

BIORREATORES ANAERÓBIOS DE MEMBRANA DINÂMICA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: REVISÃO

José Raniery Rodrigues Cirne¹
André Luiz Muniz Brito²
Ediano Duarte de Lima³
Wilton Silva Lopes⁴

RESUMO

O presente trabalho faz uma breve revisão bibliográfica da tecnologia de Biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica (BRAnMDs) considerando o estudo da configuração do módulo de membrana, formação e limpeza da membrana dinâmica (MD). Esta tecnologia se torna muito promissora pois a combinação de reatores anaeróbios com o processo de separação de membrana tem apresentado resultados satisfatórios quando comparado com outras tecnologias de tratamento de águas residuárias. Apesar de seu estudo recente, trabalhos confirmam boa eficiência na remoção de turbidez, sólidos suspensos e DQO. Outras pesquisas comprovam a eficiência de até 99% da DQO em BRAnMDs utilizando o módulo da membrana dentro do reator e na parte externa. O BRAnMD é uma tecnologia rentável para o tratamento de águas residuárias, no entanto ainda necessita de estudos para otimização, concentrando-se em melhoria da qualidade do efluente, operação do biorreator, controle no processo de filtração da MD, exploração de estratégias eficientes para produção e coleta de biogás.

Palavras-chave: Biorreator de membrana, Incrustações, Membrana dinâmica, Água residuária.

INTRODUÇÃO

Uma das principais fontes de poluição dos corpos aquáticos no Brasil é o despejo de esgoto doméstico e/ou industrial sem nenhum tratamento. Diversas tecnologia e alternativas são utilizadas para a remoção dos poluentes, nutrientes e matéria orgânica que estão presentes nos esgotos.

Além das técnicas comumente utilizadas para o tratamento de águas residuárias, atualmente cresce a pesquisa a respeito dos biorreatores de membrana (BRM). Estes apresentam um processo bastante viável e de grande eficiência, apresentando um efluente tratado (permeado) com qualidade excelente, podendo ser eficiente na ausência de contaminação fecal e de sólidos suspensos. Segundo Skouteris *et al.* (2012) os BRMs anaeróbios têm recebido muita atenção, embora os BRMs sejam aplicados principalmente em condições aeróbias.

¹ Doutorando em Engenharia Ambiental - UEPB, raniery_rodrigues@hotmail.com;

² Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental - UEPB, andrebriito@gmail.com

³ Doutorando em Engenharia Ambiental - UEPB, ediano_duarte@hotmail.com;

⁴ Doutor em Química, UEPB, wilton@uepb.edu.br.

Apesar da boa eficiência no tratamento, Hu *et al.* (2016) afirma que o uso da tecnologia de BRM pode se tornar oneroso, pois as membranas apresentam custo elevado e o sistema necessita de alta demanda de energia elétrica para estar em funcionamento.

Desta forma, a tecnologia de membrana dinâmica tem atraído muito interesse nos últimos tempos, porque apresenta uma ótima relação custo benefício, pequeno espaço requerido, baixa produção de lodo em excesso e bons resultados para a remoção de matéria orgânica.

O biorreator anaeróbio de membrana dinâmica (BRAnMD) funciona combinando a digestão anaeróbia com o processo de separação por membrana, e vem sendo utilizado no tratamento de águas residuárias e lodo, no objetivo de melhorar a qualidade do efluente e produzir metano (DHAR *et al.*, 2013).

O sistema combinado de biorreatores anaeróbios e membranas tem o principal objetivo de reduzir o volume do biorreator por facilitar a separação entre o tempo de detenção hidráulica (TDH) e o tempo de retenção celular (TRC). Nos sistemas de BRAnM ocorre TDHs relativamente mais curtos e longos TRCs, ou seja, a biomassa no biorreator é mantida mais tempo que o lodo, levando à redução do volume do biorreator, enquanto corresponde a altas taxas de digestão e melhora o desempenho do sistema (DAGNEW *et al.*, 2012).

Deste modo, o presente trabalho faz uma breve revisão bibliográfica sobre biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica e uma análise de alguns artigos internacionais mais atualizados sobre esta tecnologia, abordando as configurações utilizadas e resultados mais significativos.

METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de um estudo de revisão bibliográfica sobre a produção científica do tema: Biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica (BRAnMDs). Esta pesquisa também contempla uma análise de quatro (4) artigos científicos da base de dados “Bioresource Technology”, apresentando dados mais atualizados sobre a temática. Tal análise leva em consideração a metodologia utilizada, configuração das membranas, tipo de biorreator, tratamento, remoção de turbidez, DQO, entre outros aspectos. Os artigos foram acessados no mês de maio e junho de 2019.

DESENVOLVIMENTO

Biorreatores de membrana (BRMs)

A tecnologia de biorreator de membrana (BRM) combina os processos de tratamento biológicos de efluentes com o processo de separação por membranas. Para a tecnologia de membranas o sistema pode ser utilizado processos de ultrafiltração, onde os tamanhos de poros variam de 0,05 a 0,4 μm . Desta forma, os sistemas de BRM permitem a retenção de flocos bacterianos e sólidos suspensos dentro do biorreator (LE CHECH *et al.*, 2006).

O Biorreator anaeróbio de membrana (BRAnM) apresenta vantagens quando comparamos os processos convencionais de tratamento de águas residuárias, dentre elas: exige pequenas áreas, produz um efluente de boa qualidade, boa capacidade para a remoção de material orgânico e menor produção de lodo, segundo Sun *et al.*, (2018).

Esta tecnologia foi introduzida no final dos anos 60 mas não atraiu muito interesse neste tempo devido ao alto custo das membranas comerciais de micro e ultrafiltração. Segundo Le Chech (2006), o projeto original foi introduzido por Smith, DiGregorio e Talcott em 1969, onde puderam combinar o uso de reatores de lodo ativado com o processo de separação por membranas operando com o fluxo tangencial.

Nos BRAnMs ocorre a retenção de biomassa na etapa de filtração, na qual permite a operação em elevados tempo de retenção de sólidos, gerando um efluente de melhor qualidade, também conhecido como permeado.

Torres *et al.* (2011) acredita que a combinação desses dois sistemas (digestão anaeróbia e separação por membrana) garante a manutenção de microrganismos responsáveis pela degradação de material orgânico, e proporciona um obstáculo (barreira) para os poluentes que se encontram suspensos nas águas residuárias.

