

切線進料之管式膜過濾研究

A Study of Tubular Membrane Filtration with Tangential Feed

洪嘉澤

吳容銘

Jia-Tze Hung

Rome-Ming Wu

淡江大學化學工
程與材料工程學

明志科技大學環
境與安全衛生工

系

程系

摘要

水資源的缺乏是近年來全球極需面對的議題，本研究藉由流力改變增加掃流剪力以延緩過濾膜的積垢，以提昇水資源的回收，方法是於管式膜過濾模組中將進料口方式改為與管殼切線方向進入，並將管殼空間變大，使得進料溶液不會因碰撞到膜管而產生不必要之紊流以及動量損失。實驗方面，採用平均孔徑為 $0.8\ \mu\text{m}$ 的複合陶瓷膜，過濾平均粒徑為 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 的馬鈴薯澱粉粉體，探討以不同過濾壓力、不同懸浮液濃度、不同體積流率下之操作條件，比較管式膜過濾基本系統和切線系統之效率。

關鍵字：管式膜過濾、切線進料、積垢、掃流過濾、水資源缺乏

Abstract

The scarcity of water resources is a global issue that has been faced in recent years. This study aims to increase the cross-flow shear stress hydrodynamically to delay fouling of the filtration membrane and improve the recovery of water resources. The method involves changing the inlet of the tubular membrane filtration module to enter in the tangent direction of the shell and increasing the shell space, so that the feed solution does not generate unnecessary turbulence and momentum loss by colliding with the membrane tube. From experiments, a composite ceramic membrane with an average pore size of $0.8\ \mu\text{m}$ was used to filter potato starch powder solution with an average particle size of $30\sim 40\ \mu\text{m}$. The study investigated the efficiency of the tubular membrane filtration system with tangential inlet system under different filtration pressures, suspension concentrations, and volume flow rates.

Keywords: Tubular membrane filtration, tangential feed, fouling, cross-flow filtration, water scarcity

1. 緒論

掃流過濾 (Cross-Flow Filtration) 由於進料流體在膜表面形成一個橫向的流動，稱為「掃流」。這種流動幫助掃除堆積在膜表面的懸浮固體或微生物等，從而保持膜表面的清潔，減少了清洗次數，延長了膜的使用壽命，是一種常用的膜過濾技術，用於分離懸浮固體或液體中的固體顆粒、微生物或蛋白質等物質。掃流過濾的基本原理是利用壓力或真空力驅動進行分離過程。進料流體以橫向方向（平行於膜面）通過膜，而分離出來的溶液則通過膜表面，因而達到固體-液體分離的效果。掃流過濾通常使用具有微孔結構的薄膜或多層薄膜結構，通過將進料流體通過薄膜，進行物質的選擇性分離。

掃流過濾技術具有高效(Balavi and Boluk, 2018)、通量大、節能、環保等優點，廣泛應用於食品(Cuperus and Nijhuis, 1993)、製藥(Lu et al., 2019)、化工(Sarrade et al., 2002)、環保(Liu et al., 2002)等領域。掃流過濾的適用物質非常廣泛，可以處理懸浮固體(Chew et al., 2020)、生物物質(Krippel et al., 2021)、粘稠物質、高濃度物質、高溫物質(Lu et al., 2021; Yang et al., 2022)等。

掃流過濾主要具有：可得較高的濾速、較澄清的濾液、以及可維持長時間恆速操作、操作方便等優點(Gonder et al., 2010)。Bourgeois et al. (2001)發現若過濾含高比例之微細粒子時，形成之濾餅內所含微細粒子所佔之比例也會隨著時間的增加而提高，導致過濾阻力上升。Benitez et al. (2009)探討進料濃度與粒徑分佈對掃流微過濾之影響，當添加較大粒徑粒子時，濾速可獲得提升。Xu et al. (2002)指出以鋁粒子進行實驗，粒徑與膜孔徑比小於 2.4 以下，增加掃流速度其濾速呈線性增加。Kang and Choo (2003)以掃流薄膜過濾處理含細微膠體粒子的玻璃工業廢水，由於廢水中之玻璃為鋼性粒子，在較低掃流速度時，增加操作壓差可提升濾速，但在高掃流速度時，由於廢水中較細微的膠體粒子容易沉積在膜

面上，所形成之濾餅孔隙較低且容易造成膜孔阻塞，故增加壓力對濾速並沒有提升的作用。

掃流過濾是一種常用的液體過濾技術(Tan et al., 2021)，其濾材結構較複雜，其中包含多個細小孔洞或通道，這些孔洞或通道可能會在過濾過程中產生壓損，進而影響過濾效率和產量(Iritani, 2013)。掃流過濾也需要清洗：由於掃流過濾器在過濾過程中會逐漸積聚雜質，因此需要進行定期清洗，以維持過濾器的效率 (Zsirai et al., 2018)。此外，積垢 (fouling) 是膜分離過程中一個普遍存在的問題(Ashtari et al., 2012; Lesak et al., 2022)，它會導致薄膜的通量下降和去除效率降低。

