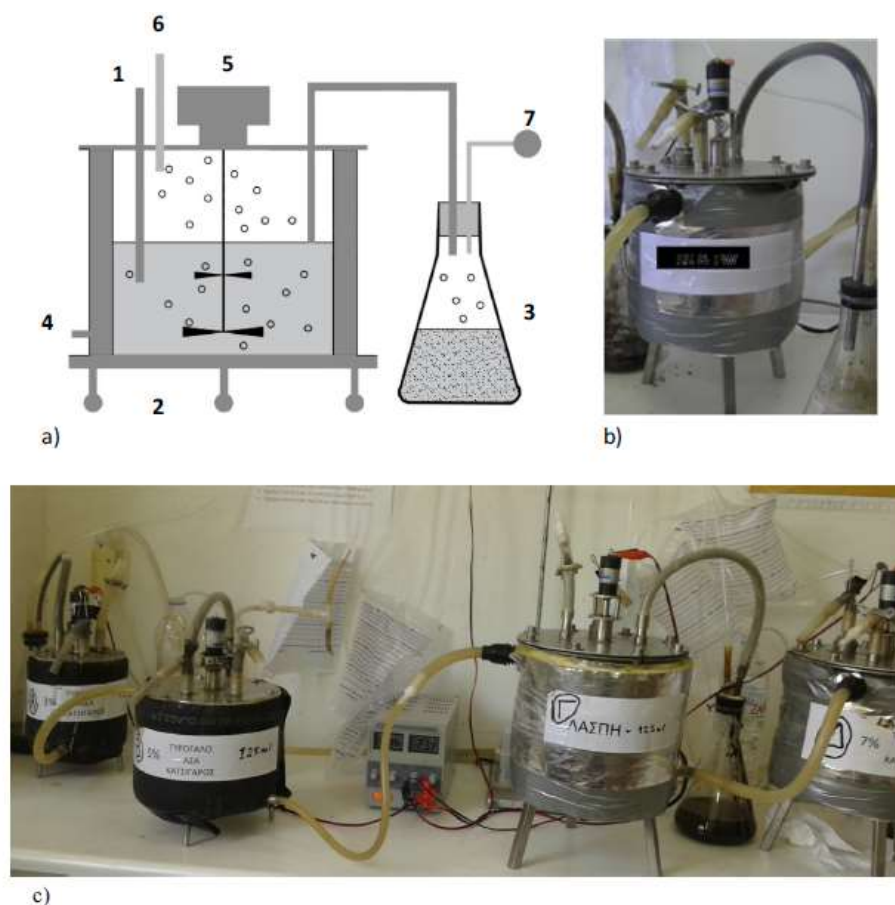


Figure 5. (a) Biogas lab digester schematic diagram: 1 – influent pump for reactor, 2 – biogas reactor, 3 – effluent bottle, 4 – heating, 5 – mixer, 6 – gas sampling, and 7 – gas collecting bag (b) actual photo (c) the lab-scale digesters at the Technological Educational Institute of Crete.

3.6. Analyses

The influent and effluent were analyzed for pH and total (TS) and volatile (VS) solids according to APHA (1985) using a pH-meter (Crison, model GLP 21) and appropriate laboratory ovens. Total and dissolved chemical oxygen demand (T-COD and d-COD respectively) were determined spectrophotometrically by use of standard test kits (Hach-Lange). Biogas yield was monitored on a daily basis by the water displacement method as described elsewhere in the literature. Biogas composition was analyzed using a gas chromatograph (Agilent 6890N GC System). Gas samples were collected in gas-tight syringes and transferred to the gas chromatograph by sealing the needle with a butyl rubber stopper. Twenty microliters were injected into a gas chromatograph for methane and carbon dioxide analyses. A thermal conductivity detector (TCD) and a capillary column (GS Carbonplot, 30 m x 0.32 mm, 3 μ m) were used. The column was operated isothermally at 80 °C and the detector port was operated at 150 °C. Helium was used as the carrier gas at a flow rate of 15 ml/min. Analyses of all individual samples were carried out in triplicate. VFA concentrations of acetic, propionic, iso-butyric, butyric, iso-valeric and valeric acid were measured. VFA concentrations were also determined using the same gas chromatograph equipped with a flame ionization detector (FID). The column was a capillary (Agilent technologies INC. 30m x 0.53mm). A mixture of helium and hydrogen was used as the carrier gas. Detector temperature was 225°C. The temperature of the column was programmed to rise from 105 °C and then gradually increased, initially at a rate of 15 °C / min for 3.67 min, and then at a rate of 20 °C /

min for 6.75 min. The statistical analysis of the data and the results of this study (analysis of average values, variance and standards deviation) were performed using Origin 9 (OriginLab, USA). One-way analysis of variance (ANOVA) was carried out and Tukey Analysis was used to identify significant differences ($p < 0.05$) in the average values of the variables that were normally distributed.

3.7. Results and discussion

Fig. 6a presents biogas production (ml/Lreactor/d) for mixtures of 3%, 5% and 7% FCO, compared to daily biogas production of SS (0% FCO). The daily biogas production was found to increase as the FCO concentration increased. Moreover, in all cases the addition of FCO resulted in higher biogas production. In particular, after 3% addition of FCO in sludge, daily biogas production increased from 437 ± 132 ml/Lreactor/d to 533 ± 160 ml/Lreactor/d. Moreover, Fig. 2 shows that there is a significant increase in daily biogas production when 5% and 7% FCO is used as co-substrate in anaerobic digestion of sludge. In particular, comparing biogas production of SS and the corresponding production after the addition of 5% and 7% FCO, an increase of nearly 170% was estimated as values of 1172 ± 216 ml/Lreactor/d and 1181 ± 156 ml/Lreactor/d, respectively. Therefore, the increment of 2% FCO did not significantly increase the biogas production.

Moreover, Fig. 3 shows the mean biogas production (ml/Lreactor/d) of each substrate. Different letters indicate significant differences with $p < 0.05$. Digesters D1 and D2, where 100% SS and 3% FCO is digested, at the 0.05 level, the population means of biogas production are not significantly different ($p = 0.07$, which is higher than 0.05). Furthermore, digesters D3 and D4, 5% and 7% FCO, are not significantly different ($p = 0.9$). As indicated, the best biomethane production (815 ml/Lreactor/d) with 70% of methane content was achieved at an OLR of 1.3 kgVSm⁻³d⁻¹ for the 5% FCO substrate concentration. For all effluents, the pH remained within an optimal working range (7.4-8.0), and in all cases, VFAs in the effluent were negligible. Therefore, there was no presence of VFAs due to their total conversion to biogas. The absence of VFAs demonstrates that the methanogenic stage was not disturbed and the methane from these intermediates was quick. The average composition of the biogas produced during the experiments at different OLRs is shown in Table 8.

Table 8. Biogas and Biomethane production, biogas composition, COD and VS removal for different co-digestions

Table 8 – Biogas and Biomethane production, biogas composition, COD and VS removal for different co-digestions				
Parameter	D1	D2	D3	D4
Biogas production (ml/L _{reactor} /d)	437±132	533±160	1172±216	1181±156
Biogas increment (ml/L _{reactor} /d) & (%)	-	95 (22%)	735 (168%)	744 (170%)
Biogas composition CH ₄ (%)	65.6±0.5	68.9±4.4	69.5±2.7	66.6±1.4
Biomethane production (ml/L _{reactor} /d)	287±116	367±98.6	815±175.2	787±84.5
d-COD removal (%)	52.7	79.6	83.4	83.6
T-COD removal (%)	28.9	42.3	25	33.4

Table 8 – Biogas and Biomethane production, biogas composition, COD and VS removal for different co-digestions

VS in (g/l)	24±4.1	27±3.6	33.4±3.9	34.3±4.2
VS out (g/l)	20.1±3.5	17.8±1.7	25.8±2.7	26.7±2.7
VS removal (%)	16.3	34.2	22.7	22.0
<i>D1: SS (100%); D2: SS (97%) + FCO (3%); D3: SS (95%) + FCO (5%); D4: SS (93%) + FCO (7%)</i>				

Fig. 6b presents biomethane production (ml/Lreactor/d). The composition of the methane in the biogas fluctuated between 61.2% and 67% for SS with a mean value of 65.6% and biomethane production of between 169 and 418 ml/l/d. The methane percentage increased with an increase of FCO concentration. The maximum composition of methane in the biogas was observed after 5% FCO addition in sewage sludge, with a mean value of 69.5% and a mean biomethane production of 815 ml/l/d (Table 4). When 7% FCO was added, the methane percentage was 66.6% (mean value), approximately equal to the SS substrate. In particular, comparing the methane content of SS and the corresponding content after FCO mixtures, an increment of between 1.5% and 6% is observed.

In another study (Angelidaki and Ahring, 1997), the authors reported a biogas production of approximately 1250 mL/L/day in an anaerobic co-digesting process treating OMW with manure at a ratio of 50:50 under thermophilic conditions with an organic loading rate of 7.8 g COD/L/day, which corresponds to a methane yield of 160 L CH₄/Kg COD. Other researchers (Gelegenis et al., 2007) have shown a biogas production rate of 210 mL/L/day digested diluted poultry manure and olive mill effluent at a ratio of 50:50 under mesophilic conditions and a hydraulic retention time of 20 days. Our case proved to be more efficient than these studies and our methane yield rates were higher than those reported. In other experiments, the co-digestion of SS with OMW or CW (at a ratio 95:5 (v/v) at same HRTs have been reported a volumetric biogas production rates for OMW and CW 0.2 and 0.3 Lbiogas/Lreactor/d, respectively (Maragkaki et al., 2017b).

In a recent publication, Maragkaki et al. (2017a) have shown a biogas production rate of 572 ± 44 ml/l/d (or 408 ml/l/d bio-methane production) by digesting SS and FW at a ratio of 95:5 under mesophilic conditions and a hydraulic retention time of 24 days. Therefore, 5% FCO co-digestion proved to be more efficient (1172 ± 216 ml/l/d or 815 ml/l/d bio-methane production) than other our studies Maragkaki et al. (2017a) and Maragkaki et al. (2017b) where information of biogas production form single substrate was studied.

