



University of Zagreb

FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING AND  
TECHNOLOGY

IVA ĆURIĆ

**CLOSED WATER CYCLE IN TEXTILE  
INDUSTRY USING MEMBRANE  
SEPARATION PROCESSES**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

IVA ĆURIĆ

**ZATVORENI VODNI CIKLUS U  
TEKSTILNOJ INDUSTRIJI UZ PRIMJENU  
MEMBRANSKIH SEPARACIJSKIH  
PROCESA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.

## **Abstract**

This doctoral research investigates the development of an integrated membrane based treatment system for textile wastewater (TWW) to enable water reuse and support the transition toward a closed water cycle in the textile industry. The textile industry is one of the most water intensive industrial sectors, generating large volumes of wastewater with highly variable composition. Textile wastewater typically contains dyes, salts, surfactants, and auxiliary chemicals, many of which are resistant to conventional treatment processes. In addition to a high organic load, TWW often exhibits strong color, elevated salinity, and recalcitrant compounds, making it particularly challenging to treat to a level suitable for reuse in textile wet processes such as dyeing, bleaching, and washing.

Conventional biological and physico-chemical treatment methods are often insufficient to achieve the required water quality for reuse. Biological processes may be limited in removing color and non biodegradable organic compounds, while physico-chemical treatments can require high chemical consumption and may generate secondary waste streams. As a result, there is a growing need for advanced treatment technologies capable of producing high quality effluent suitable for reuse within the textile industry.

In this context, membrane based processes have emerged as promising solutions due to their ability to effectively remove a wide range of contaminants. This study evaluates the performance of pressure driven membrane processes, including membrane bioreactor (MBR), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), and reverse osmosis (RO), using real TWW. Particular emphasis was placed on understanding the role of each process within an integrated treatment system and its contribution to overall system performance.

The results demonstrated that MBR is an effective pretreatment step, achieving high removal of biodegradable organic matter, suspended solids, and colloidal particles, while significantly reducing fouling potential in downstream membrane processes. Ultrafiltration further enhanced system stability by removing residual suspended solids and colloids, contributing to reduced flux decline and improved cleaning efficiency. Nanofiltration enabled efficient removal of dissolved organic matter, color, and multivalent ions, producing permeate suitable for reuse in textile wet

processes. Reverse osmosis provided the highest removal efficiency for both organic and inorganic contaminants, generating permeate suitable for applications requiring high water quality, such as boiler feed water for steam generation.

Based on the experimental findings, a hybrid membrane configuration (MBR–UF–NF–RO) was proposed and translated into a conceptual full-scale system design. The proposed system enables the production of water at different quality levels, allowing targeted reuse within the textile process. Most treated water can be reused in dyeing, washing, bleaching, and finishing operations, while a smaller fraction treated by RO can be used for boiler feed water and steam generation.

The experimental results were further used for scale-up and development of a conceptual full-scale design, which served as the basis for techno-economic evaluation. A preliminary techno-economic assessment was performed, including estimation of capital expenditure (CAPEX) and operating expenditure (OPEX), as well as key economic indicators such as return on investment (ROI), net present value (NPV), and payback period. The total CAPEX was estimated at approximately 1.6 million EUR, while the annual OPEX was approximately 48,000 EUR.

The economic analysis indicated that the feasibility of the proposed system is strongly dependent on operating conditions, particularly water pricing. Under conservative assumptions, the system does not achieve full investment recovery within the assumed project lifetime. However, under more realistic industrial conditions, assuming an avoided water cost of 4.0 EUR/m<sup>3</sup>, the system achieves a net annual benefit of approximately 214,800 EUR, corresponding to a simple ROI of approximately 13%, a payback period of about 7 years, and a positive NPV. These results highlight the importance of local economic conditions and regulatory frameworks in determining the viability of water reuse systems.

Overall, the findings of this research confirm that integrated membrane based systems represent a viable and scalable solution for textile wastewater treatment and reuse. The combination of high treatment efficiency and the ability to produce water of different quality levels enables flexible reuse within industrial processes. Furthermore, the integration of technical and economic evaluation provides a comprehensive basis for implementing of sustainable water management strategies in the textile industry.

**Keywords:** textile wastewater; water reuse; membrane processes; ultrafiltration; nanofiltration; reverse osmosis; membrane bioreactor; hybrid systems; fouling; CAPEX; OPEX; techno-economic assessment; closed water cycle

## Sažetak

Ovo doktorsko istraživanje bavi se razvojem integriranog membranskog sustava za obradu tekstilnih otpadnih voda (TOV) s ciljem omogućavanja uporabe (ponovne uporabe) vode i potpore prijelazu prema zatvorenom vodnom ciklusu u tekstilnoj industriji. Tekstilna industrija prepoznata je kao jedan od najintenzivnijih industrijskih potrošača vode, pri čemu nastaju velike količine otpadnih voda s visokom varijabilnošću sastava. Tekstilne otpadne vode obično sadrže bojila, soli, tenzide i pomoćna doradna sredstva, od kojih su mnoga otporna na konvencionalne postupke obrade. Osim visokog organskog opterećenja, TOV često pokazuju intenzivnu obojenost, povišen salinitet te prisutnost teško razgradivih spojeva, što znatno otežava postizanje kvalitete vode prikladne za uporabu u tekstilnim mokrim procesima kao što su bojadisanje, izbjeljivanje i pranje.