Pablo et al. (2022)專注於研究逆滲透系統中的生物污染而導致的積垢阻塞，藉由分析膜表面的生物膜和礦物質結晶物質的組成和分布，評估了生物污染和積垢的程度。Chen et al. (2021)開發具有內部多層形態的彈性膜過濾器的流動和污染的數學模型。考慮恆定壓降和恆定通量兩種過濾機制，獲得彈性孔壁變形的解析解。

近來，單程切向流過濾證明是一種具前景的下游技術，可應用於蛋白質沉澱物的脫水與洗滌(Piash et al., 20025)。Oetomo et al. (2025)回顧了與使用機器學習 (ML) / 人工智慧 (AI) 方法控制以高價值生物產品為目標的切向流過濾 (TFF) 過程相關的文獻。從健康與經濟兩大領域的角度指出在此領域持續深入研究是必要的。

Javidanbardan et al. (2025) 提出隨著對 mRNA 治療藥物需求的日益增加，更高效率的製造策略發展變得日益重要。而單程切向流過濾 (Single-Pass Tangential Flow Filtration, SPTFF) 具有提升或連續進行 mRNA 濃縮與純化的潛力。可在低跨膜壓下連續操作 12 小時，實現 10 倍濃縮，顯示切向流過濾的重要性。

Wu et al. (2025)亦指出脂質奈米粒子 (Lipid Nanoparticles, LNPs) 是目前研究最深入的 mRNA 治療藥物遞送系統，COVID-19 疫情證

實了 mRNA-LNP 疫苗的卓越效力與快速部署能力，LNPs 對製程極為敏感，而使用切向流過濾（Tangential Flow Filtration, TFF）可進行濃縮與緩衝液置換。

本研究以切線入料的方式進行過濾，藉由切線入料造成的剪力延緩薄膜表面的積垢與提升濾速，並在相同的操作條件之下，與傳統過濾方式進行比較，研究顯示，切線進料的方式平均能獲得較高 10% 左右的濾速。

2. 實驗裝置與物料

2.1 馬鈴薯澱粉粉體

馬鈴薯澱粉粉體呈橢圓形白色粉末狀，外觀如圖 1 所示，粒徑介於 25-100 μm 之間、平均粒徑為 33.4 μm ，密度為 1.62 g/cm^3 。表 1 為馬鈴薯澱粉之性質。

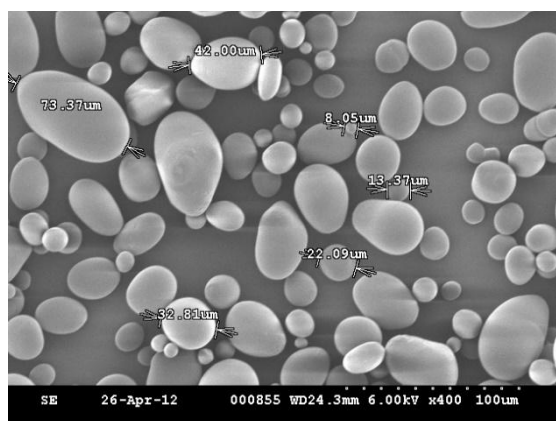


圖 1 馬鈴薯澱粉粉體之 SEM 圖

2.2 切線進料之管式膜過濾構造

本研究針對原本管式膜過濾基本構造加以改變，將原本垂直於管殼之進料口改為與管殼切線方向進入，以增加膜面上的剪力並抑制濾餅生成，如此之改變，使得傳統模式中流體沿膜表面的線速度為 33 cm/s （在 1.5 L/min 的流量下），而在同情況的切線模式中，流體沿膜表面的線速度為 25 cm/s 。圖 2 為實驗的流程圖。圖 3 為裝置之照片。

表 1 馬鈴薯澱粉之性質

Item	Standard Value
Appearance	White Powder
Moisture Content	Max. 20%
Protein	Max. 0.15%
Ash	Max. 0.4%
pH	7
SO ₂	Max. 2 ppm
Peak Viscosity	Min. 1350 BU
coliforms	Max. 10 CFU/g
Total plate count	Max. 10000 CFU/g
Yeast and mould	Max. 500 CFU/g
Salmonella	Absent in 25 gram

2.3 實驗步驟

本研究使用的濾膜為單通道複合陶瓷膜，其性質如表 2 所示。

表 2 單通道複合陶瓷膜之性質

Maximum pressure	10 bar
Operating pH range	0~14
Maximum temperature	350°C
Average pore size	0.8 μm
Membrane Material	ZrO ₂ -TiO ₂
Length	600 mm
Surface area	0.011 m ²

並使用馬鈴薯澱粉與去離子水配製所需濃度之懸浮液，置於磁石攪拌器上固定轉速攪拌，以使濃度分布均勻。傳統管式膜過濾與切線進料管式膜過濾裝置之示意圖如圖 4 所示。實驗過程先開啟蠕動式幫浦使配製好的懸浮溶液經循環系統輸送至濾室中，並調整幫浦的轉速來控制濾室中的掃流速度。



