

1279 - DIGESTÃO DE MACRÓFITAS DA FAMÍLIA LEMNÁCEAE E LODO ANAERÓBIO DE REATOR UASB: AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MISTURA.

Nestor Leonel Muñoz Hoyos⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidad del Cauca (Colômbia), Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidad del Valle (Colômbia). Doutor e mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é pesquisador do Departamento de Hidráulica e Saneamento DHS da UFPR.

Jose Carlos Alves Barroso Junior⁽²⁾

Engenheiro de Produção e Sistemas pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Doutor e mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - DEHA - Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus do Pici, CE.

Maria Cristina de Almeida Silva⁽³⁾

Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Doutora e mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professora Adjunta do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Ian Rocha de Almeida⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitário e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Mestre e doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Luiz Olinto Monteggia⁽⁵⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutor em Engenharia de Meio Ambiente pela Universidade de Newcastle. Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, N° 100 - Prédio Principal, Bloco V, 2° andar, PH 07 - Jardim das Américas - Curitiba - Paraná - CEP: 81531-000 - Brasil - +55 (41) 3361-3142.

e-mail: nestorlmh@gmail.com

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás da biomassa lignocelulósica produzida em excesso no tratamento de água residuária doméstica, do mesmo modo, avaliou-se a incidência da mistura sobre a produção volumétrica e o rendimento de biogás e metano do processo de co-digestão. As macrófitas flutuantes utilizadas como substrato foram obtidas da lagoa de pós-tratamento do efluente do reator anaeróbio, as espécies dominantes identificadas nesta lagoa foram a *Lemna minor*, *Wolffia columbiana*, *Spirodela polyrrhiza* e *Spirodela intermedia*. Utilizou-se como inóculo e co-substrato lodo anaeróbio do reator de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB) tratando esgoto sanitário. A temperatura média de operação dos biodigestores foi de 23 ± 2.0 °C, o tempo de duração do ensaio foi de 32 dias e a relação de carregamento utilizada foi I/S=1.0. O substrato foi pré-tratado mecanicamente com triturador de resíduos orgânicos Trapp TR200. Utilizaram-se nove biodigestores para realizar o experimento anaeróbio, seis deles carregados com lodo anaeróbio e substrato nas proporções requeridas para a relação I/S=1.0. Nos demais biodigestores (3) foi adicionado somente lodo anaeróbio (AS) para determinar a produção líquida do substrato. Os seis biodigestores com substrato e lodo anaeróbio dividiram-se em dois conjuntos, o conjunto I/S=1.0-WM referente a triplicata de biodigestores com mistura (WM) e o conjunto I/S=1.0-WoM referente a triplicata sem mistura (WoM). A mistura foi realizada no turno da manhã de forma manual e intermitente, todos os dias com duração de 1 minuto. Os resultados experimentais mostraram que o regime de mistura nos biodigestores contribuiu para o aumento da produção de biogás e metano, na composição do biogás e no rendimento específico de metano. Os biodigestores com macrófitas com mistura (I/S=1.0-WM) apresentaram um incremento de 20% de biogás, 30% de metano e 28% quanto ao rendimento específico de metano (Y_{CH_4}) comparativamente aos biodigestores sem mistura (I/S=1.0-WoM).

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, biocombustível, macrófitas, lodo anaeróbio, digestão anaeróbia.

INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia (DA) é uma tecnologia de recuperação de bioenergia eficaz e de baixo custo (O'Sullivan et al. 2010). A tecnologia DA provavelmente seja a mais importante para o abastecimento de energia renovável para as populações onde o sistema distribuído nacional não tem infraestrutura disponível, normalmente são comunidades localizadas nas zonas rurais dos países em desenvolvimento com dificuldade ao acesso energético (Kumar Khanal et al. 2021).

O principal produto do processo biológico é uma mistura de gases, composta principalmente de metano (45-70%) e dióxido de carbono (30-55%), e em menor medida hidrogênio, nitrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, vapor de água, hidrocarbonetos e siloxanos (Muñoz et al. 2015; Angelidaki et al. 2018).

