

超音波線上清洗生物性積垢控制對 SMBR 活性污泥與過濾通量效應之研究

摘要

薄膜分離技術已廣泛應用在水與廢水處理上，尤其是水及廢水回收再利用更是不可或缺。而薄膜積垢(fouling)現象卻影響其使用效率及提高處理成本，進而阻礙其應用推廣。本研究於**沉浸式**薄膜生物反應槽(Submerged membrane bioreactor, SMBR)內組裝一超音波設備，應用於線上薄膜去生物性積垢，探討超音波對薄膜積垢控制與對活性污泥活性之影響，以期將此技術應用於 SMBR 處理廢水，提高其操效率、降低處理成本提高水回收再利用之目標。在 10000 mg/L 高活性污泥濃度下，於薄膜過濾時間至 26 小時，薄膜積垢使過濾通量，由 769.2 mL/h 之初使過濾通量下降至 270.8 mL/h。於第 32 小時進行 2 分鐘的超音波線上清洗，清洗後通量回復到 466 mL/h，恢復過濾通量達 72%以上。但繼續過濾至 46 小時，通量下降到 127.6 mL/h，再進行線上清洗，清洗後通量卻只能回復到 217.2 mL/h，恢復過濾通量約 70%。另進行超音波線上清洗，發現在實驗使用之超音波頻率與功率下，對微生物分解有機物影響不明顯。

關鍵詞：薄膜生物反應槽，超音波，線上清洗

一、前言

活性污泥法因技術成熟、處理效果穩定、成本低等優點，被廣泛的應用在處理生活污水或工業廢水場。標準活性污泥處理程序，雖可有效地分解廢水中之有機物質，但需有終沉池分離大量污泥分離大量污泥。偶有突發狀況常無法有效固液分離，去除水中之固體物。此程序仍有許多問題待克服如高污泥產量、生物處理效果有限、佔地面積大及終沉池沉澱效率等問題⁽¹⁻³⁾。

近年來針對活性污泥法問題的改善，發展出薄膜生物反應槽(Membrane bioreactor, MBR)技術。MBR 技術結合傳統活性污泥法與薄膜技術而成⁽⁴⁻⁵⁾，此程序為現階段最具潛力的廢水回收再利用技術之一。MBR 技術不僅保留傳統活性污泥法的優點，且不需要沉澱池及其他附屬之過濾與後續處理設施，可避免生物反應槽內微生物被洗出(wash out)，亦可免除活性污泥容易膨化或上浮的缺點而降低處理效率，而成為一新世代之生物處理技術。

MBR 通常應用於二級生物處理，同時具有生物處理與薄膜過濾之功能，因

此其處理水質為三級處理之標準，利於水回收再利用。在發展初期薄膜過濾系統放置於反應槽後，類似活性污泥法之終沉池的方式操作，稱為側式(Side-stream MBR)系統(如圖 1 所示)。而後為了節省操作動力及土地成本，將薄膜系統置於傳統的活性污泥反應槽中，稱為沉浸式(submerged MBR, SMBR)系統。此系統中的薄膜可取代傳統廢水生物處理程序中的終沉池。由於活性污泥會累積於薄膜的表面並形成一層生物膜，使得沉浸式 MBR 系統可同時具有活性汙泥及生物膜兩種反應特性，可提升出流水質⁽⁶⁾。