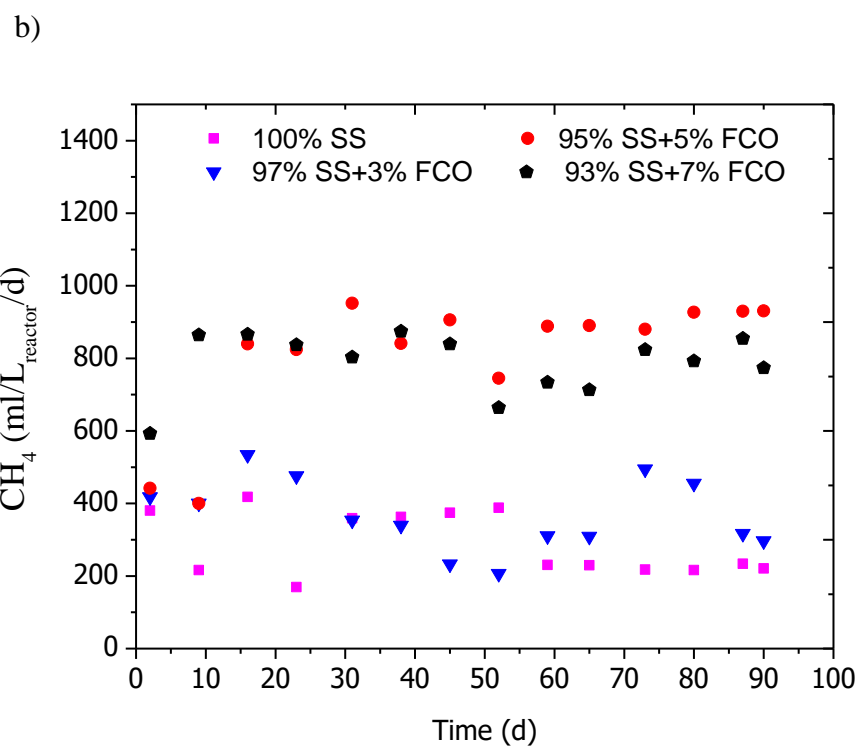
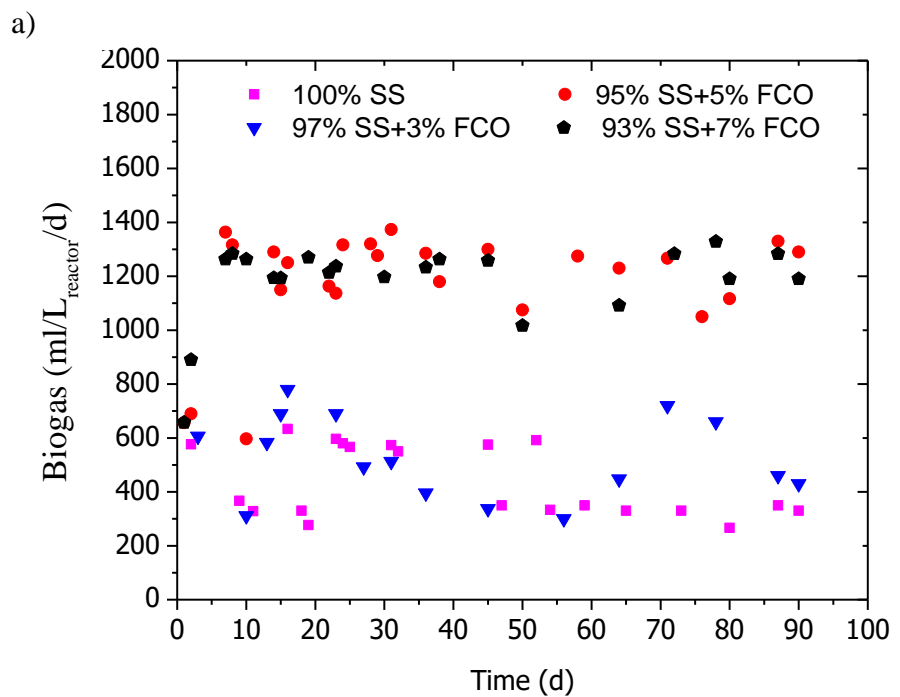


Figure 6. Biogas (a) and Biomethane (b) production during anaerobic digestion of SS and FCO mixtures

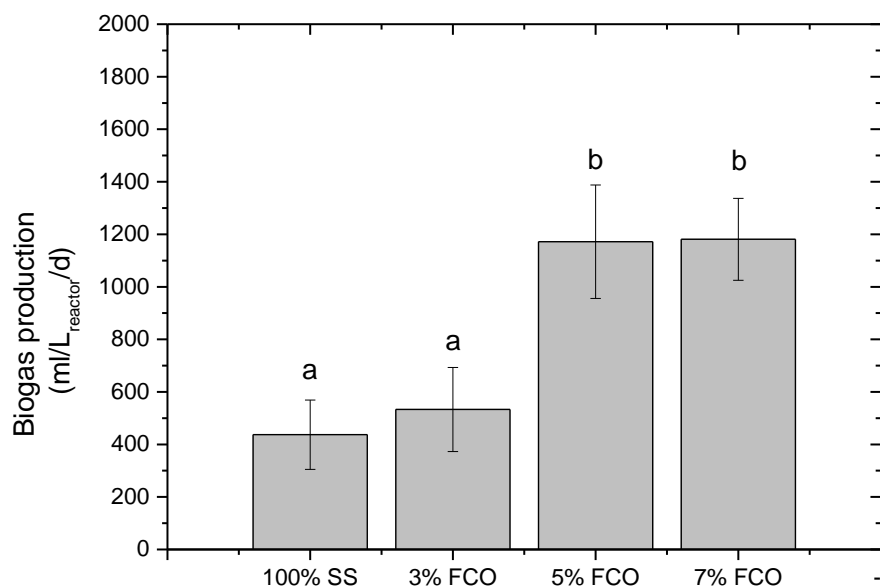


Figure 7. Biogas production (ml/L_{reactor}/d) for different concentrations of substrates. Different letters indicate significant differences with $p < 0.05$. Error bars indicate standard deviation of the biogas production.

As shown in Fig. 8, high dissolved COD removal efficiencies (between 79.6% and 83.6%) were obtained for different FCO concentrations, while the total COD was removed between 25% and 42.3% (data not shown). The best d-COD removal efficiency of approximately 84% was achieved for 5% and 7% FCO substrates, while the best T-COD removal efficiency was 42.3% for 3% FCO substrate. The removal of COD in conjunction with gas production in the reactor provided evidence of effective microbial activity from methanogenic bacteria. Comparable compositional analysis has been reported by Chu et al. (2008) and Lee et al. (2010).

Throughout the whole of the experimental periods, higher biogas production was achieved in the reactor after the supplementation of food wastes in the feed. This effect may be explained by the additional COD of the wastes added. This is consistent with the literature data of Cecchi et al. (1988) and Hamzawi et al. (1998), who found that cumulative biogas production of mixtures increased with increasing proportions of SS, although this was under mesophilic conditions. In another study (Martinez-Garcia et al., 2007), the researchers used olive mill wastewater with whey as co-substrate in a mesophilic anaerobic digestion process, in which the maximum OLR was 3.0 g COD/L/d, achieving an average COD removal of 83%, similar to our results.

Fig. 9 illustrates the monitoring profiles of pH, for mixtures of 0% (100% SS), 3%, 5% and 7% FCO. During the 100% SS experimentation period, the pH in the reactor was approximately stable between 7.4 and 8.2 (7.7 ± 0.1 mean value), while the influent value was between 6.8 and 7.8. During the 3% FCO addition, the pH in the reactor was approximately stable between 7.7 and 8.2 (7.9 ± 0.1 mean value), while the influent value was about 5.7 and 7.3. The influent pH decreased from 7.4 to 6.4 due to 3% FCO

addition. Finally, during the 3 % and 5% FCO addition, the pH in the reactor was approximately stable between 7.2 and 7.9 (7.6 ± 0.2 mean value), while the influent value was 6.3 ± 0.4 (5% FCO) and 6.0 ± 0.4 (7% FCO) mean value (Fig. 5). However, the influent pH had a maximum decrement from 7.4 to 6.0 due to 7% FCO addition, without affecting the effluent pH.

Another way of assessing the performance of a digester is to examine the efficiency of the Volatile Solids (VS) reduction. During the digestion process, volatile solids are degraded to a certain extent and converted into biogas. *Volatile solids reduction %* = $(VS_{in} - VS_{out} / VS_{in}) \times 100$, where VS_{in} , VS_{out} are the concentrations of volatile solids in the feed and the digested substrate respectively. In the feeding mixture, VS concentration ranged from 24 g/l (with a OLR $1.0 \text{ kgVS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) to 34 g/l (OLR $1.4 \text{ kgVS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) for D1 to D4. The digestate concentrations were measured in a range between 18 g/l to 27 g/l, as shown in Fig. 6. The VS concentration in the influent mixture was increased when the mixture of FCO was added to sewage sludge. The removal efficiency in VS concentration for all scenarios examined ranged between 16% and 34% as shown in Fig. 11. Among the different concentration of FCO, the 3% FCO mixture showed the highest VS reduction 34% at an OLR $1.1 \text{ kgVS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, which agrees with the highest T-COD removal. The mixtures of 5% and 7% FCO showed almost the same VS reduction of 22%. These results show that as the concentration increased, it presented the lowest degradation capability.

Moreover, Fig. 10 shows that VS destruction of 5% and 7% was lower than that for 3%. This may be attributed to the fact that, as Ma et al. (2008) observed, the extra organic carbon source, i.e. the FCO mixture, enhanced the growth of active biomass, which increased the total amount of volatile solids. VS reduction is slightly higher for the 5% and 7% FCO mixture compared with the corresponding SS values, due to the difficult-to-biodegrade compounds. The optimum VS reduction should be about 30% after sludge digestion according to Metcalf and Eddy (Metcalf and Eddy et al., 2003).

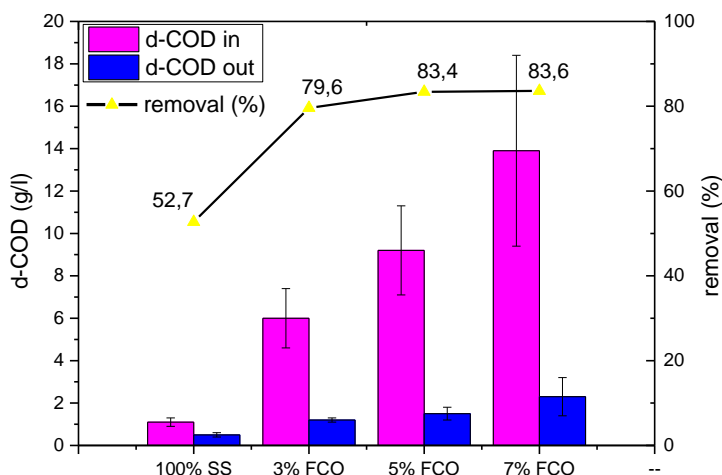


Figure 8. D-COD removal and d-COD concentrations in the influent (in) and effluent stage (out). Error bars indicate standard deviation.

