

**VALORIFICAREA ENERGETICĂ
A DEȘEURILOR DIN INDUSTRIA ALIMENTARĂ**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat INGINERIE MECANICĂ

autor ing. Ing. Adriana Raluca Avram (căsătorită Wächter)

conducător științific Prof.univ.dr.ing. habil Ioana Ionel

Aprilie 2023

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității depuse în cadrul Centrului de Cercetări pentru Mașini și Echipamente Termice, Transporturi și Combaterea Poluării din Facultatea de Mecanică al Universității Politehnica Timișoara. Cercetarea se concentrează asupra ideii de valorificare a potențialului energetic conținut în fracția organică biodegradabilă a deșeurilor provenite din industria alimentară și agricultura.

Una din problemele de actualitate ale societății din zilele noastre este procesarea și tratarea deșeurilor organice provenite din industria alimentară. Obținerea produselor alimentare se realizează cu un consum energetic ridicat și generează cantități semnificative de deșeuri organice. Sistemul de management integrat al deșeurilor are rolul de a trata această problemă.

Sub acest aspect, valorificarea energetică prin exploatarea biogazului obținut prin fermentare anaerobă, reprezintă o soluție fezabilă și sustenabilă pentru producerea energiei regenerabile din deșeurile organice. În majoritatea țărilor industrializate, se pune accent pe soluțiile sustenabile de management al deșeurilor și pe producerea de energie regenerabilă din deșeuri organice, fapt care se reflectă prin legislația europeană și fondurile europene puse la dispoziție prin liniile de finanțare promovate la nivel național și european.

Lucrarea se axează pe conceptul „Waste-to-Energy” care oferă soluții fezabile pentru utilizarea deșeurilor organice din industria alimentară, ca sursă alternativă de energie. Procesele de recuperare energetică studiate, au la bază acțiunea bacteriilor de fermentare anaerobă, prin care are loc conversia materiei organice în combustibil sub formă de biogaz cu un conținut ridicat de metan (CH₄). Acest proces este considerat optim din punct de vedere al bilanțului energetic, permite utilizarea unei game variate de deșeuri organice, și tot odată constituie o metodă de tratare a deșeurilor organice pentru reducerea impactului asupra mediului înconjurător. Valorificarea biogazului are loc în grupuri de cogenerare cu producere de energie termică și electrică (CHP – Combined and Heat Power). În plus, reziduurile rezultate în urma procesului de fermentare anaerobă pot fi folosite ca fertilizator în industria agricolă.

Tema de cercetare abordată urmărește valorificarea energetică a biogazului produs prin fermentare anaerobă, utilizând ca materie primă deșeurile din industria alimentară. În acest sens au fost analizate două studii de caz pentru producători agroalimentari industriali care generează cantități semnificative de deșeuri organice.

Lucrarea este consolidată pe o serie de cercetări experimentale în laborator, pentru care s-au folosit echipamente de ultimă generație „state-of-the-art” în ce privește estimarea producției de biogaz prin fermentare anaerobă. Pentru aprofundarea și fixarea cunoștințelor teoretice acumulate din literatura de specialitate, pe parcursul studiilor de doctorat, am efectuat vizite on site în țară la 3 stații de producere biogaz la scară industrială.

Pentru măsurători, analiza și interpretarea datelor s-au utilizat echipamentele și aparatura din dotarea Laboratorului de Analize de Combustibili Investigații Ecologice și Dispersia Noxelor de la Universitatea Politehnica Timișoara și a laboratorului de Biotehnologii Microbiene și Industriale de la Universitatea de Științe Agricole și Medicină Veterinară a Banatului – USAMVB. Rezultatele obținute au fost publicate în 13 articole științifice din care 8 indexate ISI Web Of Science și 1 BDI.

Timișoara, Aprilie, 2023

Adriana Raluca Avram
(căsătorită Wächter)

CUPRINS

1. INTRODUCERE	5
1.1 Stabilirea temei de cercetare	
1.2 Importanța și actualitatea temei	
1.3 Încadrarea temei în topica de cercetare la nivel internațional și național	
1.4 Obiectivele științifice prestabilite pentru cercetare	
1.5 Metoda de cercetare abordată	
2. PRODUCEREA BIOGAZULUI	7
2.1 Digestia anaerobă	
2.2 Caracterizarea energetică a deșeurilor organice	
2.3 Factorii de proces care influențează producția de biogaz	
2.4 Fluxuri tehnologice de producere a biogazului prin digestie anaerobă	
2.4.1 Bioreactor cu film fix	
2.4.2 Bioreactor cu pat absorbant	
2.4.3 Bioreactor cu șicane orizontal	
2.4.4 Bioreactor tip lagună acoperită	
2.4.5 Bioreactor tip piston (plug-flow)	
2.4.6 Bioreactor cu mixare continuă	
2.4.7 Bioreactor de contact cu separare și recirculare	
2.4.8 Bioreactor de contact cu stabilizare	
2.4.9 Bioreactor de contact cu separare de fază	
2.5 Alegerea variantei constructive a bioreactorului	
3. INVESTIGAREA INSTALAȚIILOR INDUSTRIALE DE PRODUCERE BIOGAZ....	9
3.1. Stația de producere biogaz – Baia Mare	
3.1.1 Implementarea proiectului	
3.1.2 Descrierea fluxului tehnologic	
3.1.3 Producerea biogazului	
3.1.4 Stocarea și valorificarea biogazului	
3.2. Stația de producere biogaz – Seini	
3.2.1 Implementarea proiectului	
3.2.2 Descrierea fluxului tehnologic	
3.2.3 Producerea biogazului	
3.2.4 Stocarea, tratarea și valorificarea biogazului	
3.2.5 Stocarea și prelucrare digestat	
3.3. Stația de producere biogaz – Arad	
3.3.1 Implementarea proiectului	
3.3.2 Descrierea fluxului tehnologic	
3.3.3 Producerea biogazului	
3.3.4 Stocarea și valorificarea biogazului	
3.3.5 Stocarea și prelucrare digestat	
4. EXPERIMENTE ÎN LABORATOR	11
4.1. Metode experimentale aplicate	
4.1.1. Producerea biogazului în regim staționar	
4.1.2. Producerea biogazului în flux cu alimentare continuă	
4.1.3. Stand în regim staționar utilizat în experimente	
4.1.4. Stand cu alimentare continuă utilizat în experimente	
4.2. Studiu de caz 1 – Ferma de porci Bacova	