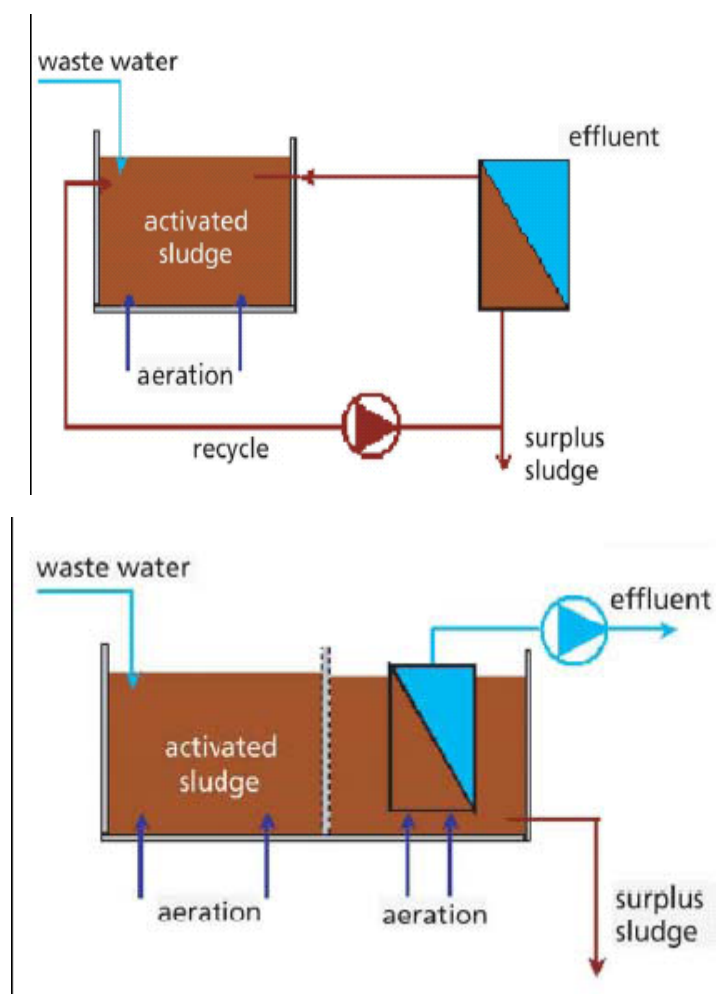


Fig.1 Side-stream MBR and submerged MBR

MBR 處理系統有高容積效率、低污泥產生率及操作簡單等優點，且處理效率優於傳統活性污泥法。不論採用沉浸式或側式薄膜生物反應槽，其出流水質佳，在正常操作條件下出流水之 SS 甚小，且可忍受高負荷變動；操作時因混合液懸浮固體物(MLSS)長期保留於反應槽內，包含原生動物、後生動物、真菌及細菌等微生物，雖可保持反應槽內之微生物多樣性及高污泥濃度，但薄膜表面之積垢表現嚴重⁽¹³⁻¹⁴⁾，如圖 2 所示⁽⁶⁾，導致系統過濾出水量嚴重降低。因此 MBR 系統雖可於低水力停留時間、高污泥停留時間及高 MLSS 下操作，但薄膜積垢現象成為 MBR 操作上最大困擾之一。





Fig.2 The biofilm on the hollow fibers in SMBR wastewater treatment plant

造成薄膜積垢的主要物質可分為：

1. 有機性積垢(organic fouling): 膠體、腐植酸、黃酸、蛋白質及醣類碳水化合物等；
2. 無機積性垢(inorganic fouling): 膠體、硫酸鹽及碳酸鹽等無機物；
3. 生物性積垢(biofouling): 微生物附著及生長繁殖於薄膜表面⁽¹⁰⁾。

生物性積垢不易去除，為積垢最嚴重的型式之一。此現象會增加薄膜過濾阻抗，且隨著時間而增加，造成過濾通量降低、能量耗用增加，降低處理效率及縮短薄膜使用年限，進而提高操作成本。薄膜使用壽命高度影響操作成本，因此積垢的控制為延長薄膜使用壽命、提高處理效率及降低操作成本的重要課題。積垢控制方法可歸納為三類⁽⁷⁾：

