

## Gıda Atıklarının Fermentasyon Ortamı Olarak Kullanıldığı Anaerobik Parçalanma Yöntemi Üzerine Bir İnceleme

Mine Nazan KERİMAK ÖNER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bölümü, 41285, Kartepe/Kocaeli

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-2286-6289>

\*Sorumlu yazar: mine@kocaeli.edu.tr

### Derleme

### ÖZ

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 02.09.2022

Kabul tarihi: 20.12.2022

Online Yayınlanma: 05.07.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Biyokütle

Gıda atığı

Oksijensiz parçalanma

Biyo-enerji

Biyo-yakıt

Metan

Anaerobik parçalanma (AD), organik atıkları biyo-enerjiye dönüştürme potansiyeline sahip, enerji krizi ve atık imha sorununa çözüm üretirken, çevre kirliliği kontrolünü de sağlayan yenilikçi ve sürdürülebilir bir teknolojidir. Günümüzde geleneksel imha yöntemleri ile muamele edilen gıda atıkları ciddi bir çevre problemi ve maliyet oluşturmaktadır. Gıda atıkları biyo-gaz üretimi için ideal substrattırlar. Ancak bu atıkların karışık kimyasal yapıları ve heterojeniteleri AD prosesinde biyo-dönüşümlerini zorlaştırmakta ve süreçte teknik problemler yaratmaktadır. Bu nedenle gıda atıklarının AD prosesi ile atık yönetim sistemine kazandırılması güçleşmektedir. Gıda atıklarının AD sürecinde yer alan temel biyolojik ve fizikokimyasal süreçlerinin geliştirilmesinin gerekliliği, hem bu atıkların sürdürülebilir şekilde yöntemde kullanılabilmesi hem de prosesin geliştirilebilmesi amacıyla hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, gıda atıklarının biyokütle kaynakları arasındaki yeri işaret edilerek, miktar, bileşim ve metan üretim potansiyelleri tartışılmıştır. Birlikte çürütme, mikro-besin ilavesi, köpük kontrolü ve proses dizaynı gibi değişik stratejiler varlığında gerçekleştirilen gıda atıkları varlığındaki tek ve çift aşamalı AD süreçlerinin verimlilikleri de karşılaştırılmıştır.

## A Review of Anaerobic Digestion Method Using Food Waste as Fermentation Medium

### Reviews

#### Article History:

Received: 02.09.2022

Accepted: 20.12.2022

Published online: 05.07.2023

#### Keywords:

Biomass

Food waste

Anaerobic digestion

Bio-energy

Bio-fuel

Methane

### ABSTRACT

Anaerobic digestion (AD) is an innovative and sustainable technology that has the potential to convert organic wastes into bio-energy while providing solutions to the energy crisis and waste disposal problem and controlling environmental pollution. Today, food wastes treated with traditional disposal methods constitute a serious environmental problem and cost. Food waste is the ideal substrate for biogas production. However, the mixed chemical structures and heterogeneity of these wastes complicate their bioconversion in the AD process and create technical problems in the process. For this reason, it becomes difficult to bring food waste into the waste management system with the AD process. The necessity of developing the basic biological and physicochemical processes of food wastes in the AD process is of vital importance both for the sustainable use of these wastes in this method and for the development of the process. In this study, the place of food waste among biomass sources has been pointed out and the quantity, composition, and methane potential of this waste have been discussed. The efficiency of one- and two-stage AD processes in the presence of food waste was compared in the presence of different strategies including co-digestion, the addition of micronutrients, control of foaming, and process design.

**To Cite:** Öner MNK. Gıda Atıklarının Fermentasyon Ortamı Olarak Kullanıldığı Anaerobik Parçalanma Yöntemi Üzerine Bir İnceleme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(2): 1713-1741.

## 1. Giriş

Günümüz dünyasının en önemli problemlerinden bir tanesi de hızla artan nüfusa paralel olarak gerçekleşen katı atık miktarındaki dramatik yükseliştir. Nüfus artışı artan gıda, besin, yakıt ve çeşitli değerli ürünlerin üretimine olan ihtiyaç ile birlikte bu ürünlerin üretilebilmeleri için gerekli hammadde gereksinimini de beraberinde getirmiştir (Venkata ve ark., 2016; Maina ve ark., 2017). Nüfus artışı ile birlikte artan tüketim sonucu üretilen atık miktarındaki hızlı yükseliş beraberinde çevreci ve sürdürülebilir atık yönetimi politikalarının uygulanabilirliğinin yollarını gösteren aynı zamanda da teknik ve biyolojik yöntemleri barındıran geri dönüşüm teknolojilerine dikkatlerin toplanmasına neden olmuştur (EC, 2011; Maina ve ark., 2017; Vea ve ark., 2018). Yeni dünyada yeşil ekonomi; modern geri dönüşüm teknolojilerini içeren, çevre ve insan sağlığına saygılı, katı atık miktarındaki artışı geri dönüşüm teknolojileri ile değerlendirerek katma değerli son ürünlere dönüştüren, “düşük karbon salımlı, kaynağında etkin, ekolojik ve çevresel zararları indirgeyen ve sosyo-ekonomik ayrıntıları” içeren biyo-ekonomik sistem olarak tanımlanmaktadır (Scarlat ve ark., 2015; Gwak ve ark., 2018).

Yeşil ekonominin merkezinde yer alan ana temalardan bir tanesi de “geri dönüşümü mümkün atık” olarak isimlendirilen hammaddelerden biyoteknolojik yöntemler vasıtasıyla hayvan yemi, gübre, biyo-malzeme, kağıt ve biyo-yakıt gibi katma değerli son ürünlerin üretilmelerine ait yöntemlerin AR-GE basamaklarının geliştirilmesi ve yeniliklerinin oluşturulmasıdır (Scarlat ve ark., 2015).

Bu yenilikçi süreçte geri dönüşümü mümkün atık sınıfında kendine hızlıca yer bulmaya başlayan gıda atıkları, katı atık sınıfında yer alan ve kentsel atıkların organik parçası olarak isimlendirilen endüstriyel ve tehlikeli atık sınıfına girmeyen katı atıklar olarak tanımlanmaktadır (Bilgili, 2020). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) yaptığı tanıma göre gıda atığı, insan tüketimi için hazırlanmış fakat tüketilmeden atılmış organik atık anlamına gelmektedir. FAO gıda üretiminin ilk basamağından başlayıp tüketiminin son aşamasına kadar ortaya çıkan gıda kaybının ve israfının dünyada her yıl üretilen toplam gıda miktarının 1/3'ünü oluşturduğunu ve bu israfın ekonomik değerinin 900 milyar dolara karşılık geldiğini bildirmiştir (Kırmızıkuşak ve Yücel, 2021; Tekiner ve ark., 2021).

Yarattığı çevre kirliliği açısından bakıldığında gıda atıklarının, su ve toprak kirliliğine neden olmalarının yanında depolama alanlarında gerçekleşen kontrolsüz ayrışma ve çürüme süreci sonunda oluşan sera gazlarının atmosfere serbest bırakıldığı ve özellikle yakılmalarının da önemli ölçüde hava kirliliğine sebep olduğu bilinmektedir (Demirarslan, 2020). Herhangi bir muamele yöntemine tabii tutulmaksızın çöplüklere terk edilen 1 ton gıda atığı 4,5 ton karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonuna neden olmaktadır (Uçkun Kıran ve ark., 2015). Atık miktarının kaynağında azaltılması tüm dünyada benimsenen temel ilke olup önlenemeyen gıda atıklarının son basamak olan geri dönüşüm aşamasında faydalı ürünlere dönüştürülmesi günümüz küresel atık yönetim sistemlerinde benimsenen ilke olmuştur (Rocamora ve ark., 2020). Gıda atıklarının yakma, kompostlama ve toprağa gömme gibi geleneksel yöntemler ile imha edilmelerinin negatif çevresel etkileri göz önüne alındığında, enerjice zengin

materyal içeren bu atıklar için hem etkili atık muamelesi yöntemi hem de yenilenebilir enerji elde yöntemi olarak AD teknolojisi önerilmektedir (Xu ve ark., 2018).

Biyokütle; organik atıkların birçok türünden üretilebilen, fosil kaynaklara alternatif, gıda, hayvan yemi ve biyo-plastik, biyo-malzeme ve biyo-enerji gibi ürünlere dönüştürülebilen alternatif ve sürdürülebilir bir kaynaktır (Popp ve ark., 2021). Biyokütle kaynakları arasında ormancılık atıklarının ardından ikinci sırada yer alan gıda atıkları insani faaliyetler sonucu üretilen belediye katı atıklarının organik fraksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Braguglia ve ark., 2018). Biyokütlenin hammadde olarak kullanıldığı biyolojik ve termokimyasal dönüşüm teknolojilerini barındıran biyo-rafineri modeli vasıtasıyla iki tanesi enerji ile ilgili olmak üzere üç ana ürün elde edilebilmektedir. AD süreci ise biyo-gaz üretiminin gerçekleştirildiği biyokimyasal dönüşüm teknolojileri yöntemlerinden bir tanesidir (Yang ve ark., 2013; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Braguglia ve ark., 2018).

Küresel boyutta yıllık olarak üretilen yaklaşık iki milyar ton belediye katı atık miktarının %34-53'ünü biyolojik olarak parçalanabilen ve ev-restoran mutfaklarından atılan organik atıklar oluşturmakta ve bu oranın %90'ının geri dönüştürülebilme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Toplanan bu organik atıklar genellikle %74-90 arasında nem, %85 yüksek uçucu katı bileşenine ve ortalama olarak 5,1 pH değerine sahiptirler. Tipik bir gıda atığı temel olarak; parçalanabilir karbonhidratlar (%41-62), proteinler (%15-25), yağlar (%13-30), organik asitler ve küçük miktarlarda da inorganik kalıntıları içermektedir (Karthikeyan ve ark., 2018). İnsani tüketim için hazırlanan gıdaların gıda temin zincirinde atık haline dönüştüğü beş aşama tarif edilmektedir. Bu modelde yer alan aşamalar sırasıyla 1) tarımsal üretim 2) hasat sonrası 3) saklama aşaması 4) gıda işleme basamağı 5) dağıtım ve tüketim aşamalarıdır. Yapılan küresel tahminlere göre; 2025 yılına kadar sayılan bu aşamalardan yaklaşık olarak yılda  $2,5 \times 10^9$  ton gıda atığının üretilmesi beklenmektedir. Gıda atık miktarının azaltılıp önlenemeyen atık miktarının da ekonomik değer kazandıracak şekilde değerlendirilmesi ancak etkin ve yeterli bir atık yönetim sistemi ağının kurulması ve uygulamaya konulmasının gerekliliğini de işaret etmektedir (Pham ve ark., 2015; Thi ve ark., 2015; Xu ve ark., 2018).

Günümüzde içerdiği yüksek miktardaki nem, yüksek miktarda organik madde ve besin maddesi içeriği ve yüksek biyobozunabilirlik gibi sebeplerden dolayı gıda atıklarının biyo-metan üretiminin gerçekleştirildiği AD süreçlerinde katma değerli biyokütle kaynağı olarak kullanılabilmesinin yolları değerlendirilmektedir (Xiao ve ark., 2018). AD teknolojisi atık suların, kanalizasyon atıklarının ve hayvan gübresi atıklarının arıtılmasında geniş uygulama alanına sahip ve uygulama koşulları iyi bilinen bir yöntemdir. Buna karşılık gıda atıklarının AD prosesinde kullanılması durumunda süreçte, stabiliteye etki eden toksik madde birikimi, köpüklenme, düşük tamponlama kapasitesi vb. gibi faktörler ortaya çıkmaktadır. Bu faktörlerin varlığı nedeniyle oluşan teknik problemler yöntemin gıda atıklarının AD prosesinde substrat olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Xu ve ark., 2018). AD prosesi hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez olmak üzere dört basamakta gerçekleşmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde gıda atıklarının AD prosesine substrat olarak kazandırılması amacıyla dezavantajlı tek aşamalı prosese alternatif olarak iki farklı reaktörde

gerçekleştirilen ve çift aşamalı proses olarak tanımlanan yöntemin uygulama koşullarının geliştirilmesi yollarının araştırıldığı gözlemlenmektedir. Bu yöntemde hidroliz, asidojenez ve asetojenez basamaklarının birinci reaktörde, metan (CH<sub>4</sub>) üretiminin gerçekleştiği dördüncü ve son basamak olan metanojenez basamağının ise ikinci reaktörde gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Önerilen yöntemin kullanılması suretiyle gıda atıklarının sahip oldukları bileşimleri sebebiyle uygulamada ortaya çıkan ve proses stabilitesine etki eden olumsuz faktörlerin önüne geçilerek bu atık çeşidinin arıtılmasında ve atıktan enerji eldesinde AD sürecinin kullanılmasının mümkün olabileceği belirtilmektedir (De-Gioannis ve ark., 2017). Çift aşamalı AD koşullarının iyileştirilmesi suretiyle her bir aşamada farklı çevresel ihtiyaçları gösteren mikrobiyal topluluğun ayrı ayrı ihtiyaçları karşılanacak bu yolla da sistem stabilitesi sağlanarak gıda atıklarının substrat olarak kullanıldığı AD verimliliği artırılabilir (Xiao ve ark., 2018). Bu amaçla, bir süredir tek ve çift aşamalı sistemlerin avantajlarını ve dezavantajlarını tartışan ve her iki sürecin de geliştirilmesi adına yapılan çeşitli araştırmalar literatürde gözlemlenmektedir (De-Gioannis ve ark., 2017).

