

**TITLUL TEZEI: Digestia anaerobă a deșeurilor organice pentru producerea biogazului:
Stadiul actual al cunoașterii, tendințe de cercetare și investigații experimentale**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie chimică

autor ing. Mădălina-Gabriela Ivanovici

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Teodor TODINCA

luna septembrie anul 2026

Rezumat în limba română:

Această teză își propune să ofere o imagine de ansamblu asupra tehnologiei de digestie anaerobă (DA) pentru generarea de energie, prin integrarea unei analize detaliate a stadiului actual al cunoașterii cu rezultate experimentale obținute din investigații desfășurate la scară de laborator. În contextul cererii ridicate pentru surse diversificate de energie și al necesității de a reduce constrângerile generate de dependența de combustibili fosili, digestia anaerobă reprezintă una dintre alternativele pentru producerea de energie regenerabilă. Versatilitatea acestei tehnologii constă în faptul că, pe lângă implementarea sa la scară largă, oferă numeroase oportunități de dezvoltare tehnologică, prezentând adaptabilitate la o varietate extinsă de substraturi, la diferite scări de operare, configurații și cerințe operaționale. De asemenea, poate fi dezvoltată împreună cu tehnologii complementare, conducând la sisteme hibride care aduc îmbunătățiri, precum îmbogățirea biogazului în metan. Prin urmare, direcțiile de dezvoltare ale digestiei anaerobe sunt variate și sunt prezentate în această teză printr-o analiză sistematică atât a strategiilor convenționale, cât și a celor de ultimă generație, inclusiv a configurațiilor de reactoare hibride și a modelării matematice ce integrează algoritmi de inteligență artificială.

Anterior secțiunii în care sunt descrise stadiul actual al cunoașterii și tendințele de cercetare, sunt prezentate aspectele teoretice relevante ale procesului de digestie anaerobă, incluzând etapele metabolice, factorii care influențează stabilitatea și eficiența procesului, configurațiile tradiționale ale reactoarelor și valorificarea biogazului, noțiuni esențiale pentru înțelegerea și proiectarea sistemelor de digestie anaerobă. Cercetarea experimentală a avut ca obiectiv exploatarea resurselor organice disponibile, inclusiv a deșeurilor alimentare, în configurații de tip reactor cu agitare continuă, operate în regim umed. Rezultatele obținute contribuie la baza de date existentă în domeniu, ținând cont de configurația experimentală specifică utilizată. În cele din urmă, potențialul viitor al digestiei anaerobe este evidențiat în teză prin prezentarea unor aspecte generale privind compatibilitatea dintre tehnologie și principiile bioeconomiei circulare și, respectiv, dezvoltarea ulterioară a biorefinăriilor care integrează tehnologia de digestie anaerobă.

Rezumatul principalelor obiective științifice ale tezei de doctorat

În continuare și, în baza prezentării succinte introduse anterior, se vor sintetiza principalele obiective științifice, detaliate în cadrul primelor patru capitole ale tezei de doctorat.

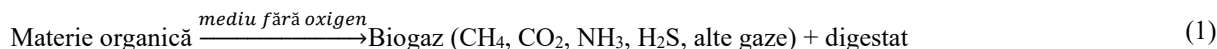
Primul capitol, intitulat **TEHNOLOGIA DIGESTIEI ANAEROBE**, prezintă o introducere cu privire la fundamentele tehnologice și mecanistice ale DA ca proces ingineresc, esențială pentru înțelegerea procesului. Acesta urmărește definirea procesului de DA prin documentarea celor patru etape metabolice principale și a comunităților microbiene corespunzătoare, precum și a transformărilor redox relevante. Parametrii operaționali cheie, aspectele relevante pentru proiectarea procesului și utilizarea biogazului sunt alte aspect abordate în acest capitol, urmate de o prezentare generală a configurațiilor uzuale de reactoare și de o evaluare a avantajelor și limitărilor tehnologiei.

Prin urmare, DA este un proces natural pe care oamenii l-au observat, studiat și exploatat ulterior încă din cele mai vechi timpuri, cu scopul de a produce energie. În prezent, DA este implementat tehnologic, în mod controlat pentru recuperarea optimizată a energiei din materia organică biodegradabilă sub formă de biogaz [2], [3], [4], [5]. Tehnologia DA reprezintă o soluție importantă de valorificare energetică a deșeurilor, operând cu informații din

multiple discipline științifice și ingineresti și oferă beneficii din punct de vedere energetic, de mediu și economic [6], [7]. Printre principalele efecte pozitive asupra mediului, se pot menționa următoarele: reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, producerea de biofertilizant ca produs secundar, diminuarea poluării apei, solului și aerului și contribuția la îmbunătățirea gestionării deșeurilor [6], [7], [8], [9]. Unul dintre cele mai importante avantaje energetice constă în producerea de energie regenerabilă și în potențiala sa utilizare ca înlocuitor al gazului natural, care reprezintă o sursă de energie fosilă [8]. Importanța energetică a tehnologiei DA este evidențiată prin diversitatea deșeurilor organice care pot fi utilizate în cadrul tehnologiei DA și multiplele utilizări ale biogazului [6], [8], [9], [10]. Beneficiile tehnico-economice întăresc atractivitatea tehnologiei și includ o mare diversitate de configurații ale digestoarelor și de scheme tehnologice de operare, implementarea la diferite scări, valorificarea ambelor produse ale tehnologiei (biogaz și digestat) și posibilitatea inovării tehnologiei prin intermediul tehnologiilor hibride [6], [8], [10], [11], [12].

Acest proces se desfășoară în patru etape succesive de transformări biochimice (hidroliză, acidogeneză, acetogeneză și metanogeneză), metabolizate de consorții microbiene specifice, în absența oxigenului și în condiții controlate, în interiorul unui digester [9]. Un procent cuprins între 40% și 90% din materia organică inițială (raportată la conținutul de solide volatile, VS) este transformată în biogaz, iar fracția rămasă, care reprezintă între 10% și 60%, este reprezentată de digestat – produsul secundar organic, utilizat în general ca biofertilizant [13], [14], [15], [16]. Biogazul este alcătuit în principal din metan (CH_4 , 55–70%), care reprezintă componenta energetică, și dioxid de carbon (CO_2 , 30–45%), precum și din alte componente prezente în concentrații mai reduse: vapori de apă (H_2O , 0–10%, până la saturație), azot gazos (N_2 , 0–8%), hidrogen sulfurat (H_2S , 0–3%), amoniac (NH_3 , 0–1%), monoxid de carbon (CO , 0–1%), hidrogen (H_2 , 0–1%), oxigen (O_2 , 0–2%) și urme de siloxani și hidrocarburi halogenate [9], [17], [18], [19], [20], [21].

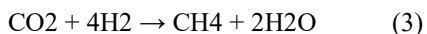
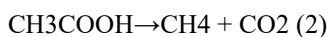
Ecuatia empirică generală a DA este prezentată în ecuația (1), în timp ce reprezentarea schematică a etapelor de biotransformare prin care trece materia organică până la formarea finală a biogazului este ilustrată în figura 1 [22].



Înțelegerea mecanismului chimico-biologic fundamental al fiecărei etape metabolice și a interconexiunilor dintre acestea este de o importanță esențială în etapele ulterioare, respectiv proiectarea și optimizarea procesului. Dezintegrarea reprezintă prima transformare a materiei organice și este caracterizată printr-o pregătire mecanică a substratului pentru a-l face mai solubil și mai susceptibil la fazele ulterioare de transformare [23]. Prin urmare, în timpul etapei de hidroliză, substratul pretrat, sub forma unor compuși organici complecși (carbohidrați, proteine și lipide), este hidrolizat de microorganismele hidrolitice în molecule mai simple (mono- și dizaharide, aminoacizi, glicerol și acizi grași cu lanț lung [LCFA]). Acestei faze îi sunt atribuite valori optime ale pH-ului cuprinse între 5 și 8 și temperaturi mezofile și termofile [24], [25], [26]. Producția acestei faze sunt transformați ulterior, în timpul acidogenezei, în principal în acizi grași volatili (VFA), alcooli, H_2 și CO_2 , aceasta fiind denumită și etapa de fermentație. Microorganismele implicate sunt denumite acidogene, iar pH-ul acestei faze este mai scăzut decât cel al fazei precedente, în timp ce domeniul temperaturii de operare este mezofil și termofil, ca și în cazul etapei de hidroliză [24], [25], [26].

O abordare frecventă constă în cuplarea etapelor de hidroliză și fermentație în digestia anaerobă în două trepte, pentru optimizarea parametrilor procesului, a operabilității și a randamentelor de gaz [27]. Precursorii din care se produce CH_4 rezultă în cea mai mare parte în timpul acidogenezei, faza consecutivă acidogenezei. Acești precursori includ în principal acetat, CO_2 și H_2 [24], [25], [28]. Interacțiunea sintrofică dintre acetogeneză și metanogeneză influențează echilibrul termodinamic al formării CH_4 și funcționalitatea fiecărei faze, întrucât H_2 consumat în timpul metanogenezei favorizează conversia VFA în timpul acidogenezei [24], [26], [28], [29].

Prin urmare, CH_4 poate fi obținut prin două căi: metanogeneza acetoclastică (ecuația 2) și metanogeneza hidrogenotrofică (ecuația 3), mediate de arheele metanogene acetoclastice și cele hidrogenotrofice [24], [26], [28], [29].



Regimurile de temperatură mezofil sau termofil sunt favorabile ambelor etape, în timp ce pH-ul acidogenezei este ușor acid, iar pH-ul metanogenezei este neutru până la ușor alcalin. Acidogeneza cuplată cu metanogeneza reprezintă cea de-a doua fază a DA în două trepte [24], [25], [26], [28], [29].

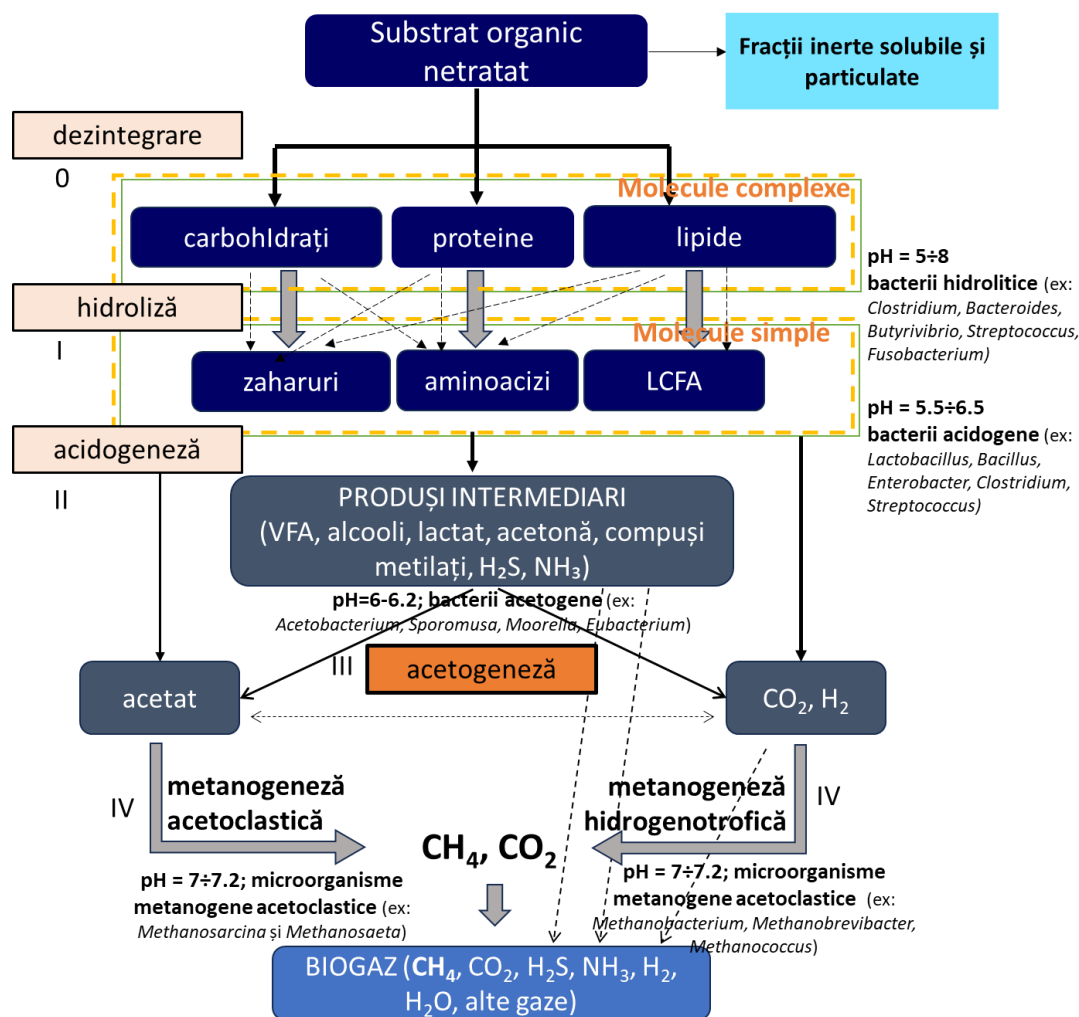


Figura 1. Reprezentarea schematică a etapelor DA (diagrama a fost construită pe baza informațiilor relevante selectate referitoare la fiecare etapă, adaptate din sursele [30], [31], [32], [33], [34])

Deși reacțiile de conversie sunt considerate în principal procese chimico-biologice, transformările redox reprezintă o componentă importantă a acestora, nu numai din perspectiva înțelegerii teoretice a procesului, ci și ca mijloc de control al procesului, în special în tehnologiile hibride, precum celulele de electroliză microbiană, pentru îmbunătățirea randamentului de gaz. Formarea metanului este un proces de reducere, în timp ce acidogeneza și acetogeneza sunt predominant procese de oxidare. Reacțiile redox au loc intracelular, fiind catalizate de enzime și purtători de electroni. Transferul de electroni este facilitat prin intermediul cuplurilor redox intracelulare și, extracelular, prin intermediul unor intermediari moleculari, solubili și care pot fi transferați prin difuzie – H_2 și formiat – și prin intermediul bacteriilor electrogene [24], [30], [31], [35], [36], [37], [38], [39].