4.2.1. Analiza fluxului tehnologic al fermei zootehnice	
4.2.2. Calculul și determinarea potențialului de biogaz	
4.2.3. Analiza și interpretarea rezultatelor	
4.3. Studiu de caz 2 – Complexul Agro Industrial Curtici	
4.3.1. Analiza fluxului tehnologic	
4.3.2. Pregătirea probelor	
4.3.3. Setarea standului experimental AMPTS II	
4.3.4. Analiza și interpretarea rezultatelor	
5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	15
5.1. Evaluarea obiectivelor de cercetare prestabilite	
5.2. Concluzii privind rezultatelor cercetării efectuate	
5.3. Direcțiile deschise pentru continuarea cercetărilor	
5.4. Contribuții proprii privind tema de cercetare abordată	
Bibliografie	16

1. INTRODUCERE

Tema și subiectul care fac obiectul tezei de doctorat sunt de actualitate și răspund la valorificarea energetică a deșeurilor cu încărcare organică generate de industria agro-alimentară. Conceptul „Waste-to-Energy” utilizează deșeurile organice ca sursă alternativă de energie, prin valorificarea biogazului produs prin fermentare anaerobă.

Teza este structurată în cinci capitole care acoperă subiecte legate de managementul integrat al deșeurilor, prezentarea unor instalații industriale de producere biogaz precum și o serie de cercetări experimentale realizate pe stand în laborator, folosind infrastructura existentă în cadrul UPT și USAMBV.

Analiza și interpretarea datelor experimentale a fost realizată într-o manieră interdisciplinară cu specialiștii în domeniul biotehnologiei, fiind utilizate două tipuri de standuri experimentale de ultimă generație în domeniul investigării producerii biogazului la scară de laborator.

Capitolul introductiv pune în evidență subiecte legate de preocupările la nivel european și național, în ce privește pachetele legislative și fondurile nerambursabile puse la dispoziție prin diferite programe finanțare.

Procesarea și tratarea deșeurilor organice provenite din industria agro-alimentară reprezintă una din problemele de actualitate ale societății contemporane. Obținerea produselor alimentare se realizează cu un consum energetic ridicat și generează cantități semnificative de deșeuri organice cu impact asupra mediului.

Produsele finite din industria alimentară sunt caracterizate de o valoare ridicată a raportului dintre cantitatea de deșeu specific și produs finit, fiind foarte dificilă scăderea cantității deșeurilor specifice cu menținerea intactă a calității produsului. Generarea deșeurilor din industria alimentară este inevitabilă, utilizarea și depozitarea acestora fiind îngreunată de mai mulți factori cum sunt: instabilitatea biologică, potențialului patogen, degradarea biologică generată de activitatea enzimatică ridicată (putrefacție), precum și a conținutului ridicat de apă. Stabilizarea, tratarea și depozitarea deșeurilor organice ridică probleme deosebite atât în domeniul protecției mediului, cât și în cel al dezvoltării durabile

Sistemul de management integrat al deșeurilor are rolul de a trata această problemă. Sub acest aspect, valorificarea energetică prin exploatarea biogazului obținut din fermentare/digestie anaerobă, reprezintă o soluție fezabilă și sustenabilă pentru producerea energiei regenerabile din deșeurile organice provenite din industria alimentară. În majoritatea țărilor industrializate, se pune accent pe soluțiile sustenabile de management al deșeurilor cu valorificare energetică din surse regenerabile.

Procesele de valorificare energetică din deșeurile organice, presupun utilizarea biogazului produs în urma descompunerii fracției organice sub acțiunea bacteriilor metanogene specifice (care produc metan prin metabolism). Procesul de descompunere a fracției organice sub acțiunea bacteriilor este cunoscut sub numele de fermentare sau digestie. Funcție de mediul în care se desfășoară fermentarea se disting două tipuri principale de fermentare: aerobă când procesul de descompunere are loc în prezența oxigenului; și anaerobă când procesul de descompunere are loc în lipsa oxigenului. Fiecare proces este caracterizat de activitatea unor bacterii specifice mediului în care se desfășoară descompunerea materiei organice.

Procesul de fermentare anaerobă este considerat optim din punct de vedere al raportului energie produsă/consumată; permite tratarea unei game variate de deșeuri organice; poate fi automatizat complet și produce un debit de biogaz în regim constant. Faptul că procesul de fermentare anaerobă poate fi automatizat complet, astfel încât acesta să producă un debit constant de biogaz, a condus la dezvoltarea mai multor tehnologii de valorificare energetică a biogazului aplicate la scara industrială. În plus, reziduurile rezultate în urma procesului de fermentare anaerobă pot fi folosite ca și fertilizator în agricultură, închizând astfel ciclul de viață al produselor din industria alimentară.

Conversia substanței organice în biometan are la bază activitatea biologică a unor culturi de bacterii metanogene regăsite în natură, care consumă fracția biodegradabilă din materie, și o transformă prin metabolism în biogaz cu un conținut ridicat de metan (55-70% vol). Energia produsă prin utilizarea biogazului este considerată „energie regenerabilă”, deci generează certificate de CO2 care pot fi comercializate, conform protocolului de la Kyoto pentru reducerea GES.

Spre deosebire de combustibilii fosili, arderea biogazului eliberează doar cantitatea de CO2 atmosferic, care a fost înmagazinată de organismele vii (plante sau animale) în timpul creșterii lor. Astfel, circuitul de carbon al biogazului este închis. Din acest motiv, utilizarea biogazului reduce emisiile de CO2 și ajută la evitarea creșterii concentrației de CO2 în atmosferă, contribuind la diminuarea încălzirii globale.

Lucrarea este consolidată pe o serie de cercetări experimentale în laborator, unde au fost concepute și testate mai multe rețete de co-digestie anaerobă pentru o serie de tipuri de deșeuri organice utilizate în amestec, cu scopul de a caracteriza potențialul energetic de valorificare a biogazului rezultat.

Rețetele de co-digestie investigate au fost stabilite funcție de natura și cantitatea deșeurilor provenite din fluxuri tehnologice industriale, astfel încât rezultatele aferente experimentelor realizate pot fi utilizate ca date tehnologice de intrare pentru realizarea unor studii de fezabilitate care să ofere o viziune asupra potențialului de valorificare energetică specifice sectoarelor abordate din industria alimentară și agricolă.