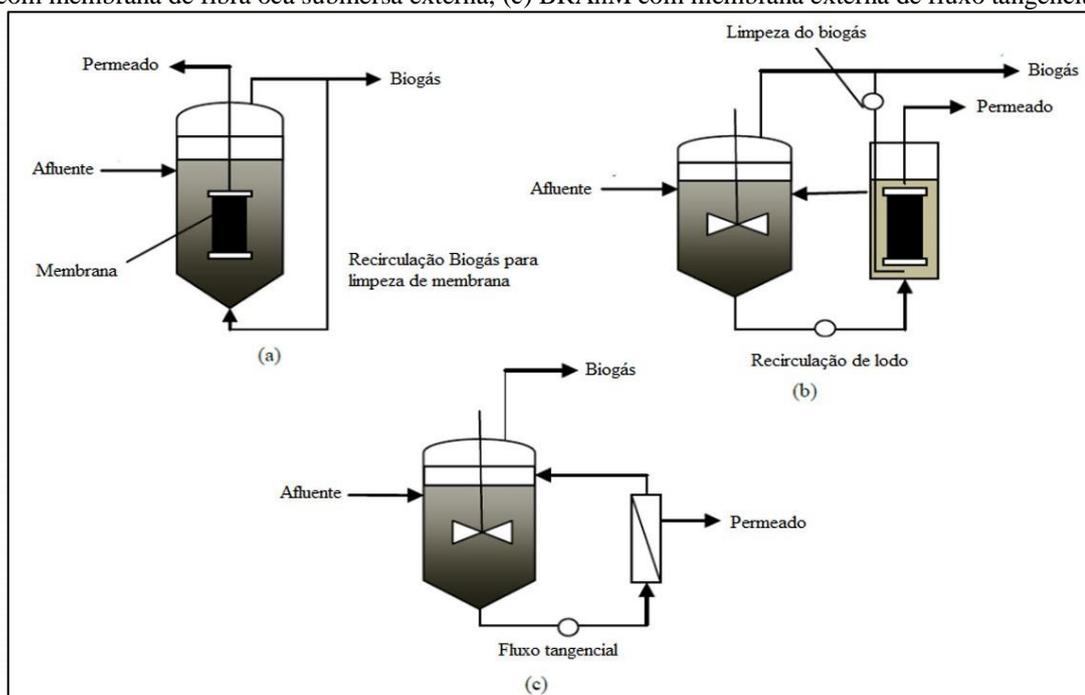
Configuração das membranas

A configuração da membrana utilizada em cada sistema é importante para determinar as condições operacionais aplicadas ao reator.

Segundo Chang (2014) a separação por membrana pode ser integrada a biorreatores anaeróbios em três formas diferentes: a filtração por membrana submersa interna, a filtração por membrana submersa externa e a filtração por membrana externa com fluxo tangencial,

como mostra a figura 1. O BRAnM pode ser de mistura completa, reator de manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB), reatores anaeróbios de leito fluidizado e outros tipos de reatores anaeróbicos.

Figura 1: Diferentes configurações do sistema de BRAnM. (a) BRAnM com membrana Submersa; (b) BRAnM com membrana de fibra oca submersa externa; (c) BRAnM com membrana externa de fluxo tangencial.



Fonte: Chang, 2014.

Segundo Le-Clech (2006) a configuração externa promove um maior controle hidrodinâmico do fouling, e oferece as vantagens de fácil substituição da membrana e elevados fluxos, ou seja, apresenta uma maior flexibilidade operacional. Entretanto, esta configuração de membrana apresenta alta velocidade de fluxo tangencial que resulta num alto consumo de energia e na deterioração das propriedades das partículas, liberando macromoléculas do interior da célula para a solução, e por sua vez, contribui com o aumento de compostos que podem ser adsorvidos pelos poros das membranas, reduzindo o fluxo.

Na configuração de membrana submersa o módulo de filtração é colocado no interior do reator, eliminando a necessidade de recirculação do sólido retido demandando menor quantidade de energia. O líquido permeado é obtido por meio de uma sucção do conteúdo do reator que atravessa as paredes da membrana. Através da diferença de pressão há a separação entre o concentrado e o permeado. Nesse tipo de configuração o fluxo permeado não atinge velocidades muito altas devido a pressão transmembrana ser limitada, e pelo fato de os

mecanismos de limpeza não serem tão eficientes o que requer maiores áreas de membrana (SMITH *et al.*, 2013).

Incrustações nas membranas

As incrustações na membrana (*fouling*) ainda são os principais fatores que limitam a eficiência do BRAnM. Tais incrustações causam aumento de resistência a filtração, redução de fluxo do líquido permeado e limpeza mais frequente, podendo diminuir a vida útil da membrana. O *fouling* é um processo que pode ser afetado por diversas variáveis, dentre elas: o material da membrana, tamanho do poro, modo de operação, característica do lodo e condições operacionais como temperatura, idade do lodo, pressão, TDH, TRS e fluxo da membrana (LIU, *et al.*, 2012).

Nos BRMs, espera-se um rápido declínio de fluxo que ocorre no estágio inicial da filtração. A taxa de incrustação diminui até manter-se constante. Bae e Tak (2005) dividiram esse processo de incrustação em três fases nos BRMs. Eles utilizaram amostras de licor misto do BRM filtrado a 100 kPa durante um período de 5 horas com uma membrana de ultrafiltração. Verificou-se que o principal parâmetro que afeta a incrustação inicial (fase 1) era a deposição da fração solúvel da biomassa. As partículas de lodo e coloides não seriam a causa da incrustação no primeiro momento, porque estes seriam removidos pelo fluxo tangencial e estariam em concentração baixa. Na fase 2, o principal fenômeno que ocorre é a deposição das partículas do lodo, provocando uma redução no fluxo permeado. Na fase 3 o fluxo parece estabilizar, indicando que fluxo do permeado mantém-se em equilíbrio.