Din perspectiva unui sistem ingineresc, este necesară controlarea și operarea eficientă a procesului de DA pentru a menține stabilitatea procesului și a obține randamente satisfăcătoare de CH_4 . Prin urmare, parametrii relevanți de operare și proiectare ai DA, ajustați în timpul optimizării procesului, includ temperatura, pH-ul, rata de încărcare organică, raportul substrat/inocul (S/I), timpul de retenție hidraulică (HRT), caracteristicile substratului, disponibilitatea și raportul optim al nutrienților, regimul de amestecare și configurația reactorului [9], [11], [26], [28], [29], [40].

Deși cercetarea în acest domeniu este extinsă, trebuie menționat faptul că DA este o tehnologie matură din punct de vedere tehnic și disponibilă comercial. Există multiple tipuri de digestoare în care DA poate fi operată la scară comercială, incluzând digestoare de tip lagună acoperită, digestoare cu curgere tip piston, digestoare cu

amestecare completă, digestoare cu reactor cu pat indus, digestoare cu biofilm film fix, digestoare anaerobe secvențiale operate discontinuu, digestoare anaerobe cu conținut ridicat de solide, reactoare anaerobe cu pat de nămol și curgere ascendentă (UASB), reactoare cu pat granular expandat de nămol și reactoare cu circulație internă [6], [9], [11], [12], [29], [41], [42], [43], [44]. Componentele tipice ale unui sistem de DA sunt: alimentarea substratului, componentă în cadrul căreia materia primă este alimentată dintr-un rezervor de stocare sau de amestecare; vasul de digestie (digestorul propriu-zis); o cupolă de acumulare a biogazului, cu conducte conectate la infrastructura externă pentru biogaz; și ieșirile pentru materia primă tratată/digestat, conectate de obicei la un spațiu de stocare. În mod obișnuit, reactoarele implică diferite regimuri de alimentare: operare discontinuă (batch), operare continuă sau operare semicontinuă. Digestoarele pot fi clasificate drept reactoare monofazice sau multifazice, în funcție de modul de operare a etapelor DA, și ca sisteme umede (cu un conținut de umiditate mai mare de 85%) sau uscate (cu un conținut de solide >15%), în funcție de conținutul de umiditate/solide al substratului [6], [9], [29], [45], [46].

Odată obținut în timpul DA și înainte de a fi utilizat drept combustibil, biogazul necesită o pregătire preliminară, variind de la metode convenționale de pretratare până la etape suplimentare de îmbunătățire a calității acestuia (upgrading) [10], [47]. După etapele de pretratare precum îndepărtarea vaporilor de apă, eliminarea H_2S și a altor contaminanți prezenți în concentrații foarte mici, biogazul cu concentrații variate de CH_4 (de exemplu, 50–70%) poate fi ars direct în cazane, arzătoare și cuptoare pentru producerea căldurii și utilizat pentru încălzire industrială, producerea aburului, gătit sau furnizarea apei calde. Biogazul poate fi utilizat, de asemenea și pentru producerea energiei electrice în unități de cogenerare a energiei termice și electrice și drept combustibil pentru motoare și turbine cu gaz, pentru producerea de căldură, energie mecanică și energie electrică. Cerințele de calitate pentru biogaz sunt definite de aplicația finală [10], [45], [48], [49].

Capitolul 2 al tezei de doctorat, intitulat PROGRES ÎN DEZVOLTAREA PROCESULUI DE DIGESTIE ANAEROBĂ: O ANALIZĂ BAZATĂ PE LITERATURA ȘTIINȚIFICĂ, urmărește continuarea documentării privind tehnologia DA și aprofundarea tendințelor actuale de cercetare, care au ca scop îmbunătățirea performanței DA.

Deoarece DA este un proces matur din punct de vedere tehnic, aplicat la scară comercială, bine documentat și studiat constant în laborator, cercetarea în acest domeniu este în mare măsură orientată spre aplicații. În acest context, direcțiile tradiționale de dezvoltare a cercetării includ pretratarea biomasei/deșeurilor, realizată înaintea procesului de DA, suplimentarea cu aditivi și combinarea mai multor substraturi în cadrul co-digestiei anaerobe. Aceste direcții urmăresc îmbunătățirea performanței generale a procesului prin creșterea potențialului de conversie a materiei prime, a eficienței și stabilității procesului, precum și a producției de biogaz și CH_4 . Sistemele hibride de DA și integrarea modelelor de IA în optimizarea matematică a procesului deschid calea către cercetări avansate în acest domeniu [9], [10], [25], [27], [50], [51], [52], [53].

Metodele de pretratare sunt aplicate substratului înainte de inițierea procesului de DA, de regulă în scopul îmbunătățirii biodegradabilității și solubilității, al eliminării compușilor toxici și, în consecință, al îmbunătățirii performanței procesului. Aceste metode sunt utilizate pentru a depăși anumite limitări asociate substraturilor și pentru a îndeplini cerințele de performanță legate de acestea sau, pur și simplu, pentru a crește randamentul și calitatea gazului [25], [33], [54], [55]. În plus, metodele de pretratare sporesc flexibilitatea procesului, permițând utilizarea unei game mai largi de substraturi și a diferitelor combinații ale acestora, precum și creșterea accesibilității substratului pentru microorganisme [25], [51]. Selectarea unei metode adecvate de pretratare este condiționată de tipul substratului, de limitările inerente și de caracteristicile compoziționale ale acestuia. Maturitatea metodelor de pretratare este evidențiată de nivelul de dezvoltare la scară industrială documentat pentru majoritatea acestora [25], [33], [51], [56].

Pe baza analizei literaturii de specialitate, strategiile de pretratare sunt grupate, în linii generale, în trei categorii principale: fizice, chimice și biologice. Prin integrarea a două sau mai multe metode aparținând categoriilor menționate anterior se definește o a patra categorie, reprezentată de metodele hibride. Fiecare categorie principală este subdivizată în mai multe subcategorii, clasificarea fiind realizată în funcție de mecanismul specific, condițiile de proces și echipamentele utilizate. Figura 2 ilustrează principalele categorii și subcategorii ale metodelor de pretratare [25], [54], [55].

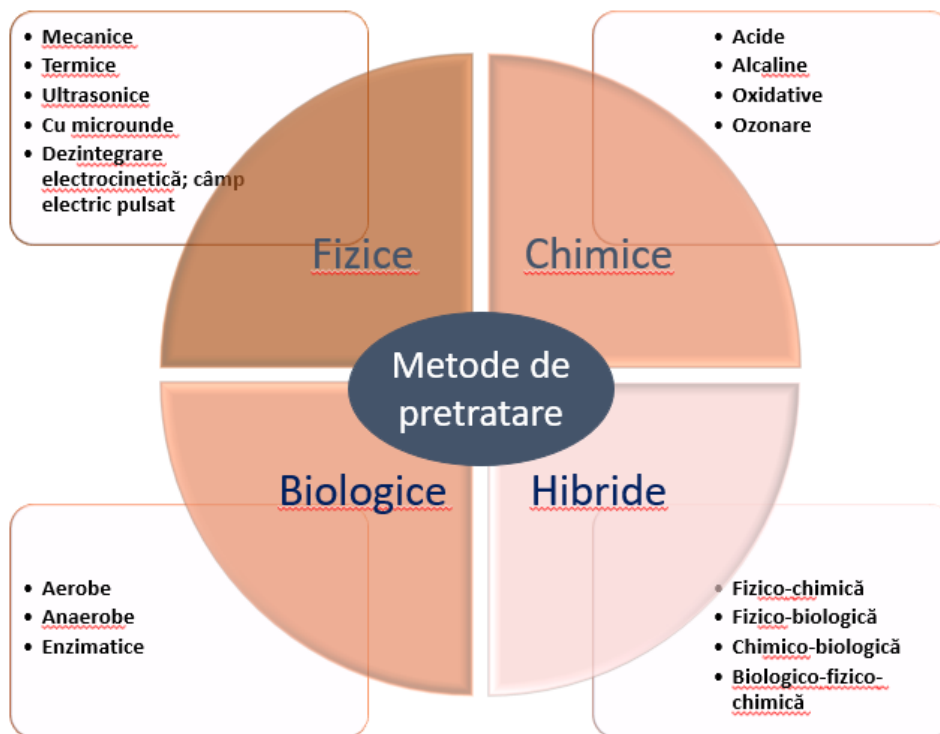


Figura 2. Clasificarea metodelor de pretratare care pot fi aplicate deșeurilor de biomă înainte de DA.

Utilizarea metodelor fizice de pretratare urmărește reducerea dimensiunii particulelor și creșterea suprafeței specifice a materiei prime, precum și îmbunătățirea contactului dintre microorganisme și aceasta, favorizând astfel omogenitatea procesului prin aplicarea unor forțe fizice. Tratamentele fizice facilitează, de asemenea, eliberarea conținutului intracelular în mediul înconjurător și reduc gradul de polimerizare, intensificând astfel hidroliza, etapa determinantă a vitezei procesului. Metodele chimice se bazează pe utilizarea substanțelor chimice pentru tratarea materiei prime, prin descompunerea structurilor moleculare complexe, eliberarea materialului intracelular în mediu și creșterea solubilității și susceptibilității acestuia la acțiunea microorganismelor [28], [54].

Aplicarea tehnologiilor de pretratare chimică necesită stabilirea unor parametri operaționali specifici și utilizarea diversilor agenți chimici. Aceștia includ o gamă variată de substanțe, precum acizi, baze, agenți oxidanți, lichide ionice, oligoelemente metalice și nutrienți esențiali [28], [52], [54], [57], [58].

Tehnicile de pretratare biologică utilizează microorganisme pentru tratarea substratului înainte de DA, accelerând astfel etapa de hidroliză. Aceste metode sunt considerate avantajoase din perspectiva eficienței și a mecanismului de acțiune, deoarece nu determină modificări extreme ale structurii substratului și favorizează solubilizarea materiei organice cu un consum minim de energie, în condiții operaționale moderate. Din perspectiva impactului asupra mediului, acestea prezintă avantajul că, spre deosebire de metodele chimice, nu generează produși secundari toxici. Sub acțiunea enzimelor, structurile complexe sunt descompuse, iar biopolimerii sunt transformați în compuși mai simpli. De regulă, metodele combinate sunt aplicate simultan sau secvențial, conducând la sisteme mai puțin costisitoare, datorită necesarului energetic redus și costurilor mai mici de implementare și operare, și cu o eficiență sporită în ceea ce privește intensificarea hidrolizei și solubilizării materiei organice, producția de biogaz și CH_4 și ușurința operării, comparativ cu aplicarea individuală a fiecărei metode de pretratare [25], [54], [55], [59].

Conform analizei literaturii de specialitate, selectarea adecvată a metodei de pretratare se realizează pe baza datelor privind compoziția materiei prime și luând în considerare tehnicile uzuale de pretratare testate pentru fiecare categorie de materie primă, clasificată în funcție de sursa de proveniență. Figura 3 prezintă schematic corelația dintre tipul materiei prime și metodele de pretratare corespunzătoare utilizate [51], [60].