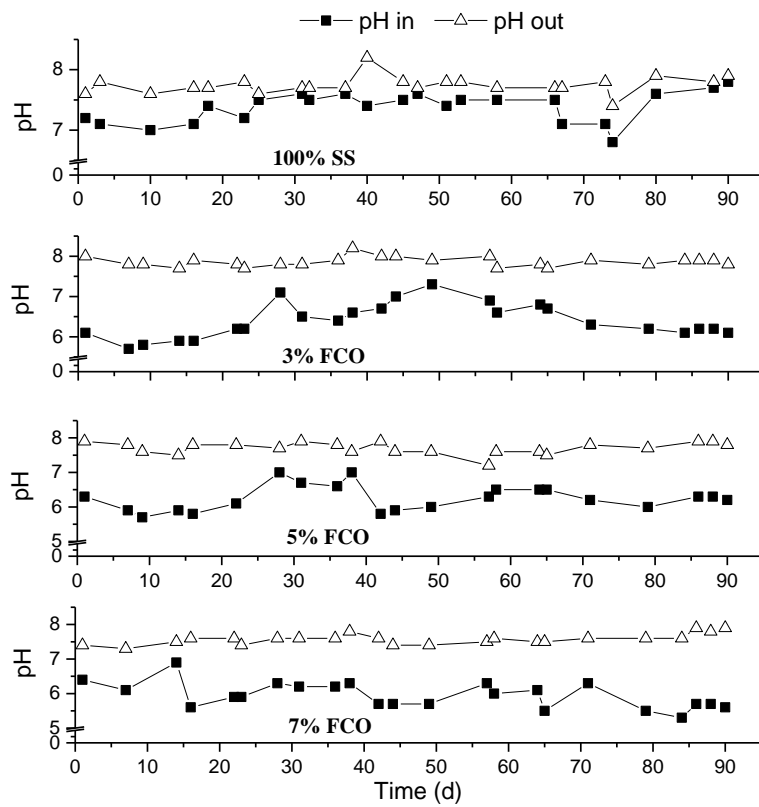


Figure 9. Profile of pH during anaerobic digestion process of SS & FCO mixtures.

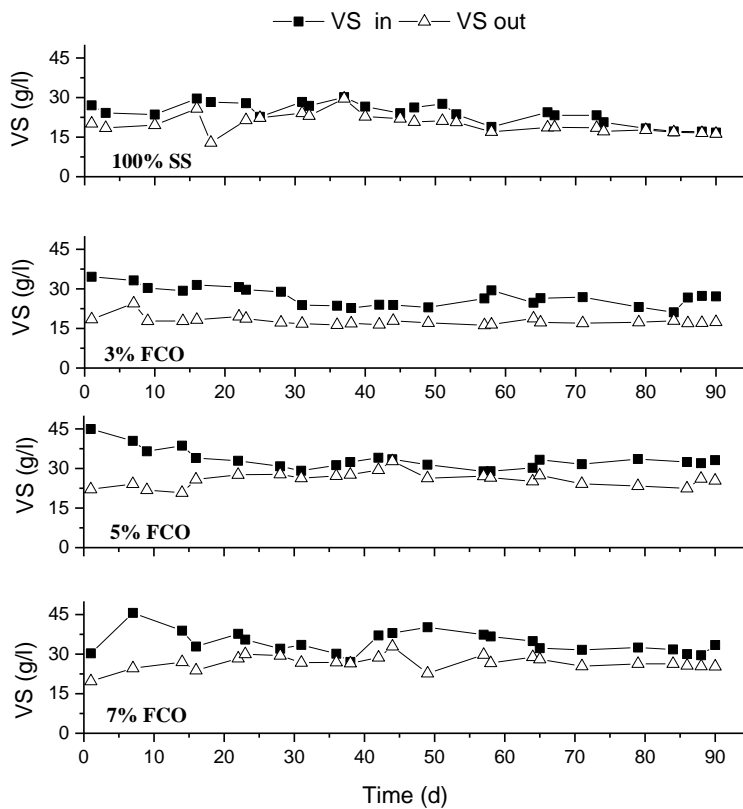


Figure 10. Profile of VS during anaerobic digestion process of SS & FCO mixtures.

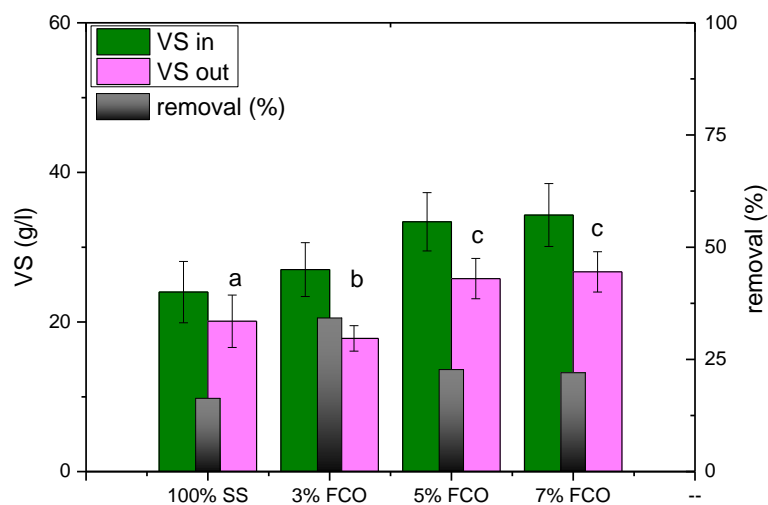


Figure 11. VS removal and VS concentrations in the influent (in) and effluent stage (out). Different letters indicate significant differences with $p < 0.05$. Error bars indicate standard deviation.

Solar drying processes can be a very attractive technology for volume reduction in order to decrease the high energy consumption of the drying operations (Maragkaki et al, 2016). In the present study, in order to study a commercial process, the mixture must be condensable (dried), with a low transportation (application) and storage cost. Therefore, for volume reduction, the solar drying process is the next step suggested. Solar drying is a far more cost-effective and environmentally friendly process than thermal drying. Solar drying is the preferred production process. Greek climatic conditions are optimum for this process.

The sun is the largest available carbon-free energy resource and the world's most abundant permanent source of energy, with the potential to meet a significant proportion of the world's energy needs. The solar drying system is one of the most attractive and promising applications of solar energy. Applying free solar energy may well be an alternative solution for reduction of drying process costs. Consequently, solar drying can be applied as an economical and efficient further-dewatering and drying method for the FCO mixtures. Using free solar energy for drying mixtures can be beneficial from the point of view of energy consumption and, consequently, the drying system cost.

REFERENCES

- Aichinger, P., Wadhawan, T., Kuprian, M., Higgins, M., Ebner, C., Fimml, C., Murthy, S., Wett, B., 2015. Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogas production and solids reduction. *Water Res.* 87, 416–423
- Angelidaki, I., Ahring, B.K., 1997. Co-digestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 8(4), 221–226.
- APHA, 1985. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed. American Public Health Association, Washington DC, USA.

Astals, S., Batstone, D.J., Mata-Alvarez, J., Jensen, P.D., 2014. Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 169, 421–427.

Cecchi, F., Fraverro, P.G., Perin, G., Vallini, G., 1998. Comparison of co-digestion performance of two differently collected organic fractions of municipal solid wastes with sewage sludges. *Environ. Technol. Lett.* 9, 391–400.

Chu, C.F., Li, Y.Y., Xu, K.Q., Ebie, Y., Inamori, Y., Kong, H.N., 2008. A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 4739–4746.

El-Mashad, H.M., McGarvey, J.A., Zhang, R., 2008. Performance and microbial analysis of anaerobic digesters treating food waste and dairy manure. *Biol. Eng.* 1, 233–242.

Fountoulakis, M., Petousi, I., Manios, T., 2010. Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production. *Waste Manag* 30, 1849–53.

Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Christopoulou, N., Goumenaki, M., 2007. Optimization of biogas production from olive oil mill wastewater, by co-digesting with diluted poultry manure. *Appl. Energy* 84(6), 646–663.

Hamzawi, N., Kennedy, K.J., Mc Lean, D.D., 1998. Technical feasibility of anaerobic co-digestion of sewage sludge and municipal solid waste. *Environ. Technol.* 19, 993–1003.

Iacovidou, E., Ohandja, D.G., Voulvoulis, N., 2012. Food waste co-digestion with sewage sludge – realising its potential in UK. *Environ. Manage.* 112, 267–274.

Khoufi, S., Louhichi, A., Sayadi, S., 2015. Optimization of anaerobic co-digestion of olive mill wastewater and liquid poultry manure in batch condition and semi-continuous jet-loop reactor. *Bioresource Technology* 182, 67–74.

Lee, D.Y., Ebie, Y., Xu, K.Q., Li, Y.Y., Inamori, Y., 2010. Continuous H₂ and CH₄ production from high-solid food waste in the two-stage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. *Bioresour. Technol.* 101, S42–S47.

Liu, C., Li, H., Zhang, Y., Liu, C., 2016. Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste. *Bioresource Technology* 219, 252–260.

Long, J.H., Aziz, T.N., Francis, L., Ducoste, J.J., 2012. Anaerobic co-digestion off at, oil and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Saf. Environ.* 90, 231–245.

Ma, J., Van Wambeke, M., Carballa, M., Verstraete, W., 2008. Improvement of the anaerobic treatment of potato processing wastewater in a UASB reactor by co-digestion with glycerol. *Biotechnol Lett* 30, 861–7.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Góiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S., 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 36, 412–427.

Maragkaki, A., Galliou, F., Markakis, N., Sabathianakis, G., Tsompanidis, C., Mavrogiannis, G., Koukakis, G., Lasaridi, K., Manios, T., 2016. Initial investigation of the solar drying method for the drying of olive oil by-products. *Waste and Biomass Valorization*. DOI 10.1007/s12649-016-9505-5.

Maragkaki, A., Fountoulakis, M., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T., 2017a. Boosting biogas production from sewage sludge by adding small amount of agro-industrial by-products and food waste residues. In press. *Waste Management*. DOI 10.1016/j.wasman.2017.04.024.

Maragkaki, A., Fountoulakis, M., Gypakis, A., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T., 2017b. Pilot-Scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro-industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at wastewater treatment plants. *Waste Management* 59, 362–370.

Martinez-Garcia, G., Johnson, A.C., Bachmann, R.T., Williams, C.J., 2007. A. Burgoyne and R.G.J. Edyvean, Two-stage biological treatment of olive mill wastewater with whey as co-substrate. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 59(4), 273–282.

Metcalf and Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 2003. *Wastewater engineering, treatment and reuse*, fourth ed. Metcalf & Eddy, Inc., Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, India.

Mayerle, S. F., De Figueiredo, J. N., 2016. Designing optimal supply chains for anaerobic bio-digestion/energy generation complexes with distributed small farm feedstock sourcing. *Renewable Energy* 90, 46–54.

Wang, D., Huang, H., Shen, F., Zeng, Y., Hu, Y., 2016. Effects of biomass densification on anaerobic digestion for biogas production. *RSC Advances* 6(94), 91748-91755.

Xie, S., Hai, F., Zhan, X., Guo, W., Ngo, H., Price, W., Nghiem, L., 2016. Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization. *Bioresource Technology* 222, 498–512.

Xie, S., Wickham, R., Nghiem, L., 2017. Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 116, 191-197.