Obiectivele științifice urmărite în cercetarea teoretică, aplicată și experimentală pot fi grupate în două categorii principale:

I. Cercetare teoretică

1. Valorificarea energetică a deșeurilor organice provenite din industria alimentară și agricultură;
2. Producerea biogazului prin digestie anaerobă;
3. Tipuri constructive de unități pentru producerea biogazului;

II. Cercetare aplicată și experimentală

4. Investigarea stațiilor industriale de producere biogaz din partea de Vest a României – vizite on-site;
5. Investigarea a apelor uzate cu încărcare organică ridicată prelevate din fluxuri industriale – determinarea încărcării organice;
6. Calculul și stabilirea rețelelor de amestec a substanțelor investigate – breviare de calcul conform standardelor în vigoare;
7. Investigarea producției de biogaz la scară de laborator în regim staționar;
8. Investigarea producției de biogaz la scară de laborator în flux cu alimentare continuă;
9. Analiza și interpretarea datelor experimentale.

2. PRODUCEREA BIOGAZULUI

Recuperarea energetică din deșeurile organice este puternic influențată de materia activă conținută în partea organică a deșeurilor, care prin procese bio-chimice este convertită în gaz metan. Pentru exploatarea potențialului maxim de producere a gazului metan generat de reacțiile bio-chimice specifice se impune aplicarea unui proces de fermentare/digestie anaerobă.

Procesul de digestie anaerobă constă în descompunerea materiei organice prin activitatea microbiologică a bacteriilor metanogene, care dezvoltă în lipsa oxigenului și în condiții de temperatură și umiditate ridicată, întâlnit în mai multe medii naturale. Acest proces poate fi reprodus în instalații tehnologice industriale, în urma cărora rezultă două produse finale: biogazul și digestatul [1,2].

Bacteriile metanogene consumă materia organică din deșeuri și îi schimbă structură moleculară prin metabolism, transformând fracția organică solidă și cea solubilă în apă în fracție gazoasă sub formă de metan (CH_4), dioxid de carbon (CO_2), mici cantități de hidrogen sulfurat (H_2S) și amoniac (NH_3). Dezvoltându-se în mediu anaerob, rata de multiplicare a bacteriilor este lentă, astfel doar o mică parte din materia organică consumată este folosită pentru creștere și multiplicare, cea mai mare parte fiind convertită prin metabolism în metan. Altfel spus, bacteriile anaerobe sunt organisme vii, care consumă cantități semnificative de materie organică pentru a supraviețui. Procesul biologic de conversie a materiei organice solide în biogaz reprezintă stabilizarea deșeurilor organice [3,4,20,22].

Conversia substanței organice în biometan prin fermentare anaerobă se desfășoară în patru etape principale [5,6,16,17] :

- Hidroliza în care are loc descompunerea fracției organice și trecerea acesteia în fază lichidă sub acțiunea enzimelor, care transformă carbohidrații, grăsimile și proteinele în monozaharide, acizi grași și aminoacizi.
- Acidifiere care se desfășoară sub influența metabolismului bacteriilor specifice, prin care faza lichidă din etapa anterioară trece în acizi saturați de carbohidrați cu catene scurte, alcooli, hidrogen și dioxid de carbon.
- Acetogeneza în care acizi saturați și alcoolii sunt transformați de bacteriile acetogenetice, în acizi organici volatili saturați, acid acetic, hidrogen și dioxid de carbon.
- Metalogeneză este ultima fază care se desfășoară sub acțiunea unor bacterii specifice metanogene, care asimilează compușii rezultați din fazele precedente, și care produc prin metabolism gaz metan.

Fermentarea anaerobă se desfășoară în condiții specifice sub influența bacteriilor în faza de acetogeneza și metanogeneza. În altă ordine de idei fracția organică conținută în deșeurile din industria alimentară constituite „hrana” bacteriilor care produc gaz metan. Astfel ajungem la concluzia că, cu cât deșeurile organice au un conținut mai ridicat de materie organică, cu atât bacteriile se reproduc mai mult, ceea ce duce la creșterea cantității de biogaz produs.

Biogazul este un amestec de gaze format în principal din metan CH_4 , dioxid de carbon CO_2 , hidrogen sulfurat H_2S și amoniac NH_3 . Funcție de condițiile de digestie anaerobă, de tipul și natura materiei organice, ponderea concentrației biogazului este de 50-85% vol CH_4 , 50-15% vol CO_2 , cantitățile de H_2S și NH_3 fiind neglijabile de sub 1%. Pe lângă producția de gaz metan, în urma procesului de fermentare anaerobă, rezultă o cantitate semnificativă de digestat/nămol foarte bogat substanță nutritivă [4,22,23].

Digestatul este materia organică procesată de bacterii, stabilizată din punct de vedere al încărcării organice și patogene, care se pretează ca îngrășământ în agricultură.

Deșeurile organice utilizate ca materie primă în procesul de producere a biogazului poartă denumirea generică de co-substrate. Compoziția co-substratelor are un rol important în

dimensionarea și proiectarea unei linii tehnologice de producere a biogazului. Conținutul organic, temperatura, umiditatea și valoarea pH-ului reprezintă parametrii de control pentru reproducerea, dezvoltarea și durata de viață a bacteriilor.

Pe baza acestui aspect și a considerentelor economice, Best Available Technology – BAT indică două intervale de temperatură: 35-45°C pentru fermentare mezofilă și 55-60 °C pentru fermentare termofilă.

În practica industrială se face un compromis între producția maximă de biogaz și rentabilitatea economică. Cei mai importanți parametrii care trebuie monitorizați într-un proces de producție a biogazului sunt:

- încărcarea organică (5-10 % masic),
- valoarea pH (7.2–8.5),
- temperatura de fermentare/ digestie (35-55°C sau 55-60 °C).

Procesul tehnologic de producere a biogazului depinde de natura deșeurilor organice, de cantitățile disponibile și raportul de amestec între mai multe co-substrate. Astfel pentru dimensionarea corectă a unei instalații tehnologice de producere a biogazului este foarte importantă o caracterizare energetică a co-substratelor, pe baza căreia să se stabilească o rețetă optimă de amestec. Digestia anaerobă a două sau mai multe tipuri de co-substrate în amestec se numește co-digestie.

Caracterizarea energetică a co-substratelor se raportează la randamentul specific în producția de metan generat de cantitatea de substanță uscată care se regăsește în natura substanțelor din care este format deșeurul.