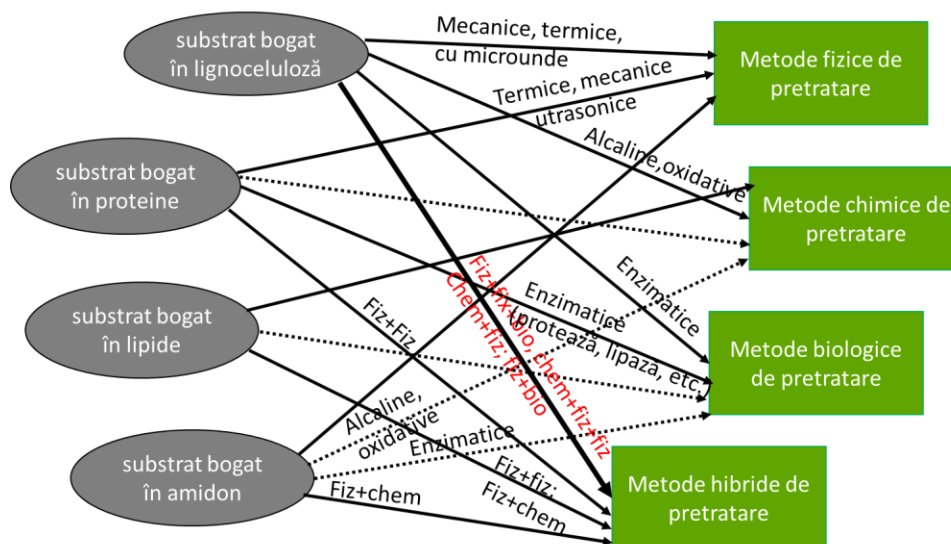


Figura 3. Reprezentarea schematică a tehnicilor de pretratare sintetizate, aplicate pentru diferite tipuri de substraturi; clasificarea s-a bazat pe tehnicile cele mai eficiente/uzuale, în timp ce materiile prime au fost clasificate pe baza componenteii lor dominante; liniile îngroșate indică tehnicile cele mai utilizate, în timp ce liniile punctate ilustrează tehnicile mai puțin uzuale; reprezentarea grafică a fost realizată pe baza studiilor [51], [60].

Suplimentarea cu aditivi reprezintă o altă strategie promițătoare pentru îmbunătățirea producției de biogaz prin procesul de DA. În sens larg, încorporarea aditivilor are rolul de a stabili mediul de digestie, de a facilita transformările biochimice esențiale, de a optimiza căile metabolice microbiene și de a îmbunătăți eficiența generală a procesului [28], [61], [62], [63]. Pentru obținerea acestor efecte, aditivii îndeplinesc mai multe funcții esențiale, inclusiv stimularea proliferării microbiene și a activității enzimatică, menținerea capacității de tamponare a sistemului, adsorbția compușilor inhibitori, facilitarea transferului direct de electroni între specii și intensificarea transformărilor biochimice în cadrul unor etape specifice, precum hidroliza sau metanogeneza [64], [65], [66]. Există o mare varietate de aditivi, care pot fi clasificați în principal în următoarele grupe: (i) aditivi biologici (de exemplu, enzime, microorganisme, fungi); (ii) aditivi anorganici (de exemplu, micro- și macronutrienți, nanomateriale funcționale, materiale cu conținut de carbon); și (iii) aditivi chimici (de exemplu, materiale pentru tamponarea pH-ului) [63], [67].

Adăugarea enzimelor a demonstrat un impact semnificativ asupra DA, acestea acționând ca agenți catalitici care transformă moleculele complexe în intermediari mai simpli, contribuind astfel la îmbunătățirea productivității generale a procesului [63].

Aditivii anorganici utilizați în DA constau în principal din micronutrienți și macronutrienți, ambele categorii fiind esențiale pentru stabilitatea biochimică și activitatea metabolică a comunităților microbiene. Aditivii utilizați pentru tamponarea pH-ului joacă un rol esențial în menținerea stabilității sistemului de DA, prin limitarea fluctuațiilor pH-ului și prevenirea perturbărilor procesului. Aceste fluctuații sunt atribuite în principal acumulării de VFA în timpul acidogenezei [68].

Aditivii utilizați pentru controlul pH-ului includ atât agenți de neutralizare – compuși acizi și alcalini, precum KOH, NaOH, H₂SO₄ și HCl – cât și agenți de tamponare, precum NaHCO₃, HCO₃⁻ și materiale pe bază de fier. La fel ca în cazul metodelor de pretratare, utilizarea aditivilor a atins maturitatea la scară industrială din perspectiva nivelului de maturitate tehnologică [63], [69], [70].

Co-digestia anaerobă (AcoD) reprezintă o altă strategie implementată pe scară largă pentru creșterea eficienței DA. Prin urmare, această metodă poate fi considerată o alternativă avansată la mono-digestia anaerobă, în cadrul căreia două sau mai multe tipuri de substraturi – denumite co-substraturi – sunt procesate într-o singură instalație, în vederea îmbunătățirii stabilității procesului și obținerii unor randamente mai ridicate de biogaz și CH₄. Scopul general este de a diminua limitările mono-digestiei anaerobe și de a obține performanțe tehnice îmbunătățite prin efectele sinergice ale substraturilor combinate, concomitent cu obținerea unor beneficii economice și pentru mediu [71], [72], [73]. Pentru cuantificarea efectului sinergic, cercetătorii au introdus indicele de performanță al co-digestiei (CPI), definit ca raportul dintre potențialul biochimic de metan (BMP) obținut prin co-digestie și media

ponderată a valorilor BMP obținute prin mono-digestia fiecărei materii prime [73]. Nivelul de dezvoltare al acestei tehnologii a ajuns la stadiul aplicării la scară industrială, co-digestia nămolului de epurare cu fracția organică a deșeurilor municipale solide, deșeurile alimentare (FW) sau alte tipuri de nămol reprezentând unele dintre cele mai frecvente exemple [73], [74].

Co-substraturile trebuie să fie compatibile și sunt, de regulă, selectate astfel încât să prezinte caracteristici complementare din punctul de vedere al compoziției chimice și al proprietăților fizice [73]. În acest context, una dintre cele mai importante caracteristici compoziționale este raportul C/N, pentru care intervalul optim este cuprins între 20 și 30 [29], [73], [75]. Alți nutrienți (C, N, P, S) și oligoelementele metalice reprezintă parametri compoziționali suplimentari considerați cu atenție în etapa de selecție a substraturilor. Acest aspect este justificat de faptul că o compoziție echilibrată a nutrienților este strâns legată de performanța procesului, deoarece previne formarea compușilor toxici și modificarea capacității de tamponare, influențând ulterior activitatea microbiană generală. Oligoelementele metalice sunt esențiale pentru susținerea sintezei și activității enzimelor, precum și pentru menținerea asocierilor microbiene sinergice și sintrofice [25], [73], [75], [76].

Prezentarea generală a strategiilor de cercetare adoptate pentru îmbunătățirea DA continuă cu discutarea abordărilor de ultimă generație, reprezentate de tehnologiile hibride, reactoarele de DA și integrarea modelelor de IA în controlul și optimizarea procesului.

Tehnologiile îmbunătățite se referă la versiuni modificate ale configurațiilor convenționale, precum și la tehnologii integrate rezultate din combinarea tehnologiei DA cu alte tehnologii complementare, precum tehnologiile cu membrane și cele ale pilelor de combustie. Sinergia tehnologiilor hibride conduce la rate mai ridicate de producere a gazului, precum și la performanțe economice și operaționale îmbunătățite comparativ cu sistemele convenționale de DA. În acest sens, digestia anaerobă în două trepte (figura 4(a)), bioreactoarele anaerobe cu membrană (figura 4(b)), tehnologia de injecție a hidrogenului (figura 5(a)) și celulele de electroliză microbială (MEC) (figura 5(b)) reprezintă câteva dintre tehnologiile avansate aflate în curs de investigare [27], [77]. Biogazul îmbogățit în CH_4 , posibilitatea valorificării altor produse cu valoare adăugată (VFA, H_2) și maximizarea utilizării resurselor reprezintă beneficii semnificative ale acestor tehnologii [27], [77], [78], [79].

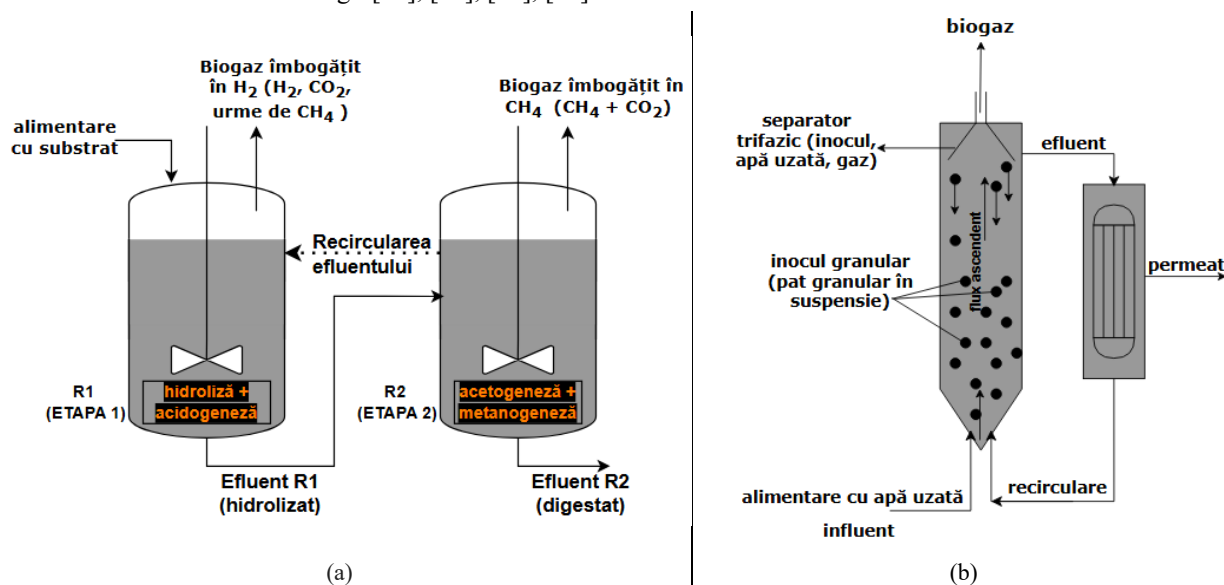


Figura 4. Reprezentarea schematică a (a) sistemului de DA în două trepte (combinatie CSTR-CSTR); (b) sistemului AnMBR (UASB-AnMBR, configurație externă submersă) pentru tratarea apelor uzate.

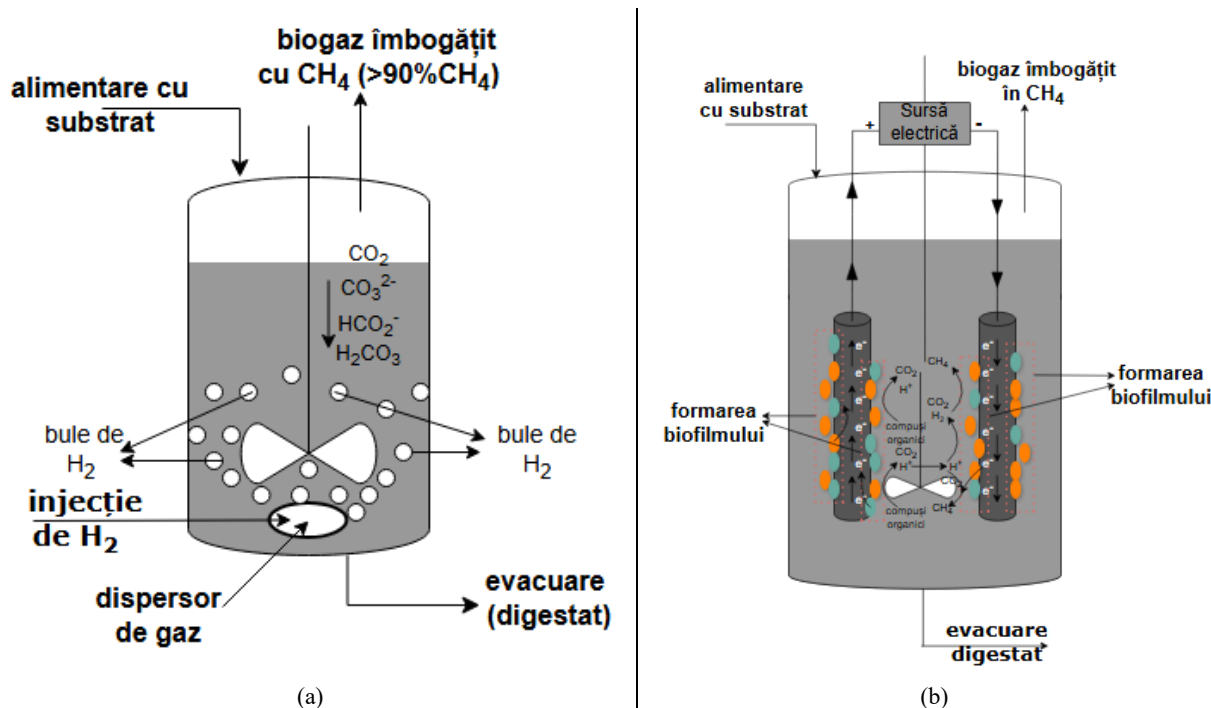


Figura 5. Reprezentarea schematică a (a) sistemului de DA cu injecție de H₂ (digester de tip CSTR); (b) sistemului DA-MEC: configurație in situ, cu o singură cameră (reactor CSTR).