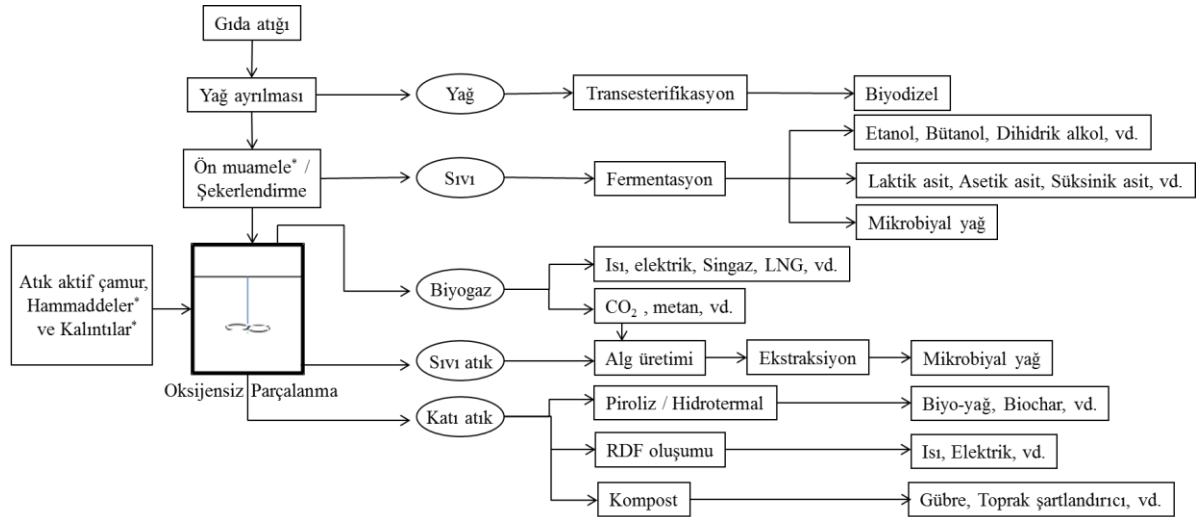
Bu çalışmada, Avrupa'da çeşitli biyokütle kaynaklarından enerji üretimi amacıyla yaygın olarak kullanılan ve ülkemiz için de ümit vaat eden bir biyolojik geri dönüşüm teknolojisi olan AD sürecinin ev, kafeterya ve restoran gibi benzer kaynaklar tarafından üretilen gıda atıklarının hammadde olarak kullanıldığı AD prosesine uygulanması ve uygulama sırasında karşılaşılan teknik problemler ve bu problemlerin giderim yöntemleri literatür bilgileri ışığında tartışılmıştır.

## **2. Gıda Atıklarının Değerlendirilme Yöntemleri**

Günümüz araştırmacıları metan fermentasyonu ile biyo-rafineri teknolojilerini birleştirerek süreci destekleyen substratlardan değerli son ürünlerin eldesi yöntemlerini 4 basamaklı biyo-rafineri modeli ile tarif etmişlerdir. Ren ve ark., (2018) tarafından önerilen biyo-rafineri modelinde sıfır sera gazı emisyonu ile birçok katma değerli son ürünün elde edilebilmesi mümkündür. Şekil 1 Ren ve ark. tarafından tarif edilen biyo-rafineri modelini göstermektedir.

Bu modelde yer alan 1. basamak; ön muamele, 2. basamak; zengin içerikli kaynak: gıda atıklarından hidrojen, laktik asit, asetik asit, etanol, bütanol, vd. üretimi, 3. basamak; biyo-metanizasyon: bir önceki procesten elde edilen hidrolizattan oksijensiz parçalanma yöntemi ile metan üretimi 4. basamak; CO<sub>2</sub> tutan mikroalgler: AD sürecinde üretilen CO<sub>2</sub> ve hidrolizatın organik bileşenlerinin ikili karbon kaynağı olarak kullanıldığı, mikroalglerin büyüme hızının artırılarak yağ ya da nişasta son ürünlerinin elde edildiği basamaktır (Ren ve ark., 2018).

Şekil 1'de verilen biyo-rafineri modelinin bir parçası olan oksijensiz parçalanma teknolojisi, biyobozunabilir organik atıkların aktif çamur ile birlikte kontrollü pH, sıcaklık ve uygun bakteri topluluğu varlığında oksijensiz koşullar altında gerçekleştirilen ve biyo-gaz üretimi için kabul gören biyolojik dönüşüm teknolojisidir. Yöntemin işlem maliyetinin düşük olması, süreç sonunda oluşan düşük atık miktarı ve birçok katma değerli ürünün üretilmesi prosesin yenilenebilir enerji üretiminde önünü açmaktadır (Nayak ve Bhushan, 2019).



**Şekil 1.** Gıda atıklarının faydalı son ürünlere dönüşüm teknolojileri; biyo-rafineri modeli (Ren ve ark., 2018)

Son yıllarda gıda atıkları sahip oldukları metan gazı üretim potansiyeli nedeniyle AD proseslerinde hammadde olarak tercih edilmeye başlamıştır. AD sürecinde substrat olarak kullanılan gıda atığının nem, uçucu katı (UK) ve besin bileşenleri gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerinin anaerobik sürecin performansında etkili olduğu bilinmektedir (Chen ve ark., 2008). Gıda atıklarının toplam katı (TK) içerikleri sıvıdan katıya %2'den az %90'dan fazla olacak şekilde değişmektedir. Gıda atığının UK/TK olarak ifade edilen organik oranının %90 civarında olması atığın AD prosesine uygulanabilirlik potansiyelinin çok yüksek olduğunu ifade etmektedir (Li ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2017). Ancak bu atık türünün birçoğu (süt ve süt ürünleri hariç, pH 6-11) reaktör alkalinitesini bozan ve AD süreci üzerinde negatif etki yaratan asidik ve zayıf asidik pH (3,3-6) değerine sahiptir. Bu sebeple süreçten optimum işlem veriminin alınabilmesi amacıyla her bir spesifik gıda atığı için farklı koşullara sahip AD sürecinin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır (Xu ve ark., 2018).

Xu ve ark., (2018)'nın gıda atıklarının AD süreci ile ilgili literatür incelemesinde, gıda atıklarının metan üretim potansiyelinin AD prosesinde sıklıkla kullanılan lignosellülozik biyokütle, hayvan atıkları, kanalizasyon çamuru gibi atıklardan daha yüksek olduğunu ve gıda atıklarının her bir türünün en yüksek metan üretim potansiyelinin 0,3-1,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgUK<sub>eklenen</sub> aralığında bulunduğunu Mao ve ark., (2015)'nin rapor ettiklerini bildirmişlerdir. Zupancic ve Jemec, (2010) tarafından tüm gıda atık türleri arasında bitkisel yağ, hayvansal yağ ve grease (FOG) içeren atıkların 1,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgUK değeri ile en yüksek metan üretim potansiyeline sahip olduğunu ayrıca teorik yağ içeriği yüksek olan bu atık türünün karbonhidrat (0,37 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgUK glukoz için) ve protein (0,74 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgUK) içeren atıklara kıyasla AD prosesinde tercih edilen tür olduğunun rapor edildiği yine Xu ve ark.'nın derleme çalışmasında bildirilmiştir.

Mata-Alvarez ve ark., (2000) tarafından ev ve restoran atıklarının bir diğer yüksek metan üretim içeriğine sahip gıda atık türü olduğu ve bu atık türünün bağıl olarak yüksek yağ ile dengeli besin maddesi içeriğine sahip olması nedeniyle AD prosesinde karbonhidrat ve proteinlerin hızlıca

gerçekleşen hidroliz sürecinin düşük hidroliz hızına sahip yağlar tarafından dengelenmesi suretiyle CH<sub>4</sub> veriminin arttırıldığını bildirmişlerdir. Meng ve ark. (2015) “AD prosesinde yağdan zengin atıklarla birlikte aynı zamanda kolayca hidrolizlenebilen karbonhidratları bulunduran gıda atıkları (kullanılmış yağ, dondurma vb.) varlığında yüksek metan verimiyle çalışılabilmektedir” diyerek Mata-Alvarez ve ark. tarafından bildirilen görüşü desteklemişlerdir. Mata-Alvarez ve ark. ile Meng ve ark.’nın çalışma sonuçlarının raporları Xu ve ark., (2018) tarafından yapılan derleme çalışmasından alınmıştır. Xu ve ark., (2018) ise yüksek lignosellülozik madde ve düşük lipid içeriği ile meyve ve sebze atıklarının en düşük metan üretim potansiyeline (0,16-0,35 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kgUK aralığında) sahip gıda atık türü olduğunu belirtmişlerdir.

### **3. Biyolojik Dönüşüm Teknolojisi; Oksijensiz Parçalanma (AD)**

Biyo-metanizasyon olarak da isimlendirilen oksijensiz parçalanma yöntemi, düşük maliyetli ve az miktarda atık oluşturan, atık birikiminin çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini indirgeme potansiyeline sahip önemli bir sürdürülebilir enerji elde yöntemidir (Deng ve ark., 2016). Depolama alanlarında kontrolsüz şartlarda bekletilen organik atıklar, biyo-gaz olarak isimlendirilen ve ana miktarda CH<sub>4</sub> ve yanında CO<sub>2</sub> içeren eser miktarda da azot (N<sub>2</sub>), oksijen (O<sub>2</sub>) ve hidrojen sülfid (H<sub>2</sub>S) bulunduran atık gazları atmosfere çevre kirleticisi olarak serbest bırakır. Aynı süreç kontrollü koşullar altında ve oksijensiz ortamda gerçekleştirildiğinde organik atıklar biyo-gaz ve besin maddesi açısından zengin gübre gibi kullanışlı son ürünlere dönüştürülebilmektedir. AD ile enerji üretimi besin döngüsünü mümkün kılarak atık hacmini indirger. Yöntem aynı zamanda düşük karbon emisyonu ve sınırlı miktarda çevre kirliliği oluşturmak gibi önemli avantajlara da sahiptir (Banks ve ark., 2011; Dung ve ark., 2014; Hafid ve ark., 2017).

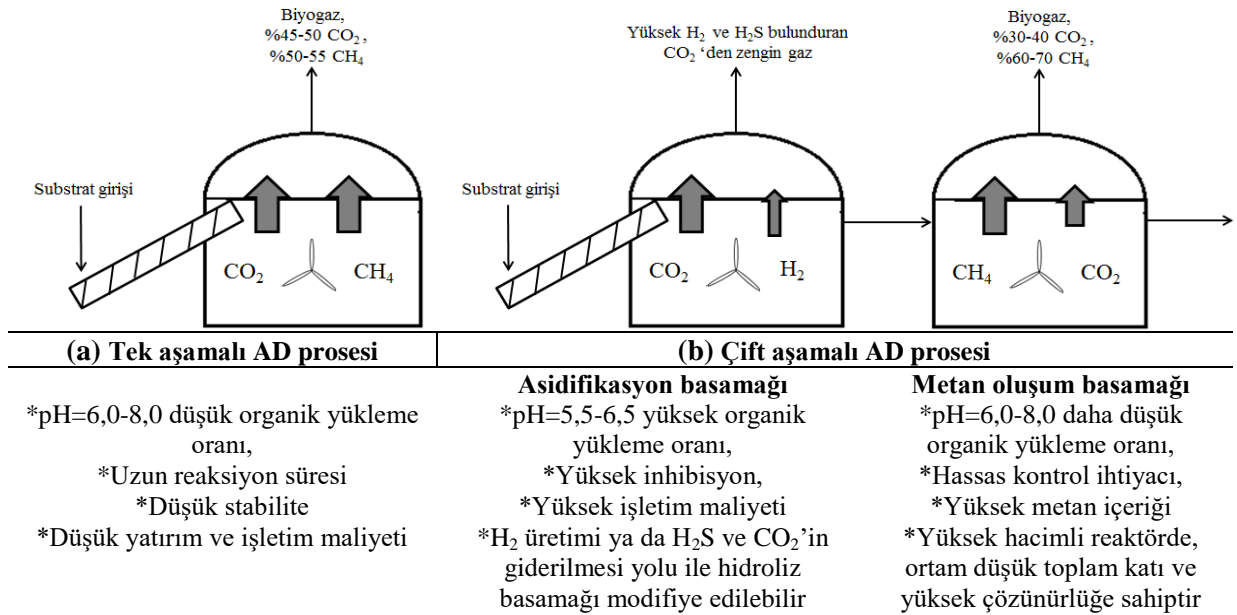
Süreçte üretilen biyo-gazın enerji değerini gazın içeriğindeki CH<sub>4</sub> miktarı belirlemektedir (Nayak ve Bhushan, 2019). Biyo-gaz %60 CH<sub>4</sub> ve %40 CO<sub>2</sub> içeriğine sahip olup içeriğindeki yüksek CH<sub>4</sub> oranı gaz üretimi sırasında oluşan düşük CO<sub>2</sub> miktarı anlamına gelmektedir (Hafid ve ark., 2017, Ren ve ark., 2018). Kimyasal absorpsiyon, membran seperasyonu vb. yöntemler ile safsızlıkların giderilmesi de üretilen biyo-yakıtın enerji değerini yükseltmektedir (Nayak ve Bhushan, 2019).

AD sürecinde evsel katı atıkların kullanıldığı tesisler birçok prosesin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Atıktan elde edilecek ürünlerin miktar ve kalitesini atığın bileşimi, yapısı ve tercih edilen reaktör tasarımı belirlemektedir. Seçilen reaktör tasarımı gerekli ön-arıtma (manyetik tambur, döner tambur, parçalama, eleme, hamurlaştırma, çöktürme ve pastörizasyon) ve son-arıtma (biyo-gaz iyileştirme, fermente ürün susuzlaştırma ve ıslak mekanik ayırım) ihtiyaçlarının da belirleyicisidir. Evsel organik atıkların oksijensiz ortamda arıtıldığı reaktörler içerdikleri katı madde yüzdesine (ıslak ve kuru sistemler), aşama sayısına (tek ve çift aşamalı) ve prosesin gerçekleştirildiği işletme sıcaklığına (mezofilik ve termofilik sistemler) göre sınıflandırılmaktadırlar (Rocamora ve ark., 2020; Yıldız ve ark., 2019).

Pilot ve ticari AD reaktörlerinin tasarımı 1950'li yılların başında başlamış ve yöntem dünya çapında ilgi kazanmıştır (Braguglia ve ark., 2018). Günümüzde AD sürecinde farklı tiplerde reaktörler kullanılmakla birlikte sıklıkla kullanılan 3 ana tip reaktör tasarımı mevcuttur. Bunlar; kesikli, tek aşamalı ve çift aşamalı reaktörlerdir (Uçkun Kıran ve ark., 2014; Pham ve ark., 2015). Bu reaktörlere örnek olarak sürekli karıştırmalı tank reaktör (CSTR), tübüler reaktör, anaerobik sıralamalı kesikli reaktör (ASBR) yukarı akışlı oksijensiz çamur battaniyeli reaktör (UASB) ve sabit film reaktörü verilebilir (Chen ve ark., 2008; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Pham ve ark., 2015).