Zheng, G., Chen, T., Yu, J., Gao, D., Shen, Y., Niu, M., Liu, H., 2015. Impact of composting strategies on the degradation of nonylphenol in sewage sludge. *Ecotoxicology*, 24(10) 2081-2087.

4. Use of dry food waste as fuel in incineration and gasification units

4.1. Abstract

CPERI/CERTH based on the provisions of the Declaration, carried out the complete and detailed investigation and evaluation of three (3) different product-fuel samples. The quantity of each sample initially delivered to CPERI/CERTH was two kilograms of each sample, for three samples of sterile materials, in total. For the above samples, CPERI/CERTH carried out a complete analysis of their physicochemical properties. In particular, the required analyzes include the elemental analysis, the determination of the upper and lower calorific value, the determination of the ash content, the measurement of the volatile components, the determination of the sulfur content, and the measurement of the chlorine content in the product-fuel samples. The investigation and evaluation of the three different samples (quantity 2 kg/sample) was carried out in the accredited Institute for Solid Fuels Technology and Applications (ISFTA) at Ptolemaida, Greece belonging to the Chemical Processes and Energy Resources Institute (CPERI) of the National Center for Research and Technology Hellas (CERTH), implements a quality management system in accordance with the requirements of EL0T EN ISO/IEC 17025:2005 (Certificate No. ESYD 894-2), to ensure the safe and complete implementation of the required product-fuel samples analyzes.

All materials had similar ash content values and relatively limited variations in ash melting temperature. Based on the results of the analyzes of the previous physicochemical characterization, one (1) sample was selected by CERTH / IDEP for further processing and study. The material selected for briquetting was the sterile food residues of 2019, as they had ash percentage and ash melting values closer to the average of the respective measurements for all analyzes. In the second stage, CPERI/CERTH received again from the Contracting Authority a quantity of one hundred kilos from the selected sterile sample. Then, CPERI/CERTH carried out processing procedures for the briquetting of the selected sample with common biomass (straw). Briquetting was achieved at a rate of 40% w/w of the selected material (sterile sample_2019), in the total weight of the briquette.

Concerning the realization of gasification tests of the one (1) selected and briquetted sample, the possibility of gasification experiments of product produced of the F4F project in the fixed bed gasifier system of CPERI/CERTH, was investigated. The reactor selected and owned by CPERI/CERTH is the downdraft fixed bed type. The system is relatively simple in design and can offer (based on the manufacturer's specifications) satisfactory performance. Because such material is used for the first time in the gasifier of CPERI/CERTH, it was therefore necessary in the first stage to carry out gasification experiments using standard wood-based material with which in the second phase the examined material was compared. Standard operation and permanent operation of the gasifier was performed as well as an effort to maintain continuous and uninterrupted operation of the gasifier. The purpose of the tests was to determine the optimal values of operating parameters and gasification conditions.

The two gasification tests of the briquettes from sterile food residues_2019 and straw cannot be considered successful. At the same time, both ensuring the smooth operation of the gasification system through continuous inspections, and the stable and expected

results of the test with beech wood chips, lead to the conclusion that any system failure is primarily due to partial or even complete unsuitability of this kind of mixed briquettes for gasification.

4.2. Εισαγωγή

Το ΕΚΕΤΑ ως Οικονομικός Φορέας στη Διακήρυξη Ηλεκτρονικού Δημόσιου Ανοικτού Διαγωνισμού κάτω των ορίων με αριθμό πρωτ. 7454/06.08.20 που προκήρυξε ο Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου μέσω της πλατφόρμας του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρονικών Δημοσίων Συμβάσεων στο πλαίσιο υλοποίησης του έργου με τίτλο «Food for Feed: An Innovative Process for Transforming Hotels' Food Wastes into Animal Feed – LIFE15/ENV/GR/000257» με κωδικό έργου 80378, ανέλαβε την «Παροχή υπηρεσίας για τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων καύσης και αεριοποίησης παραγόμενου προϊόντος του έργου F4F».

Συγκεκριμένα το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ με βάση όσα όριζε η Διακήρυξη πραγματοποίησε:

(Α) Την πλήρη και λεπτομερή διερεύνηση και αξιολόγηση τριών (3) διαφορετικών δειγμάτων προϊόντων-καυσίμων. Η ποσότητα του κάθε δείγματος που παραδόθηκε αρχικά από την Αναθέτουσα Αρχή ήταν δύο κιλά δείγματος, σε σύνολο τριών δειγμάτων αποστειρωμένων υλικών). Για τα παραπάνω δείγματα, το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ πραγματοποίησε ανάλυση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, οι απαιτούμενες αναλύσεις περιλαμβάνουν τη στοιχειακή ανάλυση, τον προσδιορισμό της ανώτερης και της κατώτερης θερμογόνου δύναμης, τον προσδιορισμό του ποσοστού τέφρας, τη μέτρηση του ποσοστού των πτητικών συστατικών, τον προσδιορισμό περιεχόμενου θείου, και τη μέτρηση του ποσοστού του χλωρίου στα δείγματα των υλικών/καυσίμων. Η διερεύνηση και αξιολόγηση των τριών διαφορετικών δειγμάτων (ποσότητας 2 kg/δείγμα) πραγματοποιήθηκε στο διαπιστευμένο Εργαστήριο Στερεών Καυσίμων στο Πρότυπο Εργαστήριο Πτολεμαΐδας που ανήκει στο Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) και το οποίο εφαρμόζει σύστημα διαχείρισης ποιότητας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005 (Αρ. Πιστοποιητικού ΕΣΥΔ 894-2), για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και ολοκληρωμένη υλοποίηση των απαιτούμενων αναλύσεων του προϊόντος.

(Β) Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων του προηγούμενου φυσικοχημικού χαρακτηρισμού, έγινε επιλογή από την Αναθέτουσα Αρχή ενός (1) δείγματος για περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη. Το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ σε δεύτερο στάδιο παράλαβε εκ νέου από την Αναθέτουσα Αρχή ποσότητα εκατό κιλών από το επιλεγμένο αποστειρωμένο δείγμα (100 kg για το ένα (1) επιλεγμένο δείγμα). Στη συνέχεια, το ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ προέβη σε διαδικασίες επεξεργασίας για την μπρικετοποίηση του ενός (1) επιλεγμένου δείγματος με κοινή βιομάζα (άχυρο). Η μπρικετοποίηση επιτεύχθηκε σε ποσοστό 40% w/w του εξεταζόμενου υλικού (αποστειρωμένο δείγμα) στο σύνολο του βάρους της μπρικέτας.

Στο κομμάτι που αφορά την πραγματοποίηση δοκιμών αεριοποίησης του ενός (1) επιλεγμένου και μπρικετοποιημένου δείγματος εκ των τριών, διερευνήθηκε η δυνατότητα πραγματοποίησης πειραμάτων αεριοποίησης παραγόμενου προϊόντος του έργου F4F στο σύστημα σταθερής κλίνης του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ. Ο αντιδραστήρας που έχει επιλεγεί και έχει στην κατοχή του το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ είναι τύπου σταθερής κλίνης

καθοδικού ρεύματος. Το σύστημα είναι σχετικά απλό στη σχεδιάσή του και μπορεί να προσφέρει (βάση των προδιαγραφών του κατασκευαστή) ικανοποιητικές αποδόσεις. Επειδή τέτοιου είδους υλικό χρησιμοποιείται πρώτη φορά στον αεριοποιητή που έχει στις εγκαταστάσεις του το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, ήταν αναγκαίο λοιπόν στο πρώτο στάδιο να πραγματοποιηθούν πειράματα αεριοποίησης χρησιμοποιώντας πρότυπο υλικό με βάση το ξύλο με το οποίο σε δεύτερη φάση συγκρίθηκε το εξεταζόμενο υλικό. Πραγματοποιήθηκε πρότυπη λειτουργία και επίτευξη μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του αεριοποιητή καθώς και προσπάθεια διατήρησης συνεχούς και απρόσκοπτης λειτουργίας του αεριοποιητή. Σκοπός των δοκιμών ήταν ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων λειτουργίας και συνθηκών αεριοποίησης, με έμφαση στον βέλτιστο λόγο αέρα καύσης και στη θερμοκρασία.

4.3. Πλήρης και λεπτομερής διερεύνηση και αξιολόγηση τριών (3) διαφορετικών δειγμάτων προϊόντων-καυσίμων

Η ποσότητα του κάθε δείγματος που παραδόθηκε από την Αναθέτουσα Αρχή (ΗΜΥ) ήταν 2 kg/δείγμα, σε σύνολο τριών δειγμάτων αποστειρωμένων υλικών:

- 1 Δείγμα - Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2018
- 1 Δείγμα - Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2019
- 1 Δείγμα - Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2020

Για τα παραπάνω δείγματα, το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ πραγματοποίησε ανάλυση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους, η οποία παρατίθεται αναλυτικά στους παρακάτω Πίνακες Α2, Α3 και Α4. Η διερεύνηση και αξιολόγηση των τριών διαφορετικών δειγμάτων ποσότητας 2 kg/δείγμα πραγματοποιήθηκε στο διαπιστευμένο Εργαστήριο Στερεών Καυσίμων στο Πρότυπο Εργαστήριο Πτολεμαΐδας που ανήκει στο Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) και το οποίο εφαρμόζει σύστημα διαχείρισης ποιότητας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005 (Αρ. Πιστοποιητικού ΕΣΥΔ 894-2), για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και ολοκληρωμένη υλοποίηση των απαιτούμενων αναλύσεων του προϊόντος.

Στον **Πίνακα Α1** παρατίθενται οι απαραίτητες αναλύσεις και τα πρότυπα για τον προσδιορισμό της ποιότητας των στερεών βιοκαυσίμων.