Digestia anaerobă în două trepte, abreviată TSAD, reprezintă o configurație de proces în care DA se desfășoară în două unități, în locul unui singur reactor, ca în cazul sistemelor convenționale. În această configurație, în primul digester au loc etapele de hidroliză și acidogeneză, iar în cel de-al doilea se desfășoară etapele metabolice ulterioare, respectiv acetogeneza și metanogeneza. Efluentul evacuat din prima unitate este direcționat către cel de-al doilea reactor (figura 4(a)). Această configurație permite optimizarea individuală a etapelor, reducerea dimensiunii totale a reactoarelor, creșterea producției de gaz și a stabilității procesului, îmbunătățirea capacității de tamponare, un control mai bun al comunităților microbiene, reducerea competiției și inhibiției microbiene și, în final, creșterea productivității generale a procesului [27], [80], [81].

Un bioreactor anaerob cu membrană (AnMBR) reprezintă o tehnologie hibridă în care DA se desfășoară într-un reactor anaerob cuplat cu un sistem de separare cu membrană. Membrana reține biomasa și microorganismele esențiale în interiorul sistemului, în timp ce permeatul lichid traversează membrana și este ulterior colectat. Această configurație permite utilizarea unor timpi reduși de retenție hidraulică (HRT) și a unor timpi îndelungați de retenție a solidelor (SRT) (figura 4(b)) [77], [82], [83]. Această tehnologie este aplicabilă în special substraturilor cu un conținut ridicat de apă (de exemplu, nămoluri, ape uzate, dejecții animaliere lichide, nămol de epurare, levigat provenit din depozitele de deșeuri) și este mai puțin adecvată substraturilor cu un conținut ridicat de solide, deoarece acestea favorizează colmatarea membranei. Colmatarea este determinată de concentrațiile ridicate de particule, coloizi și substanțe biologice, care aderă la suprafața membranei sau pătrund în porii acesteia, formând un strat de depuneri și determinând creșterea rezistenței hidraulice [77], [83], [84], [85].

Tehnologia de injecție a hidrogenului, cunoscută și sub denumirea de biometanare, reprezintă o tehnologie de îmbunătățire a calității biogazului (biogas upgrading), în cadrul căreia CO₂ este transformat în CH₄ prin injecția de H₂ și intermediul căii metanogene hidrogenotrofice, în timpul DA (figura 5(a)). Această conversie are la bază reacția Sabatier. Procesul are un impact direct asupra valorii energetice a biogazului, datorită creșterii conținutului de CH₄ la valori de peste 95%, ceea ce reprezintă unul dintre principalele beneficii ale tehnologiei [77]. Hidrogenul este furnizat ca surplus provenit din alte procese, precum electroliza apei, și poate fi introdus in situ, direct în reactorul de DA, sau ex situ, într-un bioreactor adiacent [77], [86]. Suplimentarea directă cu H₂ poate fi integrată cu ușurință în instalațiile existente, necesită o suprafață redusă pentru instalare și, prin urmare, contribuie la reducerea costurilor. În plus, această configurație asigură precursorii endogeni – VFA și CO₂ produși în timpul hidrolizei și acidogenezei – și comunitățile microbiene, inclusiv microorganismele producătoare și consumatoare de H₂, necesare pentru inițierea și susținerea

procesului de biometanare [77], [86].

DA cuplată cu o MEC reprezintă un sistem bioelectrochimic, respectiv o tehnologie hibridă în cadrul căreia electrozii integrați în sistem asigură un mediu electrostimulat care facilitează metabolismul microbial, crește viteza reacțiilor de conversie a materiei organice și permite obținerea unor randamente mai ridicate de CH_4 și a unei calități superioare a biogazului [39], [87]. Integrarea celulei de electroliză poate fi realizată in situ, prin amplasarea electrozilor în interiorul reactorului de DA, sau ex situ, prin conectarea digesterului de DA la o MEC externă și recircularea materialului supus digestiei într-o buclă între cele două unități componente (figura 5(b)) [77].

Demonstrarea la scară industrială a fost atestată pentru toate cele patru configurații tehnologice, confirmând fezabilitatea soluțiilor inovatoare din domeniu [83], [84], [88], [89], [90]. Inovarea se extinde la numeroase alte prototipuri și studii de caz, dintre care pot fi menționate: procesele în două trepte (sisteme de DA lichid–solid), îmbogățirea in situ cu metan, DA cuplată cu cultivarea algelor, sistemele de DA bazate pe biofilme și DA asistată de vid. Optimizarea etapelor metabolice ale procesului de DA, deplasarea echilibrului termodinamic al formării CH_4 , valorificarea resurselor și utilizarea biofilmelor modificate se numără printre îmbunătățirile aduse de aceste tehnologii [77], [78], [79], [91], [92], [93].

Optimizarea și automatizarea procesului de DA sunt realizate prin integrarea modelării matematice și a programelor informatice ingineresti specializate. Prin urmare, rezultatele modelării matematice a DA includ informații cu privire la calitatea și cantitatea biogazului, eficiența degradării substratului, parametrii de stabilitate ai procesului, indicatorii privind calitatea digestatului și informații referitoare la populațiile microbiene. Principalele categorii de modele matematice utilizate în mod obișnuit pentru caracterizarea sistemelor de DA sunt ADM1 și formele sale modificate, modelele cinetice, modelele bazate pe date și abordările de învățare automată (ML) [23], [34], [94], [95], [96].

Unul dintre cele mai utilizate modele matematice este ADM1, dezvoltat pentru a răspunde necesității unui cadru matematic cu aplicabilitate generală, capabil să descrie în mod cuprinzător procesul de DA, respectiv conversia materiei organice biodegradabile în biogaz (CH_4 și CO_2) și compuși intermediari inerți. Acesta este adecvat pentru orice substrat organic biodegradabil care poate fi fracționat în carbohidrați, proteine și lipide și este formulat în mod intrinsec pentru un reactor CSTR cu o singură treaptă. Pentru extinderea aplicabilității sale, au fost dezvoltate mai multe versiuni modificate ale ADM1, adaptate diferitelor condiții de operare, precum și configurațiilor alternative de reactoare și procese, abordând astfel limitările inerente ale modelului original [23], [34], [94], [97], [98], [99].

Modelele cinetice reprezintă o clasă de modele matematice utilizate pentru studierea și simularea comportamentului cinetic al proceselor biochimice din DA, inclusiv creșterea microbială, degradarea substratului și reacțiile de formare a produșilor [94]. Dezvoltarea modelelor cinetice urmărește obținerea unor funcționalități diverse, permițând utilizarea lor independentă sau integrarea acestora în cadre de modelare mai cuprinzătoare, pentru o evaluare îmbunătățită a procesului [94]. Modelele cinetice descriu, de regulă, procese dependente de timp și iau în considerare, în mod obișnuit, creșterea sau declinul biomasei microbiene. Numărul modelelor cinetice investigate este considerabil, dintre acestea putând fi menționate: (i) modelele de creștere microbială (de exemplu, McCarty, Powell, Grau etc.); (ii) modelele de creștere microbială care includ efectele inhibiției produse de substrat (de exemplu, Holzberg et al., Bazua și Wilke et al., Aiba et al. etc.); (iii) modelele cinetice de creștere care iau în considerare efectele pH-ului și temperaturii; (iv) modelele cinetice modificate: variante ale modelelor de ordinul întâi, Monod, Gompertz și Chen–Hashimoto; (v) modelele cinetice de hidroliză: abordări de ordinul întâi cu două fracții și abordări bazate pe suprafață; (vi) modelele de predicție a CH_4 pentru sisteme continue: modelele Chen–Hashimoto, Stover–Kincannon modificat și Deng; și (vii) modelele cinetice pentru producția cumulativă de gaz: modelele Logistic, Cone, Schnute, Richard și Fitzhugh [34], [94], [100], [101], [102], [103], [104], [105].

Modelele bazate pe date stabilesc relații de corespondență între intrările sistemului – precum rata de încărcare organică, proprietățile fizico-chimice ale substratului, pH-ul, temperatura și raportul C/N – și ieșirile acestuia, inclusiv randamentul de gaz și reducerea VS. Aceste modele descriu comportamentul sistemului fără a se baza pe cunoașterea mecanistică a procesului [34], [95], [106]. Avantajele modelelor bazate pe date constau în faptul că acestea nu necesită date biochimice detaliate privind procesul, a căror obținere poate fi îndelungată și costisitoare; în versatilitatea acestora, fiind adecvate pentru predicția rezultatelor în cazul unei game largi de materii prime supuse digestiei; în capacitatea de a identifica tendințe și tipare complexe în date; precum și în eficiența acestora în identificarea parametrilor incerti și susținerea optimizării procesului [107], [108]. Printre modelele bazate pe date întâlnite în mod obișnuit în DA se numără modelele exprimate prin ecuații, modelele statistice clasice, rețelele neuronale artificiale și modelele bazate pe logică fuzzy [30], [34], [98], [108], [109].

ML reprezintă un domeniu axat pe dezvoltarea modelelor predictive prin utilizarea algoritmilor și a tehnicilor

statistice care identifică tipare în date, permițând stabilirea corespondenței dintre intrări și ieșiri și generarea de predicții pentru date noi, neutilizate anterior, fără programare explicită [110], [111], [112]. În DA, algoritmi ML se dovedesc a fi instrumente eficiente pentru modelarea proceselor neliniare, predicția eficienței procesului și susținerea controlului, operării și mentenanței automatizate. Intrările utilizate pentru antrenarea modelelor ML includ caracteristicile materiei prime (de exemplu, compoziția substratului, conținutul anumitor compuși, solidele totale, VS, necesarul chimic de oxigen, raportul C/N), condițiile de operare (de exemplu, temperatura, presiunea, HRT, pH-ul), variabilele de proiectare ale sistemului (de exemplu, forma reactorului) și variabilele de stare ale procesului (de exemplu, VFA, azotul amoniacal total și conținutul de H_2) [96]. Aplicarea ML în studiile la scară de laborator este, prin urmare, de așteptat și a fost, de asemenea, validată prin implementări la scară industrială pentru predicția producției de biogaz, utilizând mai mulți algoritmi ML, inclusiv analiza componentelor principale, pădurea aleatoare, mașina cu vectori suport, metoda celor mai apropiați k vecini și rețelele neuronale artificiale [113].

Capitolul 3, intitulat CERCETĂRI EXPERIMENTALE LA SCARĂ DE LABORATOR, descrie activitatea experimentală originală desfășurată în cadrul tezei de doctorat, oferind noi perspective asupra proceselor de DA care utilizează deșeuri alimentare (FW), alcătuite predominant din deșeuri de fructe și legume (FVW), drept substrat, în combinație cu un inocul de biomasă granulară, și continuând cercetarea procesului de DA prin investigații experimentale [1].

Principala investigație experimentală s-a concentrat asupra studiului la scară de laborator al DA, utilizând FW drept substrat și un inocul granular de origine industrială drept sursă microbiană. Obiectivul principal a fost examinarea modului în care parametrii operaționali esențiali – în special temperatura și raportul S/I – influențează performanța procesului de digestie. Performanța procesului a fost evaluată pe baza unor indicatori precum producția de biogaz, compoziția gazului, randamentele de conversie și cinetica proceselor biochimice implicate [1].

Instalația de DA la scară de laborator este ilustrată schematic în figura 6, iar configurațiile experimentale ale testelor de DA sunt prezentate în tabelul 1 [1].