1. 進流預先處理: 好的預先處理可減緩積垢；
2. 操作條件: 如溫度、壓力及掃流速度⁽¹²⁾；



3. 薄膜清洗⁽⁷⁾:又可分為

- a. 傳統方法:(1)物理清洗:如海綿球清洗(sponge ball cleaning)、順沖與逆沖(forward and reverse flushing)及逆洗(back wash)等⁽¹³⁾。但此物理方法難以完全清除強力附著薄膜表面或陷在薄膜孔隙結構內之污物,而且清洗後過濾通量逐次降低⁽¹⁴⁾。(2)化學清洗:為最常用的清洗方法,尤其可清除物裡清洗無法去除的積垢。依不同的積垢成分選定清洗劑,但經常清洗可能會縮短薄膜使用壽命⁽¹⁵⁾。
- b. 非傳統方法:有超音波音場、電場、磁場及電化學方法等⁽⁷⁾。

化學清洗有其缺點,需要化學藥品費用、產生清洗後之化學廢棄物,且須處理及費用;物理性清洗的順沖及逆沖或逆洗,清洗後之過濾通量仍會漸次降低。而且物理或化學清洗均需要暫停系統操作,為連續操作系統最不樂見⁽¹⁶⁾。超音波音場是一種有效的薄膜積垢控制方法,其優點為音場可線上持續或間歇性操作,不影響操作的持續性,且不會產生化學性廢棄物⁽¹⁷⁾。

超音波放射器大多為點狀且置於反應槽外,積垢為無積物或有機物,少有探討超音波清洗對微生物積垢及其活性之影響。本研究將以板狀超音波震盪盒放置於含高濃度 MLSS 的 SBR 槽內線上清洗,以探討超音波音場清洗等對過濾通量及槽內微生物活性的影響。

二、材料與方法

本實驗將超音波震盪子設備直接置放於 MBR 中,在薄膜過濾的情況下,同時進行線上間歇式超音波震盪,探討超音波對於去除薄膜積垢之效應。以 1000 mg/L 葡萄糖泡製人工汙水批次加入 MBR 系統中,探討系統在超音波震盪效應下活性汙泥對 COD 降解的影響。

2.1 實驗設備

2.1.1 超音波設備

超音波震盪線上清洗程序為將超音波震盪投置入於沉浸 MBR 中,每隔一段時間進行 1 次 2 分鐘之超音波震盪線上清洗,震盪頻率為 40 KHz。本實驗所使用的超音波震盪機之實體及規格,如圖 1 及表 1 所示。

2.1.2 沉浸式 MBR 槽體

槽體為塑膠材質的盒子,體積為 17 公升,如圖 2 所示。





圖 1. FX-302 超音波震盪器



圖 2. 沉浸式 MBR 槽體

表 1 FX-302 超音波震盪器規格

項目	規格
功率	1500 W
周波數	40 KHz
功率調整	無段調整(20-100%)
爆洗控制	±500 Hz
出力表示	指針型錶頭顯示
電源	AC220V~240V 50/60Hz
保護回路	過熱保護
遠端控制	PLC 線控
使用溫度	0-80 度
外型尺寸	375(L)*270(W)*155(H)mm
重量	11KG



2.1.3 人工污水

本研究使用的人工污水成份如表 2 所示。

表 2 人工污水成份

成份	濃度(g/L)
葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)	1.0
NH_4Cl	0.1
KH_2PO_4	0.18
K_2HPO_4	0.29
$CaCl_2$	0.01
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.1
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	0.005
$CaCO_3$	0.1

2.1.4 中空纖維膜規格

本研究採用聚偏氟乙烯 (PVDF) 的中空纖維膜，由膜旺能源科技股份有限公司提供。該膜在實驗前須先浸泡乙醇才可上線使用。薄膜規格如表 3 所示。

表 3 中空纖維膜規格

材質	Polyvinylidene fluoride (PVDF)
半徑	1 mm
孔徑	0.06 μm
膜長	17cm
膜組	4 組
膜總面積	384.53cm ²

