

Bài báo nghiên cứu

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ VÒNG ĐỜI
TRONG HỆ THỐNG XỬ LÝ NƯỚC CẤP

Vũ Thị Thúy*, Dương Thị Giáng Hương

Trường Đại học Sài Gòn, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: Vũ Thị Thúy – Email: vtthuy@sgu.edu.vn

Ngày nhận bài: 05-10-2025; Ngày nhận bài sửa: 07-11-2025; Ngày nhận đăng: 29-11-2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu áp dụng phương pháp Đánh giá vòng đời nhằm định lượng các tác động môi trường chủ yếu phát sinh trong giai đoạn vận hành của hệ thống xử lý nước cấp. Phần mềm SimaPro và phương pháp ReCiPe (H) V1.09 được sử dụng để đánh giá các nhóm tác động ở cấp độ trung gian và điểm cuối. Kết quả cho thấy tiêu thụ điện năng và hóa chất polyaluminium chloride (PAC) là hai nguồn đóng góp tác động môi trường lớn nhất. Cụ thể, điện năng là tác nhân chính gây ra sự nóng lên toàn cầu và cạn kiệt tài nguyên hóa thạch (đóng góp từ 57,5%–77,3% ở các hạng mục tương ứng); hóa chất PAC chi phối các tác động liên quan đến độc tính gây ung thư (78,4%) và cạn kiệt tài nguyên khoáng sản (99,7%). Tổng thiệt hại điểm cuối của hệ thống là 9,97 mPt, trong đó 9,19 mPt liên quan đến sức khỏe con người. Nghiên cứu đã đánh giá kịch bản thu hồi nhôm từ bùn thải chứa PAC và kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời. Kết quả cho thấy hai kịch bản thay thế đạt được cải thiện đáng kể về môi trường, với các chỉ số tác động trung gian lần lượt giảm từ 5%–65% và 40%–74%, tổng thiệt hại điểm cuối lần lượt giảm 23% và 41%. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng của việc kết hợp xử lý nước với chiến lược tuần hoàn tài nguyên và sử dụng năng lượng tái tạo nhằm hướng tới tính bền vững trong ngành cấp nước.

Từ khóa: đánh giá vòng đời; hệ thống xử lý nước cấp; tác động môi trường; thu hồi chất keo tụ nhôm; điện năng lượng mặt trời

1. Giới thiệu

Nước là nguồn tài nguyên thiết yếu đối với hệ sinh thái tự nhiên và các hoạt động sinh hoạt, sản xuất của con người. Mục tiêu phát triển bền vững thứ 6 (SDG6) của Liên hợp quốc đã nhấn mạnh việc đảm bảo tiếp cận nguồn nước sạch và vệ sinh là một nhu cầu cơ bản của con người. Dù vậy, mức tiêu thụ năng lượng cho quá trình xử lý nước tương đối lớn và mức tiêu thụ này được dự báo sẽ tăng 60%–100% trong 15 năm tới (Hamawand, 2023). Sự tiêu thụ năng lượng kéo theo những tác động tiêu cực tới môi trường, do đó việc tăng cường hiệu suất năng lượng trong ngành xử lý nước là một yêu cầu cấp thiết (Skoczko, 2025). Phương

Cite this article as: Vu, T. T., & Duong, T. G. H. (2025). Application of life cycle assessment (LCA) in water treatment systems. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 22(12), 2142-2153. [https://doi.org/10.54607/hcmue.js.22.12.5288\(2025\)](https://doi.org/10.54607/hcmue.js.22.12.5288(2025))

pháp đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) được phát triển để định lượng các tác động môi trường nhằm kiểm soát và giảm thiểu tiêu thụ năng lượng, giảm thiểu chất thải, đồng thời thúc đẩy cải tiến quy trình xử lý. Các nghiên cứu gần đây đã ứng dụng rộng rãi phương pháp LCA trong hệ thống xử lý nước đô thị, (Mo et al., 2018) đánh giá hiệu quả môi trường – kinh tế của các kịch bản hệ thống cấp nước uống, (Xiong et al., 2018) xây dựng một khuôn khổ tối ưu nhằm kiểm soát nhu cầu nước. (Shiu et al., 2023) khẳng định tác động môi trường của nhà máy xử lý nước phụ thuộc vào hiệu suất xử lý và các giải pháp tái chế, tiết kiệm nước có thể giảm thiểu đáng kể các áp lực sinh thái. Gần đây, (Wang et al., 2025) sử dụng LCA để đánh giá phát thải khí nhà kính từ các kịch bản xử lý nước điển hình và chỉ ra rằng các tuyến thu hồi tối ưu có khả năng giảm phát thải so với phương pháp xử lý truyền thống.