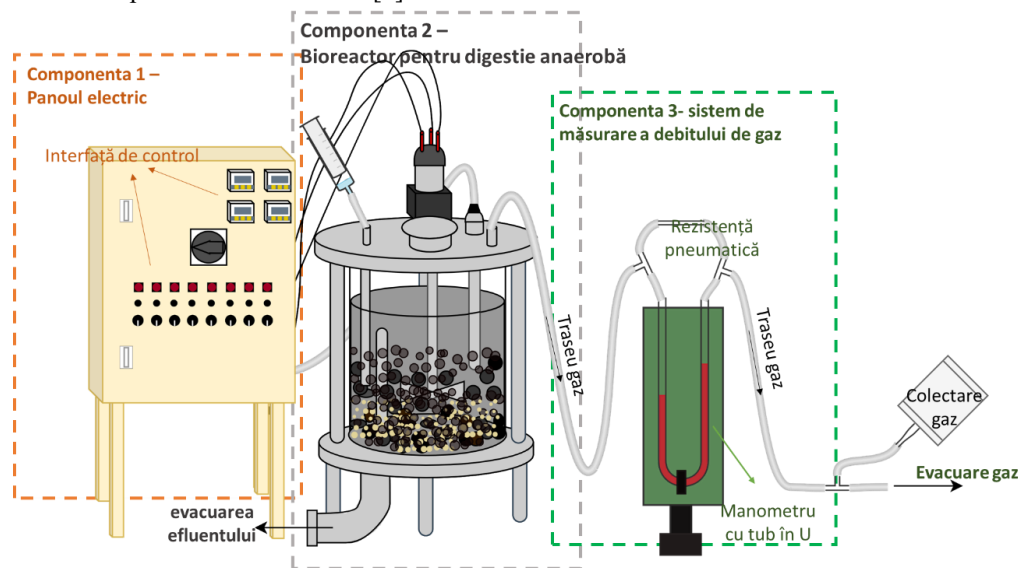


Figura 6. Reprezentarea schematică a instalației de DA la scară de laborator, ilustrând cele trei componente principale ale studiilor de DA (componenta 1 – panou electric, componenta 2 – bioreactor CSTR și componenta 3 – sistem de măsurare a debitului de gaz) [1].

Tabelul 1. Configurațiile experimentale ale experimentelor de DA în regim discontinuu (batch) [1]

Nr. experiment	Cod experiment	Temperatura de operare (°C)	Raport S/I (w/w)
1	AD33SI11	33	1:1
2	AD37SI11	37	1:1
3	AD41SI11	41	1:1
4	AD45SI11	45	1:1
5	AD37SI32	37	3:2
6	AD37SI21	37	2:1

Un aspect important al proiectării experimentale îl reprezintă efectuarea testelor în reactoare CSTR de laborator, de scară medie, realizate din sticlă. Această configurație a permis observarea vizuală directă a amestecului supus digestiei și a facilitat măsurarea debitelor de gaz. În plus, au fost monitorizați în mod continuu parametri precum pH-ul, conductivitatea electrică și compoziția biogazului. Experimentele de digestie s-au desfășurat pe perioade scurte, cuprinse între 4 și 10 zile, în condiții controlate de temperatură și amestecare [1]. Analizările utilizate pentru determinarea compoziției biogazului, a pH-ului și a conductivității electrice sunt prezentate în figura 7 [1].

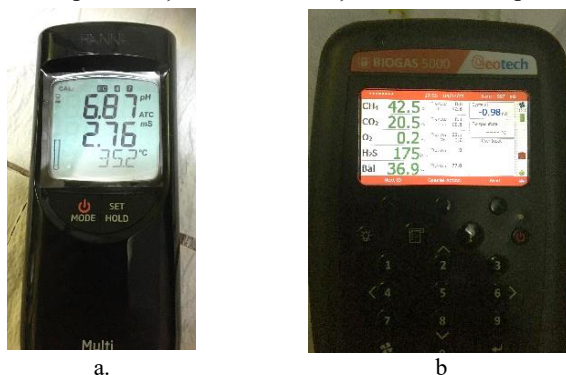


Figura 7. Echipamente portabile utilizate pentru măsurători periodice ale compoziției gazului, conductivității electrice și pH-ului:
a) analizor de biogaz și b) aparat de măsură portabil [1]

Un element important al cercetării îl reprezintă utilizarea integrată a unui amestec definit de deșeuri alimentare (FW), a reactoarelor CSTR de laborator, la scară medie, echipate cu sisteme de reglare a temperaturii și agitare mecanică, precum și investigarea unui interval mai larg de temperatură (33 °C, 37 °C, 41 °C și 45 °C). Substratul a fost alcătuit în principal din reziduuri de fructe și legume, ceea ce a permis evaluarea performanței DA pentru acest tip de materie primă și a furnizat date experimentale suplimentare pentru combinații comparabile de substraturi [1]. Înainte de digestie, reziduurile de fructe au fost omogenizate mecanic pentru obținerea unei suspensii. O altă caracteristică a configurației experimentale o reprezintă adaosul semnificativ de apă în amestecul de alimentare, corespunzător condițiilor specifice sistemelor de DA umedă. Aceste condiții experimentale au fost selectate pentru a explora potențialul utilizare a FW ca substrat ușor disponibil pentru DA, în special în combinație cu fluxuri de deșeuri industriale, precum apele uzate, utilizând totodată biomasa granulară ca sursă de inocul în sistemele de DA umedă [1].

Pentru caracterizarea suplimentară a procesului, au fost efectuate analize atât asupra substratului, cât și asupra inoculului, completate prin modelare matematică. Pentru caracterizarea sistemului biochimic au fost selectate abordări specifice de modelare, combinând un model mecanistic (stoechiometric), în regim staționar, pentru estimarea potențialului teoretic maxim de gaz, cu modele cinetice dinamice bazate pe date, pentru simularea producției cumulative de gaz în timp [1]. Un model de creștere sigmoidal, respectiv modelul Gompertz modificat de Zwietering, a fost aplicat pentru ajustarea datelor experimentale și estimarea parametrilor cinetici care descriu producția cumulativă de biogaz și CH₄ [1], [114]. Parametrii modelului au fost estimați utilizând un algoritm de optimizare implementat în MATLAB. Randamentele de conversie au fost calculate în raport cu potențialul teoretic de gaz. În plus, a fost determinat profilul de clasificare a microorganismelor din inoculul industrial, pentru caracterizarea comunității microbiene implicate în procesul de digestie [1]. Producția totală de gaz obținută în urma măsurătorilor și calculelor efectuate în experimentele de DA este prezentată în tabelul 2, iar randamentele de conversie sunt prezentate în tabelul 3. În plus, ajustarea datelor experimentale cu modelul Gompertz modificat este prezentată în figura 8 și figura 9 [1].

Tabelul 2. Producția totală de gaz rezultată în urma măsurătorilor și calculelor efectuate în experimentele de DA [1]

Experiment de referință	Volumul total de gaz (NL kg _{VS,add} ⁻¹)					
	biogaz	CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂ S
AD33SI11	69.88	24.08	13.08	28	0.350	43.23 × 10 ⁻³
AD37SI11	130.7	67.19	35.85	17.31	8.18	62.01 × 10 ⁻³
AD41SI11	214.43	60.97	43.83	75.91	16.64	193.56 × 10 ⁻³
AD45SI11	465.37	203.03	160.44	64.62	44.9	698.36 × 10 ⁻³
AD37SI32	286.25	147.2	69.29	51.93	16.92	93.03 × 10 ⁻³
AD37SI21	468.59	233.95	168.37	77.4	29.84	298.41 × 10 ⁻³

Tabelul 3. Randamentele de conversie pentru CH_4 și carbonul organic în condiții de laborator, astfel cum sunt definite în secțiunea experimentală [1]

Experiment de referință	η_{CH_4} (%)	$\eta_{\text{organic carbon}}$ (%)	CH_{4th} ($\text{NL kg}_{\text{VS}_{add}}^{-1}$)	CO_{2th} ($\text{NL kg}_{\text{VS}_{add}}^{-1}$)
AD33SI11	3.98	4.15	604.82	291.22
AD37SI11	11.11	11.5		
AD41SI11	10.08	11.69		
AD45SI11	33.57	40.56		
AD37SI32	22.91	24.15	642.38	253.89
AD37SI21	36.42	44.89	655.47	240.78

Randamentul de metan a crescut semnificativ în funcție de condițiile de operare, înregistrând o creștere de aproximativ 8,3 ori la temperatura cea mai ridicată comparativ cu cea mai scăzută și de 3,5 ori în condițiile celei mai ridicate încărcări cu substrat. Deși aciditatea crescută poate exercita efecte inhibitorii asupra metanogenezei și poate reduce durata efectivă a digestiei, producția de biogaz a continuat să crească odată cu creșterea încărcării cu substrat [1]. În mod remarcabil, compoziția biogazului a rămas relativ constantă în aceste condiții. Tendințele producției de biogaz și CH_4 , împreună cu evaluarea randamentului de conversie în CH_4 și interpretarea mecanistică a parametrilor modelului Gompertz modificat, au arătat că sistemul de DA descris nu și-a atins limitele capacității de producție, oferind posibilitatea extinderii investigațiilor experimentale asupra aceluiași sistem pentru o evaluare mai cuprinzătoare [1].

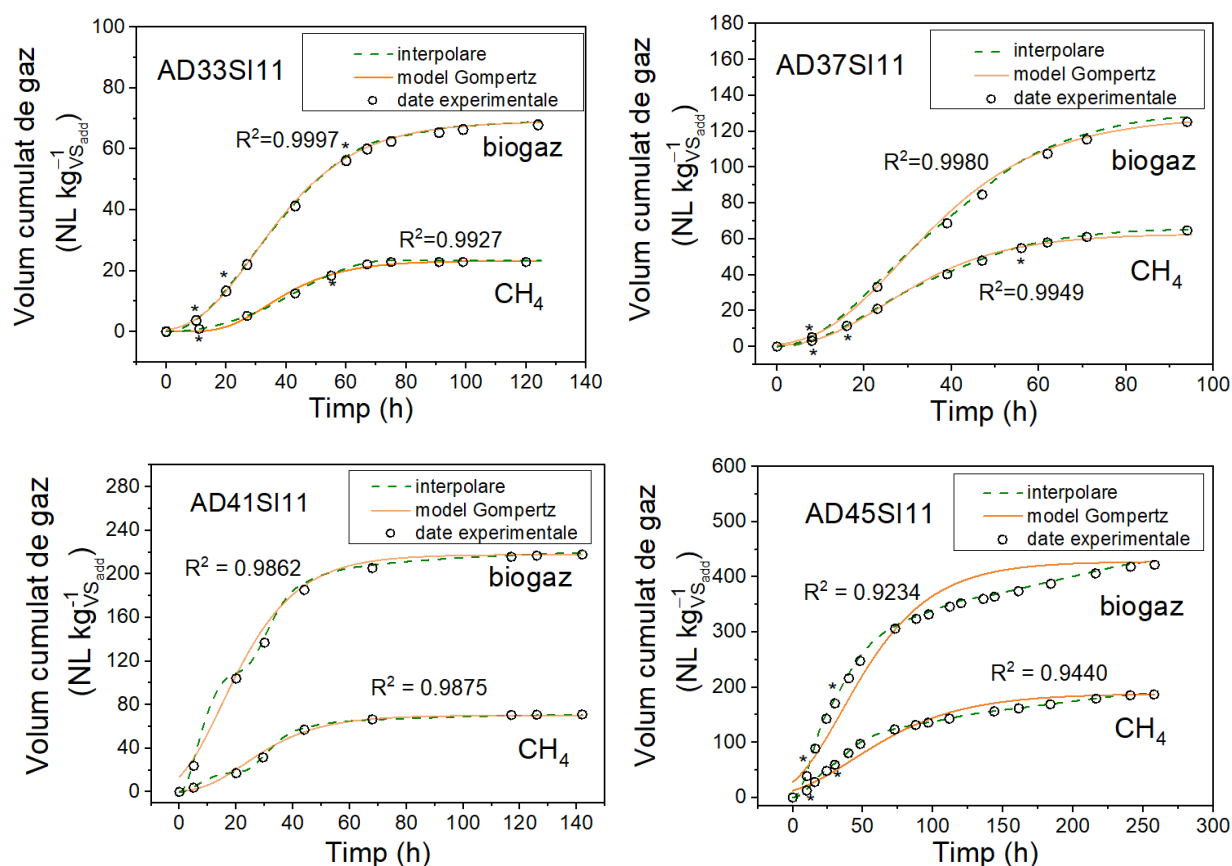


Figura 8. Curbele modelului Gompertz obținute pentru experimentele de DA (AD33SI11, AD37SI11, AD41SI11, AD45SI11); punctele de date marcate cu un asterisc simbolizează valorile generate prin algoritmul de interpolare [1].