A incrustação na membrana também pode ser classificada como biológica, orgânica ou inorgânica dependendo dos componentes responsáveis pela incrustação (WANG *et al.*, 2014). A incrustação biológica é formada devido à deposição e crescimento de microrganismos sobre a superfície da membrana. A incrustação deve-se também ao acúmulo e adsorção de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e produtos microbianos solúveis (SMP) na superfície da membrana. Pode-se definir os EPS como material polimérico ligado à superfície celular que são extraídos por diferentes métodos físicos e químicos. E os SMP pode ser definido como os produtos microbianos liberados em grandes quantidades para a solução como resultado da lise celular e da hidrólise de EPS (WANG *et al.*, 2014).

Membrana dinâmica (MD)

O módulo de membrana dinâmica engloba o material suporte e a própria membrana que será formada. A membrana dinâmica (MD), também chamada de membrana secundária pode ser usada como um filtro antes do material de suporte, e pode fornecer retenção em biorreatores aeróbios de membrana dinâmica (BRMD) e em biorreatores anaeróbios de membrana dinâmica (BRAnMDs), proporcionando um processo com baixo custo de membrana, alto fluxo e fácil limpeza (HU *et al.*, 2018).

Ersahin *et al.* (2014) afirmam que o acúmulo de partículas sólidas, como células microbianas, orgânicos extracelulares e precipitados inorgânicos na superfície da membrana é bastante comum nas tecnologias de BRAnMs. Essa massa acumulada fica mais densa e ajudará na formação da “torta” ao longo do tempo, regulando a limitação de incrustações e fluxo. Esta camada de “torta” formada em uma camada suporte, tanto em malha como em um filtro de tecido é chamado de membrana dinâmica (MD), podendo ser usado como um filtro para o material suporte, assim, mesmo com o material suporte de poros mais largos, a camada densa da MD ajudará na retenção efetiva de sólidos suspensos em BRAnMDs.

A membrana pode ser limpa de forma física ou química. A frequência dependerá da intensidade da colmatação, variando de semanas ou até mesmo meses. Zhang *et al.* (2011) mostraram em seu estudo que o BRAnMD tratava as águas residuárias com alto fluxo de 65L/m²h, e a retrolavagem de água efetivamente restaurou a permeabilidade da MD quando a pressão transmembrana (PTM) excedeu 25 kPa.

A limpeza química pode ser realizada com substâncias químicas em concentrações baixas. An *et al.* (2009) utilizou a limpeza química para remover incrustações da membrana e recuperar sua permeabilidade através de uma concentração de 0,5% de NaClO (hipoclorito de sódio), por 2 horas de duração. A limpeza foi satisfatória, no entanto, verificou-se a má qualidade do efluente no início da etapa após a limpeza química. O efluente atingiu uma melhor qualidade após 1 ou 2 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Xiong *et al.*, (2019) em sua pesquisa mais recente, utilizou a tecnologia de membrana dinâmica para tratar águas residuárias, com o objetivo de recuperar compostos orgânicos e analisar o biogás gerado. Montou um BRAnMD, onde o módulo de membrana se encontrava

submerso ao reator e utilizou malhas no suporte de membrana (malhas de aço inoxidável com um tamanho de poro de 10 e 25 μm e malha de nylon com um tamanho de poro de 25 μm). Em seus testes, verificou-se um rápido aumento da pressão transmembrana (PTM) para 30 KPa para a malha de nylon e um rápido declínio na turbidez indicando uma formação rápida de MD pela retenção de partículas nas águas residuárias durante um pequeno período de filtração (menos de 10h) na malha de aço inoxidável. Posteriormente, a turbidez do efluente começou a aumentar até estabilizar, isto ocorreu porque partículas mais finas passaram devido a um reduzido efeito de retenção da MD causado por alta pressão de filtração e resistência imposta a camada da MD.

Também investigou-se a influência da malha de aço inoxidável (25 μm) em três camadas e notou-se que os módulos de MD que utilizam malhas de uma camada, duas camadas e três camadas mostraram perfis semelhantes de mudança de PTM, indicando um aumento gradual, com valores finais de PTM de 4,3, 6,3 e 7,5 kPa, respectivamente.