Estimarea corectă a producției specifice de metan, impune o analiză în laborator, care să pună în evidență încărcarea organică a deșeurilor. Pentru determinarea încărcării organice, fiecare tip de deșeu necesită o analiză individuală.

Pentru rentabilitatea/eficiența unui flux tehnologic de producere și valorificare biogaz, este necesară menținerea unui debit constant de biogaz către unitatea de cogenerare (CHP), astfel încât acesta să funcționeze continuu. Factorii principali care influențează producția de biogaz într-un proces de digestie anaerobă sunt [7,8]:

- a. Tipul/natura deșeurilor supuse procesului de digestie anaerobă;
- b. Concentrația digestatului;
- c. Temperatura de digestie;
- d. Valoarea pH a digestatului;
- e. Prezența substanțelor toxice inhibitoare în deșeurile organice;
- f. Timpul de retenție hidraulică;
- g. Capacitatea organică de încărcare a digesterului/bioreactorului.

Există mai multe tipuri de procese tehnologice de producere a biogazului, care în principal au fost concepute funcție de natura deșeurilor organice generate; și funcție de obiectivele care trebuie atinse în ce privește tratarea deșeurilor organice. Obiectivele principale ale unei instalații de producere biogaz prin digestie anaerobă sunt:

- Valorificare energetică (electrică și termică);
- Reducerea masică substanței organice VS conținută în deșeurile organice;
- Reducerea mirosurilor asociate deșeurilor;
- Tratarea apei reziduale corespunzător cu normele de poluare a mediului;
- Concentrarea nutrienților sub formă de produs care poate fi valorificat;
- Reducerea încărcării patogene asociate deșeurilor organice.

Din punct de vedere constructiv instalațiile de producere și valorificare a biogazului se disting în funcție de tipul digesterului. Prin digester sau bioreactor se înțelege spațiul în care se desfășoară procesul biologic de conversie a compușilor organici sub acțiunea microorganismelor, și eliberarea produșilor de fermentație.

Configurația unui bioreactor este un proces complex, care are la bază principii de inginerie specifice fiecărui tip constructiv. Alegerea tipului constructiv de bioreactor este în strânsă legătură cu natura deșeurilor organice care urmează să fie valorificate/procesate în instalație. Funcție de timpul de retenție hidraulică HRT a digesterului se disting digesteroare cu debit de alimentare ridicat (HR - high rate) și cu debit de alimentare scăzut (LR - low rate). Astfel digesteroarele HR reduc HRT de la 20 zile la 2-3 ore [9,10,11,16].

3. INVESTIGAREA INSTALAȚIILOR INDUSTRIALE DE PRODUCERE BIOGAZ

S-au investigat trei stații industriale de producere biogaz Baia Mare, Seini și Arad; fiecare având un proces tehnologic diferit aplicat funcție de tipul de deșeuri organice valorificate energetic. În cadrul acestui capitol au fost pus în evidență modul de abordare și implementare al instalațiilor de producere biogaz pornind de la resursele disponibile în zonă.

Stația de producere și valorificare biogaz de la Baia Mare cu o capacitate instalată de 350 kW electric, jud. Maramureș utilizează apele uzate și nămolul rezultat în urma procesului tehnologic de tartare din stația de epurare a Municipiului Baia Mare. Sub aspect tehnologic stația de epurare funcționează după un proces de tratare mecano-biologică care implică tratarea biologică avansată a azotului și carbonului, precum și tratarea chimică a fosforului, fiind proiectată pentru o capacitate de 163.300 locuitor echivalent (1450 l/s) [13].

În procesul de tratare mecano-biologică a fost introdusă o treaptă de tratare a nămolului cu valorificarea energetică a biogazului rezultat prin digestie anaerobă. Valoarea de investiție a fost de 43 mil. lei (fără TVA), fiind finanțată din fondul de coeziune UE prin Programul Operațional Sectorial de Mediu, în vederea încadrării emisarului aferent stației de tratare ape uzate, în limitele impuse de normele de poluare UE pentru ape de suprafață senzitive.

Soluția tehnică prevăzută pentru utilizarea a 4 bioreactoare, a fost aleasă datorită variației debitului de apă ce intră în stația de tratare. Sistemul de colectare ape menajere al Municipiului Baia Mare, preia atât apa uzată generată de consumatorii casnici și industriali, cât și apa meteorică, prin același sistem de canalizare. Astfel în timpul precipitațiilor abundente debitul de apă preluat în stație este foarte mare și foarte diluat în ce privește încărcarea organică a acestuia. Având disponibile 4 bioreactoare, pot fi preluate și aceste debite mari fluctuante care pot apărea în funcționare.

Regimul de funcționare al stației de biogaz de la stația de epurare Baia Mare a fost proiectat ca treaptă de tratare a nămolului, valorificarea energetică a biogazului ca energie electrică și sub formă de căldură fiind utilizată în procesul tehnologic de funcționare al bioreactoarelor, și nu în scopul comercializării acesteia. Din aceste considerente energia sub formă de căldură primează în valorificarea energetică a biogazului, întrucât stabilizarea patogenică și reducerea încărcării organice a nămolului de epurare sunt prioritari [13].

Stația de producere și valorificare biogaz de la Seini cu o capacitate instalată de 470 kW electric, jud. Maramureș utilizează gunoiul de grajd generat de activitatea zootehnică din zonă. Localitatea Seini este inclusă pe lista localităților vulnerabile la nutrienți, cantitățile de deșeuri provenind din agricultură și impactul acestora asupra mediului, justificând necesitatea implementării unor măsuri menite să îmbunătățească factorii sociali și de mediu ai localității.

Ministerul Mediului și Schimbărilor Climatice prin semnarea și implementarea proiectului „Controlul Integrat al Poluării cu Nutrienți” finanțat de GEF/Banca Mondială, Banca Internațională pentru Reconstrucție și Dezvoltare și cofinanțat de Guvernul României, s-a angajat să implementeze un plan de măsuri menit să reducă poluarea cu nutrienți ce provin

din agricultură. Astfel, pentru implementarea acestei Directive, România a desemnat în două faze distincte un număr de 32 de zone vulnerabile la nutrienți, care reprezintă 60% din suprafața totală a teritoriului, incluzând 1963 comune [12].