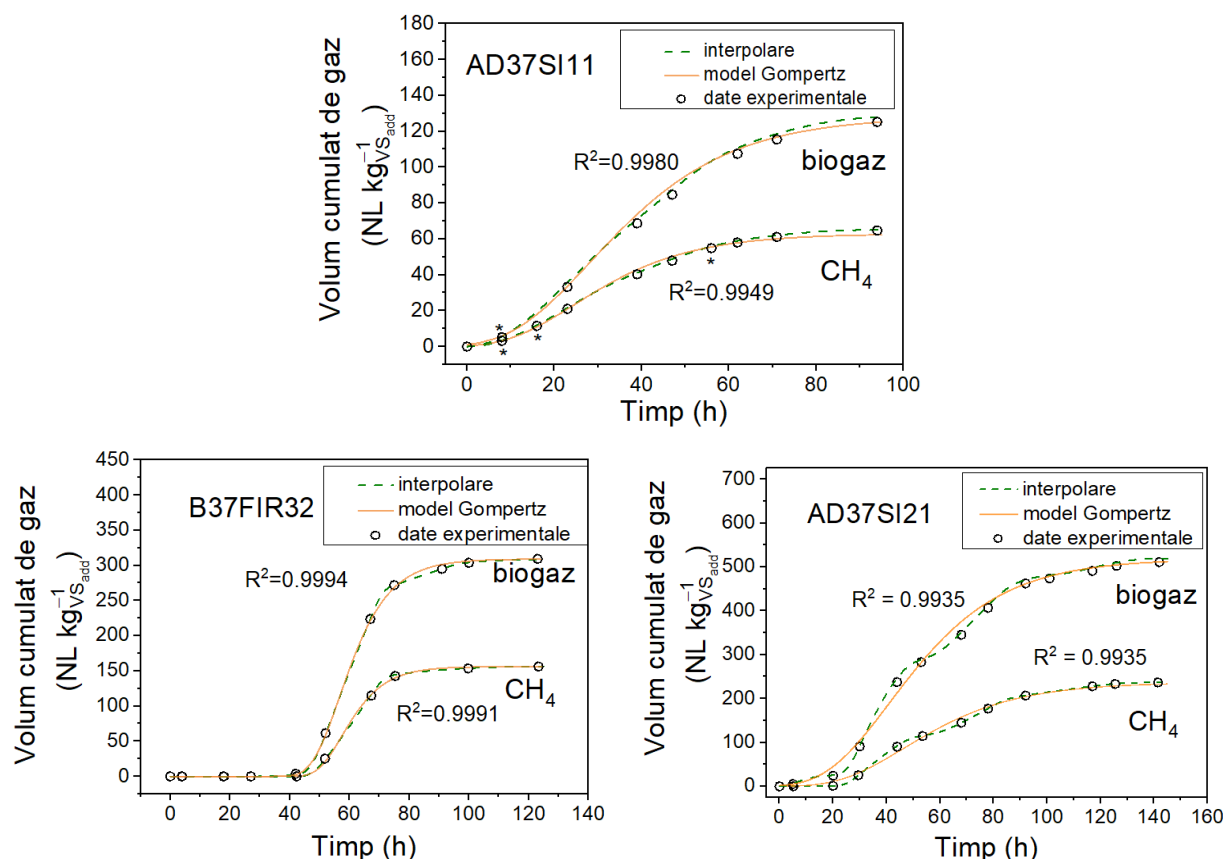


Figura 9. Curbele modelului Gompertz obținute pentru experimentele de DA (AD37SI11, AD37SI32, AD37SI21); punctele de date marcate cu un asterisc simbolizează valorile generate prin algoritmul de interpolare [1].

În final, Capitolul 4, intitulat DIGESTIA ANAEROBĂ: O CALE CĂTRE BIOECONOMIA CIRCULARĂ ȘI DEZVOLTAREA BIORAFINĂRIILOR, încheie explorarea științifică a DA prin prezentarea întregului potențial al acestei tehnologii, reflectat prin alinierea sa la principiile bioeconomiei circulare și integrarea în sistemele de biorafinare bazate pe DA.

Bioeconomia circulară reprezintă un sistem multidimensional axat pe utilizarea resurselor regenerabile (resurse biologice și deșeuri organice), minimizarea deșeurilor neutilizabile și a impactului negativ asupra mediului, promovând în același timp producția sustenabilă, pe termen lung, de energie și produse valoroase. Acest cadru integrează dimensiuni economice, tehnologice, de mediu și de politică [115], [116], [117]. În cazul sistemelor de DA, această circularitate cuprinde următoarele etape: colectarea și pregătirea deșeurilor organice (de exemplu, reziduuri agricole, deșeuri industriale, FW), conversia acestora prin DA pentru obținerea biogazului și a unor produse precum digestatul, substanțele chimice derivate și bioprodusele, reintroducerea nutrienților în ecosisteme și regenerarea biomasei, inițiind astfel un nou ciclu al fluxului de materiale (figura 10) [115], [116], [118], [119].

Biorafinările bazate pe DA au procesul de DA drept pilon central, integrând simultan procese cu fluxuri multiple pentru obținerea intenționată, pe lângă CH₄/biogaz, a altor produse valoroase, precum digestatul – unul dintre cele mai frecvente produse –, VFA, biohidrogenul, precum și substanțele chimice și produsele derivate corespunzătoare. Acești derivați cuprind o gamă de acizi carboxilici – precum acidul acetic, propionic, butiric, valeric și caproic –, diverși alcooli, NH₃, combustibili gazoși îmbunătățiți, inclusiv biometan și gaz de sinteză, precum și fracții biolichide și biosolide. În plus, aplicațiile acestor substanțe chimice sunt diverse și includ produse farmaceutice, substanțe chimice de laborator, polimeri, textile etc. [118], [121], [122].

În vederea evidențierii versatilității procesului de DA, atât ca tehnologie independentă pentru producerea energiei regenerabile, cât și ca potențial înlocuitor al tehnologiilor de procesare bazate pe combustibili fosili, această teză sintetizează tendințele de cercetare prin integrarea literaturii privind dezvoltările tehnologice și aspectele

mecanistice ale DA cu stadiul actual al tehnologiei și rezultatele experimentale obținute în urma testelor în regim discontinuu la scară de laborator.

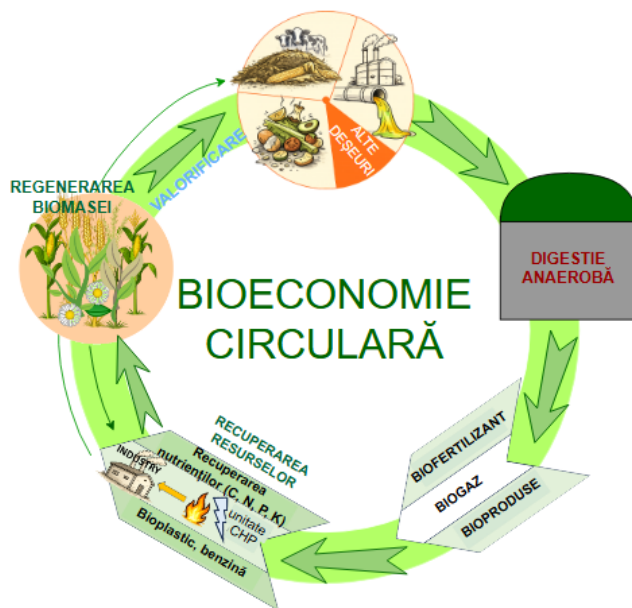


Figura 10. Reprezentarea schematică a fluxului de materiale într-un sistem de bioeconomie circulară bazat pe DA [115], [119], [120].

Măsura în care strategiile avansate specifice stadiului actual al tehnologiei conduc la îmbunătățiri reale este ilustrată prin exemple din studii la scară de laborator privind DA a FW și a reziduurilor agricole. În plus, nivelul de maturitate tehnologică este abordat pe parcursul capitolului dedicat stadiului actual al tehnologiei. Partea experimentală a acestei teze a oferit noi perspective asupra sistemelor de DA umedă, în special asupra celor care utilizează amestecuri de FW și biomasă granulară drept inocul. Randamentul de metan a crescut semnificativ în funcție de condițiile de operare, înregistrând o creștere de aproximativ 8,3 ori la temperatura cea mai ridicată comparativ cu cea mai scăzută și de 3,5 ori în condițiile celei mai ridicate încărcări cu substrat. Deși aciditatea crescută poate exercita efecte inhibitorii asupra metanogenezei și poate reduce durata efectivă a digestiei, producția de biogaz a continuat să crească odată cu creșterea încărcării cu substrat [1]. Randamentele de metan obținute sunt în concordanță cu valorile raportate în literatura de specialitate pentru sisteme similare. În final, potențiala tranziție a tehnologiei DA către un stadiu mai avansat este evidențiată prin discutarea compatibilității dintre DA și principiile bioeconomiei circulare, precum și a posibilității integrării viitoare a DA în cadrul biorafinăriilor bazate pe DA [1].

Resurse software: Diagramele schematice din prezentul rezumat (Figurile 1–6 și Figura 10) au fost realizate cu Microsoft PowerPoint și Microsoft Word, respectiv cu aplicațiile draw.io și chemix.org. Datele prezentate în Figurile 8 și 9 au fost generate utilizând MATLAB (versiunea R2024b, The MathWorks, Inc.), respectiv obținute în urma investigațiilor experimentale, și au fost reprezentate grafic utilizând programul Origin (versiunea OriginPro 2026 SR1, OriginLab Corporation). Aceleași instrumente au stat la baza figurilor corespondente din teza de doctorat.

Declarație privind utilizarea instrumentelor de inteligență artificială generative: În elaborarea rezumatului și a tezei a fost utilizat ChatGPT (OpenAI, modele GPT4.o-GPT5.6 sol, accesate în perioada 2025-2026), exclusiv în următoarele scopuri: (i) generarea unor elemente grafice cu rol ilustrativ, fără conținut de date, incluse în Figura 10 din rezumat și în Figura 41 din teză; (ii) prelucrarea grafică a imaginii din partea dreaptă a Figurii 19 din teză (fotografie digitală); (iii) editare lingvistică, respectiv corectarea gramaticii și îmbunătățirea clarității exprimării, fără modificarea conținutului științific. Instrumentul nu a fost utilizat pentru obținerea, prelucrarea sau interpretarea datelor experimentale, pentru dezvoltarea modelelor matematice, pentru formularea ipotezelor de lucru, a concluziilor ori a contribuțiilor originale. Întregul conținut rezultat a fost verificat de autor, care își asumă integral responsabilitatea pentru acuratețea științifică și pentru originalitatea lucrării.

Bibliografie:

- [1] M. Ivanovici, G.-A. Dumitrel, V. D. Gherman, T. Todinca, A.-M. Pana, and V. L. Ordodi, "Anaerobic Digestion of Food Waste and Granular Inoculum: Study on Temperature Effect and Substrate-to-Inoculum Ratio on Biogas Production," *Fermentation*, vol. 11, no. 6, p. 348, Jun. 2025, doi: 10.3390/fermentation11060348.
- [2] H. Guvvala and N. S. Maurya, "Art of anaerobic digestion: An overview," *Res. J. Chem. Environ.*, vol. 25, no. 8, pp. 168–176, Jul. 2022, doi: 10.25303/258rjcel68176.
- [3] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "A Brief History of Anaerobic Digestion and 'Biogas,'" in *Biogas Energy*, New York, NY: Springer New York, 2012, pp. 11–23. doi: 10.1007/978-1-4614-1040-9_2.
- [4] K. Stamatelatos, G. Antonopoulou, and G. Lyberatos, "Production of biogas via anaerobic digestion," in *Handbook of Biofuels Production*, Elsevier, 2011, pp. 266–304. doi: 10.1533/9780857090492.2.266.
- [5] J.-Q. Ni, "A review of household and industrial anaerobic digestion in Asia: Biogas development and safety incidents," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 197, p. 114371, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114371.
- [6] M. M. Uddin and M. M. Wright, "Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances," *Phys. Sci. Rev.*, vol. 8, no. 9, pp. 2819–2837, Sep. 2023, doi: 10.1515/psr-2021-0068.
- [7] IEA Bioenergy, "Biogas Production and Utilisation," International Energy Agency Bioenergy, Task 37.
- [8] R. Loganath and J. Senophiyah-Mary, "Critical review on the necessity of bioelectricity generation from slaughterhouse industry waste and wastewater using different anaerobic digestion reactors," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 134, p. 110360, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110360.
- [9] M. K. Jameel *et al.*, "Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review," *Results Chem.*, vol. 7, p. 101549, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101549.
- [10] G. Pesta, E. Hansemann, G. Bochmann, B. Drosig, and W. Gabauer, "Implementation of anaerobic digestion facilities in the food and beverage industry," IEA Bioenergy, Task 37, Jan. 2025.
- [11] C. Mao, Y. Feng, X. Wang, and G. Ren, "Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 540–555, May 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.032.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, *AgSTAR Project Development Handbook: A Handbook for Developing Anaerobic Digestion/Biogas Systems on Farms in the United States*, 3rd edition. 2020.
- [13] D. Lima, G. Appleby, and L. Li, "A Scoping Review of Options for Increasing Biogas Production from Sewage Sludge: Challenges and Opportunities for Enhancing Energy Self-Sufficiency in Wastewater Treatment Plants," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2369, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16052369.
- [14] D. M. D. Gray, P. Suto, and C. Peck, "Anaerobic digestion of food waste," U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY REGION 9, Funding Opportunity No. EPA-R9-WST-06-004, 2008.
- [15] S. Sakar, K. Yetilmezsoy, and E. Kocak, "Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment — a literature review," *Waste Manag. Res. J. Sustain. Circ. Econ.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–18, Feb. 2009, doi: 10.1177/0734242X07079060.
- [16] O. Anaya-Reza *et al.*, "Wet anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: experience with long-term pilot plant operation and industrial scale-up," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 47, no. 2, pp. 235–247, Feb. 2024, doi: 10.1007/s00449-023-02958-2.
- [17] N. Tippayawong and P. Thanompongchart, "Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4531–4535, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.04.014.
- [18] Y. Li *et al.*, "Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 19, pp. 11569–11579, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b03003.
- [19] R. Ruan *et al.*, "Biofuels: Introduction," in *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, Elsevier, 2019, pp. 3–43. doi: 10.1016/B978-0-12-816856-1.00001-4.
- [20] X. Y. Chen, H. Vinh-Thang, A. A. Ramirez, D. Rodrigue, and S. Kaliaguine, "Membrane gas separation technologies for biogas upgrading," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 31, pp. 24399–24448, 2015, doi: 10.1039/C5RA00666J.
- [21] E. Ryckebosch, M. Drouillon, and H. Vervaeren, "Techniques for transformation of biogas to biomethane," *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 5, pp. 1633–1645, May 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.02.033.
- [22] S. Achinas and G. J. W. Euverink, "Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste," *Resour.-Effic. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 143–147, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.reffit.2016.08.001.
- [23] Z. Barahmand and G. Samarakoon, "Sensitivity Analysis and Anaerobic Digestion Modeling: A Scoping Review," *Fermentation*, vol. 8, no. 11, p. 624, Nov. 2022, doi: 10.3390/fermentation8110624.
- [24] Q. Yin and G. Wu, "A Holistic Metabolic Pathway of Anaerobic Digestion Integrating Substrate Degradation, Electron Transfer, Energy Conservation, and Information Flow," in *Anaerobic Digestion*, G. Wu, Ed., in Green Energy and Technology, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 17–39. doi: 10.1007/978-3-031-69378-6_2.
- [25] P. Dhull, S. Kumar, N. Yadav, and R. K. Lohchab, "A comprehensive review on anaerobic digestion with focus on potential feedstocks, limitations associated and recent advances for biogas production," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, May 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33736-6.
- [26] J. N. Meegoda, B. Li, K. Patel, and L. B. Wang, "A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 10, p. 2224, Oct. 2018, doi: 10.3390/ijerph15102224.

- [27] K. Rajendran, D. Mahapatra, A. V. Venkatraman, S. Muthuswamy, and A. Pugazhendhi, "Advancing anaerobic digestion through two-stage processes: Current developments and future trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 123, p. 109746, May 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109746.
- [28] P. Dhull, R. K. Lohchab, S. Kumar, M. Kumari, Shaloo, and A. K. Bhankhar, "Anaerobic Digestion: Advance Techniques for Enhanced Biomethane/Biogas Production as a Source of Renewable Energy," *BioEnergy Res.*, vol. 17, no. 2, pp. 1228–1249, Jun. 2023, doi: 10.1007/s12155-023-10621-7.
- [29] G. Náthia-Neves, M. Berni, G. Dragone, S. I. Mussatto, and T. Forster-Carneiro, "Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 2033–2046, Sep. 2018, doi: 10.1007/s13762-018-1682-2.
- [30] S. Emebu, J. Pecha, and D. Janáčová, "Review on anaerobic digestion models: Model classification & elaboration of process phenomena," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 160, p. 112288, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112288.
- [31] K. M. Kangle, S. V. Kore, V. S. Kore, and G. S. Kulkarni, "Recent Trends in Anaerobic Codigestion: A Review," *Univers. J. Environ. Res. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 210–219, 2012.
- [32] E. A. Economou, G. Dimitropoulou, N. Prokopidou, I. Dalla, and T. Sfetsas, "Anaerobic Digestion Remediation in Three Full-Scale Biogas Plants through Supplement Additions," *Methane*, vol. 2, no. 3, pp. 265–278, Jul. 2023, doi: 10.3390/methane2030018.
- [33] O. A. Aworanti *et al.*, "Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review," *Front. Energy Res.*, vol. 11, p. 1170133, Jun. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1170133.
- [34] S. Xie *et al.*, "Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 498–512, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.015.
- [35] A. Sikora, A. Detman, A. Chojnacka, and M. K. Blaszczyk, "Anaerobic Digestion: I. A Common Process Ensuring Energy Flow and the Circulation of Matter in Ecosystems. II. A Tool for the Production of Gaseous Biofuels," in *Fermentation Processes*, A. F. Jozala, Ed., InTech, 2017. doi: 10.5772/64645.
- [36] Q. Cao, S. Mills, and G. Wu, "Microbial Ecology of Anaerobic Digestion," in *Anaerobic Digestion*, G. Wu, Ed., in Green Energy and Technology. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 57–81. doi: 10.1007/978-3-031-69378-6_4.
- [37] F. Yin, J. Ji, and W. Zhang, "Co-Production of Hydrogen and Methane by Anaerobic Digestion," in *Methanogens - Unique Prokaryotes*, S. Aydin, Ed., IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1007305.
- [38] R. K. Thauer, "Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson:1998 Marjory Stephenson Prize Lecture," *Microbiology*, vol. 144, no. 9, pp. 2377–2406, Sep. 1998, doi: 10.1099/00221287-144-9-2377.
- [39] T.-J. Ao, C.-G. Liu, Z.-Y. Sun, X.-Q. Zhao, Y.-Q. Tang, and F.-W. Bai, "Anaerobic digestion integrated with microbial electrolysis cell to enhance biogas production and upgrading in situ," *Biotechnol. Adv.*, vol. 73, p. 108372, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108372.
- [40] M. T. Valentin, D. Ciolkosz, and A. Białowiec, "Influence of inoculum-to-substrate ratio on biomethane production via anaerobic digestion of biomass," *Environ. Microbiol. Rep.*, vol. 16, no. 6, p. e70009, Dec. 2024, doi: 10.1111/1758-2229.70009.
- [41] H. Ali Adannou and B. Ibrahim Mahamat, "State of the Art of Bioreactor Technology and Mathematical Dimensioning Equations for Biogas Production," *Am. J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2025, doi: 10.12691/ajmse-13-1-1.
- [42] C. C. Nnaji, "A review of the upflow anaerobic sludge blanket reactor," *Desalination Water Treat.*, vol. 52, no. 22–24, pp. 4122–4143, Jun. 2014, doi: 10.1080/19443994.2013.800809.
- [43] Q. Lu, B. Jeong, S. Lai, G. Li, and J. Liu, "Enhanced startup of full-scale IC reactor treating high-salt fatty acid wastewater," *DESALINATION WATER Treat.*, vol. 219, pp. 178–186, 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.26836.
- [44] S. O'Connor, E. Ehimen, S. C. Pillai, A. Black, D. Tormey, and J. Bartlett, "Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 139, p. 110580, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110580.
- [45] A. Ijaola *et al.*, "Biogas Production, Upgrading, and Utilization: A Comprehensive Review," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 17, 2024, doi: 10.5455/jeas.2024010502.
- [46] H. Sun, L. Zhang, and Y. Liu, "Bioreactor Principles for Anaerobic Digestion," in *Anaerobic Digestion*, G. Wu, Ed., in Green Energy and Technology. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 261–295. doi: 10.1007/978-3-031-69378-6_13.
- [47] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. P. Minh, and N. Lyczko, "A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies," *Waste Biomass Valorization*, vol. 8, no. 2, pp. 267–283, Mar. 2017, doi: 10.1007/s12649-016-9826-4.
- [48] M. R. Atelge *et al.*, "A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11515, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132011515.
- [49] G. Piechota, "Biogas/Biomethane Quality and Requirements for Combined Heat and Power (CHP) Units/Gas Grids with a Special Focus on Siloxanes-a Short Review," *Sustain. Chem. Eng.*, pp. 1–10, Sep. 2021, doi: 10.37256/sce.3120221015.
- [50] X. Huang, "The Promotion of Anaerobic Digestion Technology Upgrades in Waste Stream Treatment Plants for Circular Economy in the Context of 'Dual Carbon': Global Status, Development Trend, and Future Challenges," *Water*, vol. 16, no. 24, p. 3718, Dec. 2024, doi: 10.3390/w16243718.
- [51] T. M. Anacleto *et al.*, "Methane yield response to pretreatment is dependent on substrate chemical composition: a meta-analysis on anaerobic digestion systems," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 1240, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-51603-9.

- [52] K. Obileke, G. Makaka, S. Tangwe, and P. Mukumba, "Improvement of biogas yields in an anaerobic digestion process via optimization technique," *Environ. Dev. Sustain.*, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10668-024-04540-6.
- [53] S. Sutthiprapa, S. Towprayoon, C. Chiemchaisri, P. Chairasert, and K. Wangyao, "Performance Comparison between Anaerobic Hybrid Reactor and Anaerobic Continuous Stirred-Tank Reactor for High-Strength Fresh Leachate Treatment," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 33, no. 3, pp. 2307–2315, Feb. 2024, doi: 10.15244/pjoes/174785.
- [54] M. R. Atelge *et al.*, "A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery," *Fuel*, vol. 270, p. 117494, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117494.
- [55] G.-C. Mitraka, K. N. Kontogiannopoulos, M. Batsioulas, G. F. Banias, A. I. Zouboulis, and P. G. Kougiyas, "A Comprehensive Review on Pretreatment Methods for Enhanced Biogas Production from Sewage Sludge," *Energies*, vol. 15, no. 18, p. 6536, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15186536.
- [56] F. R. Amin *et al.*, "Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion," *AMB Express*, vol. 7, no. 1, p. 72, Dec. 2017, doi: 10.1186/s13568-017-0375-4.
- [57] V. Khanh Nguyen *et al.*, "Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge," *Fuel*, vol. 285, p. 119105, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119105.
- [58] B. Shrestha *et al.*, "A Review of Pretreatment Methods to Enhance Solids Reduction during Anaerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludges and the Resulting Digester Performance: Implications to Future Urban Biorefineries," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 24, p. 9141, Dec. 2020, doi: 10.3390/app10249141.
- [59] T. Karupiah and V. Ebenezer Azariah, "Biomass Pretreatment for Enhancement of Biogas Production," in *Anaerobic Digestion*, J. Rajesh Banu, Ed., IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.82088.
- [60] M. Carlsson, A. Lagerkvist, and F. Morgan-Sagastume, "The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 9, pp. 1634–1650, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2012.04.016.
- [61] M. Ye *et al.*, "Improving the stability and efficiency of anaerobic digestion of food waste using additives: A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 316–326, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.244.
- [62] M. Liu, Y. Wei, and X. Leng, "Improving biogas production using additives in anaerobic digestion: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 297, p. 126666, May 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126666.
- [63] A. Elsayed *et al.*, "Application of additives for anaerobic digestion intensification: A comprehensive review on improving biogas production and methane yield," *Appl. Energy*, vol. 381, p. 125202, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.125202.
- [64] K. Obileke, G. Makaka, and N. Nwokolo, "Recent Advancements in Anaerobic Digestion and Gasification Technology," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 9, p. 5597, May 2023, doi: 10.3390/app13095597.
- [65] A. A. Pilarska *et al.*, "Additives Improving the Efficiency of Biogas Production as an Alternative Energy Source—A Review," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4506, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17174506.
- [66] B. W. Gebreegziabher, A. A. Dubale, M. S. Adaramola, and J. Morken, "Advancing Anaerobic Digestion of Biodiesel Byproducts: A Comprehensive Review," *BioEnergy Res.*, vol. 18, no. 1, p. 15, Jan. 2025, doi: 10.1007/s12155-025-10820-4.
- [67] E. Leca, B. Zennaro, J. Hamelin, H. Carrère, and C. Sambusiti, "Use of additives to improve collective biogas plant performances: A comprehensive review," *Biotechnol. Adv.*, vol. 65, p. 108129, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.biotechadv.2023.108129.
- [68] M. S. Romero-Güiza, J. Vila, J. Mata-Alvarez, J. M. Chimenos, and S. Astals, "The role of additives on anaerobic digestion: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1486–1499, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.094.
- [69] L. Ho and G. Ho, "Mitigating ammonia inhibition of thermophilic anaerobic treatment of digested piggery wastewater: Use of pH reduction, zeolite, biomass and humic acid," *Water Res.*, vol. 46, no. 14, pp. 4339–4350, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.watres.2012.05.016.
- [70] Y. Shapovalov, S. Zhadan, G. Bochmann, A. Salyuk, and V. Nykyforov, "Dry Anaerobic Digestion of Chicken Manure: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, p. 7825, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10217825.
- [71] M. Ferdeș, G. Paraschiv, M. Ionescu, M. N. Dincă, G. Moiceanu, and B. Ștefania Zăbavă, "Anaerobic Co-Digestion: A Way to Potentiate the Synergistic Effect of Multiple Substrates and Microbial Diversity," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2116, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16052116.
- [72] F. Cheng, *Biogas production from food-processing industrial wastes by anaerobic digestion*. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2010.
- [73] R. Karki *et al.*, "Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives," *Bioresour. Technol.*, vol. 330, p. 125001, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125001.
- [74] L. D. Nghiem, K. Koch, D. Bolzonella, and J. E. Drewes, "Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: Bottlenecks and possibilities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 354–362, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.062.
- [75] C. Morales-Polo, M. Del Mar Cledera-Castro, and B. Y. Moratilla Soria, "Reviewing the Anaerobic Digestion of Food Waste: From Waste Generation and Anaerobic Process to Its Perspectives," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, p. 1804, Oct. 2018, doi: 10.3390/app8101804.
- [76] D. J. Prasanna Kumar, R. K. Mishra, S. Chinnam, P. Binnal, and N. Dwivedi, "A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends," *Biotechnol. Notes*, vol. 5, pp. 33–49, 2024, doi: 10.1016/j.biotno.2024.02.001.