圖 3 管式膜過濾裝置照片

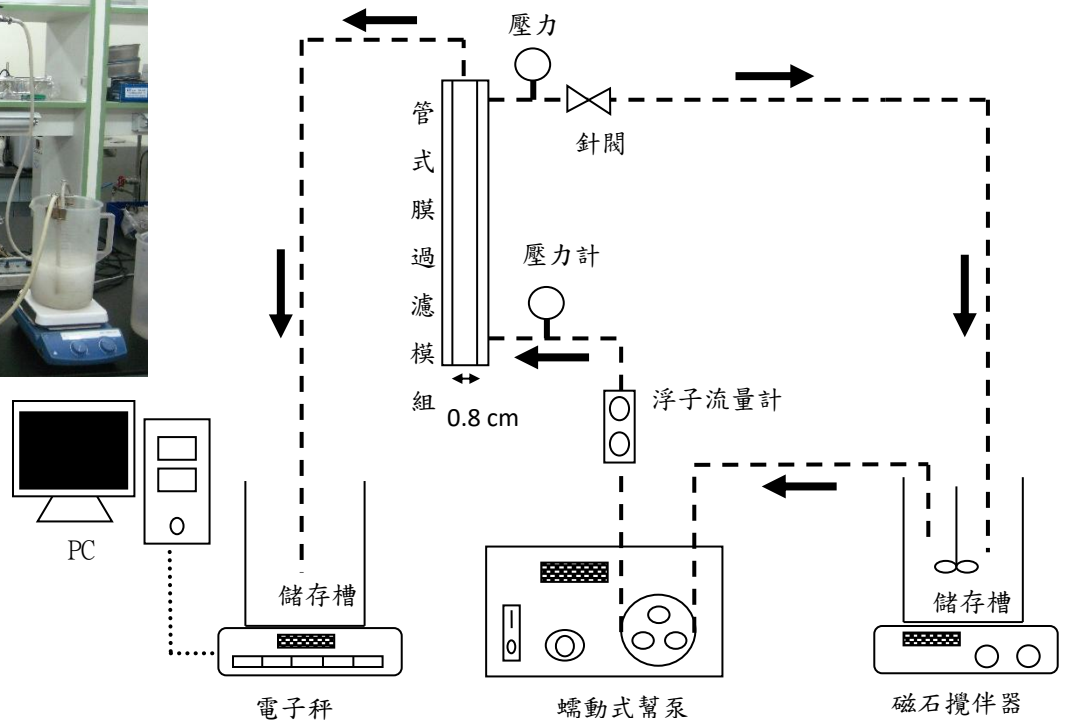


圖 2 實驗的流程圖

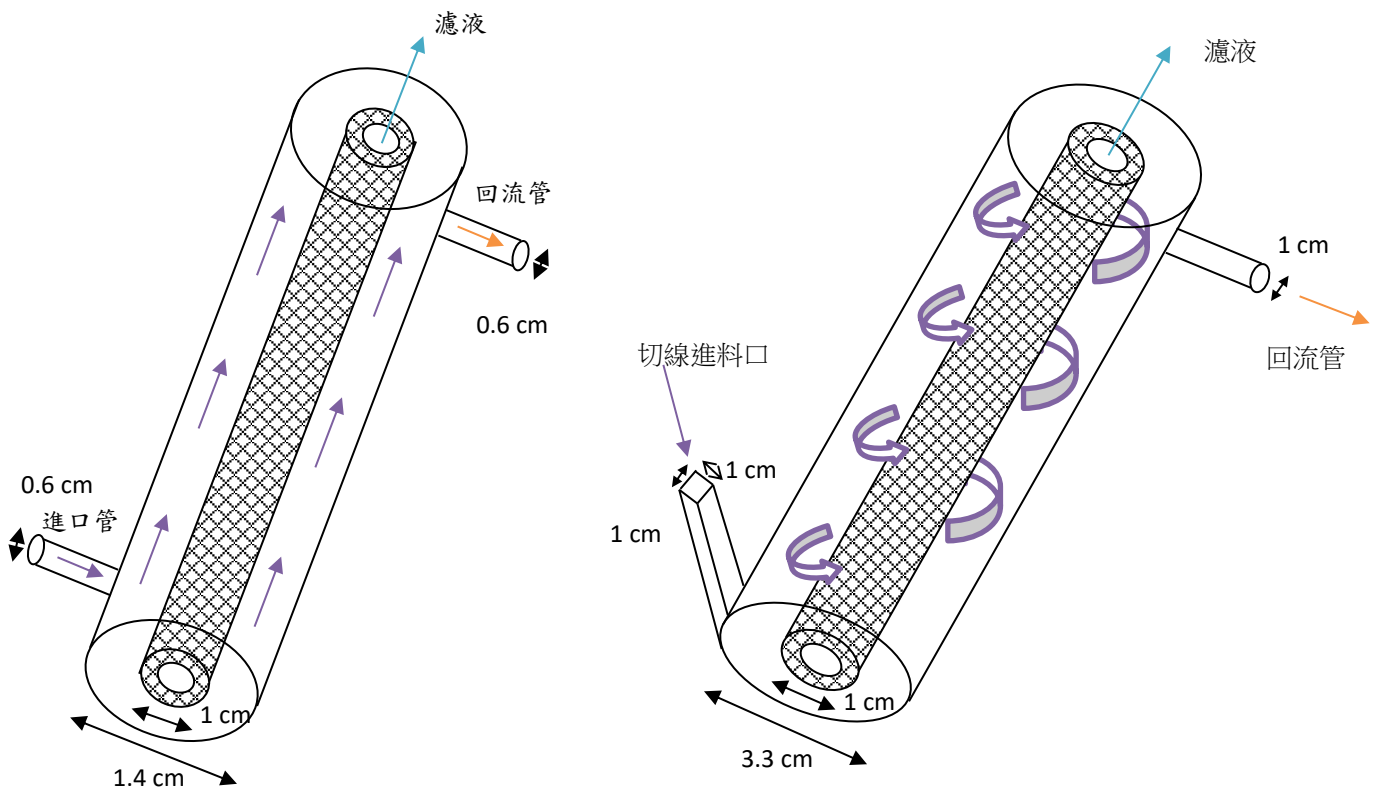


圖 4 傳統管式膜過濾與切線進料管式膜過濾裝置之示意圖

懸浮溶液流經浮子流量計再通過濾室後，溶液會通過回流壓力計與針閥而回流至原懸浮溶液槽中，期間調整針閥以控制所需的過濾壓差。另一股濾液則經由濾室透過濾膜由收集容器經電子秤記錄。

3. 結果與討論

本研究探討管式膜過濾與切線系統之差異，實驗操作條件分別以不同壓力、不同過濾流量、不同懸浮液濃度進行比較。

3.1 不同回流壓力之濾速比較

圖 5 分別為不同壓差操作下濾速衰減之情形，圖 6 為不同壓力下濾液量隨時間之變化情形。在圖 5 中，濾速會隨著時間的增加而衰減，在過濾初期，操作在不同壓力下，管式膜切線系統之濾速 Q_t 比基本系統之濾速 Q_0 來的高，表示以切線進料之方式較容易帶離附著在膜面上的懸浮粒子，減緩濾餅成長的速度。例如在過濾時間為 4000 s 時，管式膜切線系統在不同壓差下，