Seiniul fiind una dintre localitățile desemnate ca zone vulnerabile la poluarea cu nitrați, localitatea este eligibilă pentru implementarea programului de investiții pentru realizarea lucrărilor de construcții necesare pentru colectarea, depozitarea temporară și utilizarea ca îngrășământ organic a gunoiului de grajd în conformitate cu prevederile din „Codul bunelor practici agricole pentru protecția apelor împotriva poluării cu nitrați proveniți din activitățile agricole”, aprobat prin Ordinul nr. 1182/22.11.2005 al M.M.G.A., ale cărui prevederi sunt obligatorii în zonele declarate vulnerabile la poluarea cu nitrați.

Obiectivul principal al proiectului este realizarea unei instalații ce demonstrează fezabilitatea tratării gunoiului de grajd în scopul producerii de electricitate și căldură, prin cogenerare, utilizând drept combustibil biogazul rezultat.

Subsidiar, implementarea proiectului va promova un nou concept instituțional privind gestionarea gunoiului de grajd la nivelul unei unități administrativ teritoriale (UAT) prin preluarea parțială a responsabilităților privind gestionarea acestor categorii de deșeuri de către autoritatea publică.

Capacitatea maximă de tratare instalată este de 54.79 tone/zi amestec deșeuri organice, din care 49.31 tone/zi dejecții animale și 5.48 tone/zi siloz vegetal. În baza acestor cantități se estimează o producție anuală de 1.527.445 m³/an, având o compoziție indicativă de 60% CH₄, 39% CO₂ și 1% O₂, CO și H₂S. Din biogazul obținut se estimează o producție de energie electrică de circa 2.967.030 kWh/an.

Subsidiar, odată cu producerea energiei electrice se estimează o producție de energie termică de cca. 3.280.564 kW, din care 970.564 kW vor fi utilizați în procesul de producție a biogazului (încălzirea bioreactorului) și 2.310.000 kW pentru instalația de producere fertilizator (uscarea a digestatului) [12].

Stația de producere și valorificare biogaz de la Arad cu o capacitate instalată de 988 kW electric, jud. Arad utilizează biomasă în cantitate de 48,03 t/zi (17.530 t/an), dejecții animale la pornirea procesului tehnologic și periodic pentru întreținerea fermentării, și apă din foraje pentru menținerea concentrației optime de substanță solidă în procesul de fermentare anaerobă.

Implementarea proiectului a avut la bază legislația europeană de promovare în domeniu, transpusă în legislația din România prin cerințele formulate prin obiectivele Programului Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice 2007-2013, ale Axei Prioritare 4 - „Creșterea eficienței energetice și a siguranței furnizării, în contextul combaterii schimbărilor climatice”. Ca variantă constructivă, fluxul tehnologic implementat în instalația de producere biogaz de la Arad s-a optat pentru utilizarea unui bioreactor de contact cu stabilizare cu fermentare în două trepte.

Avantajul acestui proces tehnologic constă în faptul că pot procesa deșeuri organice heterogene cu grade diferite de descompunere. Astfel în rețeta de amestec a co-substratelor pot fi integrate deșeuri organice care au în compoziția lor celuloză care necesită un timp îndelungat de descompunere, cum este în cazul nostru biomasa provenită din agricultură. În bioreactoare este un amestec format din materia primă care intră în proces, în cazul de față biomasă sub formă siloz de porumb (48,0274 t/zi). Alimentarea cu substraturi are loc după o rețetă determinată în funcție de tipul și cantitatea co-substratelor disponibile.

În condițiile de calitate și disponibilitate a co-substratelor utilizate în proces, instalația de producere a biogazului poate livra spre vânzare 822.23 kW_{el} și 755.8 kW_{th}, care în procente raportat la totalul energiei conținută în biogaz este de 83.23 % energie electrică și 76.35 % energie termică [15].

Cantitatea zilnică de digestat generată de procesul de producere biogaz este 34,08 t/zi. Digestatul este utilizat în agricultură ca îngrășământ/fertilizant, acesta fiind transportat pe

suprafețele de teren agricole pe o durată de 8 luni din an cu o medie de 52t/zi.

4. EXPERIMENTE ÎN LABORATOR

Partea experimentală desfășurată în prezenta lucrare de cercetare s-a realizat în Laboratorul Analize de Combustibili Investigații Ecologice și Dispersia Noxelor al Facultății de Mecanică UPT și Laboratorul de Biotehnologii Microbiene și Industriale de la Universitatea de Științe Agricole și Medicină Veterinară a Banatului – USAMVB Timișoara.

S-a aplicat metoda de cercetare experimentală pe stand de laborator, utilizând două tipuri de instalații „state-of-the-art” pentru investigarea potențialului de producere biogaz prin digestie anaerobă a substanțelor organice biodegradabile, ambele instalații de laborator fiind furnizate de Bioprocess Control Sweden AB (<https://bioprocesscontrol.com/>).

În laboratorul USAMVB s-a utilizat instalația de producere a biogazului în regim staționar pe standul experimental Automatic Methane Potential Test System II (AMPTS® II), prin care s-a investigat potențialul de producere a gazului metan (Biogas Methane Potential – BMP) prin digestie anaerobă a deșeurilor organice. Acest tip de instalație oferă informații legate de producția specifică de biogaz, și de capacitatea de conversie a substanței organice în gaz metan prin digestie anaerobă în condiții de laborator, informații de bază în ce privește valorificarea energetică a deșeurilor organice. În figura 39 se prezintă standul experimental utilizat în campaniile experimentale realizate în prezenta cercetare pentru producerea biogazului în regim staționar.

În laboratorul UPT s-a utilizat instalația de producere a biogazului în flux cu alimentare continuă pe standul experimental Bioreactor Simulator – BRS, prin care s-a investigat modul de producere continuă a biogazului prin digestie anaerobă, fiind o copie fidelă la scară de laborator, a modului de operare a unei stații industriale de producere biogaz. Concret acest tip de instalație oferă informații asupra parametrilor de operare a unei stații de biogaz, cum sunt capacitatea organică de încărcare zilnică (organic loading rate – OLR) și timpul de retenție hidraulică (hydraulic retention time - HRT). În figura 43 se prezintă standul experimental utilizat în campaniile experimentale realizate în prezenta cercetare pentru producerea biogazului în flux cu alimentare continuă.

S-au identificat și analizat două surse generatoare de deșeuri organice unde se pretează implementarea unor instalații de valorificare energetică a biogazului; una fiind ferma zootehnică de la Bacova, jud. Timiș și cealaltă Combinatul Agro Industrial Curtici, jud. Arad.