2.2、實驗步驟

超音波線上除垢：取 20,000 mgL⁻¹ 葡萄糖溶液，加入無機營養鹽及水稀釋至 1,000 mgL⁻¹，以配製實驗所需之葡萄糖濃度人工廢水。薄膜模組則使用環氧樹脂黏製，在上機運轉之前，皆使用酒精浸潤數秒鐘，再以 RO 水洗淨。將 MLSS 8,000~10,000 mgL⁻¹ 之活性污泥及超音波震盪器置入反應槽中，進行批次實驗。每 12 小時取樣測定沉浸式 MBR 中混合液及過濾液 COD。過濾通量由電子天平連線至電腦紀錄之，超音波震盪器線上除垢清洗薄膜每隔一段時間進行 2 分鐘，實



驗系統如圖 3 所示。

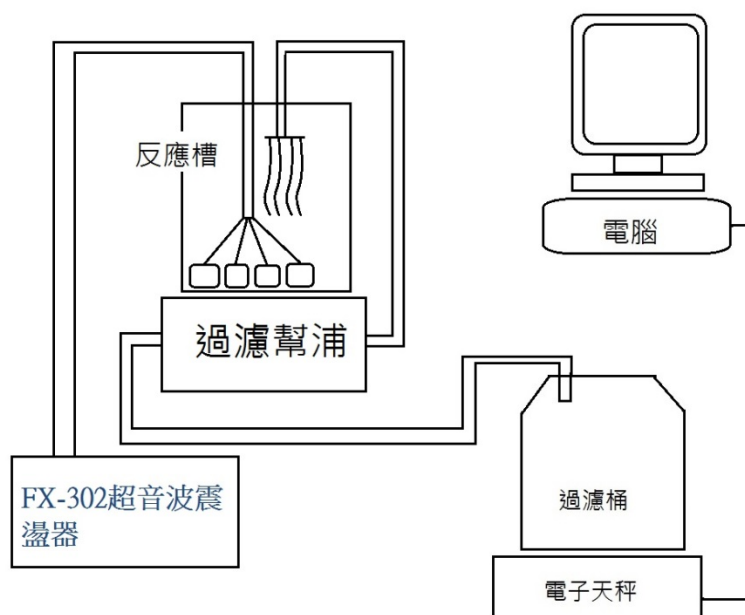


圖 3. 沉浸式 MBR 超音波線上清洗系統圖

三、實驗結果與討論

3.1 超音波對薄膜過濾通量之效應

初期 MBR 運轉 32 小時使薄膜產生積垢，再進行線上清洗及離線清洗。線上清洗在過濾開始後第 32 小時及 46 小時各一次，每次進行 2 分鐘，清洗時停止薄膜過濾。另在第 55 小時拆下薄膜膜組，同樣以該組超音波震盪器離線清洗 2 分鐘，再安裝上線過濾。

超音波線上清洗對薄膜過濾通量之效應如圖 4 所示。實驗初始時之過濾通量為 769.2 mL/h，薄膜過濾時間至 26 小時，因薄膜積垢，使過濾通量下降至 270.8 mL/h。於第 32 小時進行 2 分鐘的超音波線上清洗，清洗後通量回復到 466 mL/h，恢復過濾通量達 72%以上。過濾時間在 46 小時，通量下降到 127.6 mL/h，再進行線上清洗，清洗後通量卻只能回復到 217.2 mL/h。過濾時間在第 55 小時進行膜組離線清洗，在 RO 水中同樣條件下清洗，清洗後通量卻可回復到 553.2 mL/h。實驗結果顯示離線清後過濾通量比線上清洗較佳，但也發現前者過濾通量衰減較快。