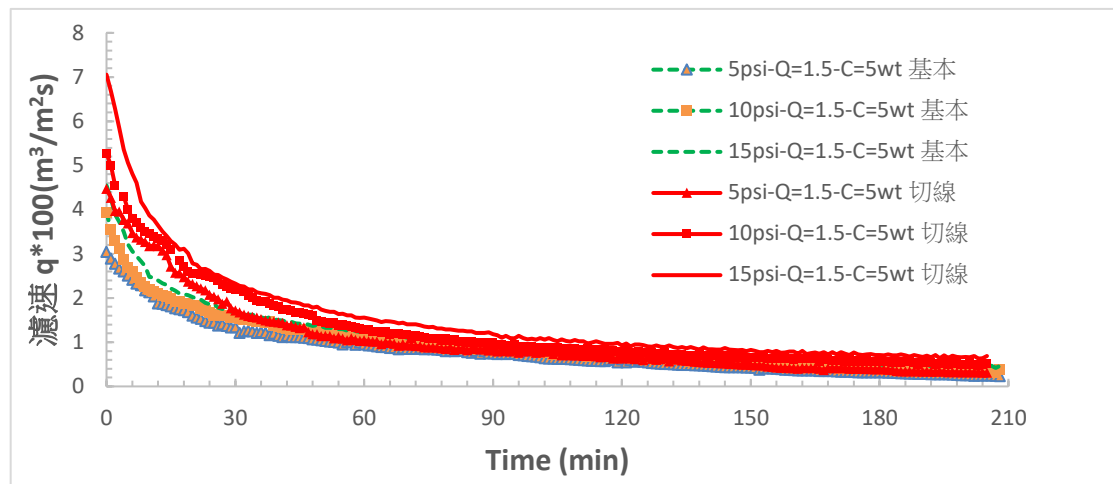


圖 5 不同壓差(5 psi, 10 psi, 15psi)操作下濾速衰減之情形

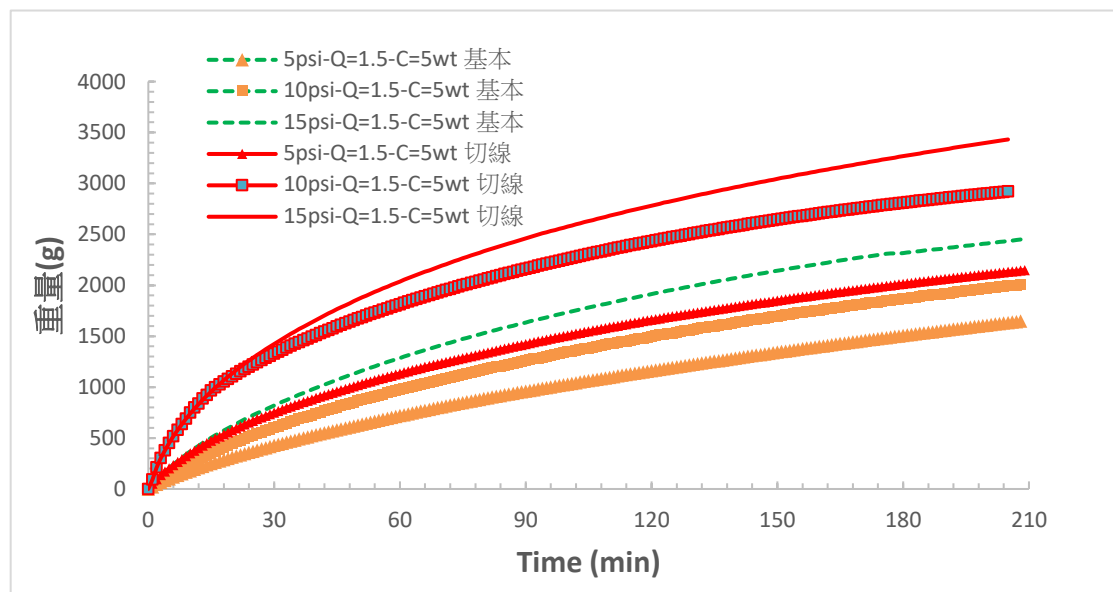


圖 6 不同壓力(5 psi, 10 psi, 15 psi)下濾液量隨時間之變化情形

亦即 15 psi、10 psi、5 psi，提升之效率大小分別為 23 %、20 %、與 17 %，可見壓力愈大，切線進料方式之效果愈好。在圖 6 中，切線系統之濾液量 Q_t 比基本系統之濾液量 Q_o 多，平均大約多出近 20-30%的濾液量。

3.2 不同過濾流量之濾速比較

將過濾流量提高，主要是增加流體流動的速度，使流體能在膜面上產生較大的水力剪力，減緩濾餅生成，進而提高濾速。圖 7 為不同過濾流量操作下基本系統和切線系統濾速之比較，濾速

會除了隨著時間的增加而衰減外，在過濾末期時，濾餅層已經形成，因此濾速會趨近於穩定，這些為掃流過濾基本之認知。而本研究切線系統之濾速 Q_t 明顯比基本系統之濾速 Q_o 高。例如在過濾時間為 4000 s 時，切線系統在不同過濾流量 (1.5、1.1、0.7 L/min) 下，提升之效率分別為 41%、15%、12%，顯示切線速度越快，造成之提升濾速之效果越明顯。圖 8 為不同過濾流量下濾液量隨時間之變化情形，從圖中可看出切線系統之濾液量 Q_t 比基本系統之濾液量 Q_o 多，顯示切線系統之有效性。