În studiu de caz ferma zootehnică Bacova s-a investigat posibilitatea valorificării energetice a dejecțiilor de porci. Sub aspect zootehnic, este o fermă de reproducere, cu o capacitate de 10 000 adulți și 267800 ÷ 272950 tineret, din care 4277 efective porcine sunt livrate anual la abator. În studiul de caz analizat, caracterizarea energetică a dejecțiilor de porci nu impune utilizarea unor valori cu precizie ridicată, întrucât acestea sunt utilizate la nivelul unui studiu de fezabilitate, cu scopul de a pune în evidență rentabilitatea economică și timpul de amortizare a investiției în cazul implementării unei instalații de producere și valorificare energetică a biogazului. În acest scop, s-a utilizat literatura de specialitate care indică valorile caracteristice producției de biogaz specifice diferitelor tipuri de substanțe organice [47].

Aceste valori fost utilizate ca date de intrare pentru programul de calcul și simulare a producției specifice de biogaz BioGC dezvoltat de WFG Schwäbisch Hall Münzstraße 1 D-74523 Schwäbisch Hall Germany. Avantajul utilizării unor astfel de programe de calcul, constau în faptul că informațiile se obțin foarte rapid, prezintă într-un mod concentrat informații legate de dimensionarea echipamentelor principale, realizează calcule economice care oferă informații despre costurile de operare și consumurile energetice ale unei instalații de producere biogaz. Utilizarea programelor de calcul de acest gen este recomandată în fazele incipiente de proiectare cum sunt studiile de soluție, studii de fezabilitate sau studii de fezabilitate, unde

se pune accent pe identificarea soluției tehnice optime ce trebuie implementată, care să susțină fezabilitatea economică a investiției. Calculul de simulare a fost realizat pentru mono fermentare, adică, implică utilizarea unui singur tip de substrat, care în cazul nostru este reprezentat de dejecțiile de porci.

În studiu de caz de la Combinatul Agro Industrial Curtici (CAI Curtici), ferma zootehnică Macea, județul Arad, s-a investigat posibilitatea valorificării energetice (BMP) a dejecțiilor de porc, gunoi de grajd vite și apă uzată de abator, colectate. Sub aspect zootehnic, ferma practică un sistem integrat de agricultură și zootehnie, aplicând o economie foarte apropiată de economia circulară. CAI Curtici practică și gestionează în regim propriu agricultura, creșterea animalelor, sacrificarea animalelor, prelucrarea cărnii și laptelui, fabricarea produselor agroalimentare mezeleri și produse lactate precum și vânzarea și comercializarea acestora în magazine proprii.

Campania experimentală s-a realizat în patru faze principale care au vizat (i) colectarea și pregătirea probelor, (ii) calculul și stabilirea parametrilor de proces, (iii) pregătirea și punerea în funcțiune a standului experimental și (iv) colectarea și analiza datelor experimentale.

Faza de pregătire a probelor presupune prelevarea probelor on-site și caracterizarea substanței organice prin determinarea conținutului de substanță uscată TS și substanță volatilă VS. Colectarea probelor s-a realizat conform protocoalelor indicate în standardul german VDI 4630, probele fiind prelevate din fluxul tehnologic înainte de a intra în etapele de tratare, pentru a păstra caracteristicile biologice intacte, și a nu contamina probele.

Modul de calcul utilizat pentru stabilirea parametrilor de proces s-a realizat conform protocoalelor indicate în standardul german VDI 4630, unde sunt precizate cantitățile și rapoartele de amestec ce trebuie îndeplinite, pentru ca rezultatele experimentale să fie corecte. Astfel s-au întocmit fișe de calcul pentru fiecare probă/rețetă analizată, sub formă tabelară, realizate în baza protocoalelor de laborator specifice activității de laborator pentru desfășurarea campaniilor experimentale de investigare a deșeurilor organice pentru producerea biogazului prin digestie anaerobă.

Pregătirea și punerea în funcțiune a standului experimental AMPTS II, a constat în pregătirea și încărcarea celor 15 bioreactoare cu co-substrate pentru 4 tipuri de rețete. Fiecare probă de laborator a fost realizată în triplicate, ceea ce înseamnă că 3 bioreactoare sunt încărcate cu aceeași rețetă.

După realizarea acestor faze, standul experimental este pregătit pentru punerea în funcțiune, urmând a se realiza fazele de interconectare a bioreactoarelor cu modulul de tratare a biogazului unde are loc reținere CO₂; cu unitatea de măsură debit gaz, înregistrare și prelucrare date; respectiv cu laptopul care asigură controlul și monitorizarea standului.

Achiziția și înregistrarea datelor experimentale s-a realizat pentru o durată de 21 zile, timp în care standul a funcționat 0-24. În baza valorilor determinate experimental și a formulei de calcul specifice pentru determinarea BMP, a fost calculată o valoare a potențialului de producție a biogazului pentru fiecare rețetă investigată experimental. Calculele BMP au fost realizate utilizând valoarea rezultată prin efectuarea unei medii aritmetice a rezultatelor experimentale înregistrate pentru fiecare set de bioreactoare.

Prin realizarea campaniei experimentale de producere a biogazului în regim staționar pe stand de laborator, s-a pus în evidență modul de aplicare practică al procedurilor de laborator; s-au caracterizat co-substratele investigate sub aspect al conținutului de substanță uscată TS și substanță organică VS; s-a prezentat o variantă de realizare a unor fișe de calcul sub formă tabelară pentru setarea parametrilor unui experiment; s-au determinat experimental potențialul de bio-metan BMP și producția specifică de metan pentru materia organică investigată.

5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Cercetarea științifică aplicată și experimentală, realizată pe parcursul studiilor doctorale, are la bază valorificarea energetică a biogazului produs prin digestie anaerobă, utilizând deșeurile provenite din industria alimentară și agricultura.

În acest sens au fost investigate experimental în laborator, apele reziduale cu încărcătură organică ridicată, generate în procesul de fabricare a produselor alimentare finite din industria alimentară, pe de o parte; și respectiv apele uzate provenite de la fermele de creștere a animalelor din zootehnie /agricultură. În acest scop s-au stabilit obiectivele urmărite, prezentate în subcapitolul 1.4. Toate obiectivele prestabilite au fost atinse în totalitate, prin:

- Investigarea a 3 instalații de producere a biogazului la scară industrială;
- Abordarea a două studii de caz;
- Realizarea a două campanii experimentale de investigare a producerii biogazului la scară de laborator pe stand experimental, în Laboratorul de Analize de Combustibili Investigații Ecologice și Dispersia Noxelor - UPT; în Laboratorul de Biotehnologii Microbiene și Industriale – USAMVB.