Diferentes parâmetros operacionais têm incidência positiva ou negativa no desempenho do processo anaeróbio. O tipo de biomassa, relação de carregamento orgânico inóculo/substrato (I/S), a temperatura, o tempo de detenção hidráulica e de sólidos, o tipo de reator, o tamanho de partícula, a mistura e a intensidade e os pré-tratamentos do substrato são os alguns dos mais estudados (Liu et al. 2019; Rocamora et al. 2020; Yang et al. 2021).

Pesquisas têm demonstrado a importância do efeito da mistura sobre a eficiência da DA. Alguns dos benefícios relatados pelos autores são: otimização do contato com o substrato, enzimas e microrganismos, melhoria da etapa de hidrólise, resistência à formação de espuma e camada flutuante, dispersão do material tóxico, evita a estratificação do digestor, liberação e aumento da produção de biogás (Lindmark et al. 2014a; Kariyama et al. 2018; Wang et al. 2019; Tabatabaei et al. 2020).

Os métodos comumente utilizados para realizar a mistura do digestor são: a mistura mecânica, hidráulica e pneumática (Deublein and Steinhauser 2011). A mistura mecânica intermitente é um dos métodos recomendados devido a sua eficácia no consumo de energia e pelos resultados obtidos em termos de rendimento, equiparáveis e em alguns casos superiores aos alcançados com sistemas de mistura contínua (Lindmark et al. 2014b; Bergamo et al. 2020).

Embora a mistura tenha um importante efeito no processo biológico anaeróbio, segundo os resultados de muitas pesquisas neste tópico, ainda hoje não existe consenso sobre a mistura ideal para a DA em termos de intensidade e do método a ser empregado, já que a mistura adequada depende de vários fatores próprios de cada caso e/ou experimento (Singh et al. 2020).

OBJETIVO DO TRABALHO

Neste estudo, foi avaliado o potencial de produção de biogás e metano por meio de testes em escala laboratorial de digestão anaeróbia da biomassa lignocelulósica flutuante produzida em lagoa de alta taxa com lodo anaeróbio proveniente de reator UASB tratando esgoto sanitário. Conjuntamente foi analisado o efeito do regime de mistura sobre a produção volumétrica de biogás e metano e a estabilidade do processo anaeróbio.

METODOLOGIA

As amostras de inóculo e substrato foram coletadas em estação piloto experimental situada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na cidade de Porto Alegre/RS, Brasil. O substrato lignocelulósico foi obtido de uma lagoa de alta taxa alimentada com efluente sanitário após tratamento anaeróbio. A lagoa possui volume útil de 80 m³ e foi operada com TDH de 3,3 dias (Barroso Junior et al. 2022). Encontrou-se que a *Spirodela*, *Lemna* e *Wolffia* foram os gêneros presentes na lagoa e que a *Lemna* minor, *Spirodela* intermedia, *Spirodela* polyrhiza, e a *Wolffia* columbiana as espécies predominantes.

A biomassa foi coletada do reator UASB alimentado com esgoto sanitário. O reator tem altura de 4 m e diâmetro de 2,5 m. A vazão de alimentação foi de 1,6 m³/h e carga hidráulica volumétrica média aplicada no sistema de 2,0 m³/m³d (Hoyos 2021).

O teste realizou-se em 9 biodigestores de 50 L de volume construídos em tubos de PVC. Os reatores foram adaptados com sistema de agitação manual de eixo vertical.

Seis biodigestores foram carregados com lodo anaeróbio e substrato (macrófitas) na relação I/S=1.0. Este conjunto de reatores foi dividido em dois grupos, o grupo I/S=1.0-WM referente a triplicata de biodigestores com mistura (WM) e o conjunto I/S=1.0-WoM referente a triplicata sem mistura (WoM). Nos biodigestores restantes foi adicionado lodo anaeróbio (AS) para poder determinar a produção líquida de biogás e metano das macrófitas. A mistura do meio de reação dos biodigestores com macrófitas (I/S=1.0-WM e I/S=1.0-WoM) e do lodo foi realizada uma vez ao dia na jornada da manhã de forma manual com duração de 1 minuto.