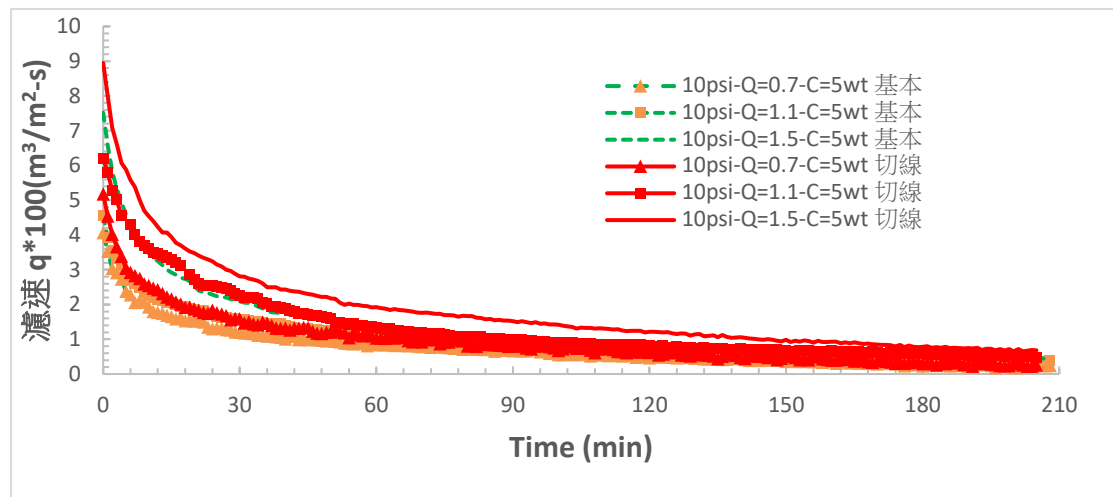


圖 7 不同流量(0.7 L/min, 1.1 L/min, 1.5 L/min)操作下濾速衰減之情形

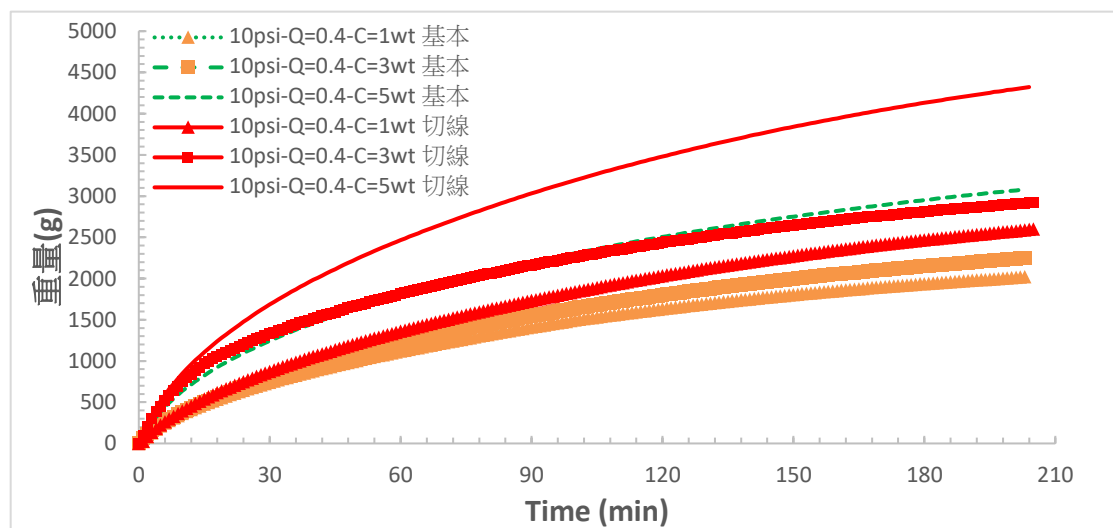


圖 8 不同流量(0.7 L/min, 1.1 L/min, 1.5 L/min)操作下濾液量隨時間之變化情形

3.3 不同懸浮液濃度之濾速比較

圖 9 為在固定壓力、過濾流量，而不同懸浮液濃度操作下，基本系統和切線系統之濾速比較，同樣地，切線系統之濾速 Q_t 比基本系統之濾速 Q_o 高，在過濾時間為 4000 s 時，切線系統在懸浮液濃度為 1 wt%、3 wt%、5 wt% 的情形下，提升之效率大小分別為 51%、24% 與 15%，由此可見，切線系統操作在低懸浮液濃度下效果最好，可有效的減緩濾速衰退。

圖 10 為不同懸浮液濃度下濾液量隨時間之變化情形，切線系統之濾液量 Q_t 比基本系統之濾液量 Q_o 多。

3.4 管式膜過濾系統之整體分析比較

由前面不同操作條件之比較來看，管式膜切線系統之濾速值都比管式膜基本系統之濾速值大，因此將兩系統在每次操作條件一樣的情況下和過濾時間為 600 s 時的濾速值統計下來並加