Πίνακας Α1. Απαραίτητες αναλύσεις και πρότυπα για στερεά βιοκαύσιμα

Ανάλυση	Πρότυπο
Εργαστηριακή προκατεργασία δειγμάτων βιομάζας	ISO 14780 – Solid biofuels – Sample Preparation
Προσδιορισμός Ολικής Υγρασίας σε δείγματα βιομάζας	ISO 18134-1 – Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method
Άμεση Ανάλυση Καυσίμου Βιομάζας (Υγρασία – Τέφρα)	ISO 18134-3 – Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample & ISO 18122 – Solid biofuels – Determination of ash content
Προσδιορισμός Άνθρακα, Υδρογόνου και Αζώτου σε	ISO 16948 – Solid biofuels – Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen

καύσιμα Βιομάζας	
Προσδιορισμός Χλωρίου και Θείου σε δείγματα Βιομάζας	ISO 16994 – Solid biofuels – Determination of total content of sulfur and chlorine & ASTM D 516 – Standard Test Method for Sulfate Ion in Water
Προσδιορισμός Κατωτέρας και Ανωτέρας Θερμογόνου Δύναμης Καυσίμου Βιομάζας	ISO/DIS 18125 – Solid biofuels – Determination of calorific value

Πίνακας Α2. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_ Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2018

	Αριθμός Πιστοποιητικού:	4
Ημερομηνία Δείγματος	19/02/2021	
Ημερομηνία Ανάλυσης	22/02/2021, 23/02/2021, 24/02/2021, 26/02/2021, 01/03/2021, 02/03/2021	
Κωδικός Δείγματος	S20210219	
Περιγραφή Δείγματος	Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2018_F4F	

Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	15,6	0,57

Άμεση Ανάλυση (ISO 18134-3, ISO 18122, ISO 18123)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Μερική Υγρασία		%	1,3	0,09
Τέφρα	επί ξηρού	%	6,3	0,19
Πτητικά	επί ξηρού	%	82,8	0,89
Τέφρα	ως έχει	%	5,3	0,16
Πτητικά	ως έχει	%	69,8	0,89

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανθρακας	επί ξηρού	%	52,52	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	7,18	
Άζωτο	επί ξηρού	%	4,30	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	0,29	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Χλώριο	επί ξηρού	%	1,26	

Θερμογόνος Δύναμη (ISO/DIS 18125)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	5591,9	

Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	5222,1	
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4717,9	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4314,6	

Σημείο Ευτηκτότητας Τέφρας (CEN/TS 15370-1)

Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θερμοκρασία Συρρίκνωσης	°C	515	
Θερμοκρασία Παραμόρφωσης	°C	841	
Θερμοκρασία Ημισφαιρίου	°C	>1550	
Θερμοκρασία Ροής	°C	>1550	

Πίνακας A3. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_ Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2019

	Αριθμός Πιστοποιητικού:	4
Ημερομηνία Δείγματος	19/02/2021	
	22/02/2021, 23/02/2021, 24/02/2021, 25/02/2021,	
Ημερομηνία Ανάλυσης	26/02/2021, 01/03/2021, 02/03/2021	
Κωδικός Δείγματος	S20210219	
Περιγραφή Δείγματος	Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2019_F4F	

Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	14,0	0,51

Άμεση Ανάλυση (ISO 18134-3, ISO 18122, ISO 18123)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Μερική Υγρασία		%	1,3	0,09
Τέφρα	επί ξηρού	%	7,4	0,22
Πτητικά	επί ξηρού	%	82,1	0,88
Τέφρα	ως έχει	%	6,4	0,19
Πτητικά	ως έχει	%	70,6	0,87

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Άνθρακας	επί ξηρού	%	50,15	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	6,88	
Άζωτο	επί ξηρού	%	3,93	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	0,29	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα

Χλώριο	επί ξηρού	%	1,52	
---------------	-----------	---	------	--

Θερμογόνος Δύναμη (ISO/DIS 18125)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	5471,0	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	5116,0	
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4705,6	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4318,7	

Σημείο Ευτηκτότητας Τέφρας (CEN/TS 15370-1)

Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θερμοκρασία Συρρίκνωσης	°C	526	
Θερμοκρασία Παραμόρφωσης	°C	>1550	
Θερμοκρασία Ημισφαιρίου	°C	>1550	
Θερμοκρασία Ροής	°C	>1550	

Πίνακας Α4. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_ Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2020

	Αριθμός Πιστοποιητικού:	4
Ημερομηνία Δείγματος	19/02/2021	
Ημερομηνία Ανάλυσης	22/02/2021, 23/02/2021, 24/02/2021, 25/02/2021, 26/02/2021, 01/03/2021, 02/03/2021	
Κωδικός Δείγματος	S20210219	
Περιγραφή Δείγματος	Αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα 2020_F4F	

Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	13,0	0,47

Άμεση Ανάλυση (ISO 18134-3, ISO 18122, ISO 18123)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Μερική Υγρασία		%	1,9	0,11
Τέφρα	επί ξηρού	%	11,5	0,34
Πτητικά	επί ξηρού	%	82,3	0,89
Τέφρα	ως έχει	%	10,0	0,30
Πτητικά	ως έχει	%	71,6	0,86

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Άνθρακας	επί ξηρού	%	49,18	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	6,55	
Άζωτο	επί ξηρού	%	4,10	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	0,27	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Χλώριο	επί ξηρού	%	1,68	

Θερμογόνος Δύναμη (ISO/DIS 18125)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	5144,7	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	4807,0	
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4475,9	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4106,2	

Σημείο Ευτηκότητας Τέφρας (CEN/TS 15370-1)

Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θερμοκρασία Συρρίκνωσης	°C	586	
Θερμοκρασία Παραμόρφωσης	°C	718	
Θερμοκρασία Ημισφαιρίου	°C	>1550	
Θερμοκρασία Ροής	°C	>1550	

Όλα τα υλικά είχαν παρόμοιες τιμές ποσοστού τέφρας και σχετικά περιορισμένες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία τήξης τέφρας. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων του προηγούμενου φυσικοχημικού χαρακτηρισμού, έγινε επιλογή από το ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ ενός (1) δείγματος για περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη. Το υλικό που επιλέχθηκε για μπρικετοποίηση ήταν τα αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα του 2019 καθώς είχαν τιμές ποσοστού τέφρας και τήξης τέφρας περισσότερο κοντά στο μέσο όρο των αντίστοιχων μετρήσεων για το σύνολο των αναλύσεων.

4.4. Μπρικετοποίηση τροφικών υπολειμμάτων 2019

Το ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ σε δεύτερο στάδιο παράλαβε εκ νέου από την Αναθέτουσα Αρχή τη ζητηθείσα ποσότητα των εκατό κιλών από το επιλεγμένο αποστειρωμένο δείγμα.

Πίνακας Β1. Παραλαβή 100 kg αποστειρωμένων τροφικών υπολειμμάτων του 2019.

Κωδικός Δείγματος	Περιγραφή	Ημερομηνία αποστολής	Ποσότητα
F4F_FW_2019_FINAL	Τελικό παραγόμενο προϊόν μονάδας 2019 (τροφικά υπολείμματα με κρέας)	05/04/2021	6 κούτες σύνολο 100 Kg.



Στη συνέχεια, το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ προέβη σε διαδικασίες επεξεργασίας για την μπρικετοποίηση του ενός (1) επιλεγμένου δείγματος με κοινή βιομάζα (άχυρο). Η μπρικετοποίηση επιτεύχθηκε σε ποσοστό 40% w/w του υλικού στο σύνολο του βάρους της μπρικέτας. Για τη διαδικασία της μπρικετοποίησης χρησιμοποιήθηκε η εικονιζόμενη γερμανικής προέλευσης μηχανή με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά

Πίνακας Β2. Τεχνικά χαρακτηριστικά μπρικετομηχανής

	<p>Τεχνικά χαρακτηριστικά μπρικετομηχανής:</p> <p>Υδραυλικό σύστημα (3 kW) υψηλής πίεσης με πίεση λειτουργίας (150-200 bar)</p> <p>παραγωγή: (30 - 40) kg/h (ανάλογα με το υλικό)</p> <p>Διάμετρος μπρικέτας: Φ60 mm</p> <p>Μήκος μπρικέτας: L = 10mm - 60mm, αλλά επιθυμητό 50 mm</p> <p>Η μπρικετομηχανή έχει όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις (CE-Certifications)</p>
---	--





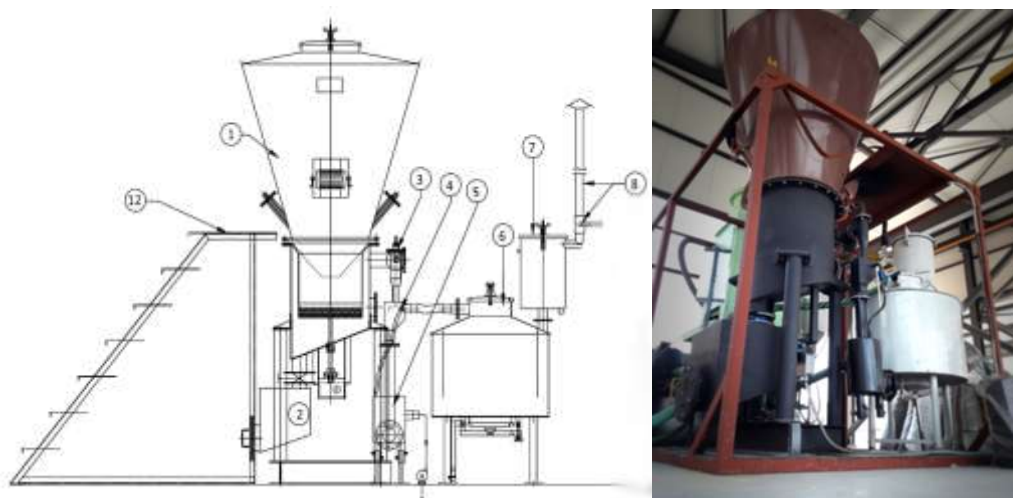
Εικόνα Β1. Διαδικασία μπρικετοποίησης με σκοπό την παραγωγή μπρικέτας από άχυρο (60%) και αποστειρωμένα τροφικά υπολλείματα_2019 (40%)

4.5. Πειραματική διαδικασία

Στο κομμάτι που αφορά την πραγματοποίηση των δοκιμών αεριοποίησης του ενός (1) μπρικετοποιημένου δείγματος εκ των τριών, διερευνήθηκε η δυνατότητα πραγματοποίησης πειραμάτων αεριοποίησης παραγόμενου προϊόντος του έργου F4F στο σύστημα σταθερής κλίνης του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ. Ο αντιδραστήρας που έχει επιλεγεί και έχει στην κατοχή του το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ είναι τύπου σταθερής κλίνης καθοδικού

ρεύματος. Το σύστημα είναι σχετικά απλό στη σχεδίασή του και μπορεί να προσφέρει (βάση των προδιαγραφών του κατασκευαστή) ικανοποιητικές αποδόσεις. Επειδή τέτοιου είδους υλικό χρησιμοποιείται πρώτη φορά στον αεριοποιητή που έχει στις εγκαταστάσεις του το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, στο πρώτο στάδιο ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν πειράματα χρησιμοποιώντας πρότυπο υλικό με βάση το ξύλο με το οποίο σε δεύτερη φάση συγκρίθηκε το εξεταζόμενο υλικό (αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα του 2019).

Συγκεκριμένα, το σύστημα του αεριοποιητή σταθερής κλίνης καθοδικής ροής που διαθέτει το ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ φαίνεται στην εικόνα Β2.



Εικόνα Β2. Το σύστημα αεριοποίησης του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ.