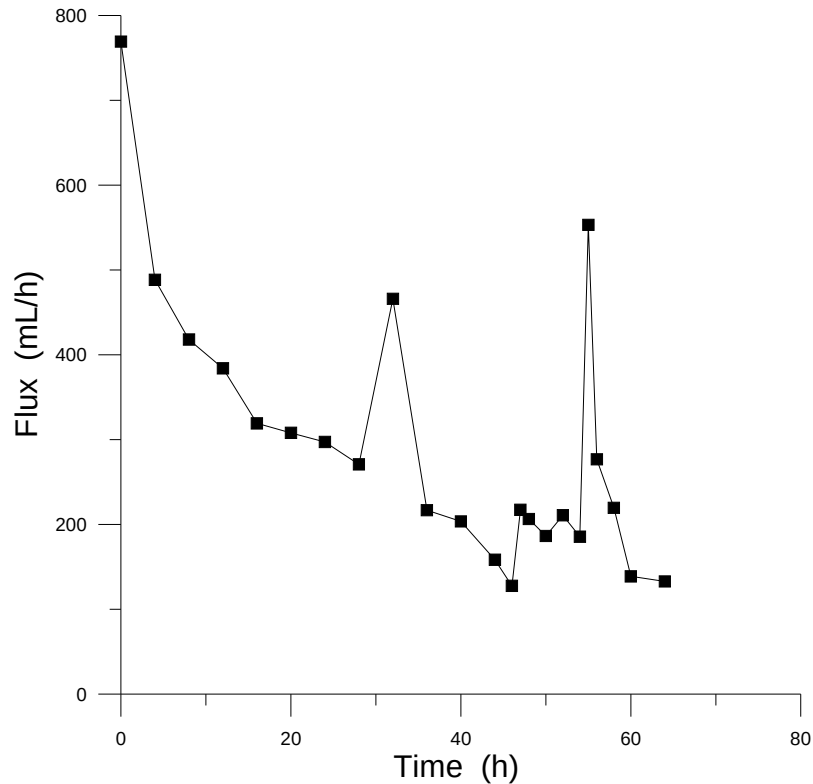
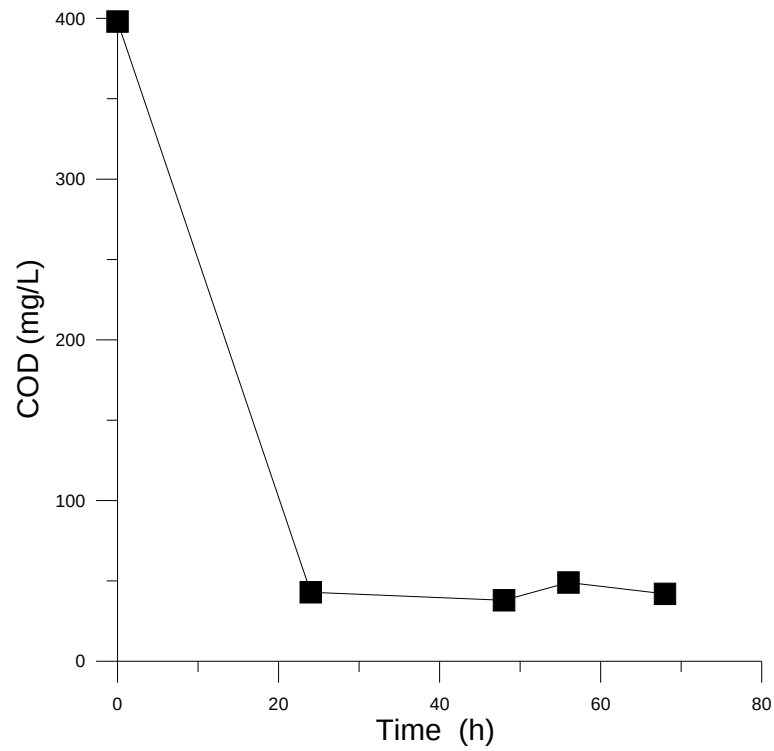