Tabela 1. Dados de alimentação dos biodigestores

Parâmetros operativos	I/S=1.0-WM	I/S=1.0-WoM	Lodo anaeróbio
ST Inóculo (g/L)	26,7	26,7	26,7
STV Inóculo (g/L)	11,2	11,2	11,2
Volume inóculo (L)	10	10	10
STV Inóculo (g)	112	112	112
Massa fresca substrato (g)	1820	1820	
ST Substrato (g)	127,8	127,8	
STV Substrato (g)	112,6	112,6	
pH	6,7	6,8	6,9

A medição da vazão de biogás produzido nos processos anaeróbios foi quantificada diariamente com o método de deslocamento de água utilizando o frasco de Mariotte modificado, utilizando-se garrafas de água mineral de 20 L e acoplados em cada biodigestor.

A avaliação da estabilidade e do desempenho dos testes anaeróbios de digestão de lodo anaeróbio e macrófitas foi baseada no monitoramento de um conjunto de parâmetros físicos e químicos realizados de acordo com as metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA-AWWA-WEF 2017).

O biogás produzido e a sua qualidade foram avaliadas diariamente nos nove biodigestores. A produção de biogás determinou-se de acordo com o volume de água deslocado do frasco de Mariotte e a composição biogás foi verificada de acordo com a metodologia de Hoyos (2021).

RESULTADOS

O conteúdo de umidade, ST e SVT para o substrato (macrófitas) foi de 93%, 7,0%, e 88,1%, respectivamente. A concentração de ST e SVT do lodo anaeróbio foi de 26706 e 11247 mg/L, indicando que a fração de biomassa ativa no inóculo (SVT/ST) foi de aproximadamente 40%. O pH do lodo anaeróbio situou-se na faixa neutra (6,9), a concentração de AT, AP e NTK, foram de 466, 167 e 773 mg/L, respectivamente. Os valores dos parâmetros físicos e químicos determinados são menores dos valores reportados na literatura para lodos anaeróbios procedentes de ETE.

A temperatura média de operação dos biodigestores do teste BMP foi de 23±2.0 °C e o tempo de duração do teste foi de 32 dias.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos do teste de BMP dos biodigestores com mistura (WM) e sem mistura (WoM) e do lodo anaeróbio (AS).

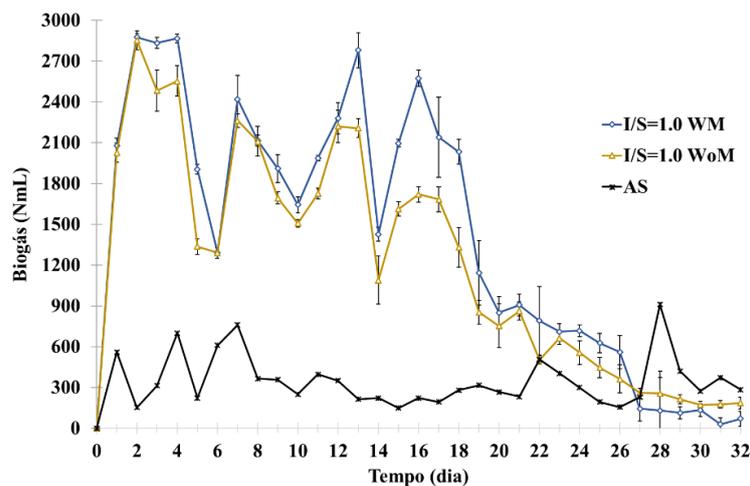
Tabela 2. Resultados teste BMP e do lodo anaeróbio

Ensaio	1.0-WM	1.0-WoM	AS
NmL Biogás	46176,7*	39976,7*	11473,3
NmL CH ₄	23211,2*	18150,6*	1274,6
Conteúdo de CH ₄ (%)	47±2	44±2	11±4