Mặc dù, các nghiên cứu đã cung cấp những hiểu biết về vai trò của LCA trong việc đánh giá hệ thống xử lý nước, nhưng các nghiên cứu tại Việt Nam còn rất hạn chế, chưa có nhiều nghiên cứu định lượng tác động môi trường theo cách tiếp cận vòng đời và phát triển hệ thống xử lý theo hướng bền vững. Nghiên cứu này nhằm giải quyết khoảng trống nghiên cứu nói trên, thông qua việc đánh giá các tác động môi trường của hệ thống xử lý nước cấp dùng cho sinh hoạt tại nhà máy cấp nước Hóa An, Đồng Nai (Việt Nam). Nghiên cứu sử dụng phương pháp ReCipe và cơ sở dữ liệu nền Ecoinvent trong phần mềm SimaPro 9.6, đồng thời so sánh kịch bản xử lý truyền thống với hai kịch bản thay thế. Kết quả của nghiên cứu sẽ cung cấp dữ liệu cho công tác xây dựng các chính sách môi trường, thúc đẩy phát triển và ứng dụng các công nghệ xử lý nước bền vững.

2. Phương pháp nghiên cứu

Công cụ đánh giá vòng đời được sử dụng trong nghiên cứu tuân thủ theo tiêu chuẩn ISO14044:2006: (1) xác định mục tiêu và phạm vi đánh giá, (2) phân tích kiểm kê, (3) đánh giá tác động, (4) trình bày kết quả (ISO, 2006)

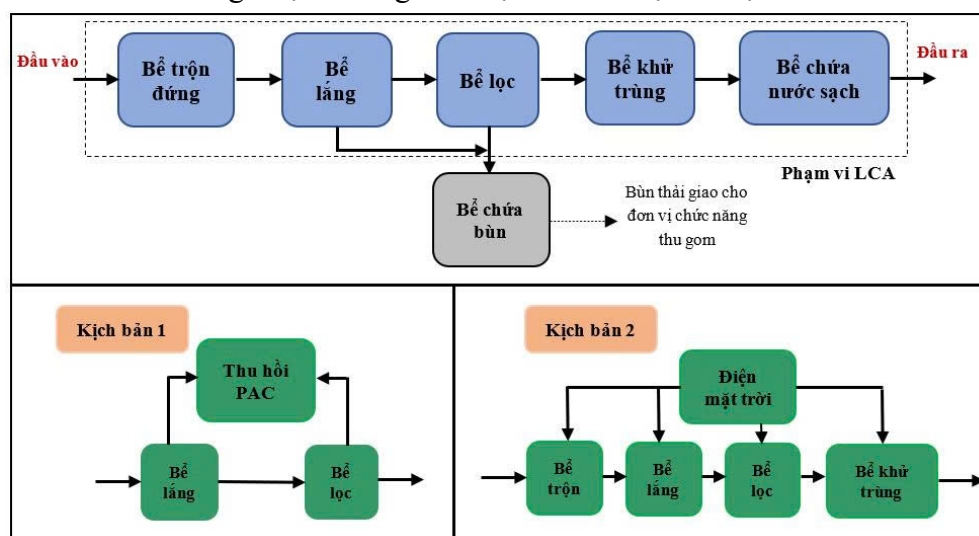
2.1. Mục tiêu và phạm vi đánh giá

Nghiên cứu được thực hiện trong 6 tháng (từ tháng 10 năm 2024 đến tháng 3 năm 2025) với mục tiêu là đánh giá các tác động môi trường tiềm ẩn của hệ thống xử lý nước cấp trong giai đoạn vận hành. Ngoài ra nghiên cứu còn so sánh với kịch bản liên quan đến việc thu hồi thành phần phenol PAC từ bùn thải của hệ thống xử lý và kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời thay thế cho nguồn điện từ lưới điện quốc gia. Nhà máy cấp nước Hóa An là nhà máy xử lý nước mặt dùng cho sinh hoạt lấy nguồn nước từ sông Đồng Nai với công suất xử lý 15.000m³/ngày đêm, hiệu suất xử lý đạt 98%. Hiệu quả của hệ thống xử lý được thể hiện bằng tiêu chuẩn chất lượng nước đầu vào và đầu ra tương ứng, như trong Bảng 1, cho thấy chất lượng nước đầu vào đạt chuẩn dùng cho mục đích cấp nước sinh hoạt với công nghệ xử lý phù hợp và chất lượng nước đầu ra đạt tiêu chuẩn nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.

Bảng 1. Kết quả quan trắc mẫu nước mặt và mẫu nước cấp

Chất lượng nước mặt (đầu vào)			Chất lượng nước cấp (đầu ra)		
Thông số	Kết quả	QCVN 08:2023/ BTNMT (Mức A)	Thông số	Kết quả	QCVN 01- 1:2024/ BYT
pH	8,36	6,5-8,5	pH	6,72	6-8,5
DO (mg/l)	6,02	≥ 6	Mùi	Không có mùi lạ	Không có mùi lạ
BOD ₅ (mg/l)	3,7	≤ 4	Độ đục (NTU)	0,1	2
COD (mg/l)	9	≤ 10	Màu sắc (TCU)	KPH	15
TSS (mg/l)	23	≤ 25	Amoni (mg/l)	0,09	1
Amonia (mg/l)	0,2	0,3	Fe ((mg/l)	KPH	0,3
Clorua (mg/l)	18,46	250	Clo dư (mg/l)	KPH	0,2-1,0
Asen (mg/l)	KPH	0,01	Asen (mg/l)	KPH	0,01
Fe (mg/l)	0,42	0,5	Coliform (CFU/100ml)	KPH	<1
E.coli (CFU/100ml)	16	20	E.coli (CFU/100ml)	KPH	<1
Coliform (CFU/100ml)	800	≤ 1.000			