Στην Εικόνα Β2 παρουσιάζεται το σκαρίφημα και μια πραγματική φωτογραφία του αεριοποιητή σταθερής κλίνης καθοδικής ροής, που τροφοδοτείται με ξυλώδη βιομάζα (wood-chips), μέγιστης χωρητικότητας 12 kg/h, και ο οποίος βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η βιομάζα τροφοδοτείται μέσω του θαλάμου τροφοδοσίας (12) και αποθηκεύεται στη χοάνη (1). Η στένωση βοηθά στην παραγωγή ενός καθαρού και καλής ποιότητας παραγόμενου αερίου σύνθεσης (syngas). Μια ελεγχόμενη ποσότητα αέρα εισέρχεται στον αεριοποιητή μέσω των ακροφυσίων, για μερική καύση. Ο αντιδραστήρας συγκρατεί τα προϊόντα της μερικής καύσης για αναγωγή, ενώ επιτρέπει επίσης τη διαφυγή της τέφρας στο κουτί συλλογής τέφρας (2) μέσω ενός διάτρητου φύλλου. Το αέριο διέρχεται από το άνω τμήμα του διάτρητου φύλλου του αντιδραστήρα. Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης στον αεριοποιητή οδηγείται διαδοχικά μέσω μιας αντλίας Venturi (3), ενός παθητικού φίλτρου (6), και ενός φίλτρου ασφαλείας (7) και, τέλος καταλήγει στη φλόγα πιλότο (gas flare)(8) όπου και καίγεται. Το νερό αντλείται μέσω ενός κλειστού κύκλου για να τροφοδοτήσει τον απαραίτητο αέρα για την αεριοποίηση της βιομάζας. Η ρύθμιση της ταχύτητας της αντλίας επιτρέπει τον έλεγχο της παροχής του αέρα στον αεριοποιητή, καθώς και της στοιχειομετρικής αναλογίας αεριοποίησης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται αναλυτές αερίων για τη μέτρηση της σύστασης του παραγόμενου αερίου σύνθεσης ως προς την περιεκτικότητα σε H_2 , CO , CO_2 , CH_4 και O_2 . Τέλος, εφαρμόζεται το tar protocol για τη συλλογή και την ανάλυση των παραγόμενων πισσών, ενώ το παραγόμενο εξανθράκωμα συλλέγεται, κατά τα πειράματα αεριοποίησης, από τον κάτω θάλαμο του αντιδραστήρα. Αυτός ο αεριοποιητής σταθερής κλίνης και καθοδικής ροής,

μπορεί να λειτουργεί συνεχώς (σε ημι-βιομηχανική κλίμακα) για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 10 kWel.

Πριν από την έναρξη κάθε πειράματος γίνεται η ορθή διασφάλιση ότι όλα τα σημαντικά τμήματα της εγκατάστασης λειτουργούν χωρίς πρόβλημα. Η παροχή του αέρα καθορίζεται από τη χρήση τσιφαριού νερού (3) στην έξοδο του αντιδραστήρα εξοπλισμένο με ειδικό σωλήνα (4) και δοχείο συλλογής του νερού (5). Σε κάθε περίπτωση πριν από το πείραμα γίνεται έλεγχος των αντλιών του συστήματος του νερού (3-5).

Εν συνεχεία πραγματοποιείται η γόμωση του αντιδραστήρα (1) με βιομάζα. Ακολουθεί προσεκτική έρευνα για τυχόν σημεία διαρροών αερίου. Τα ακροφύσια του αέρα δεν έχουν δυνατότητα ρύθμισης της παροχής του αέρα. Αυτό πραγματοποιείται με τη ειδική ρύθμιση της προσροφητικής ικανότητας του τσιφαριού νερού (3). Αυτή ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε η μέτρηση διαφοράς πίεσης μεταξύ του αντιδραστήρα (ύψος τροφοδοσίας αέρα) και πριν το τσιφάρι να βρίσκεται στα επιθυμητά όρια. Η μέτρηση αυτή γίνεται με μανόμετρο τύπου στήλης νερού ανάμεσα στο δύο αυτά σημεία. Η διαδικασία έναυσης του αντιδραστήρα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φλόγιστρων προπάνιου, (εικόνα B3) .



Εικόνα B3. Η χρήση φλόγιστρων προπάνιου.

Μετά την έναυση του ο αεριοποιητή, μπορεί να προσδώσει υψηλής θερμικής αξίας αέριο τα πρώτα 20 min. Το αέριο καίγεται συνεχώς σε ειδικό σύστημα φλόγας πιλότου (8). Το δείγμα του αερίου περνάει πρώτα από τα συστήματα καθαρισμού (6 και 7), για να καταλήξει τελικά στους αναλυτές για την μέτρηση της ποιότητάς του. Καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της αεριοποίησης λειτουργεί ειδικά τοποθετημένος δονητής στο κέλυφος (χοάνη) του αντιδραστήρα και περιστροφικό σύστημα απομάκρυνσης της τέφρας πυθμένα. Η χοάνη πρέπει να είναι πάντα γεμισμένη με βιομάζα στο 80% του αντιδραστήρα.

Με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μανομέτρων έγινε η συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή της πτώσης πίεσης του αεριοποιητή, του ακροφυσίου και των φίλτρων. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται και η μέτρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα με τη χρήση θερμοστοιχείων τύπου K σε συνδυασμό με έναν καταγραφέα δεδομένων θερμοκρασίας.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος οι πειραματιστές του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ φρόντισαν να έχουν όλα τα μέτρα προσωπικής ασφαλείας (γάντια, γυαλιά, ειδικό ρουχισμό, παπούτσια βιομηχανικού τύπου και το σημαντικότερο φορητό εξοπλισμό ανίχνευσης

διαρροών μονοξειδίου του άνθρακα (Εικόνα Β4) ώστε να αποφευχθεί ατύχημα σε περίπτωση οποιαδήποτε διαρροής.



Εικόνα Β4. Φορητός ανιχνευτής CO – απαραίτητο εξάρτημα κάθε πειραματιστή

4.5.1. Πρώτη ύλη βιομάζας για τα πειράματα αεριοποίησης

Ως πρώτη ύλη για το πρότυπο πείραμα αεριοποίησης επιλέχθηκε το είδος της οξιάς, καθώς το υλικό αυτό έχει μικρή περιεκτικότητα σε τέφρα, είναι ιδανικό υλικό για την μετατροπή του σε συγκεκριμένο μέγεθος (wood chips) και είναι εύκολα να βρεθεί σε μεγάλες ποσότητες αναγκαίες για το πείραμα.



Εικόνα Β5. Βιομάζα οξιάς σε μορφή Wood chips

Πίνακας Β3. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_ Wood chips οξιάς

Περιγραφή Δείγματος

Wood chips οξιάς

Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	10,2	0,11

Άμεση Ανάλυση (ISO 18134-3, ISO 18122, ISO 18123)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Μερική Υγρασία		%	3,3	0,06
Τέφρα	επί ξηρού	%	0,7	0,03
Πτητικά	επί ξηρού	%	81,2	0,46
Τέφρα	ως έχει	%	0,6	0,03
Πτητικά	ως έχει	%	72,9	0,42

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Άνθρακας	επί ξηρού	%	52,20	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	7,35	
Άζωτο	επί ξηρού	%	0,26	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	<0,03	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Χλώριο	επί ξηρού	%	0,01	

Θερμογόνος Δύναμη (ISO/DIS 18125)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	4929,9	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	4549,8	
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4426,1	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	4025,2	

Σημείο Ευτηκτότητας Τέφρας (CEN/TS 15370-1)

Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θερμοκρασία Συρρίκνωσης	°C	745	
Θερμοκρασία Παραμόρφωσης	°C	1266	
Θερμοκρασία Ημισφαιρίου	°C	1413	
Θερμοκρασία Ροής	°C	1433	

Η ανάλογη μέτρηση πραγματοποιήθηκε και στο παραγόμενο δείγμα που θα αποτελέσει τη βιομάζα του πειράματος αεριοποίησης.

Πίνακας Β4. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_ Μπρικέτα από άχυρο (60%) και αποστειρωμένα τροφικά υπολλείματα_2019 (40%)

Περιγραφή Δείγματος

Μπρικέτα από άχυρο (60%) και αποστειρωμένα τροφικά υπολλείματα_2019 (40%)

Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)

Action B7: Completing, Incorporating and Evaluating the F4F Process as Part of the EU's Wastes Strategy and other Union Policies

Deliverable B7.4 Data and complete evaluations regarding alternative uses of the F4F product

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	19,52	0,41

Άμεση Ανάλυση (ISO 18134-3, ISO 18122, ISO 18123)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Μερική Υγρασία		%	3,04	0,17
Τέφρα	επί ξηρού	%	7,34	0,23
Πτητικά	επί ξηρού	%	78,02	0,6
Τέφρα	ως έχει	%	5,92	0,18
Πτητικά	ως έχει	%	62,92	0,58

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανθρακας	επί ξηρού	%	46,41	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	6,73	
Άζωτο	επί ξηρού	%	1,83	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	0,15	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Χλώριο	επί ξηρού	%	0,8	

Θερμογόνος Δύναμη (ISO/DIS 18125)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	4723,9	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	επί ξηρού	cal/gr	4375,5	
Ανώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	3830,3	
Κατώτερη Θερμ. Δύναμη	ως έχει	cal/gr	3435,8	

Σημείο Ευτηκτότητας Τέφρας (CEN/TS 15370-1)

Μέγεθος	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θερμοκρασία Συρρίκνωσης	°C	671	
Θερμοκρασία Παραμόρφωσης	°C	1355	
Θερμοκρασία Ημισφαιρίου	°C	1371	
Θερμοκρασία Ροής	°C	1389	

4.5.2. Μέτρηση του παραγόμενου αερίου

Το δείγμα αερίου ψύχεται και καθαρίζεται πριν από την ανάλυση του σε ένα σύστημα διαχείρισης του αερίου, κατασκευής M&C (εικόνα B6). Ένας ανιχνευτής αερίου

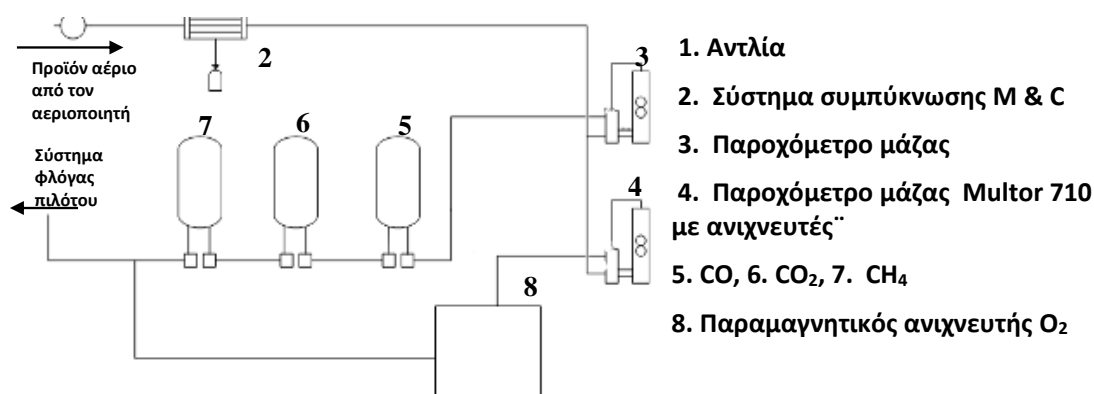
πολλαπλών συστατικών (Sick Maihak 710) χρησιμοποιείται για την ανάλυση του αερίου προϊόντος (εικόνα B7). Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μεθάνιο (CH₄) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) μετρούνται χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία IR, σε κλίμακες 0-25% v/v, 0-15% v/v και 0-25% v/v αντίστοιχα. Η μέτρηση του υδρογόνου (H₂) περιλαμβάνει έναν ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας με ένα εύρος από 0-15% v/v. Η εκτίμηση του οξυγόνου (O₂) γίνεται από ένα παραμαγνητικό αισθητήρα με ένα εύρος από 0-25% v/v. Οι παραπάνω μετρήσεις καταγράφονται σε H/Y. Συνολικά το διάγραμμα ροής των αναλυτικών οργάνων φαίνεται στην εικόνα B8.