Cai et al. (2018) estudou membranas com tamanho de poros de 1, 5, 10, 25 e 50 μm em um biorreator com membrana sumersa. O filtro foi feito de aço inoxidável e envolvido com malha de nylon. De acordo com os testes realizados, verificou-se que a turbidez inicial da membrana de 50 μm era muito alta, enquanto que o fluxo para o filtro de 1 μm era muito baixo. Portanto em sua pesquisa foi estudado as membranas de tamanho de poros de 5, 10 e 25 μm para o teste a longo prazo. Com relação ao resultados, verificou-se que a PTM manteve-se abaixo de 0,6 Kpa até o 60° dia, após o 62° dia que se elevou gradativamente até 8,2 Kpa.

Os três filtros (com tamanho de poros de 5, 10 e 25 μm) apresentaram valores de turbidez similares no estágio de MD já formada, em torno de 40 NTU. Alguns trabalhos sugerem que para um tamanho de poro de 30–100 μm , a média de sólidos suspensos ou turbidez durante o estágio da MD estabilizada é menos de 5 mg / L ou 10 NTU, respectivamente.

ERSAHIN *et al.* (2017) analisou a eficiência do BRAnMD nas duas configurações: submersa e externa. O módulo de membrana era do tipo folha plana, e utilizou tecido de monofilamento de polipropileno com um tamanho médio de poros de 10 μm como material suporte. Os resultados de tratamento dos BRAnMDs submersos e externos que tratam águas residuárias de alta resistência foram avaliados e comparados entre si. Embora a qualidade de permeado ligeiramente melhor em termos de concentração de DQO fosse obtida pelo BRAnMD submerso, mais de 99% de eficiência de remoção de DQO foi conseguida em ambas as configurações. Foi necessário mais tempo no BRAnMD externo comparativamente ao BRAnMD submerso para formar uma camada de DM eficaz, permitindo obter uma eficiência de remoção estável e baixas concentrações de DQO solúvel no permeado. Por conseguinte, a

configuração BRAnMD submersa parece mais adequada quando é necessário um curto período de arranque ou quando se considera a limpeza periódica do tecido do filtro.

Saleem *et al.* (2016) realizou um estudo com um BRAnMD com o módulo de membrana externa de fluxo tangencial. Seus resultados para as duas corridas de filtração indicam que o desenvolvimento da MD é um processo faseado em que o comportamento inicial do PTM foi caracterizado por um aumento lento e quase linear, seguido por uma segunda fase de aumento rápido. Também constatou-se que para o desenvolvimento de uma MD em configuração de fluxo cruzado, fluxo de filtração e a velocidade de fluxo tangencial precisam estar equilibrados para estimular a compactação da camada de torta. Os resultados deste estudo também sugerem que os fluxos aplicados tem papel significativo quando comparado com a concentração de sólidos suspensos para o desenvolvimento da camada de MD. No entanto, alta concentração de SS pode ter aumentado o número de partículas depositando na superfície da tela no primeiro experimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia de biorreatores anaeróbios combinados com o processo de separação por membranas tem demonstrado ser promissor, embora esta temática seja pouco explorada. De acordo com os estudos mais recentes encontrados, a qualidade do efluente gerado em BRAnMDs depende do tamanho do poro do material suporte, a configuração utilizada para o módulo de membrana (Submersa ou externa), velocidade de fluxo e qualidade do afluente.

O processo de BRAnMD é uma tecnologia rentável para o tratamento de águas residuárias, no entanto ainda necessita de estudos para otimização, concentrando-se em melhoria da qualidade do efluente, operação do biorreator, controle no processo de filtração da MD, exploração de estratégias eficientes para produção e coleta de biogás.

REFERÊNCIAS

AN, Y., WANG, Z., WU, Z., YANG, D., ZHOU, Q. Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Chem. Eng. J.* 155 (3), 709–715. 2009.

BAE, T.-H., TAK, T.-M., Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor, *J. Membr. Sci.* 264 (2005) 151–160.

CAI, D.; HUANG J.; LIU, G.; LI, M.; YU, Y.; MENG, F. Effect of support material pore size on the filtration behavior of dynamic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. volume 255, Pages 359-363 (2018).