Forste-Carneiro ve ark. (2008), gıda atıkları ile laboratuvar tipi kesikli reaktör ve karıştırmalı tank reaktörde karşılaştırmalı biyo-metanizasyon süreci ile ilgili gerçekleştirdikleri çalışmada mezofilik koşullarda (55°C) üç farklı TK konsantrasyonu (%20, %25 ve %30) ve iki farklı inokulum miktarında (%20 ve %30); %20 TK ve %30 inokulum dozu ile yüklenen karıştırmalı tank reaktörde 20-60 günlük süreçte 0,49 m<sup>3</sup> kg/UK ve 2820 mL CH<sub>4</sub> üretimi ile en yüksek CH<sub>4</sub> verimine ulaştıklarını rapor etmişlerdir. Kazda ve ark., (2013) kesikli tip reaktörde %45,4 TK atık yüklemesi ile yaptıkları çalışmada 3-4 haftalık süreçte %45,4 UK ve 1760 mL CH<sub>4</sub> üretimi elde etmişlerdir.

Proses tasarımı CH<sub>4</sub> üretimi verimliliğinde en önemli parametredir. Proses tek ve çift aşamalı oksijensiz parçalanma süreci olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Şekil 2'de Xu ve ark., (2018) tarafından yapılan tek ve çift aşamalı oksijensiz parçalanma süreçlerinin karşılaştırılması gösterimi verilmiştir.

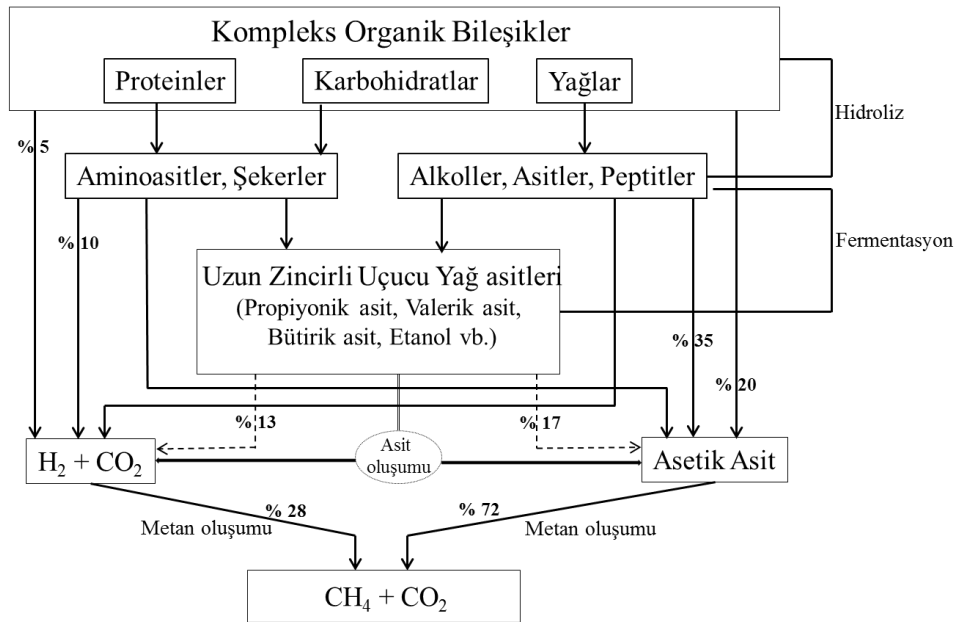


Şekil 2. (a) Tek aşamalı ve (b) Çift aşamalı oksijensiz parçalanma süreçleri (Xu ve ark., 2018)

Tek aşamalı AD prosesi şehir katı atıklarının muamelesinde yaygın olarak kullanılırken çift aşamalı AD prosesi sıklıkla ayrı reaktörlerde CH<sub>4</sub> ve hidrojen üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Tek aşamalı AD süreci içinde tüm reaksiyonlar kendiliğinden tek reaktörde gerçekleşirken tasarım çift aşamalı sürece göre daha az teknik olumsuzluklar barındırması ve daha az yatırım maliyetine sahip olması gibi

üstünlüklere sahiptir (Deng, 2016; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018). Çift aşamalı sürecin tek aşamalı sürece üstünlükleri olsa da, günümüzde Avrupa’da organik atıkların anaerobik çürütülmesinde kullanılan reaktörlerin %95’i tek aşamalı AD sistemleridir (Forster-Carneiro ve ark., 2008).

Yaygın olarak kullanılan proses tek aşamalı süreç olsa da AD prosesi üzerinde var olan yeni yaklaşımlar da literatürde izlenmektedir. Zhang ve ark., (2017), tarafından gıda atıklarının AD prosesi için üç aşamalı anaerobik sistem tanımlanmıştır. Sistemde hidroliz, asidifikasyon ve metanojenik adımlar için birbirinden bağımsız üç aşama mevcuttur. Tek ve iki aşamalı AD prosesi ile karşılaştırıldığında, bu sistemden %24-%54 oranında daha yüksek CH<sub>4</sub> verimi alındığı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Wu ve ark., (2015), şekerlendirme, etanol fermentasyonu (şekerlendirme yapılan sıvıda) ve anaerobik muamele (şekerlendirme işleminden kalan residüde) aşamalarını içerecek şekilde geliştirdikleri üç basamaklı anaerobik prosesi tek aşamalı proses ile karşılaştırdıklarında üç basamaklı proste gıda atıklarının bozunma oranının %27,5 oranında arttığını sistemin işletilmesi sırasında gerekli olan enerji ihtiyacının %51,8 oranında daha az olduğunu ve elde edilen toplam enerji ürününün %17,6 oranında arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, toplam metan üretiminin 252,6 mL/UK olduğunu bu artışın sebebini de ilk basamakta gerçekleştirilen hammaddenin şekerlendirme ön muamelesinin çürütme sürecinin performansını artırması olarak açıklamışlardır. İlkılıç ve Deviren (2011) ile Ardıç ve Taner (2021) tarafından farklı içeriklerle verilen AD ile biyo-gaz üretimi şemalarının yazar tarafından birleştirilmesi suretiyle elde edilen biyokütleden AD ile biyo-gaz üretim şeması Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Organik maddelerden oksijensiz parçalanma yolu ile biyo-gaz üretimi (İlkılıç ve Deviren, 2011; Ardıç ve Taner, 2021)

Hidroliz basamağı olarak adlandırılan birinci basamak, organik madde içeren karbonhidrat, protein ve yağ makromoleküllerinin sırasıyla şeker, aminoasit ve uzun zincirli yağ asidi monomerlerine



hidrolizinin gerçekleştiği basamaktır. Kompleks organik substratların parçalanmasının gerçekleştiği hidroliz basamağı toksik yan ürünlerin (kompleks heterosiklik bileşikler) ya da uçucu yağ asitlerinin oluşumu (UYAO) ile sonuçlandığı için bir çok araştırmacı tarafından hız belirleyen basamak olarak da tanımlanmaktadır (Chen ve ark., 2008; Ren ve ark., 2018). İkinci basamak asidojenez (asidifikasyon) basamağıdır. Bu adımda birinci basamakta ortaya çıkan uçucu yağ asitleri (UYA); içeriğinde laktik asit, pirüvik asit, formik asit ve asetik asitin bulunduğu UYA'ne bozunurlar. Asidojenez sonrasında gerçekleşen asetojenez basamağında laktik asit ve pirüvik asit gibi asitler, asetik asit ve hidrojene parçalanırken metanojenez süreci olarak adlandırılan dördüncü ve son basamakta hidrojen ve asetik asit metanojenik bakteriler tarafından son ürün olan CH<sub>4</sub>'dan zengin biyo-gaza dönüştürülür (İlkılıç ve Deviren, 2011; Deng, 2016; Ren ve ark., 2018; Ahmed ve ark., 2021). Süreçte üretilen yakıt (biyo-gaz) kimyasal olarak % 50-85 CH<sub>4</sub> ve % 20-35 CO<sub>2</sub> içerir ve süreç enerji kıtlığını aşmak için küresel sürdürülebilir bir enerji elde yöntemi olarak kullanılabilir (Srisowmeya ve ark., 2020).

AD sürecinde görev alan mikroorganizma gruplarının büyüme ve metabolizmalarındaki temel denge proses stabilitesini belirler (Srisowmeya ve ark., 2020). Sırasıyla hidroliz, asidifikasyon, asetojenez ve metanojenez (CH<sub>4</sub> üretim) aşaması olarak yürütülen organik maddenin çürütüldüğü AD sürecinde her bir basamakta gerçekleşen reaksiyonlar kendi bireysel mikroorganizmaları tarafından yürütülür. Her bir basamakta yer alan bakteri grubunun sıcaklık, pH, C/N, redoks potansiyeli gibi süreç sırasında optimum aktivite gösterebilmek için spesifik çevresel gereksinimleri mevcuttur. Örneğin hidroliz/asetojenez basamağında görev yapan bakterilerin optimum performansı için sıcaklık isteği 25-35°C, pH 5,2-6,3, ve C/N oranı 10-45 aralığında iken metan üretim aşamasındaki metanizasyon bakterileri için operasyon sıcaklığı 30-60°C, pH 6,7-7,5 ve C/N oranı 20-30 aralığında olmalıdır (Chen ve ark., 2008).

### *3.1. Tek Aşamalı Oksijensiz Parçalanma Süreci*

Tek reaktör barındıran bu sebeple de tek aşamalı AD süreci olarak isimlendirilen bu proseste görev alan mikroorganizma topluluğunun tümü bir arada ve süreç boyunca denge halinde bulunmak zorundadırlar. Bu durum sisteme hassasiyet getirir, çünkü var olan mikrobiyal topluluğun tümü fizyolojik ihtiyaçları, besin gereksinimleri, büyüme kinetikleri açısından; pH, sıcaklık, tuzlar ve toksik materyaller gibi çürütme boyunca oluşan çevresel koşullara karşı son derece hassastır. Süreçte ortaya çıkan bu çevresel koşullar sistemin ciddi bir dezavantajdır ve sistemin stabilitesi ve dolayısıyla da ürün verimi bu koşulların doğru dengelenmesine bağlıdır (Chen ve ark., 2008).

Tek aşamalı AD sürecinde pH değeri 7-8 aralığında olmalıdır. Bu koşul sağlanmadığı takdirde asitleştirici hidrolitik bakteriler için optimum büyüme koşulları oluşmadığı için, hidroliz/fermentasyon oranı düşer ve biyo-gaz üretimi azalan seyre girer. Tek aşamalı sistemin en büyük dezavantajı üretilen biyo-gazın enerji değeri açısından kalitesinin düşük olmasıdır. Bununla birlikte, bu sistem organik atıklar için köklü bir sistem olup basit kurulum, bağlı olarak sınırlı yatırım ve operasyon maliyeti ile karakterize edilebilen bir sistemdir (De Gioannis ve ark., 2017). Gıda atıklarının tek aşamalı AD

süreci sistem stabilitesinin sağlanamaması, UYA'nın birikimi, amonyak inhibisyonu, yetersiz tamponlama kapasitesi, zararlı ara ürünlerin oluşumu ve yüksek organik yüklemenin başarılabilmesi gibi süreç problemleri içermektedir (Srisowmeya ve ark., 2020). Proses boyunca ortaya çıkan safsızlıkların kimyasal absorpsiyon, membran seperasyonu gibi teknikler yardımıyla giderilmesi süreç sonunda oluşan biyo-yakıtın enerjetik değerini yükseltmektedir (Chen ve ark., 2008). AD sürecinde karşılaşılan teknik problemler ve çözüm önerileri aşağıda alt başlıklar halinde kısaca açıklanmıştır.

### *3.1.1. Dikkatli Bir Süreç Kontrolü ve Süreç Optimizasyonunun Sağlanamaması*

Süreç kontrolünün/optimizasyonunun sağlanamaması durumunda işlem sırasında zararlı ara ürün bileşikler kolaylıkla oluşarak prosesin kararlılığı indirgenmekte ya da düşük miktarda metan oluşumu ve/veya reaktör içinde köpüklenme görülmektedir. Gıda atığındaki yüksek protein ve lipit içeriği ortam üzerinde inhibitör etkisi oluşturan amonyak, hidrojen sülfid ve uzun zincirli yağ asitlerinin oluşumuna neden olmaktadır (Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018). Kazda ve ark., (2013) çürütme sırasında metan üretim sürecinin durma sebebini ortamda biriken ve inhibitör etkisi yaratan yüksek konsantrasyonlardaki yağ asitleri olarak açıklamışlardır (asetik asit >25 mg/mL ve propiyonik asit >3 mg/mL).