Εικόνα B6. Το σύστημα M&C



Εικόνα B7. Ο αναλυτής αερίων πολλαπλών συστατικών της εταιρείας Sick Maihak 710



Εικόνα B8. Συνολικό διάγραμμα ροής σύστημα μέτρησης αερίων

4.6. Αξιολόγηση πειραμάτων

4.6.1. Διεργασία της αεριοποίησης και πειραματικά αποτελέσματα

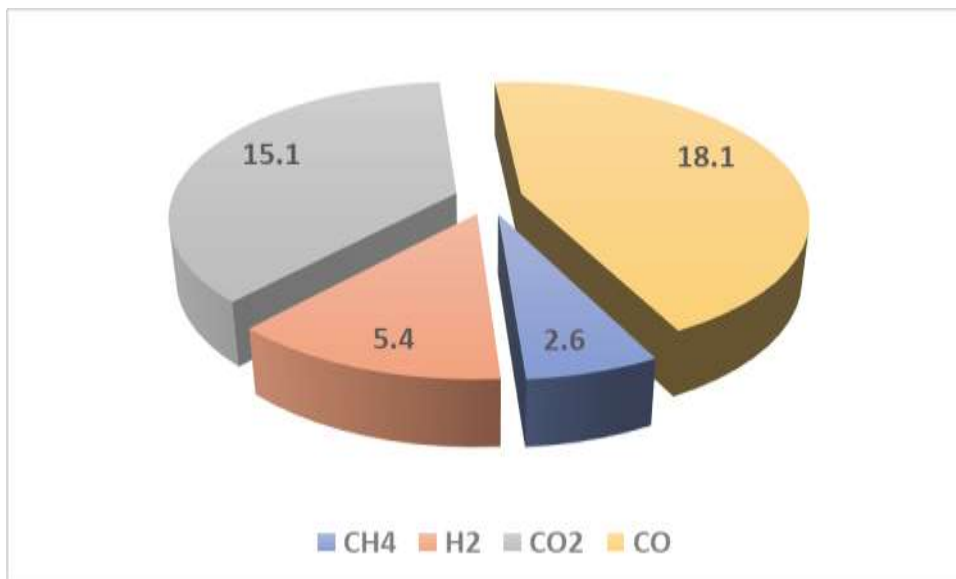
Η συνολική διεργασία της αεριοποίησης μπορεί να διαχωριστεί στα ακόλουθα στάδια/ζώνες, τα οποία πραγματοποιούνται διαδοχικά: το πρώτο στάδιο είναι η άμεση ξήρανση της πρώτης ύλης, η οποία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία έως 280 °C, ακολουθούμενο από την πυρόλυση, η οποία πραγματοποιείται σε εύρος θερμοκρασίας 280 – 500 °C και κατά την οποία λαμβάνει χώρα η θερμική αποικοδόμηση της βιομάζας προς πτητικά, πίσσα και εξανθράκωμα. Οι ζώνες αυτές μετρούνται και συγκεκριμενοποιούνται με τη βοήθεια της μέτρησης της θερμοκρασίας.

Θεωρητικά, κατά την αντίδραση της αεριοποίησης ενός υδρογονάνθρακα ή ενός δείγματος βιομάζας με γενικευμένο χημικό τύπο CH_xO_yN_zS_w, τα τυπικά πιθανά προϊόντα είναι CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂, CH₄, μαζί με άνθρακα υπό μορφή εξανθρανθρακώματος ή πίσσων. Πριν την έναρξη κάθε πειράματος αεριοποίησης, η

σύσταση της βιομάζας αναλύεται με λεπτομέρεια. Επιπλέον, μετρείται και η ποσότητα του άνθρακα στο εξανθράκωμα, Cs. Παράλληλα, αναλύεται πλήρως η ποιότητα και περιεκτικότητα του αερίου στο προϊόν.

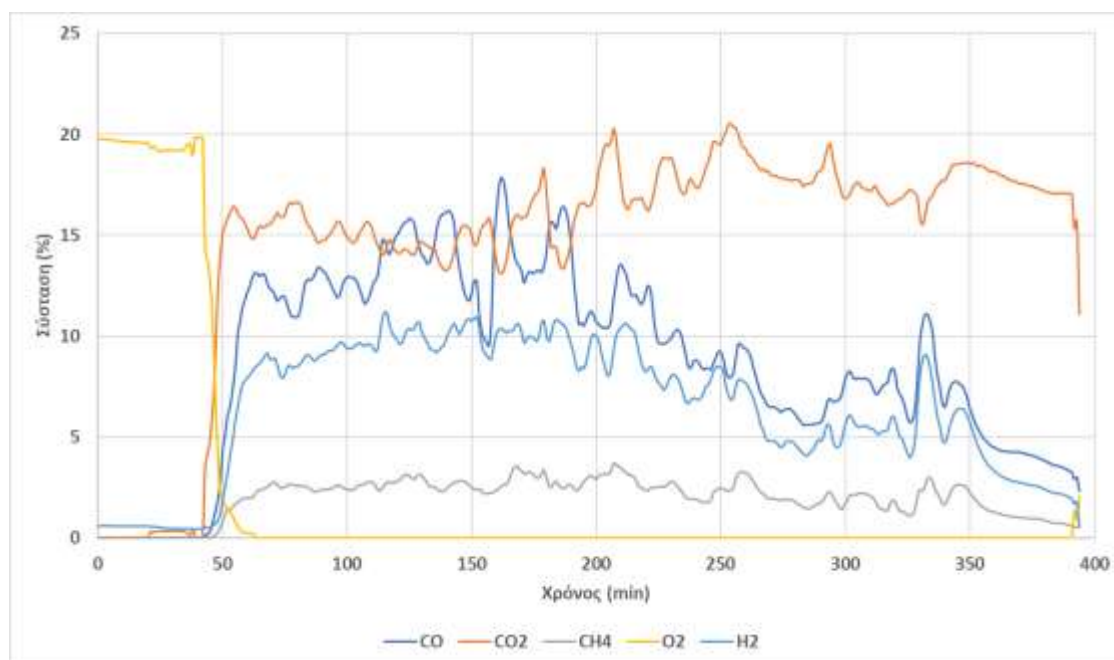
Πριν τις δοκιμές αεριοποίησης των μπρικετοποιημένων δειγμάτων αποστειρωμένων τροφικών υπολειμμάτων (σε μπρικέτες που περιέχουν 60% άχυρο), πραγματοποιείται πείραμα αεριοποίησης ενός πρότυπου είδους βιομάζας, συγκεκριμένα wood chips οξιάς. Σκοπός αυτής της επιπλέον δοκιμής είναι η στανταροποίηση του αεριοποιητή και ο έλεγχος της ομαλής λειτουργίας του, συμπεριλαμβάνοντας και όλα τα μετρητικά όργανα. Το συγκεκριμένο είδος βιομάζας θεωρείται ως πρότυπη πρώτη ύλη για την αεριοποίηση και συγκεκριμένα στην παρούσα μονάδα έχει δοκιμαστεί στο παρελθόν σε πολλαπλές περιπτώσεις με σταθερά και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Και σε αυτήν την περίπτωση, η λειτουργία του αντιδραστήρα αεριοποίησης πραγματοποιήθηκε με επιτυχία, χωρίς προβλήματα. Μετά τη χρονική περίοδο εκκίνησης, το σύστημα συνέκλινε σε μία μόνιμη κατάσταση και διατηρήθηκε εκεί για χρονικό διάστημα 10 ωρών (συμπεριλαμβάνοντας και την έναρξη του αντιδραστήρα). Δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα (ως δυναμικές μεταβολές των παραγόμενων αερίων), αλλά προτιμάται να καταγραφεί η σύσταση των αερίων προϊόντων κατά τη μόνιμη κατάσταση. Στο Σχήμα B1 μπορεί να φανεί ενδεικτικά η σύσταση των αερίων προϊόντων από την αεριοποίηση των wood chips οξιάς, με ρυθμό κατανάλωσης της βιομάζας 12 kg/hr. Όπως είναι αναμενόμενο, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του αερίου ρεύματος προϊόντων αντιστοιχεί σε CO (18,1%) και CO₂ (15%). Η αναλογία του παραγόμενου H₂ (5,4%) και του CH₄ (2,6%) ήταν σημαντικά μικρότερη, αλλά οι τιμές είναι αισθητές στο μίγμα προϊόντων. Αντίθετα, αξίζει να σημειωθεί πως καθ' όλη την εκτέλεση του συγκεκριμένου πειράματος, η σύσταση του μετρούμενου O₂ ήταν μηδενική. Από τα παραπάνω προκύπτει πως το πείραμα αεριοποίησης της πρότυπης βιομάζας ήταν επιτυχημένο, με πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες και αναμενόμενα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται δύο διαφορετικές δοκιμές αεριοποίησης των μπρικετών που προήλθαν από τα επιλεγμένα αποστειρωμένα απόβλητα τροφικών υπολειμμάτων (κατά 40%) και άχυρο (κατά 60%). Η μεθοδολογία, οι συνθήκες και γενικότερα όλα τα βήματα κατά την πειραματική διαδικασία είναι ταυτόσημα με αυτά που ακολουθήθηκαν στην περίπτωση της πρότυπης βιομάζας από wood chips οξιάς. Η δύο δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με διαφορά μίας ημέρας.



Σχήμα B1. Σύσταση αερίων συστατικών του παραγόμενου αερίου με κατανάλωση 12 kg/hr.

Στο Σχήμα B2 μπορεί να φανεί η δυναμική μεταβολή της σύστασης των αερίων προϊόντων, καθόλη τη διάρκεια της αεριοποίησης (περίπου 400 min), για τη Δοκιμή 1. Μετά την έναρξη του συστήματος και την πάροδο περίπου 40 min, είναι φανερό ότι εκκινεί η αντίδραση αεριοποίησης. Στο διάγραμμα, είναι επίσης φανερό πως δεν επιτυγχάνεται μόνιμη κατάσταση σε κανένα χρονικό σημείο της αντίδρασης.