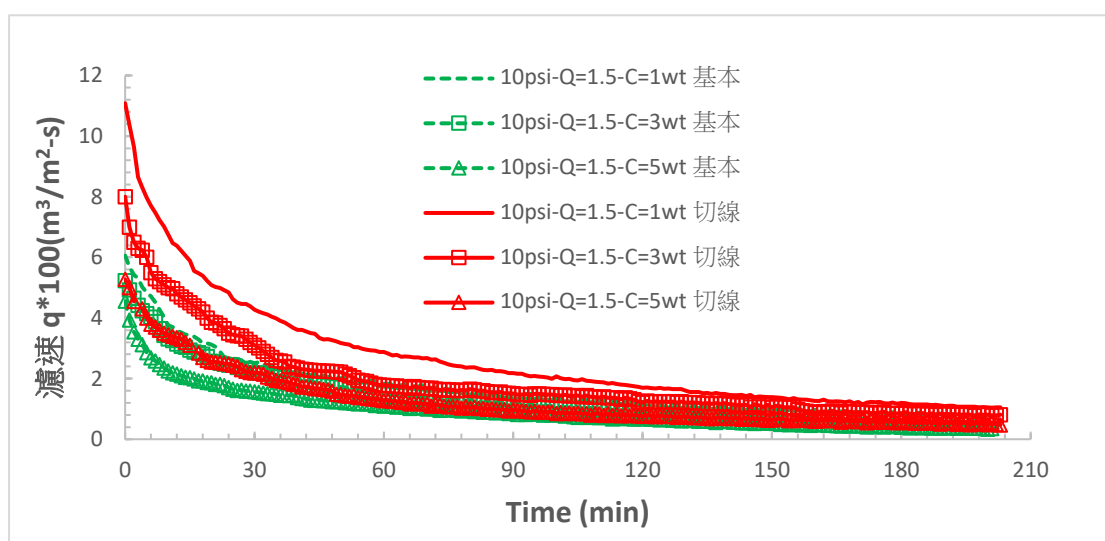


圖 9 不同進料濃度(1%, 3%, 5%)操作下濾速衰減之情形

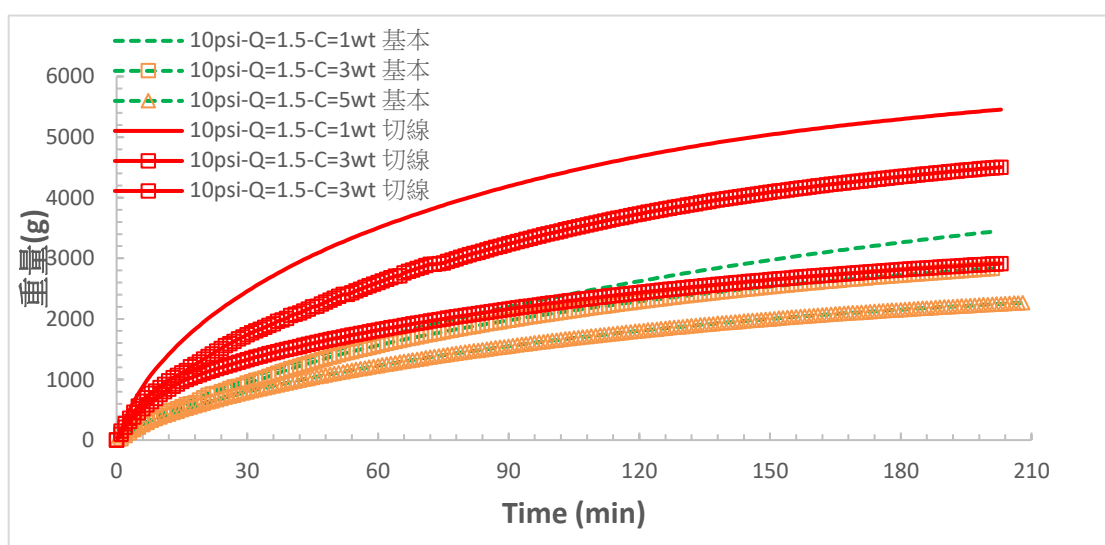


圖 10 不同進料濃度(0.1%, 0.3%, 0.5%)操作下濾液量變化之情形

以比較，由圖 11 中可看出，切線系統之滷速值 Q_t 在 15 次的操作下都比基本系統之滷速值 Q_0 大，由此可見，以切線進料之方式是能有效的降低膜面上滷餅之生成，減緩膜孔之阻塞情形，使得滷速值得到提升。

結論

本研究將管式膜基本過濾模組進料口的方式改良為沿管殼外側切線進料，在不同壓力、不同過濾流量、不同懸浮液濃度情形下進行比較，管式膜過濾切線系統在不同壓力、不同過濾流量、不同懸浮液濃度操作情形下之，滷液量皆提升 20-30%。

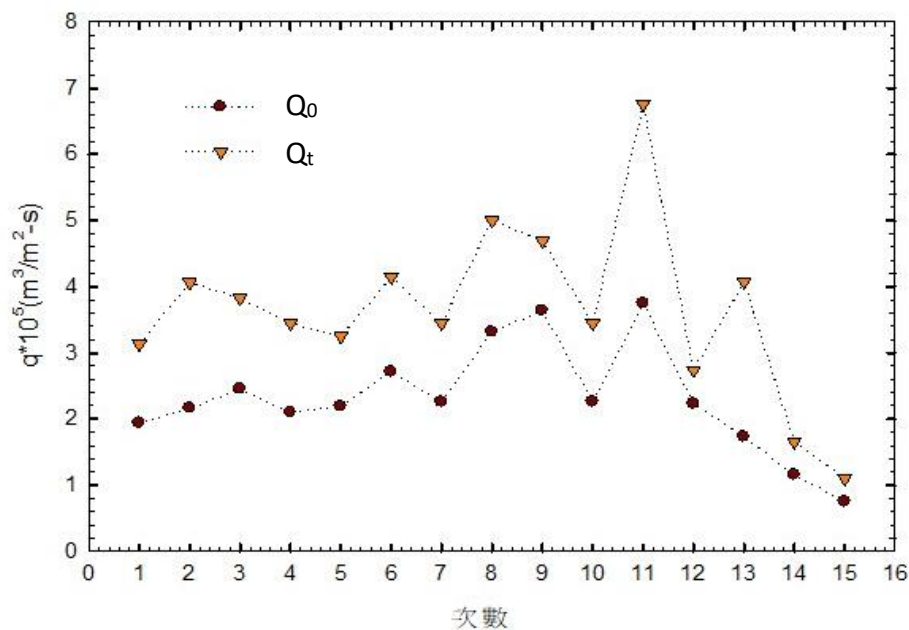


圖 11 基本管與切線管在過濾時間 600s 之滷速比較

參考文獻

1. M. Ashtari, S.N. Ashrafizadeh, M. Bayat, (2012) Asphaltene removal from crude oil by means of ceramic membranes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 82–83, 44–49.
2. H. Balavi, Y. Boluk, (2018) Dynamic filtration of drilling fluids and fluid loss under axially rotating crossflow filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 611–615.
3. F.J. Benitez, J.L. Acero, A.I. Leal, M. Gonzalez, (2009) The use of ultrafiltration and nanofiltration membranes for the purification of cork processing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 162, 1438–1445.
4. K.N. Bourgeois, J.L. Darby, G. Tchobanoglous, (2001) Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness. *Water Research*, 35, 77.
5. J.W. Chew, J. Kilduff, G. Belfort, (2020) The

- behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration: An update. *Journal of Membrane Science*, 601, 117865.
6. Z. Chen, S.Y. Liu, I.C. Christov, (2021) Flow and fouling in elastic membrane filters with hierarchical branching pore morphology. *Physics of Fluids*, 33, 062009.
 7. F.P. Cuperus, H.H. Nijhuis, (1993) Applications of membrane technology to food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 4, 277–282.
 8. Z.B. Gonder, Y. Kaya, I. Vergili, H. Barlas, (2010) Optimization of filtration conditions for CIP wastewater treatment by nanofiltration process using Taguchi approach. *Separation and Purification Technology*, 70, 265–273.
 9. E. Iritani, (2013) A Review on Modeling of Pore-Blocking Behaviors of Membranes During Pressurized Membrane Filtration. *Drying Technology*, 31, 146–162.
 10. A. Javidanbardan, Z. Wang, A. Kostic, A. Behboudi, A.L. Zydney, (2025) Single-pass tangential flow filtration (SPTFF) for continuous mRNA concentration and purification. *Journal of Membrane Science*, 719, 123730.
 11. S.K. Kang, K.H. Choo, (2003) Use of MF and UF Membrane for Reclamation of Glass Industry Wastewater Containing Colloidal Clay and Glass Particles. *Journal of Membrane Science*, 223, 89–103.
 12. M. Krippel, T. Kargl, M. Duerkop, A. Dürauer, (2021) Hybrid modeling reduces experimental effort to predict performance of serial and parallel single-pass tangential flow filtration. *Separation and Purification Technology*, 276, 119277.
 13. Giuliana Varela Garcia Lesak, Lorena Alves Xavier, Thamayne Valadares de Oliveira, Eliton Fontana, Alexandre Ferreira Santos, Vicelma Luiz Cardoso, Rafael Bruno Vieira (2022) Enhancement of pozzolanic clay ceramic membrane properties by niobium pentoxide and titanium dioxide addition: Characterization and application in oil-in-water emulsion microfiltration, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 217, 110892.
 14. H. Li, A.G. Fnae, H.G.L. Coster, S. Vigneswaran, (2003) Observation of deposition and removal behavior of submicron bacteria on the membrane surface during crossflow microfiltration. *Journal of Membrane Science*, 217, p29–41.
 15. X. Liu, C. Tian, Y. Zhao, W. Xu, D. Dong, K. Shih, T. Yan, W. Song, (2002) Enhanced cross-flow filtration with flat-sheet ceramic membranes by titanium-based coagulation for membrane fouling control. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16, 110.
 16. C. Lu, Y. Bao, J.Y. Huang, (2021) Fouling in membrane filtration for juice processing. *Current Opinion in Food Science*, 42, 76–85.
 17. J. Lu, Y. Qin, Q. Zhang, C. Yu, Y. Wu, Y. Yan, H. Fan, M. Meng, C. Li, (2019) Antibacterial, high-flux and 3D porous molecularly imprinted nanocomposite sponge membranes for cross-flow filtration of emodin from analogues. *Chemical Engineering Journal*, 360, 483–493.
 18. B. Oetomo, L. Luo, Y. Qu, M. Discepola, S.E. Kentish, S.L. Gras, (2025) Controlling tangential flow filtration in biomanufacturing processes via machine learning: A literature review. *Digital Chemical*

- Engineering, 14, 100211.
19. G.T. Pablo, A.C. Makrina, C. Luiza, L.C. Campos, (2022) Investigating reverse osmosis membrane fouling and scaling by membrane autopsy of a bench scale device. *Environmental Technology*, 43, 3198–3211.
 20. K.P.S. Piash, C. MacElroy, Z. Wang, A.L. Zydney, (2025) Vibration-Assisted Single-Pass tangential flow filtration for processing precipitated proteins. *Separation and Purification Technology*, 376, 134136.
 21. S. Sarrade, C. Guizard, G.M. Rios, (2002) Membrane technology and supercritical fluids: chemical engineering for coupled processes. *Desalination*, 144, 137–142.
 22. J. Tan, Y.N. Ji, W.S. Deng, Y.F. Su, (2021) Process intensification in gas/liquid/solid reaction in trickle bed reactors: A review *Petroleum Science*, 18, 1203–1218
 23. W. Wu , L.T. Oliveira , A. Jain , Y. Karpov , K. Olsen , Y. Wu, R.K.G. Panicker, (2025) Process development of tangential flow filtration and sterile filtration for manufacturing of mRNA-lipid nanoparticles: A study on membrane performance and filtration modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 675, 125520.
 24. N. Xu, Y. Zhong, J. Shi, (2002) Crossflow Microfiltration of Micro-Sized Mineral Suspension Using Ceramic Membranes. *Chemical Engineering Research and Design*, 80, 215–221.
 25. X. Yang, W. Fan, R. Zhang, (2022) Experimental investigations on aviation kerosene Multi-jets in high temperature and low pressure air crossflow. *Fuel*, 324 Part C, 124828.
 26. T. Zsirai, H. Qiblawey, P. Buzatu, M. Al-Marri, S.J. Judd, (2018) Cleaning of ceramic membranes for produced water filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166, 283–289.