Gıda atıklarının içeriğindeki yüksek protein ve lipit oranı bu bileşiklerin hidrolizasyonunun gerçekleştiği sıvıda köpük oluşum nedenidir (Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018). Köpürme, sıvı AD süreçlerinin birçoğunda reaktördeki yağ asitleri, deterjanlar, proteinler ya da diğer bileşiklerin dâhil olduğu yüzey aktif ajanların miktarlarının yükselmesi sebebiyle en sıklıkla rastlanan olaydır (Xu ve ark., 2018). AD reaktöründe gerçekleşen köpürme 3 bileşenli bir olay olup substrattaki sürfaktanlar (katı ya da sıvı bileşenli) ya da yüzey aktif materyaller, reaktördeki sıvı ve reaktörde üretilen biyo-gaz açısından değerlendirilmelidir. Reaktörde köpürme gerçekleştiğinde üretilen biyo-gaz ortam sıvısından ayrılamaz ve sıvı içerisinde dağılarak üretilen gaz miktarındaki artış ile birlikte reaktörde hidrolizlenen sıvının hacmini arttırır. Hidrolizlenen sıvı hacmindeki artış hem reaktörün kullanılabilir hacmini azaltır ki bu suretle hedef dozlama ve ürüne ulaşamaz, hem de gaz borularını bloke ederek valflere yüksek basınç uygulamak suretiyle reaktör yapısına zarar verir (Kougiyas ve ark., 2014). Süreç sırasında gerçekleşen köpürmenin bir diğer önemli nedeni reaksiyon sırasında hidrolizat içerisinde gerçekleşen ani gaz boşalmalarıdır. Reaktördeki biyo-gaz ana miktarda CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> eser miktarlarda da H<sub>2</sub>S, amonyak, uçucu organik bileşikler (UOB) ve siloksanlar bulundurur (Rasi ve ark., 2007). Biyo-gaz içerisinde CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> arasındaki yüksek oranda çözünürlük farkı nedeniyle CH<sub>4</sub> gazının büyük miktarı hidrolizatta baloncuklar halinde gaz fazında iken CO<sub>2</sub> hidrolizatta sıcaklık ve pH'ya bağlı olarak karbonik asit (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) şeklinde çözülmüş formdadır. Sıcaklığın artması ve pH'nın düşmesi ile birlikte fizikokimyasal koşullarda gerçekleşen ani değişiklikler CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> gazları arasındaki çözünürlük dengesini bozarak ana miktarda CO<sub>2</sub> olacak şekilde büyük hacimlerde ani gaz çıkışlarına ve takibinde reaktörde aşırı köpüklenmeye neden olur. Xu ve ark., (2018) tarafından oksijensiz çürütme sırasında gerçekleşen

köpürmenin azaltılması ve/veya önüne geçilebilmesi amacıyla uygulanabilecek köpük giderme stratejileri Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** AD reaktörlerinde köpüklenmeyi azaltmaya yönelik izlenebilecek yöntemler (Xu ve ark., 2018)

Acil Durum Önlemleri	Dolum seviyesinin düşürülmesi Beslemenin azaltılması Karıştırıcıların en üst seviyeye ayarlanması
Köpük Kesici Ajan İlavesi	Ticari köpük kesici ürünler Bitkisel yağ ya da biyo-dizel Tamponlayıcı katkıları
Köpük Arttırıcı Besleme Substratlarından Kaçınmak	Köpük arttırıcı substratların azaltılması Bu substratların son reaktöre yüklenmesi Besleme aralıklarının değiştirilmesi
Süreç Sıkıntılarını Çözmek	Gerekli ise eser element uygulaması İnhibitör kullanılmaması, toksifikasyondan sonrası yeni aşılama Aşırı beslemeden sonra beslemenin azaltılması
Fizikokimyasal Koşulların Değiştirilmesi	Viskozitenin değiştirilmesi Sıcaklık değişiminin kontrolü Alkalinite değişimi
Karıştırma ve Besleme Planının Değişimi	Karıştırma aralıkları arasındaki duraklamaların kısaltılması Besleme aralıkları arasındaki duraklamaların kısaltılması Mikser hızı ve/veya yöneliminin değiştirilmesi
Teknik Önlemler	Fan nozullarının montajı Dolum seviyesi yüksekliğinde taşma borusu montajı Dolum seviyesi yüksekliğinde mikser montajı

### 3.1.2. Mikrobiyal Reaksiyonun Genellikle 20-40 Gün Aralığında Gerçekleşmesi

AD teknolojisinin en büyük dezavantajı mikrobiyal bozundurma için gerekli olan ve 20-40 gün aralığında gerçekleşen bozundurma sürecidir (Chen ve ark., 2008). Bu uzun süreçte azot içeriği yüksek protein bileşiklerinin parçalanması sonucu ortaya çıkan yüksek miktardaki serbest amonyak ( $\text{NH}_3$ ) ortam pH değerini yükseltmek suretiyle metanojenik bakterilerin spesifik aktivitesini etkileyerek proses üzerinde inhibisyon etkisi yaratmaktadır. Ortaya çıkan toplam amonyak azotu, serbest amonyak azotu ve  $\text{NH}_4^+$ ’dan oluşmaktadır. Anaerobik sistemde serbest amonyak azotu ve  $\text{NH}_4^+$  birbirine dönüşebilen türlerdir. Yüksek pH ve sıcaklık koşulları toplam amonyak azotunun en zehirli türü olan serbest amonyak azotu oluşumunu destekler. Bakteriyel hücre membranını geçebilme yeteneğine sahip olan serbest amonyak azotu hücre içi proton dengesizliğine neden olur, enerji ihtiyacını değiştirir, hücre içi pH değişikliğine neden olarak spesifik enzimlerin inhibisyonunu gerçekleştirir. Serbest amonyak azotu ve toplam amonyak azotunun inhibitör etkisi gösterdiği konsantrasyonların substrat, inokulum ve ortam koşulları ile ilgili olduğu belirlenmiştir (Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018). Süreçte oluşan yüksek  $\text{NH}_3$  konsantrasyonu fiziksel (karıştırma) ve kimyasal (kimyasal çöktürme) olmak üzere iki ana yöntem ile kontrol altında tutularak gerçekleşen  $\text{NH}_3$  inhibisyonu indirgenebilmektedir (Li ve ark., 2017). Gerçekleşen serbest  $\text{NH}_3$  azotu oluşumunun önüne geçilebilmesinin bir diğer yolu düşük azot ve lipid içeriğine sahip gıda atıklarının da AD sürecine dâhil edilmesidir. Böylelikle yüksek  $\text{NH}_3$  konsantrasyonlarının oluşumu ve ara basamaklarda ortaya çıkan UYA’nın ara ürün olarak birikiminin önüne geçilmiş olur. Yapılan birçok çalışma gıda atıklarının

şehir atıkları ile birlikte AD sürecinde yer almasının biyo-gaz oluşumunu yalnız gıda atıklarının AD sürecine alınmasına göre %40-50 oranında arttırdığını göstermiştir (Yang ve ark., 2013; Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018).

### *3.1.3. Kolay Parçalanabilir Gıda Atıklarının AD Prosesinin Erken Evrelerinde Hızlıca UYA'ne Dönüşmesi*

Bu olay ortamda yeterli tamponlanma kapasitesinin olmaması durumunda ortam pH'sında keskin düşümlere ve ortam kararlılığının kaybolmasına neden olmaktadır. Kazda ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada asidik gıda atığı ile aşırı yükledikleri çürütücüde ilk 300 saat içerisinde pH değerinin 6,0'nın altına düşmesiyle birlikte gerçekleşen hızlı asidifikasyon nedeniyle CH<sub>4</sub> üretim sürecinin durduğunu bildirmişlerdir. Ortam pH'sının ve tamponlama kapasitesinin yeniden düzenlenmesinden sonra (pH 7,0'nin üzerine) biyo-film taşıyıcı bulunan reaktörde CH<sub>4</sub> üretim sürecinin tekrar başladığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Izumi ve ark., (2010) substratın sahip olduğu parça büyüklüğünün ortam asidifikasyonu üzerinde etkili olduğunu, aşırı küçük parça büyüklüğüne sahip gıda atığı (VII-40000) ile gerçekleştirilen AD prosesinde (VII-40000: denemede kullanılan parça büyüklüğüne karşılık verilen kod) VII-40000 denemesinde substratın çok küçük tane büyüklüğünün AD sürecinin ilk aşamalarında gerçekleşen hidroliz ve asit fermentasyonunu hızlandırdığını ve ortamda UYA'nin birikmesine neden olduğunu rapor etmişlerdir. Ren ve ark., (2018), ortamın hızlı asidifikasyonunun önüne geçilmesinin bir diğer yolu olarak AD sürecinin tamponlama kapasitesinin artırılması amacıyla sistemde etanol ön-fermentasyonunun gerçekleştirilmesini önermişlerdir. Bu durumda ortamdaki karbon kaynağının önemli bir kısmının AD süreci için zararlı olan UYA yerine etanole dönüşerek substratın hızlı hidrolizinin durdurulması suretiyle fermentasyonun stabilitesinin arttırıldığını bildirmişlerdir. Gıda atıklarının sahip olduğu yüksek biyo-bozunabilirlik ve düşük C/N oranı AD sürecinde ortamın hızlı asidifikasyonunun bir başka sebebidir. Süreçte asit üreten bakterilerin çoğalması metanojenleri inhibe ederek UYA'nin ortamda birikmesine neden olur. UYA'nin tüketim hızı üretim hızından daha yavaş olduğunda ortamda gerçekleşen pH düşüşü süreç üzerinde inhibisyona neden olmaktadır. Ortama yüksek C/N oranına sahip saman ve pirinç kabuğu gibi lignosellülozik biyo-kütle sınıfında yer alan ko-substrat (azot içeriği açısından zengin gıda atığı içerisinde karbon kaynağı) ilavesi sadece gıda atığı varlığında gerçekleştirilen parçalanma süreci sırasında gerçekleşen hızlı asidifikasyonun önüne geçmektedir (Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018).

Kazda ve ark., (2013) ise farklı bir yaklaşımla kompleks substratlarda ek biyo-film taşıyıcı ilavesi yaparak metan üretim verimini arttırmışlardır. Ek biyo-film taşıyıcı varlığında ve yokluğunda metan ürün verimi sırasıyla; 246,8 L/kgUK ve 126 L/kgUK olarak rapor edilmiştir. Ek biyo-film varlığının sürece katkısını da, sintropik bakteriler ve metanojen arkeaların biyo-film iç tabakada yer alırken asit üreten bakterilerin dış biyo-film tabakada düzenlenmeleri suretiyle pH duyarlı arkeaların süreçte

oluşan organik asitlerin yüksek konsantrasyonlarından ve düşük pH değerlerinden etkilenmemeleri olarak açıklamışlardır.

#### 3.1.4. C/N Dengesi ve Ko-substrat İlavesi

Gıda atıkları yüksek miktarda organik bileşik bulundurmaları sebebiyle AD prosesinde alternatif enerji üretimi için oldukça uygun olmakla birlikte sahip oldukları yüksek tuz konsantrasyonu, sodyum ( $\text{Na}^+$ ), potasyum ( $\text{K}^+$ ), kalsiyum ( $\text{Ca}^{+2}$ ) ve magnezyum ( $\text{Mg}^{+2}$ ) gibi katyonların varlığı çürütme sürecini yavaşlatan etkenler arasındadır (Hafid ve ark., 2017; Ren ve ark., 2018). Oksijensiz parçalanma sırasında gübre, kanalizasyon çamuru ve lignoselülozik biyokütle gibi ko-substratların kullanılmasının ortamdaki zehirli kimyasalların seyreltilmesi, besin maddelerinin dengesinin sağlanması ve süreçte görev alan mikroorganizmaların ortama uyum sağlaması açısından faydalı olduğu bildirilmiştir (Yang ve ark., 2013; Xu ve ark., 2018). Yang ve ark., (2013) mısır sapı, talaş ve kullanılmış mantar ko-substratları varlığında gerçekleştirdikleri anaerobik süreçte C/N oranının mutfak atığı ile hazırlanan kompostun stabilizasyonunda en önemli indeks olduğunu belirtmişlerdir. Ko-substrat ilavesinin atık materyaldeki nem içeriğini ayarlaması ve kompostlanan atık materyal içerisinde mikrobiyal aktivite için alan oluşturması gibi etkileri vardır. C/N oranında 23'den 16'ya doğru en az düşüş gösteren kullanılmış mantar ko-substratı (SMS) ile yapılan denemelerde diğer ko-substratlara göre yüksek verime ulaştıklarını rapor etmişlerdir. SMS ko-substratı ile kompostlanan gıda atığı ile yapılan denemede C/N oranı 23'den 16'ya düşerken kompost toksisitesi ve olgunluğunun en önemli göstergesi olan germinasyon indeksinin (GI) ise %53'den %151'e yükseldiğini rapor etmişlerdir. GI'nin %50'den yüksek olmasının toksik olmayan ortam, %80'den yüksek olmasının ise olgunlaşmış kompostun işareti olduğunu bildirmişlerdir.

#### 3.1.5. Fiziksel ve Biyolojik Ön-muamele Yöntemleri Kullanmak

Bazı araştırmacılar tarafından AD süreci üzerinde belirtilen sebeplerden dolayı gerçekleşen inhibisyonu azaltmak, sürecin hız belirleyici basamağı olarak kabul edilen hidroliz basamağını hızlandırmak ve metan üretim miktarını arttırmak amacıyla fiziksel ve biyolojik ön-muamele yöntemleri önerilmektedir (Li ve ark., 2017; Cho ve ark., 2020). Önerilen bu fiziksel, kimyasal, termal ve enzimatik ön-muamele yöntemleri substrat olarak kullanılan gıda atıklarının çözünürlüğünü ve organik atığın degradasyonunu hızlandırmak amacıyla uygulanmaktadır (Chen ve ark., 2008).

Fiziksel ön-muamele yöntemleri mekanik ve ısı uygulaması metotlarıdır. Mekanik yöntemlerin substrat olarak kullanılan ve yüksek miktarda katı içeriğine sahip olan gıda atıklarını daha küçük parçalara ayırarak gıda parçalarının spesifik yüzey alanının artırılması suretiyle anaerobik bakteri ve substrat arasındaki etkileşimi arttırdığı, bu suretle de AD sürecini hızlandırdığı bildirilmektedir (Chen ve ark., 2008; Li ve ark., 2017). Izumi ve ark., (2010) substratın fiziksel yöntemler ile daha küçük tanecik boyutuna indirgenmesinin biyo-gaz üretimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kesikli reaktörde gerçekleştirdikleri AD sürecinde metan üretim oranının parçaçık boyutu ile ters

orantılı olduğunu ve atığın parçacık boyutunun 0,888 mm'den 0,718 mm'ye düşürülmesi ile metan üretiminin %28 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Bir diğer fiziksel ön-muamele yöntemi olan ısı muamelesi ile substrat hücre zarının parçalanması suretiyle proste kullanılan organik bileşiklerin hidrolizinin hızlandırıldığı Ren ve ark., (2018) tarafından bildirilmiştir. Li ve ark., (2017) ısı ön-muamelesinin gıda atığı içeriğinde bulunan partikül halindeki ham proteinin çözünürlüğünü arttırarak sıvı faza geçişini hızlandırdığını ve sıvı fazda kolayca ulaşılabilen çözünür proteinin fermentatif bakteriler tarafından etkin bir şekilde tüketilebildiğini ifade etmişlerdir.

Kimyasal ön-muamele yöntemi olarak asit, alkali ve yükseltgeyici ajanların ilavesinin mikroorganizmaların farklı gıda atıklarından biyo-gaz üretiminin arttırılmasına yardımcı olduğu bildirilmektedir. Fiziksel ve kimyasal ön-muamele yöntemlerinin en büyük dezavantajı, yüksek enerji ve kimyasal tüketimine neden olmalarıdır (Chen ve ark., 2008).