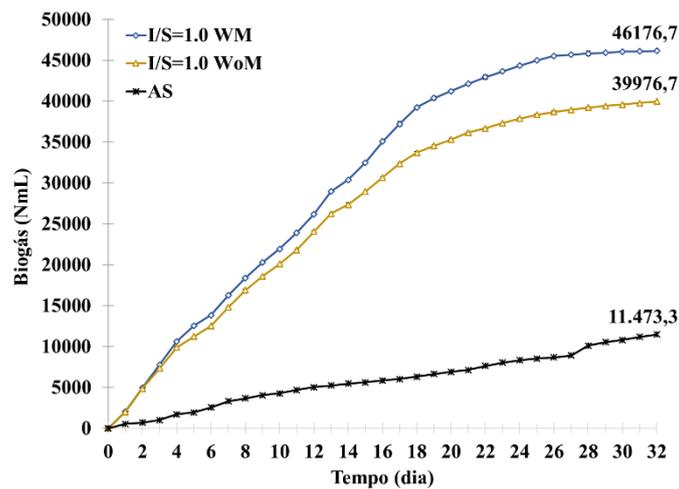
Ensaio	1.0-WM	1.0-WoM	AS
Fração de CH ₄ (%)	50,3	45,2	11,1
Y _{CH₄} NmL CH ₄ /g SV	206,2	161,3	

*Produção líquida

Os resultados obtidos da produção diária de biogás (Gráfica 1), e acumulada de biogás (Gráfica 2), e metano (Gráfica 3), e a produção específica de metano (Gráfica 4), foram plotados, os gráficos resultantes se apresentam a seguir:



Gráfica 1. Produção diária de biogás em relação ao tempo



Gráfica 2. Produção acumulada de biogás em relação ao tempo

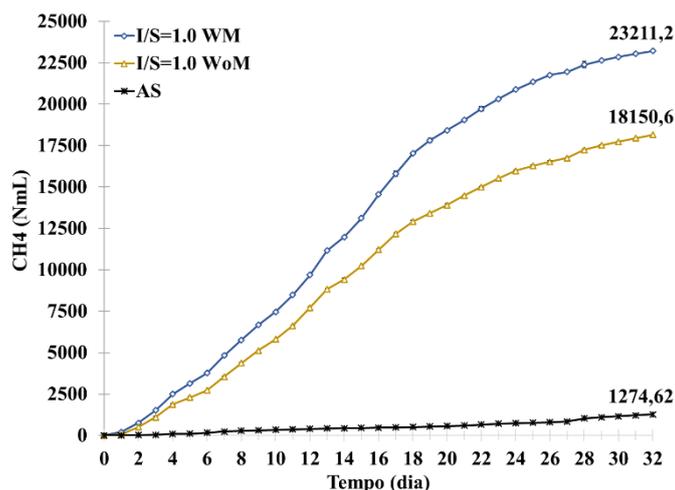


Gráfico 3. Produção acumulada de metano em relação ao tempo

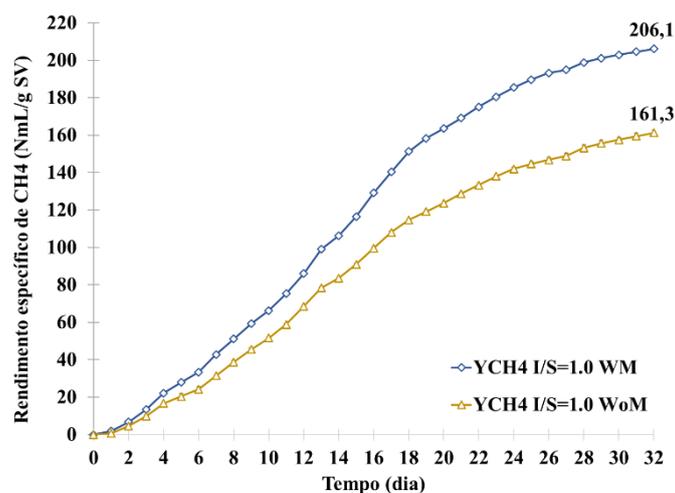


Gráfico 4. Rendimento específico de metano em relação ao tempo para os biodigestores com mistura I/S=1.0-WM e sem I/S=1.0-WoM.