CHANG, S. Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR) for Wastewater treatment. *Advances in Chemical Engineering and Science*, v 4, p.56-61, 2014.

DAGNEW, M.; PARKER, Q.; SETO, P. Anaerobic membrane bioreactors for treating waste activated sludge: Short term membrane fouling characterization and control tests. **Journal of Membrane Science**, n. 421-422, p.103–110, 2012.

DHAR, B-R.; GAO, Y.; YEO, H.; LEE, H-S. Separation of competitive microorganisms using anaerobic membrane bioreactors as pretreatment to microbial electrochemical cells. **Bioresource Technology**, n. 148, p. 208-214, 2013.

ERSAHIN, M. E.; OZGUN H.; TAO, Y.; VAN LIER, J. B. Applicability of dynamic membrane technology in anaerobic membrane bioreactors. **Water Research**, [s.l.], v. 48, jan. 2014. Elsevier BV.

ERSAHIN, M. E.; TAO, Y.; OZGUN, H.; GIMENEZ, J. B.; SPANIERS, H.; VAN LIER, J. B. Impact of anaerobic dynamic membrane bioreactor configuration on treatment and filterability performance. *Journal of Membrane Science*. Volume 526, 15, Pages 387-394. 2017.

HU, Y.; WANG, X. C.; NGO, H. H.; SUN, O.; YANG, Y. Anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*. Volume 247, Pages 1107-1118. 2018.

HU, Y.; WANG, X-C.; TIAN, W.; NGO, H-H.; CHEN, R. Towards stable operation of a dynamic membrane bioreactor (DMBR): Operational process, behavior and retention effect of dynamic membrane. *Journal of Membrane Science*, n° 498, p. 20-29. 2016.

LE-CLECH, P.; CHEN, V.; FANE, T.A.G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. **Journal of Membrane Science**, n. 28, p. 17–53, 2006.

LIU, Y.; LIU, H.; CUI, L.; ZHANG, K. The ration of food-to-microorganism (F/M) on membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating low-strength wastewater. **Dessalination**, n. 297, p. 97-103, 2012.

SALEEM, M.; ALIBARDI, L.; LAVAGNOLO, M. C.; COSSU, R.; SPAGNI, A. Effect of filtration flux on the development and operation of a dynamic membrane for anaerobic wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. Volume 180, 15, Pages 459-465. 2016

SKOUTERIS, G.; HERMOSILLA, D.; LÓPEZ, P.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. **Chemical Engineering Journal**, n. 198-199, p. 138-148, 2012.

SMITH, A.L.; SKERFLOS, J.S.; RASKIN, L. Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater. **Water Research**, n. 47, p. 1655-1665, 2013.

SUN, F., ZHANG, N., Li, F., WANG, X., ZHANG, J., SONG, L., LIANG, S., Dynamic analysis of self-forming dynamic membrane (SFDM) filtration in submerged anaerobic bioreactor: Performance, characteristic, and mechanism, *Bioresource Technology* (2018).

TORRES, A.; HEMMELMANN, A.; VERGARA, C.; JEISON, D. Application of two-phase slug-flow regime to control flux reduction on anaerobic membrane bioreactors treating wastewaters with high suspended solids concentration. *Separation and Purification Technology*, v79, p. 20-25, 2011.

WANG, Z.; MA, J.; TANG, C.Y.; KIMURA, K.; WANG, Q.; HAN, X. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. **Journal of Membrane Science**, n. 468, p. 276-307, 2014.

XIONG, J.; YU, S.; HU, Y.; YANG, Y.; WANG, X. C. Applying a dynamic membrane filtration (DMF) process for domestic wastewater preconcentration: Organics recovery and bioenergy production potential analysis. *Science of The Total Environment*. Volume 680, Pages 35-43. 2019.

ZHANG, X., WANG, Z., WU, Z., WEI, T., LU, F., TONG, J., Mai, S. Membrane fouling in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for municipal wastewater treatment: characteristics of membrane foulants and bulk sludge. *Process Biochem.* 2 (4), 1538–1546. 2011.