Üretilen biyo-gaz verimini arttırmak amacıyla kullanılabilir ön-muamele yöntemlerinden bir diğeri de reaktöre süreç sırasında ham veya ticari enzim preparatlarının ilave edilmesi suretiyle gerçekleştirilen biyolojik ön-muamele yöntemidir (Uçkun Kıran ve ark., 2015; Romero-Güiza ve ark., 2016). Romero-Güiza ve ark., (2016) tarafından yapılan literatür incelemesinde lignosellülozik ve lipitten zengin organik maddeleri içeren kompleks organik substratların ham veya ticari enzim preparatlarıyla ön-muamelesi sonrasında gerçekleştirilen biyo-gaz üretiminde dikkate değer bir artış gözlemlendiği belirtilmektedir. Ancak enzimler AD prosesine direkt olarak verildiğinden dozlanan enzimlerin çeşitli zehirli ve inatçı substratlar varlığında etki edebilme yeteneğine sahip olması ve geniş aralıkta hızlıca değişebilen çevresel koşullar (pH, sıcaklık ve tuzluluk vb.) altında aktivitelerini koruyabilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu makromoleküller mikrobiyal metabolizmanın ürettiği inhibitörler ve ortamdaki mikroorganizmalar varlığında aktivite gösterebilmeli, biyokütle içinde gerçekleşen olaylardan kendilerini koruyabilecek özellikte olmalı ve substrata daha hızlı etki edebilmek için mikroorganizmalardan daha küçük boyutta, daha çözünür ve hareketli olmalıdır (Donoso-Bravo ve Fdz-Polanco, 2013). Donoso-Bravo ve Fdz-Polanco, (2013) yağ tutucu (%5 UK) ve kanalizasyon çamuru ile muamele ettikleri AD prosesinde sürece % 0,33 (h/h) oranında yaptıkları lipaz enzimi inokulasyonunun  $CH_4$  üretimini 365 mL  $CH_4$ /gUK değerinden 452 mL  $CH_4$ /gUK değerine kayda değer bir şekilde arttırdığını rapor etmişlerdir. Uçkun Kıran ve ark., (2015), gıda atıkları ile yaptıkları çalışmada enzimatik ön-muamele uygulanmayan ve uygulanan gıda atıklarının AD sürecinden elde edilen metan veriminin dikkate değer bir şekilde farklı olduğunu ön-muamele uygulanmayan ve uygulanan gıda atığının AD sürecinden elde edilen metan verimlerinin sırasıyla 197,6 mL  $CH_4$ /gUK ve 457,3 mL  $CH_4$ /gUK olduğunu rapor etmişlerdir.

Biyolojik ön-muamele süresince gerçekleştirilen uzun inkübasyon süresi ön-muamele yönteminin geniş ölçeklerde uygulanabilirliğini sınırlıyor olması nedeniyle yöntemin dezavantajı olarak belirtilmektedir (Chen ve ark., 2008). Wu ve ark., (2015) enzimatik şekerlendirme işlemi ile ön-muameleye tabii tutulmuş mutfak atığı ile ham mutfak atığının karşılaştırmalı AD sürecini

çalışmışlardır. Araştırmacılar, şekerlendirme ön-muamelesi ve katı-sıvı ayrımı yapılmış mutfak atığı ile yürütülen çürütme işleminde uygulanan ön-muamele yöntemi vasıtasıyla kararsız organik bileşenler tarafından gerçekleştirilen asidifikasyonun önüne geçildiğini rapor etmişlerdir.

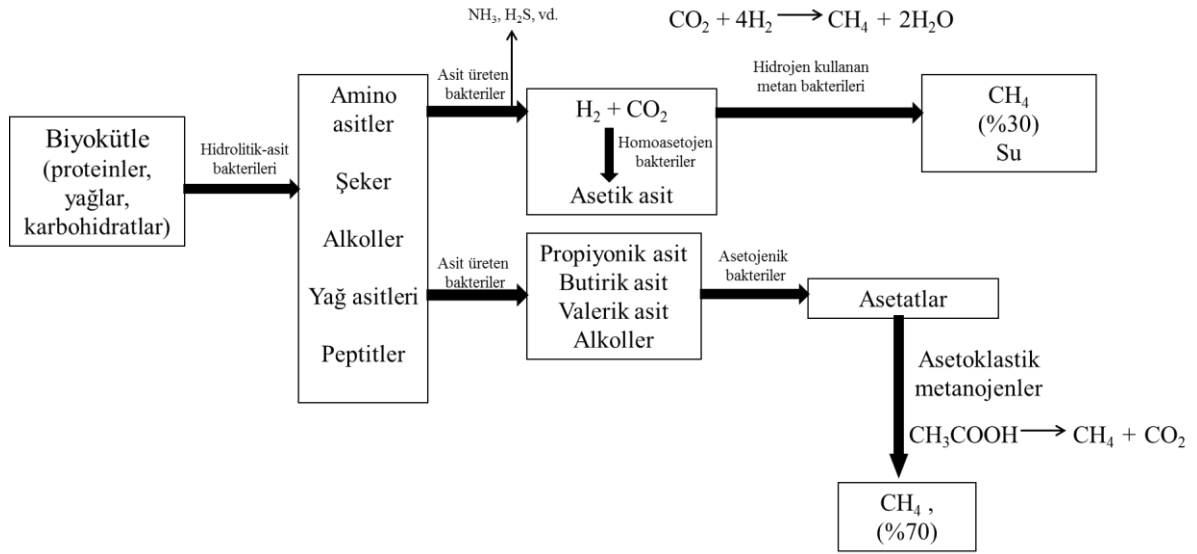
### *3.1.6. Mikroorganizmaların Mikro-besin İhtiyacının Karşılanması*

Gıda atıklarının oksijensiz parçalanma sürecinde etkili olan bir diğer faktör süreçte görev alan mikroorganizmaların mikro-besin ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Gıda ve mutfak atıkları genellikle eser elementlerin düşük konsantrasyonlarını bulundurmaktadır (Pham ve ark., 2015). Bu sebeple işlem sırasında görev alan mikroorganizmaların performansı ve gıda atığı çürütücülerinin stabilitesinin artırılması amacıyla ortama metanojenik bakteriler için nikel (Ni), kobalt (Co), molibden (Mo), demir (Fe), selenyum (Se) ve tungsten (W), hidrolitik bakteriler için çinko (Zn), bakır (Cu) ve mangan (Mn) esansiyel elementlerinin ilavesi tavsiye edilmektedir (Pham ve ark., 2015; Romero-Güiza ve ark., 2016; Xu ve ark., 2018). Bu elementlerin eksikliği anahtar enzimlerin aktivite ve fonksiyonları üzerinde etkili olurken varlığı mikrobiyal büyüme için yükseltgenme-indirgenme potansiyeli gibi çevresel koşulları düzenlemektedir. Sisteme hayvan gübresi ve kanalizasyon çamuru gibi ko-substrat ilavesi ile proses için gerekli olan mikro-besin maddesi ihtiyacı yeteri miktarda karşılanır. Gıda atığı ile gerçekleştirilen AD süreçlerine yapılan eser element ilaveleri metan üretim miktarını ortalama olarak %15-65 arasında arttırmaktadır (Pham ve ark., 2015). Süreçte demir genellikle biyo-gaz içerisindeki H<sub>2</sub>S konsantrasyonunun düşürülmesi için kullanılırken (Banks ve ark., 2012), eksikliği propiyonik asit birikimine neden olur yokluğundan hem metanojenik arkealar hem de propiyonat oksidasyonu yapan bakteriler etkilenirler (Romero-Güiza ve ark., 2016). Zhang ve ark., (2012) Mo, Co ve Ni varlığında reaktör performansının arttığını, Banks ve ark., (2012) ise Se'un propiyonat oksidasyonu ve hidrogenotropik metanojenler için esansiyel element olduğunu rapor etmişlerdir. İlave olarak; Se ve Co elementlerinin mutfak atıkları ile AD prosesinde yüksek yükleme oranı (3-5 g UK/Lgün) ve yüksek amonyak konsantrasyonunda (4,7 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/L) kritik mikro-besinler olduklarını ve bu elementlerin mikrobiyal aktiviteyi arttırdığını belirtmişlerdir. Aynı çalışma grubu tarafından selenyum ve kobalt elementlerinin ortalama organik madde yükleme oranlarında (OMYO) UYAO'nu etkili bir şekilde azalttığını ve bu elementlerin sintropik asetat-oksidasyon bakterileri ve hidrogenotropik metanojenler için kritik elementler oldukları rapor edilmiştir. Zhang ve Jahng (2012) ise Fe elementinin gıda atığı ile gerçekleştirilen AD sürecinin stabilitesi için en etkili element olduğunu bildirmişlerdir.

### *3.2. Çift Aşamalı Oksijensiz Parçalanma Süreci*

Organik maddelerden AD prosesi vasıtasıyla biyo-gaz üretiminin hidroliz, asidojeniz, asetojeniz ve metanojeniz basamakları olmak üzere dört ardışık kompleks mikrobiyal adımı içerdiği önceden belirtilmişti (Chen ve ark., 2008; Deng, 2016; Ren ve ark., 2018; Ahmed ve ark., 2021). Bu süreçte görev alan mikroorganizmalar asidojenik ve metanojenik mikroorganizmalar olarak

sınıflandırılabilirler (İlkılıç ve Deviren, 2011). Ancak her grup mikroorganizmanın besin ve substrat konsantrasyonu, pH değeri gibi optimum büyüme koşul ve ihtiyaçları geniş bir aralıkta değişmektedir (Srisowmeya ve ark., 2020). Bu sebeple her bir grup mikroorganizma için optimum çevresel koşulları sağlamak amacıyla Pohland ve Ghosh tarafından 1971 yılında yeni bir model önerilmiştir (Lindner ve ark., 2016; De Gioannis ve ark., 2017). Bu modelde asidojenik basamak ile metanojenik basamak iki ayrı reaktör kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Birinci aşamada oluşan UYA'nın ikinci aşamaya alınıp dönüştürülmesi suretiyle ikinci aşamada CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> üretiminin gerçekleştirildiği bu süreç çift aşamalı AD süreci olarak adlandırılmaktadır (Lindner ve ark., 2016). Gıda atıklarının işlenmesinden elde edilen katma değerli ürün ve bu ürünlerin elde edildiği yolların gösterildiği AD prosesi (Dursun ve Özdemir, 2016; Srisowmeya ve ark., 2020; Ardıç ve Taner, 2021) ve bu proseste görev yapan bakteriler ile görev yaptıkları yollar (Srisowmeya ve ark., 2020; Ardıç ve Taner, 2021) Şekil 4'de verilmiştir.



**Şekil 4.** Oksijensiz parçalanma sırasında gıda atıklarının biyo-metanasyon süreci (Dursun ve Özdemir, 2016; Srisowmeya ve ark., 2020; Ardıç ve Taner, 2021)

Çift aşamalı sistemlerde, ilk aşama genellikle zayıf asidik pH değeri (pH 5,5-6,5) ve kısa hidrolitik alıkonma zamanı (HAZ; 2-3 gün) süresinde gerçekleşen hidroliz ve asit fermentasyonu basamağıdır. İkinci basamak yavaş büyüyen metanojenik bakterilerin çoğaldığı, 20-30 gün ve pH 6-8 aralığında yürütülen metanojenez basamağıdır. Böylelikle tek aşamalı sistemlerde gıda atığının hızlı asidifikasyonu sebebiyle ortaya çıkan metanojenlerin inhibisyonu probleminin önüne çift aşamalı sistemlerde asit üretimi ve metan üretimi safhalarının iki reaktöre ayrılması suretiyle geçilmiştir (Ren ve ark., 2018). Çift aşamalı sistemlerde, reaktörlerin fiziksel olarak birbirlerinden ayrılması ile iki bağımsız proses oluşturularak asidojenik ve metanojenik bakteri topluluğunun stabilizasyonunun sağlanması yoluyla bakterilerin spesifik metabolik aktivitelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş bu suretle de CH<sub>4</sub> üretimi maksimize edilmiştir (De Gioannis ve ark., 2017).



İki aşamalı AD prosesinin ilk basamağında birinci reaktörde gerçekleştirilen asidifikasyon asidojenez ve asetojenez süreçlerinin kombinasyonu ile süreç boyunca hidrolizlenen organik bileşiklerin formik asit, asetik asit, propiyonik asit, bütirik asit ve pentanoik asit gibi UYA'ne metanol ve etanol gibi alkollere, aldehit, karbondioksit ve hidrojene biyo-dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Asetat, propiyonat ve bütirat sırasıyla 75:75:10 ile 40:40:20 aralığında değişen oranlarda en sıklıkla rastlanan asidojenez ürünleridir. Asidojenez AD'deki diğer süreçler ile karşılaştırıldığında hızlı bir süreçtir. Bu aşamada üretilen UYA metanojenez basamağı için anahtar substrat rolü oynar ve reaktörün performansı açısından kritik faktördür (İlkılıç ve Deviren, 2011). UYA'nin asidifikasyonu AD prosesinde en çok rapor edilen kusurdur. Diğer yandan protein degradasyonu sonucu oluşan amino asitlerin parçalanmasından ortaya çıkan  $\text{NH}_3$ 'de süreç üzerinde inhibisyon etkisi yaratmaktadır. Asidojenik reaktör pH 4-6 aralığında en yüksek performansı gösterir (Ren ve ark., 2018; Srisowmeya ve ark., 2020) bu pH aralığında hidrogenotropik metanojenlerin büyümesi desteklenir (Srisowmeya ve ark., 2020). Hidrojene tüketerek metan üreten bu bakteriler asidojenik fazın performansında önemli rol oynamaktadırlar. Düzenleyici hidrogenotropik metanojenler asidojenik reaktörde hidrogen üretiminin stabilize edilmesi için hayati önem taşırlar. UYA ve oluşan diğer ara ürünler asetojenez boyunca asetatlara ve hidrojene dönüştürülür (Srisowmeya ve ark., 2020).

Asetatların %25'inin oluştuğu hidrojene %11'inin üretildiği asetojenez basamağı %70  $\text{CH}_4$  üretiminin yapılacağı metanojenez basamağı için hayati bir önem taşır. Metanojenler tarafından direkt olarak kullanılan asetatlar  $\text{CH}_4$  üretimi için esansiyel anahtar substratlardır. Hidrojen asetojenik bakterileri inhibe edebileceği için hidrojene tüketen  $\text{CH}_4$  bakterileri ve asetojenik bakteriler arasındaki simbiyotik ilişki asetojenik sürecin stabilizasyonu için çok önemlidir. Hidroliz ve asidifikasyon basamaklarının ürünleri  $\text{CH}_4$  oluşum basamağının etkinliğini belirler. Asidojenik fazda toplam katı ve toplam uçucu katıların etkili indirgenmesi metanojenik fazda  $\text{CH}_4$  ürünlerinin artışına neden olmaktadır. Bu fazda toplam katının %52 ve toplam uçucu katıların %64 oranında indirgenmesi metanojenik reaktörde  $\text{CH}_4$  verimini %72,7 oranında arttırmaktadır (Srisowmeya ve ark., 2020).