Giai đoạn vận hành tạo ra gánh nặng môi trường lớn nhất (Goga et al., 2019), do đó nghiên cứu đánh giá vòng đời hệ thống xử lý nước cấp theo quan điểm “từ cái nôi đến cái nôi”, phạm vi nghiên cứu và sơ đồ dòng chảy của hệ thống được thể hiện trong Hình 1. Quá trình xử lý bùn thải không được đánh giá do hạn chế về mặt dữ liệu.



Hình 1. Sơ đồ dòng chảy của hệ thống xử lý và phạm vi LCA (2 kịch bản)

2.2. Kiểm kê vòng đời

Giai đoạn phân tích kiểm kê trong đánh giá vòng đời của hệ thống xử lý nước cấp được thực hiện tập trung vào năng lượng, hóa chất sử dụng và chất thải phát sinh. Bảng 2 trình bày các thông số kiểm kê của hệ thống xử lý nước cấp tính trung bình tháng và quy đổi theo đơn vị chức năng (1m^3 nước sạch).

Bảng 2. Tóm tắt kiểm kê vòng đời giai đoạn vận hành của hệ thống xử lý nước cấp

Nguyên liệu/năng lượng/sản phẩm	Số lượng/tháng	Số lượng quy theo đơn vị chức năng/ 1m^3 nước sạch	Đơn vị
Nước sạch	441.000	1	m^3
Nước thô	450.450	1,0214	m^3
Vôi	2.985	0,0068	kg
Phèn nhôm PAC	10.232	0,0232	kg
Clo	411	0,0009	kg
Điện tiêu thụ toàn hệ thống	66.753	0,1514	kWh
Bùn thải	304	0,0006	kg
Nước thải	120	0,0003	m^3

2.3. Đánh giá tác động vòng đời

Sau quá trình phân tích kiểm kê, bước đánh giá tác động vòng đời được tiến hành, đây là bước phân tích quan trọng trong phân tích LCA. Nghiên cứu sử dụng phần mềm SimaPro và cơ sở dữ liệu nền Ecoinvent để thực hiện với những ưu điểm về cơ sở dữ liệu lớn, khả năng mô hình hóa và phân tích toàn diện (Wernet et al., 2016). Phương pháp ReCiPe 2016 (H) V1.09 được sử dụng với hai cấp độ đánh giá: trung gian và điểm cuối (Huijbregts et al., 2016).

Các tác động môi trường trung gian (midpoint) gồm 18 hạng mục, phản ánh mức độ đóng góp của hệ thống đối với các tác động môi trường cụ thể. Chỉ số điểm cuối (endpoint) gồm 22 hạng mục tác động và được tổng hợp thành ba nhóm tác động lớn: sức khỏe con người, hệ sinh thái, tài nguyên; cho biết thiệt hại cuối cùng mà các tác động môi trường gây ra cho con người, hệ sinh thái và tài nguyên. Việc chuyển đổi từ chỉ số trung gian sang chỉ số điểm cuối giúp dễ dàng thấy được hậu quả thực sự chứ không chỉ dừng ở áp lực như các chỉ số trung gian, đảm bảo những đánh đổi môi trường được xem xét một cách toàn diện và là công cụ có độ tin cậy cao để hỗ trợ việc ra các quyết định và chính sách.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả đánh giá vòng đời hệ thống xử lý nước cấp

Kết quả phân tích vòng đời của hệ thống xử lý nước cấp ở giai đoạn vận hành cho thấy các tác động môi trường chủ yếu phát sinh từ việc tiêu thụ năng lượng điện và sử dụng hóa chất trong các công đoạn keo tụ, lắng, lọc và khử trùng. Kết quả đánh giá tác động trung gian được trình bày tại Bảng 3 và Hình 2. Tiêu thụ điện là nguồn đóng góp lớn nhất vào các hạng mục tác động môi trường trong hệ thống xử lý nước cấp, đặc biệt là ở các tác động nóng lên toàn cầu (68,2%), suy giảm tầng ozon (57,9%), hình thành ozon quang hóa (71,8%), hình thành bụi mịn (73,7%), axit hóa đất (77,3%), cạn kiệt tài nguyên hóa thạch (69,4%). Nguyên