圖 4. 超音波線上清洗對薄膜過濾通量之效應

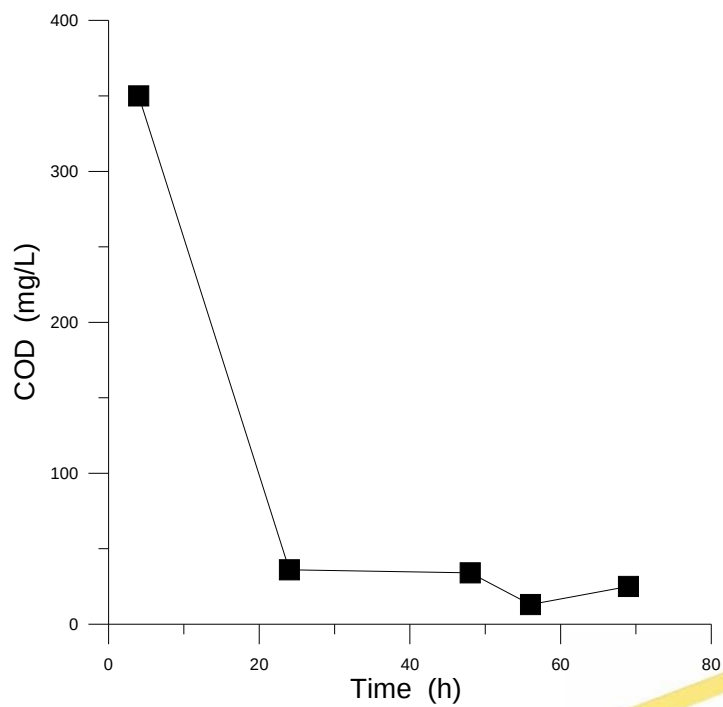
3.2 超音波對微生物分解 COD 效率之影響

以 1000 mg/L 葡萄糖泡製人工汙水批次加入 MBR 系統中，探討系統在超音波震盪效應下對活性汙泥降解 COD 的影響。結果如圖 5(a)及(b)所示，系統在超音波線上間歇式震盪下對活性汙泥降解 COD 觀察不出有任何影響。未來以超音波線上清洗薄膜積垢之研究，可著重在連續式 MBR 反應實驗及薄膜對超音波震盪之抵抗性。





(a) MBR 反應槽混和液 COD 的之變化



(b) 過濾液 COD 的變化

圖 5. 沉浸式生物反應槽

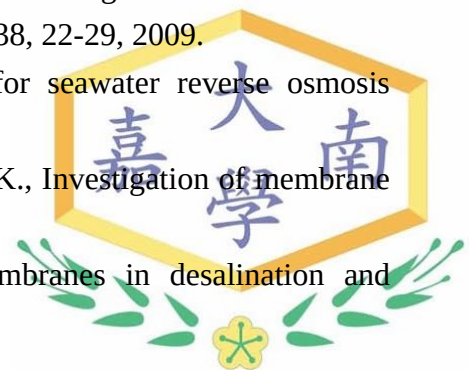


四、結論與建議

1. MBR 進行超音波線上清洗確實可恢復部分薄膜過濾通量；
2. 膜組離線在 RO 水環境下超音波清洗時，可得到較佳之清洗效果；
3. MBR 進行超音波線上清洗，對微生物分解有機物影響不明顯；
4. 建議未來可進行：
 - a. 連續流之超音波線上清洗之研究
 - b. 對不同超音波頻率、清洗時間及超音波震盪子與薄膜距離之清洗效應研究
 - c. 深入探討超音波頻率對微生物活性之影響。