Metanojenez süreci asidifikasyon reaktörü ürünlerinin  $\text{CH}_4$  ve  $\text{CO}_2$ 'e dönüştürüldüğü süreçtir. Metanojenler asetatları, hidrojene ve  $\text{CO}_2$ 'i tüketerek  $\text{CH}_4$  üreten yüksek hassasiyete sahip mikroorganizmalardır.  $\text{CO}_2$ 'in indirgenmesi  $\text{CH}_4$  üretimine %30 katkıda bulunur (Srisowmeya ve ark., 2020). Substrat tüketimine göre metanojenler I)  $\text{CH}_4$  ve  $\text{CO}_2$  üretmek amacı ile asetatları tüketen asetoklastik metanojenler, II)  $\text{H}_2$  ve  $\text{CO}_2$  tüketerek metan üreten hidrogenotropik metanojenler, III) metanolü tüketerek  $\text{CH}_4$  ve su üreten metilotropik metanojenler olmak üzere üç sınıfta toplanabilirler. Asetoklastik metanojenler ve hidrogenotropik metanojenler  $\text{CH}_4$  üretimine sırasıyla 2/3 ve 1/3 oranında katkıda bulunurlar (Chandra ve ark., 2012). Metanojenik faz genellikle çok yüksek HAZ'nda çalıştırılır (20-30 gün) (Ren ve ark., 2018; Srisowmeya ve ark., 2020) ve süreç pH ve sıcaklığa çok duyarlıdır (Srisowmeya ve ark., 2020).

Çift aşamalı sistemler reaktör tasarımı, inokulum türü, işlem pH'sı ve sıcaklığı, HAZ ve OMYO gibi değişken faktörler tarafından kontrol edilir (Srisowmeya ve ark., 2020). Bu değişkenler gıda atıkları ile

beslenen AD sürecinde yüklenen organik madde miktarını, üretilen ürün miktarını ve süreç stabilitesini arttırmak için dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır. Çift aşamalı sistemlerde uygulanan bir diğer modifikasyon yöntemi ikinci fazdaki çürütme süresini kısaltmak amacıyla farklı yüksek-akış hızına sahip reaktörlerin kullanılmasıdır (Uçkun Kıran ve ark., 2014; Karthikeyan ve ark., 2018; Ren ve ark., 2018). Metan üretim aşamasında H<sub>2</sub>S ve CO<sub>2</sub> bileşiminin basınçlı biyo-film anaerobik reaktörünün kullanılması yolu ile indirgenerek üretilen metan miktarının %9 civarında arttırıldığı rapor edilmiştir (Xu ve ark., 2018). Çift aşamalı AD süreci 20 yıldan fazla bir zamandır araştırılan çeşitli iyileştirme ve modifikasyon yolları tespit edilmeye çalışılan gelişim sürecinde olan bir prosestir (Ren ve ark., 2018). Aşağıda çift aşamalı AD süreci ile ilgili gerçekleştirilebilecek modifikasyon yöntemleri literatür bilgileri ışığında başlıklar halinde kısaca tartışılmıştır.

### 3.2.1. Sıcaklık

Çift aşamalı AD sürecinde iki reaktörde farklı sıcaklıkların kullanılması sistem stabilitesini arttırmak amacıyla yapılan modifikasyonlardan bir tanesidir. Sıcaklık-faz oksijensiz parçalanma (TPAD) sistemi olarak adlandırılan bu sistemde birinci basamak termofilik ikinci basamak mezofilik sıcaklıklarda çalıştırılır. Termofilik sıcaklık basamağı yağlı gıda atıklarının çürütülmesi için tasarlanmış, hidrolizi güçlendiren ve yağ içeriği yüksek atıkların daha yüksek OMYO ile reaktöre yüklenmesine izin veren sıcaklıklar olduğu düşünülmektedir (Ren ve ark., 2018). Mezofilik sıcaklıklarda yürütülen ikinci basamak ise metanojenik bakterilerin üreme sıcaklığı açısından daha elverişli olan basamaktır. Bu basamakta aynı zamanda substrat pastörizasyonu da gerçekleştirilmektedir (Hans ve Kumar, 2019; Srisowmeya ve ark., 2020). Çift aşamalı sistemde birinci basamakta elde edilen CH<sub>4</sub> miktarı tek aşamalı sisteme göre daha az olmakla birlikte ikinci basamakta daha yüksek CH<sub>4</sub> konsantrasyonu elde edilebilmektedir. Ayrıca çift aşamalı sistemlerde ilk basamakta potansiyel ürün değerine sahip olan hidrojen eldesi de gerçekleştirilmektedir (Ren ve ark., 2018; Srisowmeya ve ark., 2020). Trisakti ve ark., (2017) iki aşamalı AD sürecinde sıcaklığın metanojenez basamağı üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında sıcaklıktaki artış ile birlikte UK parçalanma oranı ve kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) indirgenmesinde dikkate değer bir artış gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Termofilik koşullarda UK ayrışması, COD giderimi ve biyo-gaz ürün oluşumunun sırasıyla %67,44, %79,16 ve 37,03 L/kgUK olduğunu mezofilik koşullarda ise UK ayrışması, COD giderimi ve biyo-gaz ürün oluşumunun sırasıyla %79,82, %51,56 ve 31,77 L/kgUK değerleri ile sonuçlandığını rapor etmişlerdir.

### 3.2.2. pH

Anaerobik reaktörde proses stabilitesinin sağlanmasında pH'nın hayati öneme sahip olduğu bilinmektedir (Chen ve ark., 2008). Fermentasyon bakterileri pH 4,0-8,0 gibi geniş bir pH aralığında etkin bir aktivite gösterebilirlerken metanojenik bakteriler dar bir pH aralığında (pH 6,5-7,5) fonksiyonel aktivitelerini sürdürebilmektedirler. Zayıf asidik pH (4,0) UYA'nın bazik pH (8,0) NH<sub>3</sub> üretiminin gerçekleştiği pH değerleridir (Srisowmeya ve ark., 2020). UYA konsantrasyonunun artması

metanojenik bakterilerin performansının düşmesine neden olmaktadır (Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018). Çift aşamalı sistemlerde istenen pH aralığı değeri asidifikasyon basamağı için pH 5,2-6,5 metanojenik faz için pH 6,5-7,2 aralığındadır. Asidojenik fazda pH değerinin 5,5'te tutulması özellikle istenen ürün olan ve metanojenik fazda substrat olarak kullanılan asetik asit oluşumunu destekler. Mezofilik koşullardaki çift aşamalı reaktörlerde asidojenik faz pH kaymalarına daha yatkındır bu da UYA'nin üretilmesini destekleyen koşuldur. UYA'nin konsantrasyonu reaktördeki dengesizliğin göstergesidir. Artan pH değeri bu bileşenlerin üretimine imkân veren pH değeri olduğu için mutlak etkili iken reaktördeki pH düşüşü düşük HAZ ve yüksek OMYO şartlarında yüksek oranda asidifikasyona neden olur (Srisowmeya ve ark., 2020). Ayrıca hidroliz basamağının pH değerinin asit oluşum basamağının pH değerinden daha düşük tutulması yoluyla yapılan pH ayarlamasının üretilen CH<sub>4</sub> miktarında artışa neden olduğu bildirilmiştir (Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018).

### 3.2.3. Organik Madde Yükleme Oranı (OMYO) ve Hidrolitik Alıkonma Zamanı (HAZ)

OMYO çift aşamalı reaktörlerin performans ve stabilitesini sürdürebilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir diğer kriterdir (Srisowmeya ve ark., 2020). Daha yüksek OMYO farklı bakteriyel türlerin performans ve büyümesine yardım ederken sistem için yeterli enerji ve besin sağlar ve sistem stabilitesi üzerinde etkili olan UYA'nin birikmesine neden olur. OMYO'ndaki 1 gUK/L gün'den 6 gUK/L gün'e artış metan ürününün 1,73 kat azalmasına neden olmaktadır (Srisowmeya ve ark., 2020). Sistem stabilitesi üzerinde etkili olan OMYO sıcaklıktan ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Mezofilik koşullar altında artan OMYO ile birlikte metan verimi düşerken aynı OMYO'nda termofilik koşullarda çalıştırılan reaktörden elde edilen metan verimi mezofilik koşullarda çalıştırılan reaktörden elde edilen metan veriminden 1,5 kat daha fazladır. Gıda atıkları gibi biyo-bozunabilir substratlar ile çalışırken daha iyi performans ve stabilite için istenen OMYO oranı 2,5 gUK/L gün değerinin altında tavsiye edilmektedir. OMYO'ndaki artış metanojenik faz üzerinde hidrolitik/asidojenik fazdakinden daha yıkıcıdır ve çift aşamalı süreçlerde metanojenik fazın performansı OMYO inhibisyonuyla etkilenmektedir (İlkılıç ve Deviren, 2011; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Karthikeyan ve ark., 2018; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018; Srisowmeya ve ark., 2020).

Hidrolitik Alıkonma Zamanı (HAZ), substratın reaktör içindeki bekleme süresini tanımlar. Mikrobiyal popülasyonun büyümesi ve substratlardan biyo-gaz eldesi için gerekli zamanı işaret eder. HAZ esas olarak substrat tipine ve proses operasyon koşullarına (özellikle sıcaklık) bağlıdır (Karthikeyan ve ark., 2018; Ren ve ark., 2018). HAZ mezofilik reaktörlerde 14-40 gün iken termofilik reaktörlerde 14-20 gündür. Çift aşamalı anaerobik çürütücülerde HAZ süresi asidojenik faz için genellikle 2-4 gün arasındadır (İlkılıç ve Deviren, 2011; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Karthikeyan ve ark., 2018; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018).

#### 3.2.4. İnokulum

İnokulum özellikleri AD sürecinin performansını etkilemesi açısından önemlidir. Çürütücünün operasyon koşulları iyi kalitede inokulum belirlemede yardımcıdır. Çürütücünün operasyon koşullarının pH 7,0-8,5 aralığında (İlkılıç ve Deviren, 2011; Srisowmeya ve ark., 2020) 1 g  $\text{CH}_3\text{COOH/L}$  değerinden daha düşük UYA, 3 g  $\text{CaCO}_3 / \text{L}$  değerinde yüksek bazlık ve 2,5 g  $\text{N-NH}_4^+/\text{L}$  değerinden düşük amonyum konsantrasyonunda olması istenen inokulum kalitesidir. Substrat inokulum oranı (S/I) UYA birikiminin ve çürütücünün tamponlama kapasitesinin önemli bir parametresidir (Srisowmeya ve ark., 2020). Bu yüzden gıda atığı ve metanojenik biyokütlenin optimal oranı çürütücü stabilitesi, performansı ve ürün miktarının artırılmasında anahtar stratejidir (İlkılıç ve Deviren, 2011; Xu ve ark., 2018). Çift aşamalı sistemlerde S/I oranının 7,5 olmasının üretilen  $\text{CH}_4$  ürününde %12 artışa sebep olduğu belirtilmiştir (Srisowmeya ve ark., 2020).

#### 3.2.5. Substrat

Substrat konsantrasyonu ve bileşimi  $\text{CH}_4$  üretiminde tek başına bile etkilidir. Gıda atıklarının toplam katı içeriği %18,1-%30, uçucu katı bileşimi %17,1-26,35 ve nem içeriği %70-80 arasında değişmektedir (Srisowmeya ve ark., 2020). Daha yüksek katı bileşimi yetersiz karıştırma ve reaktör içerisinde ölü bölgeler oluşturmak suretiyle biyo-dönüşümün etkinliğini engellerken daha düşük katı bileşimi yetersiz substrat miktarı sebebiyle sürecin etkinliğini düşürür. Bu sebeple istenen katı bileşimi %10-25 aralığında olmalıdır (Srisowmeya ve ark., 2020). Ham yağlar spesifik  $\text{CH}_4$  ürünü oluşumu ile pozitif yönde ilişkilirken karbonhidratlar negatif yönde etki oluşturur (Suksong ve ark., 2015).

Besin elementlerinin bileşimi (karbon, azot, oksijen ve hidrojen) anaerobik çürütücünün performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Karbon-azot oranı (C/N) anaerobik çürütücüdeki besin dengesinin işaretidir (Srisowmeya ve ark., 2020). Düzgün ve optimum koşullarda çalışan bir AD süreci için ideal C/N oranı 20-30 iken gıda atıklarının süreçte kullanılması durumunda bu atık türünün sahip olduğu düşük azot/besin oranı içeriği sebebiyle C/N oranı istenen aralığın dışında kalmaktadır (Chen ve ark., 2008). Yüksek C/N oranı besin dengesizliği nedeniyle metanojenik bakterilerin etkinliğini düşürürken düşük C/N oranı ortamdaki  $\text{NH}_3$  birikmesi sebebiyle gerçekleşen pH kayması nedeniyle metanojenik bakteriler üzerinde ölümcül etkiye sebep olmaktadır. Çift aşamalı anaerobik proseslerde daha yüksek C/N oranı mikrobiyal büyüme ve performans için gerekli olan esansiyel azotun eksikliğini gösterirken daha düşük C/N oranı azotun ortamda  $\text{NH}_3$  formunda birikmesine ve ortamdaki pH artışına neden olmaktadır (Srisowmeya ve ark., 2020). Kopsahelis ve ark., (2018) C/N oranı 17'den 30'a yükseldiğinde gıda atığının parçalanma oranının %69'dan %85'e yükselip üretilen biyo-metan ürününün 1,92 kat arttığını bildirmişlerdir.

C/N oranı pH ve sıcaklık değişimlerinden de etkilenir. Sıcaklığın mezofilik koşullardan termofilik koşullara yükselmesi C/N oranında istenen bir artışa neden olacaktır. Mezofilik reaktörde C/N oranı 15 olduğunda dikkate değer bir  $\text{NH}_3$  inhibisyonu gerçekleşirken termofilik reaktörde bu oran 20'dir (Kanchanasuta ve ark., 2017).