Konvencionalni biološki i fizikalno-kemijski postupci često nisu dovoljni za postizanje potrebne kvalitete vode za uporabu. Biološki procesi mogu biti ograničeni u uklanjanju boje i biorazgradivih organskih tvari, dok fizikalno-kemijski postupci zahtijevaju veliku potrošnju kemikalija i mogu generirati dodatne tokove otpada. Stoga postoji sve veća potreba za naprednim tehnologijama obrade koje mogu osigurati visokokvalitetni efluent prikladan za uporabu u tekstilnoj industriji.

U tom kontekstu, membranski procesi nameću se kao perspektivno rješenje zbog svoje sposobnosti učinkovitog uklanjanja širokog spektra onečišćivala. U ovom radu ispituje se učinkovitost membranskih procesa pogonjenih tlakom, uključujući membranski bioreaktor (MBR), ultrafiltraciju (UF), nanofiltraciju (NF) i reverznu osmozu (RO), primijenjenih na realnu tekstilnu otpadnu vodu. Poseban naglasak stavljen je na razumijevanje uloge svakog procesa unutar integriranog sustava obrade te njegov doprinos ukupnim performansama sustava.

Rezultati su pokazali da MBR predstavlja učinkovitu predobradu, postizajući visoko uklanjanje biorazgradivih organskih tvari, suspendiranih i koloidnih čestica te značajno smanjujući potencijal za onečišćenje membrana u nizvodnim procesima. Ultrafiltracija dodatno poboljšava stabilnost sustava uklanjanjem preostalih suspendiranih i koloidnih čestica, čime se smanjuje pad fluksa i povećava učinkovitost čišćenja. Nanofiltracija omogućuje učinkovito uklanjanje otopljenih organskih tvari, boje i viševalentnih iona te proizvodi permeat prikladan za uporabu u tekstilnim mokrim procesima. Reverzna osmoza postiže najviši stupanj uklanjanja organskih i anorganskih

onečišćivala, pri čemu nastaje permeat prikladan za primjene koje zahtijevaju visoku kvalitetu vode, poput napojne vode za kotlove i proizvodnju pare.

Na temelju eksperimentalnih rezultata predložena je hibridna membranska konfiguracija (MBR–UF–NF–RO), koja je zatim prenesena u konceptualni dizajn sustava u punom mjerilu. Predloženi sustav omogućuje proizvodnju vode različitih kvaliteta, čime se omogućuje ciljana uporaba unutar tekstilnog procesa. Veći dio obrađene vode može se ponovno koristiti u procesima bojadisanja, pranja, izbjeljivanja i dorade, dok se manji dio, obrađen reverznom osmozom, može koristiti kao napojna voda za kotlove i proizvodnju pare.

Eksperimentalni rezultati korišteni su za povećanje mjerila i razvoj konceptualnog rješenja sustava u punom mjerilu, koje je poslužilo kao osnova za tehno-ekonomsku analizu. Provedena je preliminarna tehno-ekonomska procjena, uključujući procjenu kapitalnih troškova (CAPEX) i operativnih troškova (OPEX), kao i ključnih ekonomskih pokazatelja poput povrata na investiciju (ROI), neto sadašnje vrijednosti (NPV) i razdoblja povrata investicije. Ukupni CAPEX procijenjen je na približno 1,6 milijuna EUR, dok godišnji OPEX iznosi oko 48.000 EUR.

Rezultati ekonomske analize pokazali su da ekonomska isplativost predloženog sustava uvelike ovisi o radnim uvjetima, posebno o cijeni vode. U konzervativnim uvjetima sustav ne postiže potpuni povrat investicije unutar predviđenog životnog vijeka. Međutim, u realnijim industrijskim uvjetima, uz pretpostavljeni izbjegnuti trošak vode od 4,0 EUR/m<sup>3</sup>, sustav ostvaruje godišnju neto korist od oko 214.800 EUR, što odgovara jednostavnom ROI-u od približno 13 % i razdoblju povrata od oko 7 godina, uz pozitivan NPV. Ovi rezultati naglašavaju važnost lokalnih ekonomskih uvjeta i regulatornog okvira u određivanju isplativosti sustava za uporabu vode.

Zaključno, rezultati ovog istraživanja potvrđuju da integrirani membranski sustavi predstavljaju održivo i skalabilno rješenje za obradu i uporabu tekstilnih otpadnih voda. Kombinacija visoke učinkovitosti obrade i mogućnosti proizvodnje vode različitih kvaliteta omogućuje fleksibilnu primjenu unutar industrijskih procesa. Nadalje, integracija tehničke i ekonomske analize pruža čvrstu osnovu za daljnji razvoj i implementaciju održivih strategija upravljanja vodama u tekstilnoj industriji.

**Ključne riječi:** tekstilna otpadna voda; uporaba; membranski procesi; ultrafiltracija; nanofiltracija; reverzna osmoza; membranski bioreaktor; hibridni sustavi; fouling; CAPEX; OPEX; tehnološka analiza; zatvoreni vodni ciklus