A Tabela 3 apresenta os dados dos parâmetros de avaliação do processo anaeróbio durante o ensaio experimental.

Tabela 3. Caracterização física e química dos biodigestores

Parâmetros		I/S=1.0-WM	I/S=1.0-WoM	Lodo anaeróbio
ST (mg/L)	Inicial	33701	32219	26706
	Final	27646	14038	23356
SVT (mg/L)	Inicial	11701	11758	11247
	Final	8624	4438	9488
DQO _T (mg/L)	Inicial	37252±417	37205±666	35706±1.428
	Final	35776±351	11866±1.291	34031±373
DQO _F (mg/L)	Inicial	2224±171	2611±293	2863±324
	Final	1102±96	876±56	692±42
NTK (mg/L)	Inicial	432	650	760
	Final	1834	964	870

Parâmetros		I/S=1.0-WM	I/S=1.0-WoM	Lodo anaeróbio
AT (mg/L)	Inicial	1183	1173	466
	Final	3233	2426	773
AP (mg/L)	Inicial	544	523	167
	Final	2372	1725	393
pH	Inicial	6,74	6,76	6,9
	Final	7,2	7,0	6,8

DISCUSSÃO

A produção de biogás nos biodigestores com macrófitas foi superior quando comparado com a produção do lodo anaeróbio (Gráfica 1), isto evidenciou que a macrófita como substrato favoreceu a produtividade do processo anaeróbio. A produção elevada de biogás no início do teste provavelmente esteja relacionada com uma ligeira hidrólises do material lignocelulósico o que facilitou a degradação dos compostos biodegradáveis (Gaur et al. 2017).

As curvas de produção acumulada de biogás (Gráfica 2) indicam que, a partir do dia 4 nos biodigestores com mistura (I/S=1.0-WM), a produção de biogás foi incrementada comparativamente com os biodigestores sem mistura (I/S=1.0-WoM) demonstrando que o a mistura aplicada sobre o processo anaeróbio causou aumento da produção de biogás e facilitou a sua liberação.

De acordo com a produção acumulada de biogás, foi verificado um incremento percentual de aproximadamente 20% nos biodigestores I/S=1.0-WM quando comparado com os biodigestores do mesmo grupo I/S=1.0-WoM (sem mistura), respectivamente. Os biodigestores com mistura apresentaram incrementos na produção de metano de 29,5% para o grupo I/S=1.0-WM.

Observa-se que os biodigestores com regime de mistura apresentaram um incremento no rendimento 28% superior ao obtido pelos biodigestores sem mistura (I/S=1.0-WoM) (Gráfica 4). Estes resultados indicam a importância da mistura do conteúdo dos digestores para aumento da produção de biogás no processo de codigestão anaeróbia da biomassa de macrófitas e lodo anaeróbio proveniente de reator UASB.

A Tabela 3 mostra redução dos ST e SVT inferiores a 20%, evidenciando dificuldade por parte dos microrganismos em hidrolisar os componentes lignocelulósicos da estrutura da macrófita. Segundo Nizami et al. (2009) a biodegradabilidade deste material é limitada pela cristalinidade da celulose e pelo conteúdo de lignina.

O balanço de sólidos nos biodigestores com macrófitas e mistura (I/S=1.0-WM) mostrou que houve redução da fração sólida de ST de 18% e de STV de 26%.

Verificou-se aumento na concentração do nitrogênio em maior percentual nos biodigestores com mistura (I/S=1.0-WM), provavelmente causado pela solubilização de compostos nitrogenados do substrato lignocelulósico. Concentrações que não afetaram a estabilidade do processo anaeróbio.

Foi verificado aumento na concentração de AT nos biodigestores com macrófitas. O incremento da AT e AP reduz o risco de acidificação do processo anaeróbio pelo possível acúmulo de AGV e ajuda na manutenção do pH.

CONCLUSÕES

A mistura intermitente aplicada nos biodigestores de macrófitas resultou em maior produção de biogás e metano. Os resultados obtidos evidenciaram incrementos na produção de biogás e metano de 20% e 30% comparativamente com os biodigestores sem mistura.