Investigarea instalațiilor de producere a biogazului la scară industrială a fost realizată cu scopul de a înțelege modul de funcționare și modul de operare a proceselor tehnologice reale, prin care s-a consolidat partea teoretică asimilată în prima etapă de cercetare privind stadiul actual al cunoașterii. Fiecare instalație investigată utilizează o tehnologie diferită de producere a biogazului, adaptată la natura materiei organice regăsită în co-substratele utilizate în proces. În acest sens au fost investigate următoarele instalații:

1. Instalația de producere a biogazului de la stația de epurare a apelor uzate a Municipiului Baia Mare, județul Maramureș – utilizează ca substrat nămolul de epurare;
2. Instalația de producere a biogazului din Orașul Seini, județul Maramureș - utilizează ca substrat gunoiul de grajd;
3. Instalația de producere a biogazului de la Arad, județul Arad – utilizează un amestec de co-substrate rezultate din agricultură.

Studiile de caz abordează:

1. Ferma de porci Bacova, județul Timiș – investigarea producerii biogazului s-a realizat prin program de calcul dedicat, utilizând dejecțiile de porci generate de procesul de funcționare al fermei zootehnice de reproducere a porcilor;
2. Combinatul Agro Industrial Curtici – ferma Macea, județul Arad – investigarea producerii biogazului s-a realizat pe stand experimental în regim staționar pe stand de laborator, utilizând deșeurile organice rezultate în urma activităților specifice de prelucrare a cărnii, gunoi de grajd vite și dejecții de porci disponibile pe platforma agro industrială.

Pentru efectuarea cercetării experimentale s-au realizat două tipuri de standuri experimentale de ultimă generație, fabricate de Bioprocesscontrol, Suedia, după cum urmează:

- În laboratorul USAMVB s-a utilizat instalația de producere a biogazului în regim staționar pe standul experimental Automatic Methane Potential Test System II (AMPTS® II), prin care s-a investigat potențialul de producere a gazului metan prin digestie anaerobă a deșeurilor organice – pentru studiul de caz de la ferma Macea.

- În laboratorul UPT s-a utilizat instalația de producere a biogazului în flux cu alimentare continuă pe standul experimental Bioreactor Simulation – BRS, prin care s-a investigat modul de producere continuă a biogazului prin digestie anaerobă, fiind o copie fidelă la scară de laborator, a modului de operare a unei stații industriale de producere biogaz – pentru activitatea de publicare științifică în reviste de profil.

Obiectivele stabilite tratează probleme de maximă actualitate privind atât valorificarea energetică a biogazului produs prin digestie anaerobă; cât și tratarea deșeurilor provenite din industria alimentară și agricultură, în vederea reducerii impactului de poluare asupra mediului înconjurător. În acest sens au fost vizate apele reziduale cu încărcătură organică ridicată, generate în procesul de producție a produselor alimentare finite din industria alimentară, pe de o parte; și respectiv deșeurile provenite de la fermele de creștere a animalelor din zootehnie /agricultură.

În urma activității de cercetare teoretică, aplicată și experimentală desfășurate pe parcursul studiilor doctorale pe tema valorificării energetice a deșeurilor din industria agricolă și alimentară, se conturează următoarele concluzii:

- Produsele finite din industria alimentară sunt caracterizate de o valoare ridicată a raportului dintre cantitatea de deșeu specific și produs finit, fiind foarte dificilă scăderea cantității deșeurilor specifice cu menținerea intactă a calității produsului.
- Generarea deșeurilor din industria alimentară este inevitabilă, utilizarea și depozitarea acestora fiind îngreunată de mai mulți factori cum sunt: instabilitatea biologică, potențialul patogenic, degradarea biologică generată de activitatea enzimatică ridicată (putrefacție), precum și a conținutului ridicat de apă. Stabilizarea, tratarea și depozitarea deșeurilor organice ridică probleme deosebite atât în domeniul protecției mediului, cât și în cel al dezvoltării durabile.
- Deșeurile provenite din industria agricolă și alimentară, au încărcare organică ridicată și pot fi exploatate energetic foarte eficient prin utilizarea unor tehnologii de producere și valorificare a biogazului prin digestie anaerobă.
- Conceptul „Waste-to-Energy” utilizează deșeurile organice ca sursă alternativă de energie, prin valorificarea potențialului lor de a produce biogaz; și oferă soluții fezabile pentru implementare la scară industrială foarte eficiente.
- Procesele de valorificare energetică din deșeurile organice, au la bază utilizarea biogazului produs în urma descompunerii fracției organice sub acțiunea bacteriilor metanogene specifice (care produc metan prin activitatea metabolică).
- Procesul de descompunere a fracției organice sub acțiunea bacteriilor este cunoscut sub numele de fermentare sau digestie. Funcție de mediul în care se desfășoară fermentarea se disting două tipuri principale de fermentare: aerobă când procesul de descompunere are loc în prezența oxigenului; și anaerobă când procesul de descompunere are loc în lipsa oxigenului.
- Procesul de fermentare anaerobă este considerat optim din punct de vedere al raportului energie produsă/consumată; permite tratarea unei game variate de deșeurii organice; poate fi automatizat complet și produce un debit de biogaz în regim constant.