C/N oranı substrat ve inokulumun her ikisi ile birden de ilişkilidir bu yüzden optimal C/N oranı substrat, ko-substrat ve operasyon koşullarına da bağlıdır (Srisowmeya ve ark., 2020). Lindner ve ark., (2016) çift aşamalı AD prosesinde biyokütlenin biyo-gaza dönüşümü ve organik bileşiklerin parçalanmasının öncelikli olarak başlangıç substratının özelliklerine bağlı olduğunu işaret ederek şeker pancarı, mısır silajı ve saman ile gerçekleştirdikleri iki aşamalı AD sürecinin substrat verimliliğini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, maksimum miktarda biyo-gaz ürününe şeker pancarı substratı ortalama 401,5 L/kg gün ile ulaşırlarken mısır silajı ve saman ile elde edilen ürün miktarının şeker pancarı veriminden sırasıyla %40,4 ve %80,4 daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle de lignosellülozik substratların çift aşamalı süreçlerdence tek aşamalı süreçler için daha uygun olduğunu ve çift aşamalı süreçler için yüksek şeker içeriği barındıran substratların tavsiye edilebileceğini rapor etmişlerdir.

### 3.2.6. Birlikte Çürütme (Co-digestion)

Gıda atıklarının yüksek biyo-bozunurluğa sahip olması bu atık türünü AD süreci için umut vaat eden bir organik substrat yapmaktadır. Ancak gıda atıklarının tek başlarına AD sürecine alınmaları özellikle termofilik koşullarda UYA'nın birikimi ve NH<sub>3</sub> inhibisyonu nedeniyle yüksek OMYO'larında (OMYO > 2,5 gVS/Lgün) bile genellikle çürütücü istikrarsızlığına yol açmaktadır (Banks ve ark. 2012; Ren ve ark., 2018). Çift aşamalı sistemlerde tek substratın kullanılması sistemden beklenen karakteristik sonuçlara ulaşmayı mümkün kılmamaktadır. Özellikle C/N oranında dengesizlik bulduran substratlarda (gıda atıkları vb.) yüksek biyo-bozunurluk özelliği ve ağır metallerin ihmal edilebilir miktarlarda bulunması sebebiyle, prosesin ilerleyişinde sürece birlikte çürütme tekniğinin adapte edilmesi, çift aşamalı AD yönteminde var olan olumsuzlukların giderilmesi açısından uygun bir teknik olacaktır (Srisowmeya ve ark., 2020). Bu yüzden gıda atıklarının AD sürecinde selülozik substratlar gibi farklı substratlar varlığında yapılan birlikte çürütme AD sisteminde dengesiz ve/veya düşük C/N oranının dengelenmesinin en iyi ve en sıklıkla başvurulan yollarından bir tanesidir. Örneğin, gıda atıklarının düşük N içeriği bulduran karton atıkları ile karıştırılması ortamdaki C/N oranını arttırmaktadır (Zou ve ark., 2018). Bu yolla gıda atıklarının hızlı hidrolizi sonucu ortamda gerçekleşen keskin pH düşüşlerinin önüne geçilerek anaerobik sistemde toplam katının parçalanması sürecinde yeterli tamponlanma kapasitesinin sağlanması suretiyle sistem stabilitesi de sağlanmaktadır (Ren ve ark., 2018). Ayrıca gıda atığının gübre, kanalizasyon çamuru ve lignosellülozik biyokütle gibi (Xu ve ark., 2018; Zou ve ark., 2018) diğer başka substratlar ile birlikte çürütülmesi toksik kimyasalların seyrelmesi, nem içeriğinin ayarlanması, besin maddeleri arasındaki sinerjistik etkinin sağlanması ve mikroorganizmaların etkisinin artırılması sebebiyle toplam üretilen CH<sub>4</sub> ürününün artmasına da neden olmaktadır (Capson-Tojo ve ark., 2017; Zou ve ark., 2018). Azottan zengin içeriğe sahip gıda atıklarının AD prosesinde birlikte çürütme amaçlı kullanılacak bir diğer ko-substrat C/N oranı yüksek saman ve saman kabuklarıdır. Bu ko-substrat tek substratlı AD süreçlerinde gerçekleşen

hızlı asidifikasyonun üstesinden gelinmesine yardımcı olarak reaktör ortamının stabilitesine katkıda bulunmaktadır (Xu ve ark., 2018).

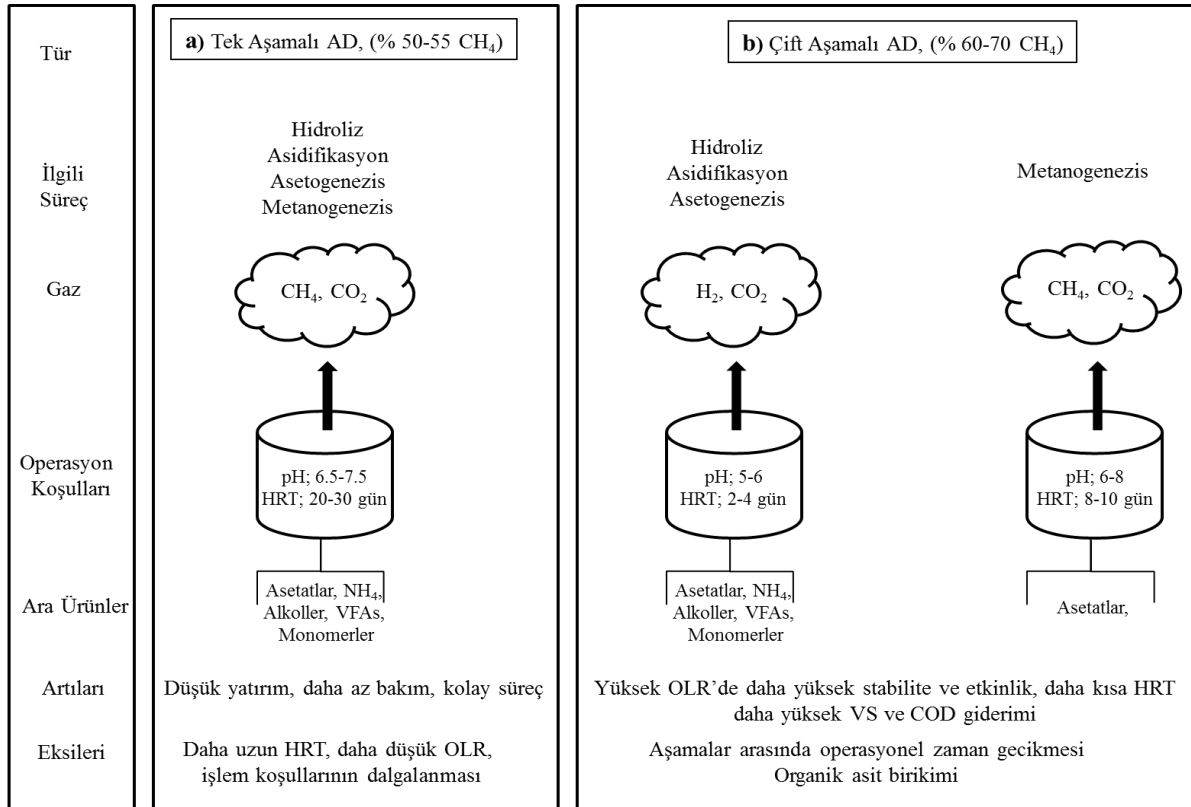
### 3.2.7. Metal İyonları

Çift aşamalı sistemlerde de aynen tek aşamalı sistemlerde olduğu gibi metal iyonlarının mikroorganizmaların gelişmesi ve büyümesi açısından etkili olduğu bilinmektedir. Ca, Na ve K gibi metaller AD performansında önemli rol oynamaktadırlar (Romero-Güiza ve ark., 2016). Ağır metallerin metan bakterileri üzerindeki bağıl toksisiteleri çinko > krom > bakır > kadmiyum > nikel > kurşun (Zn>Cr>Cu>Cd>Ni>Pb) şeklinde sıralanmaktadır (Srisowmeya ve ark., 2020). Srisowmeya ve ark., (2020) yayınladıkları derleme çalışmasında Hu ve ark., (2018) tarafından hidrogenotropik metanojenlerin performansında Na metalinin rol oynadığını mezofilik koşullarda bu metanojenler için optimal Na konsantrasyonunun 350 mg/mL olarak belirlendiğini, mezofilik ve termofilik koşullarda mikroorganizma üzerinde K<sup>+</sup> iyonunun 400 mg/mL değerinden daha düşük konsantrasyonlarda performans artırıcı etkisinin olduğunu rapor edildiğini bildirmişlerdir. Zou ve ark., (2018) ise Ca<sup>+2</sup> iyonlarının optimum konsantrasyonunun 150-300 mg/mL aralığında tespit edildiğini rapor etmişlerdir.

## 4. Tek ve Çift aşamalı AD Süreçlerinin Karşılaştırılması

Gıda atıklarının (a) tek aşamalı ve (b) çift aşamalı anaerobik prosesinin tüm yönlerinin karşılaştırılması olarak gösterimi Şekil 5'te verilmiştir (Srisowmeya ve ark., 2020). Çift aşamalı süreçte daha yüksek OMYO ile daha yüksek CH<sub>4</sub> üretimi elde edilmektedir. Süreç OMYO'ndaki dalgalanmalara karşı tek aşamalı metanojenik sürece göre daha az hassastır. Farklı besinlerin birlikte çürütülmesiyle çürütme etkinliği artırılabilir gibi (Srisowmeya ve ark., 2020) farklı atıkların ilavesi, eser element ilavesi ve başlangıç kültürü olarak aktif inokulumun kullanılması da çürütme etkinliğini arttıran diğer etmenler arasındadır (Zhang ve Jahng, 2012; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Xu ve ark., 2018). Grimberg ve ark., (2015) yaptıkları literatür çalışmasında tek ve çift aşamalı AD süreçlerini karşılaştırmışlardır. Her iki süreçte de kullanılan reaktörlerin çok düşük yükleme oranlarında bile stabiliteyi koruduğunu, iki aşamalı sistemde ilk basamakta asidifikasyonun hızlıca gerçekleşmesi nedeniyle ilk basamak olan hidroliz basamağının etkinliğinin düştüğünü yine ilk basamakta yüksek lipid degradasyonu ve uzun zincirli yağ asitlerinin dönüşümünün gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Çift aşamalı çürütücü sistemlerin; sistem kararlılığı daha yüksek ve kontrol edilebilir iken substrat parçalanması ve CH<sub>4</sub> ürün miktarı daha yüksektir. Aynı koşullarda çalıştırılan çift aşamalı çürütücülerin tek aşamalı olanlara göre %10-20 oranında daha yüksek CH<sub>4</sub> ürettiği literatürdeki çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Çift aşamalı sistemlerin bir diğer avantajı, ilk basamak biyo-hidrojen üretimi ve sülfat giderilmesi amacıyla optimize edilirken ikinci basamağın CH<sub>4</sub> üretimini artırılması ve CH<sub>4</sub> içeriğinin zenginleştirilmesi amacıyla optimizasyonunun yapılabilmesidir (İlkılıç ve Deviren, 2011; Uçkun Kıran ve ark., 2014; Karthikeyan ve ark., 2018; Ren ve ark., 2018; Xu ve ark., 2018). Xiao ve ark., (2018) çalışmalarında tek ve çift aşamalı AD proseslerini süreç boyunca geri dönüşüm

ve pH kontrolü yapılmaksızın yürütmüşler ve her iki prosesin performans, enerji dengesi ve reaksiyon sürecini karşılaştırmalı olarak çalışmışlardır. Aynı alıkonma zamanında (30 gün) gıda atığı ile beslenen tek aşamalı anaerobik sürecin daha yüksek pH ve çamur bazlığına, daha yüksek serbest amonyak azotu (SAA) ve SAA inhibitör etkisine, daha düşük UYA ve metanogenezis basamağında daha düşük toplam amonyak azotuna sahip olduğunu, çift aşamalı sistemden elde edilen ortalama biyo-gaz ürününün 0,810 L/gUK ile tek aşamalı sistemden elde edilene (0,775 L/gUK) göre daha yüksek olmasına rağmen üretilen biyo-gaz ürününün metan içeriğinin çift aşamalı sistemde %59,1 L/gUK, tek aşamalı sistemde ise %61,6 L/gUK olduğunu ve her iki anaerobik süreçinde metan üretim yüzdesinin benzer olduğunu belirtmişlerdir. Xiao ve ark., tek aşamalı AD sürecinin çift aşamalı AD sürecine göre daha yüksek enerji kazanımı ve oranına ayrıca dört çürütme adımında da daha yüksek spesifik reaksiyon oranına sahip olduğunu belirterek gıda atığı ile çalışılan çift aşamalı AD sürecinin operasyonel parametrelerinin geliştirilmesi gerektiğinin zorunluluğunu da rapor etmişlerdir.



**Şekil 5.** Gıda atığının (a) tek aşamalı ve (b) çift aşamalı anaerobik süreçlerinin karşılaştırılması (Srisowmeya ve ark., 2020)

Kumar ve ark., (2019) şehir organik atıklarının substrat olarak kullanıldığı tek ve çift aşamalı AD süreçlerinin karşılaştırmasını yaptıkları çalışmalarında, iki set olarak çalıştıkları tek aşamalı AD sürecinde ortalama olarak %5,5 H<sub>2</sub>, %22,5 CH<sub>4</sub> ve %32 CO<sub>2</sub>, çift aşamalı AD sürecinde ise %6 H<sub>2</sub>, %15 CH<sub>4</sub> ve %56 CO<sub>2</sub> içeren biyo-gaz verimine ulaştıklarını rapor etmişler ve her iki sistem arasında dikkate değer bir farklılık olduğunu belirtmişlerdir. Çift aşamalı proste elde edilen CH<sub>4</sub> veriminin

tek aşamalı sisteme göre düşük olmasının nedenini ise süreç sırasında pH değişimlerinin kontrol edilmemesi olarak açıklamışlardır.