- [77] A. Elsayed *et al.*, “Enhancing anaerobic digestion Efficiency: A comprehensive review on innovative intensification technologies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 320, p. 118979, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118979.
- [78] M.-L. Thi Nguyen, C.-Y. Lin, and C.-H. Lay, “Microalgae cultivation using biogas and digestate carbon sources,” *Biomass Bioenergy*, vol. 122, pp. 426–432, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.01.050.
- [79] M. Ishfaq, M. Abdullah, and P. Verma, “Biotransformation of wastewater-grown algal biomass to biogas,” in *Algae Biotechnology*, Elsevier, 2026, pp. 171–190. doi: 10.1016/B978-0-443-34063-5.00018-0.
- [80] X. Zheng and R. Li, “Critical Review on Two-Stage Anaerobic Digestion with H₂ and CH₄ Production from Various Wastes,” *Water*, vol. 16, no. 11, p. 1608, Jun. 2024, doi: 10.3390/w16111608.
- [81] E. Holl *et al.*, “Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems,” *Bioresour. Technol.*, vol. 360, p. 127633, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127633.
- [82] N. Raja Ram and G. N. Nikhil, “A critical review on sustainable biogas production with focus on microbial-substrate interactions: bottlenecks and breakthroughs,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 19, p. 101170, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101170.
- [83] G. Zhen *et al.*, “Anaerobic membrane bioreactor towards biowaste biorefinery and chemical energy harvest: Recent progress, membrane fouling and future perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, p. 109392, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109392.
- [84] M. Zielińska and A. Ojo, “Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBRs) for Wastewater Treatment: Recovery of Nutrients and Energy, and Management of Fouling,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2829, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062829.
- [85] F. Bu, S. Du, L. Xie, R. Cao, and Q. Zhou, “Swine manure treatment by anaerobic membrane bioreactor with carbon, nitrogen and phosphorus recovery,” *Water Sci. Technol.*, vol. 76, no. 8, pp. 1939–1949, Oct. 2017, doi: 10.2166/wst.2017.278.
- [86] M. A. Voelklein, D. Rusmanis, and J. D. Murphy, “Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion,” *Appl. Energy*, vol. 235, pp. 1061–1071, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.006.
- [87] M. M. Amin, A. Arvin, A. Feizi, B. Dehdashti, and A. Torkian, “Meta-analysis of bioenergy recovery and anaerobic digestion in integrated systems of anaerobic digestion and microbial electrolysis cell,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 178, p. 108301, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.bej.2021.108301.
- [88] A. Tamborrino, F. Catalano, A. Leone, and B. Bianchi, “A Real Case Study of a Full-Scale Anaerobic Digestion Plant Powered by Olive By-Products,” *Foods*, vol. 10, no. 8, p. 1946, Aug. 2021, doi: 10.3390/foods10081946.
- [89] M. S. Ahmmed, M. B. Jensen, M. V. W. Kofoed, L. D. M. Ottosen, and D. J. Batstone, “Hydrodynamic analysis of full-scale in-situ biogas upgrading in manure digesters,” *Water Res.*, vol. 203, p. 117528, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.watres.2021.117528.
- [90] K. Bowman *et al.*, “Performance Characteristics of a Pilot-Scale Electromethanogenic Reactor Treating Brewery Wastewater,” *Energies*, vol. 18, no. 11, p. 2939, Jun. 2025, doi: 10.3390/en18112939.
- [91] M. Ellacuriaga, J. G. Cascallana, R. González, and X. Gómez, “High-Solid Anaerobic Digestion: Reviewing Strategies for Increasing Reactor Performance,” *Environments*, vol. 8, no. 8, p. 80, Aug. 2021, doi: 10.3390/environments8080080.
- [92] A. Francisco López, T. Lago Rodríguez, S. Faraji Abdolmaleki, M. Galera Martínez, and P. M. Bello Bugallo, “From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, p. 2342, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14062342.
- [93] O. Sengur, D. Akgul, and B. Calli, “In situ methane enrichment with vacuum application to produce biogas with higher methane content,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, Jun. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33881-y.
- [94] N. Kythreoutou, G. Florides, and S. A. Tassou, “A review of simple to scientific models for anaerobic digestion,” *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 701–714, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.055.
- [95] X. Liu, A. Coutu, S. Mottelet, A. Pauss, and T. Ribeiro, “Overview of Numerical Simulation of Solid-State Anaerobic Digestion Considering Hydrodynamic Behaviors, Phenomena of Transfer, Biochemical Kinetics and Statistical Approaches,” *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1108, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16031108.
- [96] R. Gupta *et al.*, “Review of explainable machine learning for anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 369, p. 128468, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128468.
- [97] D. J. Batstone *et al.*, “The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1),” *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, 2002.
- [98] J. Lauwers, L. Appels, I. P. Thompson, J. Degreève, J. F. Van Impe, and R. Dewil, “Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 383–402, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.pecs.2013.03.003.
- [99] R. Mo, W. Guo, D. Batstone, J. Makinia, and Y. Li, “Modifications to the anaerobic digestion model no. 1 (ADM1) for enhanced understanding and application of the anaerobic treatment processes – A comprehensive review,” *Water Res.*, vol. 244, p. 120504, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.120504.
- [100] A. Adamu and E. Aluyor, “Empirical Model for Predicting Rate of Biogas Production,” *Glob. J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 1, pp. 63–68, Sep. 2013, doi: 10.4314/gjer.v12i1.7.
- [101] B. Velázquez-Martí, O. W. Meneses-Quelal, J. Gaibor-Chavez, and Z. Niño-Ruiz, “Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process,” in *Anaerobic Digestion*, J. Rajesh Banu, Ed., IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80815.

- [102] G. Wu, H. Chang, and B. Du, "Kinetic Modelling of Typical Biological Reactions During Anaerobic Digestion," in *Anaerobic Digestion*, G. Wu, Ed., in Green Energy and Technology, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 203–223. doi: 10.1007/978-3-031-69378-6_11.
- [103] A. Chai *et al.*, "Haldane-Andrews substrate inhibition kinetics for pilot scale thermophilic anaerobic degradation of sugarcane vinasse," *Bioresour. Technol.*, vol. 336, p. 125319, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125319.
- [104] T. Kunatsa and X. Xia, "A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement," *Bioresour. Technol.*, vol. 344, p. 126311, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126311.
- [105] H. Yang, L. Deng, G. Liu, D. Yang, Y. Liu, and Z. Chen, "A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater," *Water Res.*, vol. 102, pp. 464–474, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2016.06.060.
- [106] F. Walid, S. El Fkihi, H. Benbrahim, and H. Tagemouati, "Modeling and Optimization of Anaerobic Digestion: A Review," *E3S Web Conf.*, vol. 229, p. 01022, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202122901022.
- [107] G. A. Dumitrel, A. E. Cioabla, I. Ionel, and L. A. Varga, "Experimental and Modelling Approach of Biogas Production by Anaerobic Digestion of Agricultural Resources," *Rev. Chim.*, vol. 68, no. 6, pp. 1294–1297, Jul. 2017, doi: 10.37358/RC.17.6.5660.
- [108] O. H. Galal, M. M. Abdel-Daiem, H. S. Alharbi, and N. Said, "Mathematical modeling and machine learning approaches for biogas production from anaerobic digestion: A review," *BioResources*, vol. 20, no. 4, Sep. 2025, doi: 10.15376/biores.20.4.Galal.
- [109] J. Y. X. Ling *et al.*, "Machine learning methods for the modelling and optimisation of biogas production from anaerobic digestion: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 13, pp. 19085–19104, Feb. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-32435-6.
- [110] M. R. Dobbelaere, P. P. Plehiers, R. Van De Vijver, C. V. Stevens, and K. M. Van Geem, "Machine Learning in Chemical Engineering: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats," *Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 1201–1211, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.eng.2021.03.019.
- [111] N. L. Rane, S. K. Mallick, Ö. Kaya, and J. Rane, "Applications of machine learning in healthcare, finance, agriculture, retail, manufacturing, energy, and transportation: A review," in *Applied Machine Learning and Deep Learning: Architectures and Techniques*, Deep Science Publishing, 2024. doi: 10.70593/978-81-981271-4-3_6.
- [112] V. K. Thatikonda, "MACHINE LEARNING IN SOFTWARE ENGINEERING: PRACTICAL APPLICATIONS AND IMPACT ON THE MODERN SOFTWARE INDUSTRY," *Int. J. Artif. Intell. Mach. Learn.*, vol. 2, no. 01, pp. 35–43, 2023.
- [113] O. Yildirim and B. Ozkaya, "Prediction of biogas production of industrial scale anaerobic digestion plant by machine learning algorithms," *Chemosphere*, vol. 335, p. 138976, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138976.
- [114] K. M. C. Tjørve and E. Tjørve, "The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 6, p. e0178691, Jun. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0178691.
- [115] A. Fagerström, *The role of anaerobic digestion and biogas in the circular economy*. Dublin: IEA Bioenergy, 2018.
- [116] E. Mancini and A. Raggi, "A review of circularity and sustainability in anaerobic digestion processes," *J. Environ. Manage.*, vol. 291, p. 112695, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112695.
- [117] V. Venugopal, "Green processing of seafood waste biomass towards blue economy," *Curr. Res. Environ. Sustain.*, vol. 4, p. 100164, 2022, doi: 10.1016/j.crsust.2022.100164.
- [118] R. Shinde *et al.*, "Dynamic anaerobic digestion-based biorefineries for on-demand renewable energy and bioproducts in a circular bioeconomy," *Trends Biotechnol.*, vol. 43, no. 5, pp. 1140–1165, May 2025, doi: 10.1016/j.tibtech.2025.01.005.
- [119] A. Alengebawy, Y. Ran, A. I. Osman, K. Jin, M. Samer, and P. Ai, "Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 2641–2668, Dec. 2024, doi: 10.1007/s10311-024-01789-1.
- [120] W. G. Sganzerla, M. Tena-Villares, L. S. Buller, S. I. Mussatto, and T. Forster-Carneiro, "Dry Anaerobic Digestion of Food Industry by-Products and Bioenergy Recovery: A Perspective to Promote the Circular Economy Transition," *Waste Biomass Valorization*, vol. 13, no. 5, pp. 2575–2589, May 2022, doi: 10.1007/s12649-022-01682-4.
- [121] R. Millati, R. Wikandari, T. Ariyanto, N. Hasniah, and M. J. Taherzadeh, "Anaerobic digestion biorefinery for circular bioeconomy development," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 21, p. 101315, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101315.
- [122] E. Molina-Peñate, A. Artola, and A. Sánchez, "Exploring biorefinery alternatives for biowaste valorization: a techno-economic assessment of enzymatic hydrolysis coupled with anaerobic digestion or solid-state fermentation for high-value bioproducts," *Bioengineered*, vol. 15, no. 1, p. 2307668, Dec. 2024, doi: 10.1080/21655979.2024.2307668.