- Faptul că procesul de fermentare anaerobă poate fi automatizat complet, astfel încât acesta să producă un debit constant de biogaz, a condus la dezvoltarea mai multor tehnologii de valorificare energetică a biogazului aplicate la scara industrială. În plus, reziduurile rezultate în urma procesului de fermentare anaerobă pot fi folosite ca și fertilizator în agricultură, închizând astfel ciclul de viață al produselor din industria alimentară.
- Din punct de vedere constructiv instalațiile de producere și valorificare a biogazului se disting în funcție de tipul digesterului. Prin digester sau bioreactor se înțelege spațiul în care se desfășoară procesul biologic de conversie a compușilor organici sub acțiunea microorganismelor, și eliberarea produșilor de fermentație sub formă de digestat și biogaz.
- Biogazul este un amestec de gaze format în principal din metan CH₄, dioxid de carbon CO₂, hidrogen sulfurat H₂S și amoniac NH₃. Funcție de condițiile de digestie anaerobă, de tipul și natura materiei organice, ponderea concentrației biogazului este de 50-85% vol CH₄, 50-15% vol CO₂, cantitățile de H₂S și NH₃ fiind neglijabile de sub 1%.
- Digestatul este materia organică procesată de bacterii, stabilizată din punct de vedere al încărcării organice și patogeneice, care se pretează ca îngrășământ în agricultură fiind bogat substanță nutritivă.
- Configurația unui bioreactor este un proces complex, care are la bază principii de inginerie specifice fiecărui tip constructiv. Alegerea tipului constructiv de bioreactor este în strânsă legătură cu natura deșeurii organice care urmează să fie valorificat/procesat în instalație.
- Pentru determinarea încărcării organice, fiecare tip de deșeu necesită o analiză individuală, care presupune determinarea substanței uscate TS și a substanței volatile VS.
- Potențialul de producere a biometanului BMP indică capacitatea de producție a gazului metan a unei deșeu, raportat la substanța organică VS conținută de acesta.
- Dimensionarea și alegerea tipului de bioreactor pentru valorificarea energetică prin producere de biogaz a diverselor tipuri de deșeuri organice, se realizează în baza capacității de producere a metanului BMP.
- Valoarea ridicată BMP nu este influențată de cantitatea de substanță organică conținută în co-substrate, ci de natura și forma în care materia organică se regăsește în co-substrate.
- Valoarea ridicată a BMP-ului, indică faptul că materia organică din substrat, se regăsește în formă ușor asimilabilă de bacterii, și oferă informații despre calitatea materiei organice conținută în substrat. Acest aspect este unul foarte important în determinarea și stabilirea rețetei optime de fermentare pentru un proces de producere a biogazului la scară industrială.

BIBLIOGRAFIE

1. M.Sc. Chaoran Li, „Wet and Dry Anaerobic Digestion of Biowaste and of Co-substrates”, 2015, Available: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000046184>
2. Tehnologii de valorificare a potențialului energetic din biomasă - Suport curs, 2010, Universitatea Tehnică Cluj
2. Prof.univ.dr.ing. Lucian Gavrilă, „Gestionarea, valorificarea și minimalizarea deșeurilor industriei alimentare”, 2007, Suport curs, Facultatea de Inginerie Bacău
3. Klein E. Ieleji, Chad Martin, and Don Jones, „Basics of energy Production through Anaerobic digestion of Livestock Manure”, 2015, Available: www.ces.purdue.edu/bioenergy
4. Fatma Yasemin Cakir and Michael K. Stenstrom, „Anaerobic treatment of low strength wastewater”, 2017, Available: www.sciencedirect.com
5. T.Z.D. de Mes, A.J.M. Stams, J.H. Reith and G. Zeeman, „Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes”, 2020, Available: www.sciencedirect.com
6. Fabian Monnet, „An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes”, November 2003, Available: www.semanticscholar.org
7. Yuling Chen, Benjamin Rößler, Simon Zielonka, Anna-Maria Wonneberger and Andreas Lemmer, „Effects of Organic Loading Rate on the Performance of a Pressurized Anaerobic Filter in Two-Phase Anaerobic Digestion”, *Energies* 2014, Available: www.mdpi.com/journal/energies
8. Hussain, Shashi Kant Dubey, „Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents”, 23 June 2015, Available: springerlink.com
- Dennis A. Burke P.E., „Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook”, June 2001, Available: www.makinngenery.com
9. Dennis A. Burke P.E., „Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook”, June 2001, Available: www.makinngenery.com
10. Raúl Rodríguez Gómez, „UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR: MODELLING”, 2011, Thesis in Chemical Engineering Stockholm, Sweden
11. Elizabeth Tilley, Lukas Ulrich, Christoph Lüthi, Philippe Reymond and Christian Zurbrugg, „Compendium of Sanitation Systems and Technologies”, 2014, Available: <https://iwa-network.org>
12. Naiana Milea, „energie verde din gunoi de grajd”, 2018, Biogaz
13. S.C Vital S.A, Baia Mare, „Stația de epurare a apelor uzate Baia Mare”, Septembrie 2021, Available: www.vitalmm.ro
14. Popescu Ghe. Ileana Intreprindere Individuala, „Instalație pilot pentru producerea biogazului Oraș Seini, județul Maramureș Raportul Privind Impactul Asupra Mediului”, Iulie 2013, Available: <http://www.mmediu.gov.ro/>
15. Bioprocess Control Sweden AB, „AMPTS II Automatic Methane Potential Test System Operation and Maintenance Manual”, July 2011, Available: <https://bpcinstruments.com/>
16. Benedikt Hülsemann 1, Lijun Zhou 1 , Wolfgang Merkle 1 , Juli Hassa 2 , Joachim Müller 3 and Hans Oechsner, „Biomethane Potential Test: Influence of Inoculum and the Digestion System”, Available: <https://www.researchgate>
17. Adriana WÄCHTER , Reinhold WÄCHTER, Ioana IONEL , Daniel VAIDA, „Energy Recovery From Organic Waste”, Available: <https://www.scientificbulletin.upb.ro>
18. Terrell M. Thompson, Brent R. Young, Saeid Baroutian „Enhancing biogas production from Caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste”, February 2021, Journal Pre-proof, Available: <https://www.sciencedirect.com>
19. Noor Yusuf, Fares Almomani, „Recent advances in biogas purifying technologies: Process design and economic considerations”, November 2022, Journal Pre-proof, Available: <https://www.sciencedirect.com>
20. Xionghui Fei , Wenbao Jia, Ting Chen, Yongsheng Ling, „Life-cycle assessment of two

food waste disposal processes based on anaerobic digestion in China”, January 2021, Journal of Cleaner Production, Available: www.elsevier.com

21. Qin Xiao, Jinguang Hu, Mei Huang, Fei Shen, Dong Tian, Yongmei Zeng, Moon-Ki Jang, „Valorizing the waste bottom ash for improving anaerobic digestion performances towards a “Win-Win” strategy between biomass power generation and biomethane production”, February 2021, Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126508>

22. A. Sarrion, R.P. Ipiales, M.A. de la Rubia, A.F. Mohedano, E. Diaz, „Chicken meat and bone meal valorization by hydrothermal treatment and anaerobic digestion: Biofuel production and nutrient recovery”, January 2023, Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.005>

23. Zahra Hajabdollahi Ouderji, Rohit Gupta, Andrew Mckeown, Zhibin Yu, Cindy Smith, William Sloan, Siming You, „Integration of anaerobic digestion with heat Pump: Machine learning-based technical and environmental assessment”, December 2022, Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128485>