Σχήμα B2. Δυναμική μεταβολή της σύστασης των αερίων προϊόντων αεριοποίησης των μπρικετοποιημένων αποστειρωμένων απόβλητων τροφικών υπολειμμάτων (40%) και άχυρου (60%), με ρυθμό κατανάλωσης 12 kg/hr – Δοκιμή 1.

Περισσότερο ενδεικτικό γεγονός για τη μη ομαλή λειτουργία του αεριοποιητή είναι η συνεχής αυξομείωση των τιμών των συστάσεων, όλων των αερίων προϊόντων της αντίδρασης. Η ταλάντωση των τιμών του παραγόμενου CO₂ μοιάζει να είναι η μεγαλύτερη από όλα τα αέρια συστατικά. Αναλογικά, οι ταλαντώσεις των τιμών του

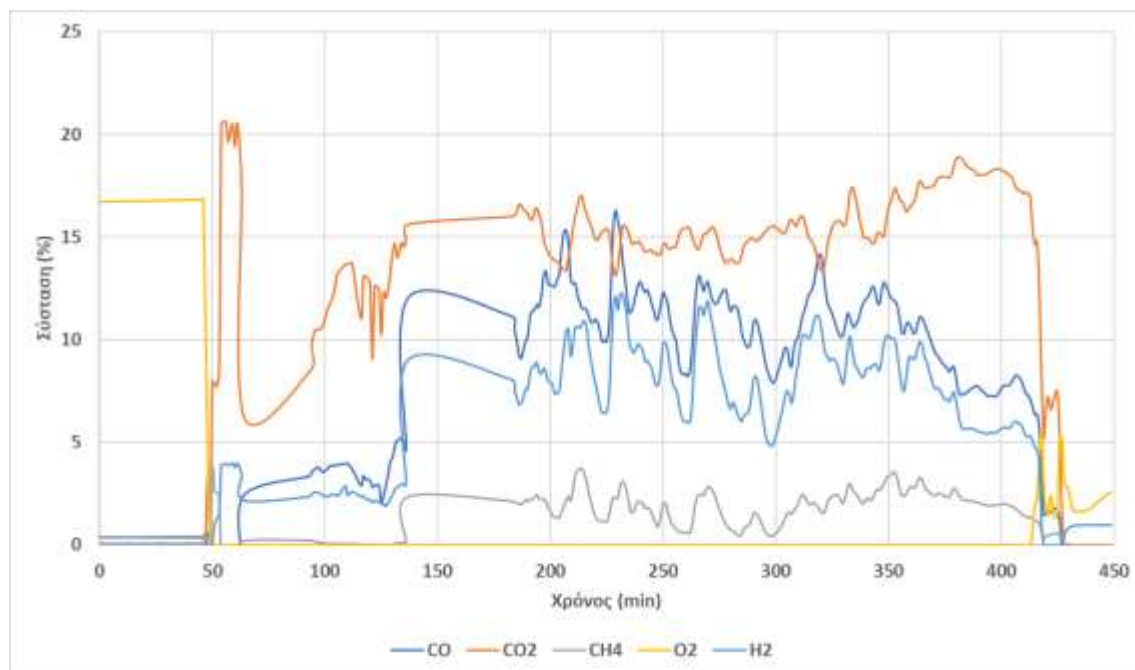
CO, του CH₄ και του H₂ πραγματοποιούνται σε μικρότερα εύρη τιμών, αλλά με μέση τιμή που συνεχώς μειώνεται. Ο συνδυασμός των παραπάνω παρατηρήσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διεργασία αεριοποίησης του συγκεκριμένου δείγματος βιομάζας αστόχησε. Αυτό είναι ακόμη πιο έκδηλο κατά τα τελευταία 30-40 min της δοκιμής.

Με σκοπό να εντοπιστεί η αιτία της αστοχίας της πρώτης δοκιμής, πραγματοποιήθηκε δεύτερη δοκιμή έπειτα από 24 ώρες. Και σε αυτήν την περίπτωση, πριν την τροφοδοσία του αντιδραστήρα και την έναρξη της αντίδρασης, έγιναν όλοι οι τυπικοί έλεγχοι καλής και ομαλής λειτουργίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα της δυναμικής μεταβολής της σύστασης των αέριων προϊόντων της αεριοποίησης των μπρικετών από αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα και άχυρο, κατά τη Δοκιμή 2, μπορούν να βρεθούν στο Σχήμα B3.

Όπως είναι φανερό από το προηγούμενο σχήμα, μετά το αρχικό χρονικό διάστημα των πρώτων 40-45 min που διαρκεί η έναρξη της αντίδρασης, εμφανίζονται ανάλογα με την πρώτη δοκιμή φαινόμενα ταλαντώσεων των τιμών της σύστασης των αέριων προϊόντων. Και σε αυτήν την περίπτωση οι μέσες τιμές, γύρω από τις οποίες ταλαντώνονται οι πειραματικές μετρήσεις, δεν μπορούν να ταυτοποιηθούν ως μόνιμη κατάσταση. Ενώ, παρά τις ταλαντώσεις, η παραγωγή CO₂ δείχνει σημαντική, οι μέσες τιμές των τριών άλλων αέριων -πλην του οξυγόνου- εμφανίζουν φθίνουσα μεταβολή. Τα φαινόμενα αυτά συνεχίζονται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, μέχρι την τελική αστοχία και τον αναγκαστικό τερματισμό του συστήματος, περίπου στα 420 min.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως το O₂ σε όλη τη διάρκεια των δύο πειραμάτων (εκτός της έναρξης και τερματισμού του συστήματος) παρέμενε σε πρακτικά μηδενικά ποσοστά, φανερώνοντας την αποτελεσματική απομόνωση της εισαγωγής δευτερογενούς παρασιτικού αέρα στο σύστημα. Επιπρόσθετα, το μικρότερο του προσδοκώμενου παραγόμενο H₂ μπορεί να οφείλεται μερικώς σε σχετική απόκλιση προς τα κάτω του λόγου αέρα, λόγω της σχετικά αυξημένης ολικής υγρασίας της βιομάζας πάνω από τα επιτρεπτά όρια.

Αναφορικά με τη συμπεριφορά του αεριοποιητή στην πρότυπη βιομάζα παρατηρήθηκε δραματική μείωση του παραγόμενου CO₂ για τη διατήρηση των θερμοκρασιών και αντίστοιχα αύξηση του ποσοστού του CO (σε σύγκριση με τις τιμές που μπορούν να εξαχθούν έστω και με αμφισβήτηση από τις δύο δοκιμές της επιλεγμένης βιομάζας). Για να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του αεριοποιητή στα πειράματα αυτά έγινε και χρήση θερμοστοιχείου τύπου K (πλάτους 5 mm), το οποίο εισήλθε στη ζώνη καύσης από μία από τις εισαγωγές αέρα. Παρά τη δυσκολία διάτρησης της κλίνης των σωματιδίων ώστε να μετρηθεί η θερμοκρασία στο κέντρο του αεριοποιητή καταγράφηκαν θερμοκρασίες μέχρι 700 °C (προφανώς οι θερμοκρασίες είναι κατά τι ανώτερες στο πραγματικό κέντρο του αεριοποιητή, όπου υπάρχει η ζώνη καύσης).



Σχήμα Β3. Δυναμική μεταβολή της σύστασης των αέριων προϊόντων αεριοποίησης των μπρικετοποιημένων αποστειρωμένων απόβλητων τροφικών υπολειμμάτων (40%) και άχρου (60%), με ρυθμό κατανάλωσης 12 kg/hr – Δοκιμή 2.

Σε κάθε περίπτωση, οι δύο δοκιμές αεριοποίησης των μπρικετών από αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα και άχρου δεν μπορούν να θεωρηθούν επιτυχημένες. Παράλληλα, τόσο η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος αεριοποίησης μέσω συνεχών ελέγχων, όσο και τα σταθερά και αναμενόμενα αποτελέσματα της δοκιμής με τα wood chips οξιάς, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η όποια αστοχία του συστήματος οφείλεται πρωταρχικά στην μερική ή ακόμη και πλήρη ακαταλληλότητα του συγκεκριμένου είδους μεικτών μπρικετών για αεριοποίηση.

Τέλος, επιπλέον των δύο δοκιμών αεριοποίησης, η παραγόμενη τέφρα πυθμένα του αεριοποιητή συλλέχθηκε και αναλύθηκε συγκεντρωτικά για τις δύο δοκιμές (Πίνακας Β5). Από τα αποτελέσματα που φαίνεται και παρακάτω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τέφρα περιέχει κατά προσέγγιση 90% άνθρακα και 10% ανόργανη τέφρα. Αυτό καταδεικνύει ότι η αεριοποίηση ήταν ατελής, αφήνοντας μεγάλο ποσοστό άνθρακα που δεν αντέδρασε στη τέφρα. Σε μία βιομηχανική εφαρμογή, το υλικό αυτό μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για επανατροφοδοσία στο σύστημα της αεριοποίησης ή να αναζητηθούν εναλλακτικές εφαρμογές του, όπως π.χ. ως εδαφοβελτιωτικό (λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας του σε άνθρακα). Θα πρέπει ακόμη να τονιστεί πως η όποια υγρασία του υλικού αυτού οφείλεται στη συλλογή του μετά από χρονικό διάστημα – κατά την παραγωγή του είναι θερμό και δεν περιέχει υγρασία.

Πίνακας Β5. Δελτίο ανάλυσης δείγματος_Τέφρας από αεριοποίηση Μπρικέτας_άχρου (60%) και αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα_2019 (40%)

Περιγραφή Δείγματος	Τέφρα από αεριοποίηση Μπρικέτας_άχρου (60%) και αποστειρωμένα τροφικά υπολείμματα_2019 (40%)
Ολική Υγρασία (ISO 18134-1)	

Action B7: Completing, Incorporating and Evaluating the F4F Process as Part of the EU's Wastes Strategy and other Union Policies

Deliverable B7.4 Data and complete evaluations regarding alternative uses of the F4F product

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Ολική Υγρασία	ως έχει	%	6,2	

Στοιχειακή Ανάλυση (ISO 16948)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Άνθρακας	επί ξηρού	%	87,59	
Υδρογόνο	επί ξηρού	%	1,17	
Άζωτο	επί ξηρού	%	1,21	

Προσδιορισμός Θείου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Θείο	επί ξηρού	%	0,07	

Προσδιορισμός Χλωρίου (ISO 16994 & ASTM D 516)

Μέγεθος	Βάση	Μονάδες	Τιμή	Διευρυμένη Αβεβαιότητα
Χλώριο	επί ξηρού	%	0,11	