## 5. Sonuç

Oksijensiz parçalanma yöntemi gıda atıklarından enerji elde edilmesinde umut vaat eden bir teknolojidir. Bununla birlikte, gıda atıklarının AD sürecinde gerçekleşen UYA birikimi, proses istikrarsızlığı, köpürme, düşük tampon kapasitesi ve yüksek finansal maliyet gibi teknik ve ekonomik zorluklar proste bu atıkların yaygın olarak kullanılmasının önüne geçmektedir. Gıda atıkları ile AD sürecinin ekonomik uygulanabilirliği açısından yüksek OMYO'na ulaşılabilmesi ve sistem kararlılığının sağlanması son derece önemlidir. Günümüzde var olan çalışmaların çeşitliliği ve her çalışmada kullanılan yöntem, malzeme ve hammadde bileşiminin farklı olması nedeniyle gıda atıklarının AD sürecine adaptasyonunda sayılan olumsuzluklara rağmen umut verici sonuçlar da elde edilmektedir. AD sistemleri yatırım maliyeti gerektiren uygulamalardır ve süreçten elde edilen gelir üretilen elektrik ve CH<sub>4</sub> satışından sağlanmaktadır. Gıda atıklarının hammadde olarak kullanıldığı AD sürecini anlamak ve iyileştirmek için yapılacak detaylı araştırmaların gerekliliği bilinmekle birlikte bu teknolojinin yaygın olarak uygulanabilmesi amacıyla üniversitelerde yapılan akademik çalışmaların yanı sıra üniversite, endüstri ve hükümet arasındaki sıkı işbirliklerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, tek ve çift aşamalı AD süreçleri substrat özellikleri ve işlem açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çift aşamalı sistemler tek aşamalı sistemlere göre avantajlara sahip olmalarına rağmen günümüzde çalıştırılan reaktörlerin %1'den az miktarı çift aşamalı sistemlerdir. Bunun sebebi ise gıda atıklarının substrat olarak kullanıldıkları çift aşamalı süreçlerin proses tasarımının geliştirilmesi ve optimizasyonu üzerinde çalışılmasının gerekliliğidir. Birçok çalışmada sistem seçimi için elde edilen enerji, hidrojen üretiminin getirileri, biyo-gaz verimliliğinin artırılmasının maliyeti ve proses kontrol ve sürdürülebilirliğinin maliyet değerlendirilmelerinin gerektiği ve teorik olarak uygun olsa da uygulanabilirliği üzerinde ekstra zorluklar yaratmaması gerektiği vurgulanmaktadır.

Yukarıda sayılan çeşitli sebeplerden dolayı çift aşamalı sistemlerin ticari başarıya ulaşabilmesi için geliştirilmesinin gerektiği açıktır. Tek aşamalı sistemlere göre daha etkin bir proses olmalarına rağmen çift aşamalı AD proseslerinin var olan zorlukları tartışılmalı ve uygulamanın küçük ölçekli laboratuvar uygulamalarından endüstriyel boyuttaki geniş ölçekli uygulamalara başarılı bir şekilde adaptasyonu yapılmalıdır. Bu adaptasyon sürecindeki anahtar başarının ise sistemde rol alan metabolik yollar ve enerji eldesi, reaktör integrasyonu ve asidojenik reaktörün performansı gibi teknik problemlerin endüstriyel boyutlara uyum sağlamasından geçmekte olduğu unutulmamalı ve çift aşamalı sistemlerin ekonomik değerlendirmesinin de tam ölçekli reaktörlere geçilmeden önce yapılması gerektiği hatırlanmalıdır.

Sonuç olarak, tek aşamalı sistemlere göre laboratuvar ölçeğinde üstünlüklere sahip olduğu literatürdeki çeşitli çalışmalarda ifade edilmesine rağmen çift aşamalı sistemlerde gıda atıklarından



AD prosesi ile enerji eldesi, teknik ve ekonomik olarak geliştirilmesi gereken ve maliyetli bir teknolojidir. Bu sebeple günümüzde daha ekonomik ve iyi bilinen bir teknoloji olan tek aşamalı reaktör sistemleri gıda atıklarından enerji eldesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

### **Kaynakça**

- Ahmed B., Tyagi VK., Aboudi K., Naseem A., Álvarez-Güelfo CJ., Kazmi AA., Romero-García LI. Thermally enhanced solubilization and anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Chemosphere* 2021; 282: 131136.
- Ardıç İ., Taner F. Biyokütleden biyogaz üretimi,” (2021, 29 Eylül). [Çevrimiçi]. Erişim: [http://www.emo.org.tr/ekler/14101ec47c52b48\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/14101ec47c52b48_ek.pdf).
- Banks JC., Chesshire M., Heaven S., Arnold R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology* 2011; 102: 612-620.
- Banks JC., Zhang Y., Jiang Y., Heaven S. Trace elements requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations. *Bioresource Technology* 2012; 104: 127-135.
- Bilgili MY. Katı atık yönetiminde kullanılan bazı kavramlar ve açıklamaları. *Avrasya Terim Dergisi* 2020; 8(2): 88-97.
- Braguglia CM., Gallipoli A., Gianico A., Pagliaccia P. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: a critical review. *Bioresource Technology* 2018; 248: 37-56.
- Capson-Tojo G., Trably E., Rouez M., Crest M., Steyer J., Escudé R. Dry anaerobic digestion of food waste and cardboard at different substrate loads, solid contents and co-digestion proportions. *Bioresource Technology* 2017; 233: 166-175.
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop waste: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16(3): 1462-1476.
- Chen Y., Cheng JJ., Creamer KS. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 2008; 99(10): 4044-4064.
- Cho, EJ., Trinh, TP., Song, Y., Lee, YG., Bae, HJ. Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource Technology* 2020; 298: 122386.
- De-Gioannis D., Muntoni A., Polettini A., Pomi R., Spiga D. Energy recovery from one- and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Waste Management* 2017; 68: 595-602.

- Demirarslan KO. Katı atık yönetiminden meydana gelebilecek sera gazları ile matematiksel tahminleri üzerine literatür araştırması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2020; 8: 363-380.
- Deng W. Turning food waste into biofuel. Springer Science+Business Media: 357-375, 2016, Singapore.
- Donoso-Bravo A., Fdz-Polanco M. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and grease trap: assessment of enzyme addition. *Process Biochemistry* 2013; 48(5-6): 936-940.
- Dung TNB., Sen B., Chen CC., Kumar G., Lin CY. Food waste to bioenergy via anaerobic processes. *Energy Procedia* 2014; 61: 307-312.
- Dursun S., Özdemir ZÖ. Anaerobik bakteriler kullanılarak atıklardan biyogaz üretimi. *Kimya & Sanayi* 2016; 2(6): 7-22.
- EC, 2011. A Road Map for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050, COM (2011) 112 Final, Brussels.
- Forster-Carneiro T., Pérez M., Romero LI. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technology* 2008; 99: 6994-7002.
- Grimberg SJ., Hilderbrandt D., Kinnunen M., Rogers M. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase digester-assessment of variable loadings on system performance. *Bioresource Technology* 2015; 178: 226-229.
- Gwak YR., Kim YB., Gwak IS., Lee SH. Economic evaluation of synthetic ethanol production by using domestic biowastes and coal mixture. *Fuel* 2018; 213: 115-122.
- Hafid HS., Rahman NAA., Md Shah UK., Baharuddin AS., Arif AB. Feasibility of using kitchen waste as future substrate for bioethanol production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 74: 671-686.
- Hans M., Kumar S. Biohythane production in two-stage anaerobic digestion system. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(32): 17363-17380.
- Hu Y., Kobayashi T., Zhen G., Shi C., Xu K. Effects of lipid concentration on thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and grease waste in a siphon-driven self-agitated anaerobic reactor. *Biotechnology Reports* 2018; 19: e00269.
- Izumi K., Okishio Y., Nagao N., Niwa C., Yamamoto S., Toda T. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2010; 64(7): 601-608.
- İlkılıç C., Deviren H. Biyogazın üretimi ve üretimi etkileyen faktörler. 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011, Elazığ.
- Kanchanasuta S., Sillaparassamee O. Enhancement of hydrogen and methane production from co-digestion of palm oil decanter cake and crude glycerol using two stage thermophilic and mesophilic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(5): 3440-3446.

- Karthikeyan OP., Trably E., Mehariya S., Bernet N., Wong JWC., Carrere H. Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: A review. *Bioresource Technology* 2018; 249: 1025-1039.
- Kazda M., Zak M., Kern M., Bengelsdorf F. Treatment of liquid and solid municipal waste in anaerobic digestion optimized for biogas production. *Fresenius Environmental Bulletin* 2013; 22(7a): 1-6.
- Kırmızıkuşak D., Yücel R. Yiyecek içecek işletmelerindeki gıda kaybı ve israfının maliyete etkisi. *Journal of Tourism and Gastronomy Studies* 2021; 9(1): 448-469.
- Kopsahelis A., Stavropoulos K., Zafiri C., Kornaros M. Anaerobic co-digestion of end-of-life dairy products with agroindustrial wastes in a mesophilic pilot-scale two-stage system: assessment of system's performance. *Energy Conversion and Management* 2018; 165: 851-860.
- Kougias P., Boe K., Tsapekos P., Angelidaki I. Foam suppression in overloaded manure-based biogas reactors using antifoaming agents. *Bioresource Technology* 2014; 153: 198-205.
- Kumar CP., Rena, Meenakshi A., Khapre AS., Kumar S., Anshul A., Singh L., Kim S., Lee B., Kumar R. Bio-Hytane production from organic fraction of municipal solid waste in single and two stage anaerobic digestion processes. *Bioresource Technology* 2019; 294: 122220-122225.
- Li Y., Jin Y., Li J., Li H., Yu Z., Nie Y. Effects of thermal pretreatment on degradation kinetics of organics during kitchen waste anaerobic digestion. *Energy* 2017; 118: 377-386.
- Lindner J., Zielonka S., Oechsner H., Lemmer A. Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates?. *Bioresource Technology* 2016; 200: 470-476.
- Maina S., Kachrimanidou V., Koutinas A. A Roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 2017; 8: 18-23.
- Mao C., Feng Y., Wang X., Ren G. Review on Research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2015; 45: 540-555.
- Mata-Alvarez J., Macé S., Llabrés P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 2000; 74: 3-16.
- Meng Y., Li S., Yuan H., Zou D., Liu Y., Zhu B., Chufo A., Jaffar M., Li X. Evaluating biomethane production from anaerobic mono- and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste. *Bioresource Technology* 2015; 185: 7-13.
- Nayak A., Bhushan B. An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management* 2019; 233: 352-370.
- Pham TPT., Kaushik R., Parshetti GK., Mahmood R., Balasubramanian R. Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions. *Waste Management* 2015; 38: 399-408.
- Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., Balázs, E. Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology* 2021; 60: 76-84.

- Rasi S., Veijanen A., Rintala J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 2007; 32(8): 1375-1380.
- Ren Y., Yu M., Wu C., Wang Q., Gao M., Huang Q., Liu Y. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: research updates and tendencies. *Bioresource Technology* 2018; 247: 1069-1076.
- Rocamora, I., Wagland, ST., Villa, R., Simpson, EW., Fernández, O., Bajón- Fernández, Y. Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. *Bioresource Technology* 2020; 299: 122681.
- Romero-Güiza MS., Vila J., Mata-Alvarez J., Chimenos JM., Astals S. The role of additives on anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 58: 1486-1499.
- Scarlat N., Dallemand JF, Monforti-Ferrario F., Nita V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts. *Environmental Development* 2015; 15: 3-34.
- Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini Devi G. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020; 119: 109587.
- Suksong W., Kongjan P., O-Thong S. Biohythane production from co-digestion of palm oil mill effluent with solid residues by two-stage solid state anaerobic digestion process. *Energy Procedia* 2015; 79: 943-949.
- Tekiner İH., Mercan NN., Kahraman A., Özel M. Dünya ve Türkiye’de gıda israfı ve kaybına genel bir bakış. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2021; 3(2): 123-128.
- Thi DNB., Kumar G., Lin CY. An overview of food waste management in developing countries: current status and future perspective. *Journal of Environmental Management* 2015; 157: 220-229.
- Trisakti B., Irvan, Mahdalena, Taslim, Turmuzi M. Effect of temperature on methanogenesis stage of two-stage anaerobic digestion of palm oil mill effluent (POME) into biogas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017; 206: 012027.
- Uçkun Kıran E., Trzcinski AP., Ng WJ., Liu Y. Bioconversion of food waste to energy, A review. *Fuel* 2014; 134: 389-399.
- Uçkun Kıran E., Trzcinski AP., Liu Y. Enhancing the hydrolysis and methane production potential of mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. *Bioresource Technology* 2015; 183: 47-52.
- Vea EB., Romeo D., Thomsen M. Biowaste valorization in a future circular bioeconomy. 25<sup>th</sup> CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April-2 May 2018, Copenhagen, Denmark.
- Venkata M., Nikhil GN., Chiranjeevi P., Nagendranatha RC., Rohit MV., Naresh KA., Sarkar O. Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: critical review and future perspectives. *Bioresource Technology* 2016; 215: 2-12.

- Wu C., Wang Q., Xiang J., Yu M., Chang Q, Gao M., Sonomoto K. Enhanced productions and recoveries of ethanol and methane from food waste by a three-stage process. *Energy & Fuels* 2015; 29(10): 6494-6500.
- Xiao B., Qin Y., Wu J., Chen H., Yu., Liu J., Li Y. Comparison of single-stage and two-stage thermophilic anaerobic digestion of food waste: performance, energy balance and reaction process. *Energy Conversion and Management* 2018; 156: 215-223.
- Xu F., Li Y., Ge X., Yang L., Li Y. Anaerobic digestion of food waste—challenges and opportunities. *Bioresource Technology* 2018; 247: 1047-1058.
- Yang F., Li GX., Yang QY., Luo WH. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere* 2013; 93(7): 1393–1399.
- Yıldız Ş., Saltabaş F., Balahorli V., Sezer K., Yağmur K. Organik atıklardan biyogaz üretimi (biyometanizasyon) projesi-İstanbul örneği,” Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu (TÜRKAY 2009), 2019, İstanbul.
- Zhang L., Jahng D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements. *Waste Management* 2012; 32(8): 1509-1515.
- Zhang J., Loh KC., Li W., Lim JW., Dai Y., Tong YW. Three-stage anaerobic digester for food waste. *Applied Energy* 2017; 194: 287-295.
- Zou H., Chen Y., Shi J., Zhao T., Yu Q., Yu S., Shi D., Chai H., Gu L., He Q., Ai H. Mesophilic anaerobic co-digestion of residual sludge with different lignocellulosic wastes in the batch digester. *Bioresource Technology* 2018; 268: 371-381.
- Zupancic G., Jemec A. Anaerobic digestion of tannery waste: semi-continuous and anaerobic sequencing batch reactor processes. *Bioresource Technology* 2010; 101: 26-33.