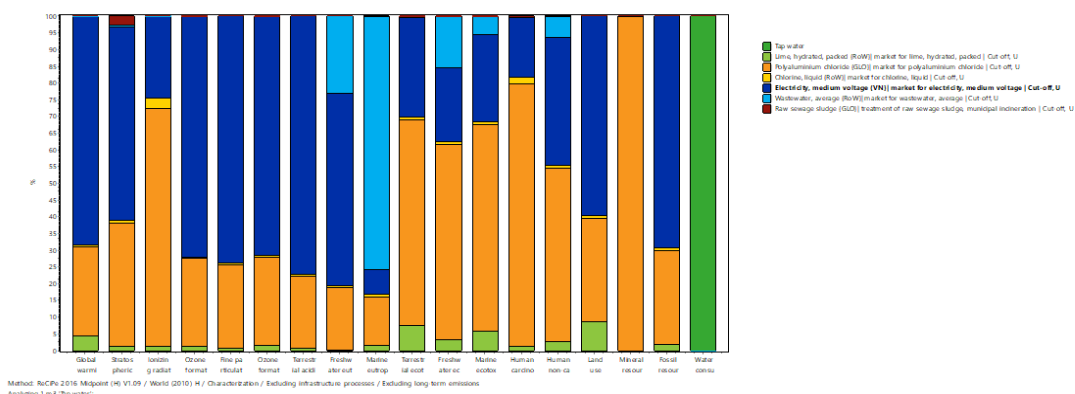
nhân chủ yếu xuất phát từ việc điện được sản xuất chủ yếu từ các nhà máy nhiệt điện (than, dầu, khí) dẫn đến phát thải CO₂, SO₂, NO_x và bụi mịn, hệ số phát thải khí nhà kính của lưới điện Việt Nam năm 2023 là 0,6592 tCO₂e/MWh (Department of Climate Change, 2024), cho thấy sự phụ thuộc lớn vào các nguồn năng lượng hóa thạch của ngành sản xuất điện tại Việt Nam. Bên cạnh đó, việc sử dụng hóa chất PAC cũng tạo tác động đáng kể đối với các chỉ số như bức xạ ion hóa (71,2%), độc tính sinh thái (58,5%–61,9%), độc tính gây ung thư (78,4%), cạn kiệt tài nguyên khoáng sản (99,7%). Phèn nhôm PAC có hiệu quả keo tụ tốt, liều dùng thấp và tạo bùn ít, nhưng đòi hỏi quá trình sản xuất tiêu tốn nhiều năng lượng và tài nguyên khoáng sản (quặng bauxit). Các hóa chất khác như vôi, clo cũng gây tác động môi trường, nhưng thấp hơn nhiều so với việc sử dụng phèn nhôm PAC, do lượng phèn nhôm sử dụng (0,0232kg/1m³ nước) gấp 25 lần lượng clo (0,0009kg/1m³ nước) và gấp hơn 3 lần lượng vôi (0,0068 kg/1m³ nước).

Nước thải của hệ thống xử lý nước cấp đóng góp chủ yếu vào các tác động phú dưỡng biển (75,5%), phú dưỡng nước ngọt (22,9%), độc tính sinh thái nước ngọt (15,4%). Trong khi đó, bùn thải được ghi nhận là không gây ra tác động lớn đối với môi trường, mức tác động cao nhất là liên quan đến suy giảm tầng ozon (2,67%).

Bảng 3. Tác động môi trường ở mức midpoint của các tác nhân trong hệ thống xử lý nước cấp

Impact category	Unit	Total	Tap water	Lime	Poly aluminium chloride	Chlorine	Electricity	Waste water	Raw sewage sludge
Global warming	kg CO _{2eq}	0,1472	0	0,0067	0,039	0,001	0,1	6,06x10 ⁻⁵	4,78x10 ⁻⁵
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 _{eq}	4,37x10 ⁻⁸	0	4,96x10 ⁻¹⁰	1,61x10 ⁻⁸	3,69x10 ⁻¹⁰	2,53x10 ⁻⁸	2,42x10 ⁻¹⁰	1,17x10 ⁻⁹
Ionizing radiation	kBq Co-60 _{eq}	0,0002	0	2,61x10 ⁻⁶	0,0002	6,22x10 ⁻⁶	5,19x10 ⁻⁵	2,15x10 ⁻⁷	1,68x10 ⁻⁸
Ozone formation, Human health	kg NO _{xeq}	0,0004	0	6,03x10 ⁻⁶	0,0001	2,21x10 ⁻⁶	0,0003	1,33x10 ⁻⁷	3,46x10 ⁻⁷
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 _{eq}	0,0003	0	2,31x10 ⁻⁶	7,53x10 ⁻⁵	1,75x10 ⁻⁶	0,0002	8,23x10 ⁻⁸	5,83x10 ⁻⁸
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _{xeq}	0,0004	0	6,41x10 ⁻⁶	0,0001	2,26x10 ⁻⁶	0,0003	1,36x10 ⁻⁷	3,48x10 ⁻⁷
Terrestrial acidification	kg SO _{2eq}	0,0008	0	5,77x10 ⁻⁶	0,0002	2,97x10 ⁻⁶	0,0006	1,78x10 ⁻⁷	1,74x10 ⁻⁷
Freshwater eutrophication	kg P _{eq}	8,08x10 ⁻⁶	0	2,12x10 ⁻⁸	1,5x10 ⁻⁶	5,48x10 ⁻⁸	4,65x10 ⁻⁶	1,85x10 ⁻⁶	1,97x10 ⁻⁹
Marine eutrophication	kg N _{eq}	3,04x10 ⁻⁶	0	5,18x10 ⁻⁸	4,37x10 ⁻⁷	2,79x10 ⁻⁸	2,21x10 ⁻⁷	2,3x10 ⁻⁶	6,26x10 ⁻⁹
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,1945	0	0,0144	0,1196	0,0016	0,0582	0,0005	0,0002
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5,01x10 ⁻⁵	0	1,59x10 ⁻⁶	2,93x10 ⁻⁵	3,91x10 ⁻⁷	1,10x10 ⁻⁵	7,74x10 ⁻⁶	5,2x10 ⁻⁸

Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,0002	0	1,14x10 ⁻⁵	0,0001	1,56x10 ⁻⁶	5,19x10 ⁻⁵	1,09x10 ⁻⁵	2,07x10 ⁻⁷
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,0005	0	6,72x10 ⁻⁶	0,0004	1,11x10 ⁻⁵	9,66x10 ⁻⁵	7,43x10 ⁻⁷	2,12x10 ⁻⁶
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,0092	0	0,0002	0,0048	7,42x10 ⁻⁵	0,0035	0,0006	2,06x10 ⁻⁵
Land use	m ² a crop _{eq}	0,0012	0	0,0001	0,0004	1,11x10 ⁻⁵	0,0007	6,76x10 ⁻⁷	8,17x10 ⁻⁸
Mineral resource scarcity	kg Cu _{eq}	0,0014	0	1,64x10 ⁻⁷	0,0014	2,28x10 ⁻⁷	3,47x10 ⁻⁶	1,12x10 ⁻⁷	6,5x10 ⁻⁸
Fossil resource scarcity	kg oil _{eq}	0,0348	0	0,0007	0,0097	0,0002	0,0242	1,07x10 ⁻⁵	4,58x10 ⁻⁶
Water consumption	m ³	1,0216	1,0214	5,35x10 ⁻⁶	0,0003	1,17x10 ⁻⁵	0,0002	-0,0003	2,21x10 ⁻⁷

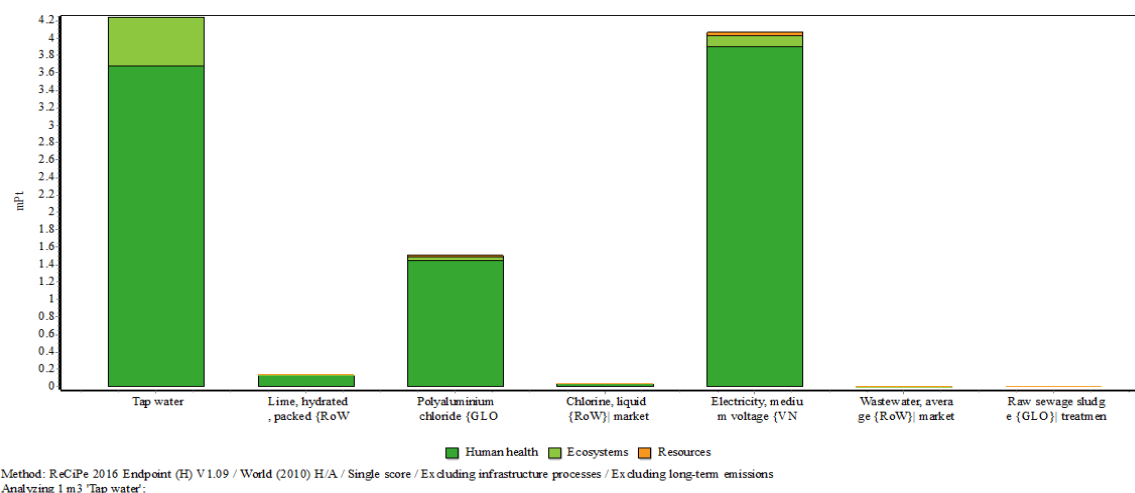


Hình 2. Đóng góp của từng tác nhân vào các chỉ số tác động môi trường ở mức midpoint

Các chỉ số môi trường trung gian được tổng hợp theo phương pháp ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 và trình bày theo ba nhóm chỉ số chính về: sức khỏe con người, hệ sinh thái và tài nguyên, như Bảng 4 và Hình 3. Hệ thống xử lý nước cấp đang nghiên cứu có tổng tác động môi trường đạt 9,97 mPt, trong đó sức khỏe con người bị ảnh hưởng nhiều nhất (9,19 mPt). Các thiệt hại của hệ sinh thái và tài nguyên tương đối nhỏ, điều này được giải thích bởi hệ thống xử lý nước cấp có nguồn nước đầu vào ít ô nhiễm, đạt chuẩn để sử dụng cho sinh hoạt sau khi xử lý phù hợp. Thiệt hại về sức khỏe con người phần lớn được quy cho việc sử dụng điện và các loại hóa chất sử dụng trong xử lý nước.