五、參考文獻

1. Roger Ben Aim, Membrane technology for more sustainable water management, Seminar in Chia Nan university of Pharmacy and Science, 2007.
2. Blankert, B., Betlem, B.H.L., and Reffel, B., Development of a control system for in-line coagulation in an ultrafiltration process, Joul. of Memb. Scie., 301, p.39-45, 2007.
3. Choi, K.Y., and Dempsey, B.A., In-line coagulation with low-pressure membrane filtration, Water Research, 38, p.4271-7281, 2004.
4. 陳建宏、任維傑、周珊珊、王藝峰、楊其錚、謝明昌，快組式村落行緊急淨水系統，自來水會刊雜誌，第 30 卷，第 4 期，15-24, 2011
5. 黃仔敏、沈珊米、羅家康，簡易自來水淨水模組開發與驗證，自來水會刊雜誌，第 30 卷，第 4 期，72-76, 2011.
6. Roger Ben Aim, MBRs Current status and future prospects, Seminar in Tamkung University, 2007.
7. Arnal, J.M., Garcia-Fays, B. and Sancho, Maria, Membrane cleaning, Expanding issues in desalination, www. intechopen. com.
8. Goosen, M.F.A., Sablani, S.S., Al-Hinai, H., Al-Obeidani, S., Al-Belushi, R. and Jackson, D., Fouling of reverse osmosis and ultrafiltration membranes : a critical review, Separation Science and Technology, Vol.39, No.10, 2261-2297, 2004.
9. Backer J.S. and Dudley, L.Y., Biofouling in membrane system-a review, Desalination, Vol.118, 81-90, 1998.
10. Chester, S.P., Innovations in the inhibition and cleaning of reverse osmosis membrane scaling and fouling, Desalination, Vol.238, 22-29, 2009.
11. Sadhwani, J.J. and Veza, J.M., Cleaning tests for seawater reverse osmosis membranes, Desalination, Vol.139, 177-182, 2001.
12. Mohammadi, T., Madaeni, S.S. and Moghadam, M.K., Investigation of membrane fouling, Desalination, Vol.153, 155-160, 2002.
13. Ebrahim, S., Cleaning and regeneration of membranes in desalination and



- wastewater applications: state-of-the-art, *Desalination*, Vol.96, 225-238, 1994.
14. Gutman, R.G., *Membrane filtration: The technology of pressure-driven cross flow processes*, Adam Hilger, Bristol, England (Chapter 4), 1987.
 15. Kimura, K., Hane, Y., Watanabe, Y., Amy, G. and Ohkuma, N., Irreversible membrane fouling during ultrafiltration of surface water, *Water Research*, Vol.38, 3431-3441, 2004.
 16. Chen, D., Weavers, L.K., Walker, H.W., Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: Effect of particle characteristics, *Water Research*, 40, 840-850, 2006.
 17. Doosti, M.R. Kargar, R. and Sayadi, M.H. Water treatment using ultrasonic assistance: A review, *Proceedings of the international academy of ecology environmental science*, 2(2), 96-110, 2012.
 18. Shah, Y.T., Pandit, A.B. and Moholkar, V.S., *Cavitation reaction engineering*, Plenum Publishers, USA.
 19. Patil, M.N. and Pandit, A.B., Cavitation – a novel technique for making stable nanosuspensions, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17 1060-1065, 2010.
 20. Atchley A. and Crum, L., in: *Ultrasound*, K.Susslick, ed. VCH, New York, 1-64, 1988.
 21. Feng, H., *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Food Engineering Series, Springer Science+Business Media, LLC, 2011,
 22. Lamminen, M.O., Walker, H.W. and Weavers L.K., Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes, *Journal of membrane science*, 237, 213-223, 2004.
 23. Kyllonen, H.M., Pirkonen, P. and Nystro, M., Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review, *Desalination*, 181, 319-335, 2005.
 24. Wen, X., Sui, P. and Huang, X., Exerting ultrasound to control the membrane fouling in filtration of anaerobic activated sludge-mechanism and membrane damage, *Water science and technology*, 57, p.773-779, 2008.
 25. Sui, P. Wen, X. and Huang X., Feasibility of employing ultrasound for on-line membrane fouling control in an anaerobic membrane bioreactor, *Desalination*, 219, p.203-213, 2008
 26. Xu, M. Wen, X., Yu, Z. Li, Y. and Huang, X., A hybrid anaerobic membrane bioreactor coupled with online ultrasonic equipment for digestion of waste activated sludge, *Bioresource and technology*, 102, p.5617-5625, 2011.
 27. AM Nell, Master thesis, University of Stellenbosch, South Africa, 2005.
 28. Chen D., Weavers L.K. and Harold W. Walker, Using ultrasound to reduce ceramic membrane fouling by silica particles, *Proceedings of the Symposia of American Chemical Society*, Orlando, FL. 2002.