De igual maneira, observou-se que o conteúdo de metano incrementou nos biodigestores com mistura. No final dos testes foi verificado que nos biodigestores com macrófitas houve um aumento na proporção de metano de 8,1%.

O rendimento específico de metano também foi alterado pelo regime de mistura, os biodigestores com macrófitas e com regime de mistura intermitente ao longo do teste (I/S=1.0-WM) apresentaram um aumento de 28% no rendimento específico de metano (Y_{CH_4}) comparativamente aos biodigestores sem mistura (I/S=1.0-WoM).

Desta forma, o regime de mistura intermitente e mínima mostrou-se como uma alternativa viável e com efeitos positivos para os processos de digestão anaeróbia testados neste estudo, a adoção deste parâmetro operacional evita a estratificação do substrato ao interior do biodigestor o que poderia gerar possíveis problemas operacionais e de estabilidade do processo biológico.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento eterno ao grande cientista e professor Luiz Olinto Monteggia (in memoriam). Seu legado e suas contribuições para o saneamento do Mundo e do Brasil permaneceram sempre em vigor. Foi uma honra e um prazer ser seu aluno, muito obrigado Mestre. Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Brasil pela bolsa de doutorado concedida a N. L. M. Hoyos Código Financeiro 88882.345763/206-02.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Angelidaki I, Treu L, Tsapekos P, et al (2018) Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol Adv* 36
2. APHA-AWWA-WEF (2017) *The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edn. Washington DC
3. Barroso Junior JCA, Silva MC de A, Hoyos NLM, Monteggia LO (2022) Evaluation of upflow Anaerobic sludge blanket effluent post-treatment in pilot-scale by microalgae high-rate Ponds and macrophytes pond for nutrient recovery. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131951>
4. Bergamo U, Viccione G, Coppola S, et al (2020) Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing. <https://doi.org/10.2166/WST.2020.248>
5. Deublein D, Steinhauser A (2011) Biogas from waste and renewable resources: an introduction.
6. Gaur RZ, Khan AA, Suthar S (2017) Effect of thermal pre-treatment on co-digestion of duckweed (*Lemna gibba*) and waste activated sludge on biogas production. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.133>
7. Hoyos NLM (2021) Co-Digestão Anaeróbia de Macrófitas com Excesso de Lodo de Reator UASB Gerados no Tratamento de Efluentes Domésticos. UFRGS
8. Kariyama ID, Zhai X, Wu B (2018) Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. *Water Res* 143:503–517
9. Kumar Khanal S, Lü F, Wong JWC, et al (2021) Anaerobic digestion beyond biogas. *Bioresour Technol* 337
10. Lindmark J, Eriksson P, Thorin E (2014a) The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.006>
11. Lindmark J, Thorin E, Bel Fdhila R, Dahlquist E (2014b) Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40:1030–1047
12. Liu Y, Fang J, Tong X, et al (2019) Change to biogas production in solid-state anaerobic digestion using rice straw as substrates at different temperatures. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122066>
13. Muñoz R, Meier L, Diaz I, Jeison D (2015) A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9379-1>

14. Nizami AS, Korres NE, Murphy JD (2009) Review of the integrated process for the production of grass biomethane. <https://doi.org/10.1021/es901533j>
15. O'Sullivan C, Rounsefell B, Grinham A, et al (2010) Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.027>
16. Rocamora I, Wagland ST, Villa R, et al (2020) Dry anaerobic digestion of organic waste: A review of operational parameters and their impact on process performance. *Bioresour Technol* 299:122681
17. Singh B, Szamosi Z, Siménfalvi Z (2020) Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731413>
18. Tabatabaei M, Aghbashlo M, Valijanian E, et al (2020) A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.037>
19. Wang H, Larson RA, Borchardt M, Spencer S (2019) Effect of mixing duration on biogas production and methanogen distribution in an anaerobic digester. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1621951>
20. Yang H, Deng L, Wu J, et al (2021) Intermittent air mixing system for anaerobic digestion of animal wastewater: Operating conditions and full-scale validation. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125304>