Bảng 4. Tác động môi trường ở mức endpoint (Single score) của các tác nhân trong hệ thống xử lý nước cấp

Damage category	Unit	Total	Tap water	Lime	Poly aluminium chloride	Chlorine	Electricity	Waste water	Raw sewage sludge
Total	mPt	9,97	4,23	0,14	1,51	0,04	4,06	-0,008	0,002
Human health	mPt	9,19	3,68	0,13	1,44	0,03	3,91	-0,007	0,002
Ecosystems	mPt	0,73	0,55	0,006	0,05	0,001	0,13	-0,0007	5,98x10 ⁻⁵
Resources	mPt	0,05	0	0,002	0,02	0,0004	0,03	1,87x10 ⁻⁵	1,09x10 ⁻⁵



Hình 3. Đóng góp của từng tác nhân vào các chỉ số tác động môi trường ở mức endpoint (Single score)

Kết quả nghiên cứu cho thấy các chỉ số midpoint và endpoint của hệ thống xử lý tập trung vào việc tiêu thụ điện và hóa chất ở giai đoạn vận hành. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước, nhấn mạnh giai đoạn xây dựng là nguồn phát thải khí nhà kính lớn ban đầu, còn giai đoạn vận hành chiếm phần lớn khí nhà kính hàng năm, khoảng 86% tổng lượng phát thải (Gui et al., 2024), trong đó tiêu thụ điện và năng lượng là tác nhân chính gây ra các thiệt hại cho con người, hệ sinh thái và nguồn tài nguyên (Hofs et al., 2022; Ouattara et al., 2024).

3.2. So sánh với kịch bản thu hồi thành phần của phèn nhôm trong bùn thải

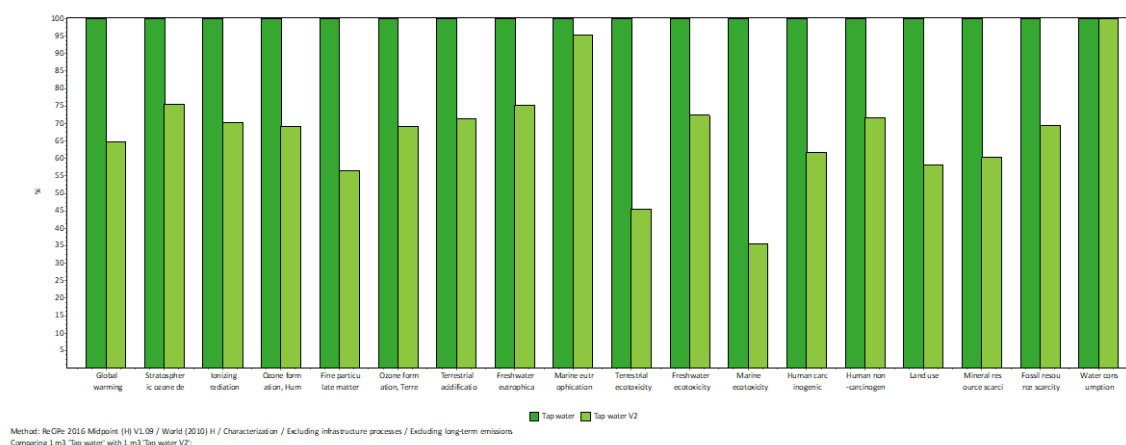
Với kịch bản này, kế hoạch được đề xuất là thu hồi thành phần nhôm của phèn nhôm PAC trong bùn thải của hệ thống xử lý. Trong bùn thải chứa phèn nhôm PAC, nhôm tồn tại chủ yếu ở dạng nhôm hydroxide kết tủa (Wang et al., 2014). Thu hồi nhôm trong bùn thải PAC thực chất là chuyển nhôm từ dạng kết tủa về dạng Al^{3+} tan có trong muối nhôm như $Al_2(SO_4)_3$, sau đó tái chế thành hợp chất nhôm sử dụng tiếp tục cho quá trình keo tụ. Hiệu quả xử lý nước của nhôm thu hồi tương đương với PAC mới (Liu et al., 2024). Theo tiêu chuẩn thương mại phổ biến của phèn nhôm PAC dạng bột dùng cho ngành xử lý nước cấp, hàm lượng nhôm Al_2O_3 dao động từ 29-31% (Atamanchemicals, 2020), như vậy hàm lượng nhôm tương ứng khoảng 16%.

Bùn thải từ quá trình keo tụ, lắng, lọc của hệ thống xử lý nước cấp, thường có 0,5-2,0 % chất rắn (Jacquez, n.d.). Theo nghiên cứu của Mora-León và cộng sự (2022) để thu hồi nhôm trong 1 lít bùn ướt cần 40ml axit H_2SO_4 3,5N và tỉ lệ thu hồi phèn nhôm là 76,3 %, thể tích bùn giảm 67%. Kiểm kê vòng đời giai đoạn vận hành của hệ thống xử lý nước cấp trong kịch bản này được thể hiện như trong Bảng 5.

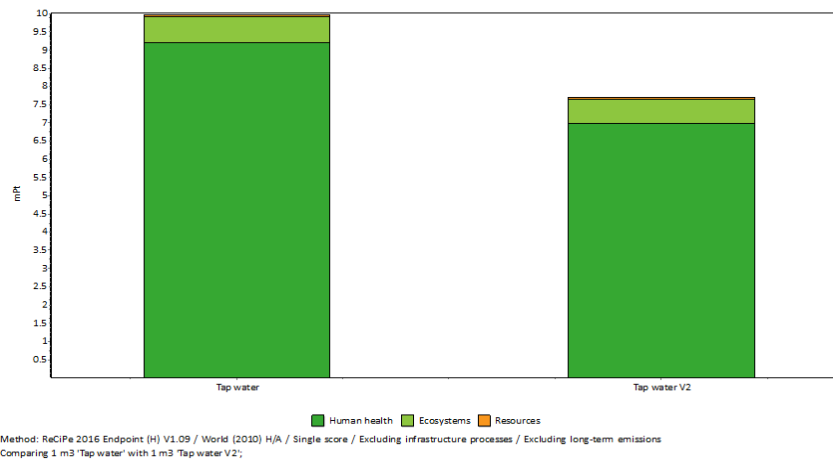
Bảng 5. Tóm tắt kiểm kê vòng đời giai đoạn vận hành của hệ thống xử lý nước cấp theo kịch bản thu hồi nhôm trong bùn thải chứa PAC

Nguyên liệu/năng lượng/ sản phẩm	Số lượng/tháng	Số lượng quy theo đơn vị chức năng/1m ³ nước sạch	Đơn vị
Nước sạch	441.000	1	m ³
Nhôm hoàn nguyên	1.249	0,0028	kg
Nước thô	450.450	1,0214	m ³
Vôi	2.985	0,0068	kg
Phèn nhôm PAC	10.232	0,0232	kg
Clo	411	0,0009	kg
H ₂ SO ₄ đậm đặc (98%)	105	0,00024	kg
Điện tiêu thụ toàn hệ thống	66.753	0,1514	kWh
Bùn thải	100	0,00023	kg
Nước thải	120	0,0003	m ³

Tác động môi trường của 2 kịch bản xử lý ở chỉ số trung gian và điểm cuối được trình bày ở Hình 4 và Hình 5, cho thấy việc thu hồi nhôm từ bùn thải chứa PAC mang lại nhiều lợi ích đáng kể. Với các chỉ số trung gian, kịch bản thu hồi nhôm từ bùn thải thể hiện mức tác động thấp hơn ở tất cả các chỉ số so với kịch bản xử lý truyền thống (mức giảm 5%-65%). Điều này có thể được giải thích bởi lợi ích từ việc thu hồi một lượng nhôm đáng kể để tái sử dụng thành PAC và tiếp tục tuần hoàn vào hệ thống xử lý, thay vì phải sử dụng nhôm nguyên sinh để sản xuất PAC. Các chỉ số endpoint tiếp tục khẳng định hiệu quả về mặt môi trường của kịch bản thu hồi nhôm từ bùn thải. Tổng thiệt hại giảm từ 9,97 mPt xuống còn 7,69 mPt (giảm 23% tổng điểm), trong đó giảm mạnh nhất là thiệt hại sức khỏe con người (9,19 mPt giảm còn 6,98 mPt). Tuy nhiên, các chỉ số của kịch bản thu hồi nhôm chưa thực sự hiệu quả tối ưu, do việc tiêu thụ thêm một lượng axit sulfuric. Điều này đặt ra vấn đề là cần phải nâng cao hiệu suất thu hồi nhôm, hoặc là sử dụng phương pháp khác để thu hồi nhôm ít gây ra tác động môi trường hơn.



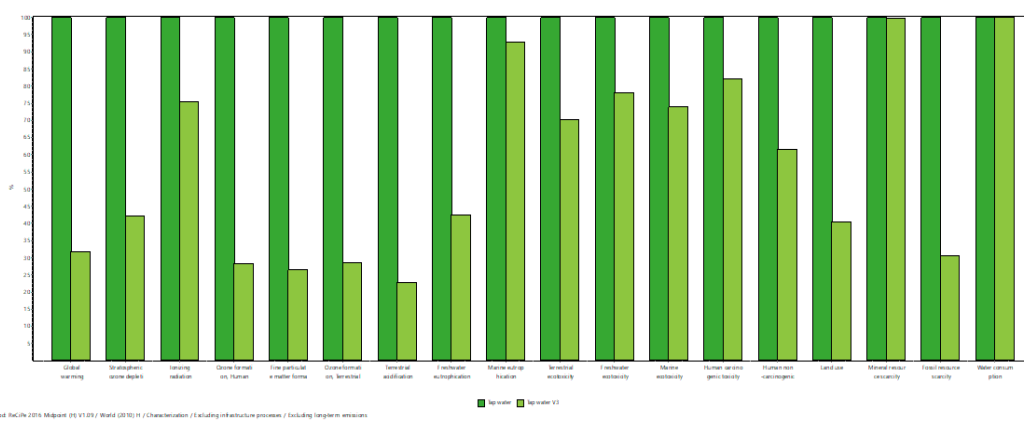
Hình 4. So sánh tác động môi trường ở mức midpoint của 2 kịch bản xử lý nước (Tap water - kịch bản truyền thống, Tap water V2 - kịch bản thu hồi nhôm)



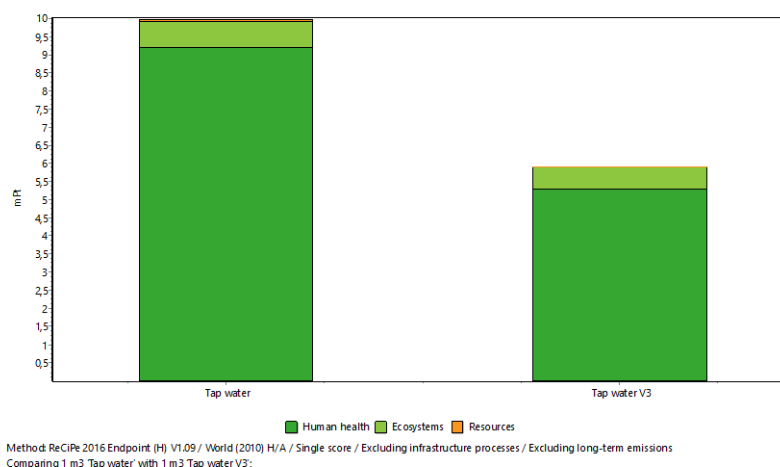
Hình 5. So sánh tác động môi trường ở mức endpoint của 2 kịch bản xử lý nước (Single score) (Tap water - kịch bản truyền thống, Tap water V2 - kịch bản thu hồi nhôm)

3.3. So sánh với kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời

Với kịch bản này, nhà máy lắp đặt một hệ thống pin năng lượng mặt trời đủ để cung cấp nguồn điện cho nhà máy sử dụng. Trong mô hình LCA xây dựng trên phần mềm SimaPro, toàn bộ dòng điện đầu vào được thay thế bằng nguồn điện sản xuất từ năng lượng mặt trời trong bộ cơ sở dữ liệu Ecoinvent, các yếu tố khác trong kiểm kê vòng đời được giữ nguyên. Kết quả so sánh tác động môi trường của 2 phương án sử dụng điện được đánh giá lần lượt theo các chỉ số trung gian và chỉ số điểm cuối, thể hiện ở Hình 6 và Hình 7. Với các chỉ số midpoint, kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời thể hiện mức tác động thấp hơn ở tất cả các hạng mục so với kịch bản truyền thống (mức giảm 40%-74%). Kết quả phân tích ở cấp độ endpoint cho thấy tổng tác động của hệ thống xử lý nước cấp trong kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời giảm đáng kể so với kịch bản truyền thống, với tổng điểm giảm từ 9,97 mPt xuống còn 5,91 mPt (giảm 41% tổng điểm). Mức giảm tác động phản ánh việc giảm phát thải khí nhà kính khi sử dụng nguồn điện năng lượng mặt trời đã góp phần cải thiện chất lượng môi trường, sức khỏe cộng đồng và tiết kiệm tài nguyên.



Hình 6. So sánh tác động môi trường ở mức midpoint của 2 kịch bản sử dụng điện (Tap water - kịch bản truyền thống, Tap water V3 - kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời)



Hình 7. So sánh tác động môi trường ở mức endpoint của 2 kịch bản sử dụng điện (Single score) (Tap water - kịch bản truyền thống, Tap water V3 - kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời)

4. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp đánh giá vòng đời để đánh giá các tác động môi trường của một nhà máy xử lý nước cấp phục vụ cho sinh hoạt với công nghệ xử lý điển hình tại Việt Nam. Phần mềm SimaPro 9.6 cùng với phương pháp ReCiPe (H) V1.09 cung cấp một phân tích toàn diện về tác động vòng đời của hệ thống trong giai đoạn vận hành. Kết quả nghiên cứu chỉ rõ rằng việc tiêu thụ điện và các loại hóa chất là yếu tố đóng góp chính vào các tác động môi trường và thiệt hại cho sức khỏe của con người.

Nhằm giảm thiểu gánh nặng môi trường phát sinh từ việc sử dụng hóa chất và tiêu thụ điện, nghiên cứu đã so sánh 2 kịch bản xử lý nước có thu hồi nhôm trong bùn thải chứa phen nhôm PAC và kịch bản sử dụng điện năng lượng mặt trời với kịch bản truyền thống. Kết quả cho thấy hai kịch bản thay thế đạt được những cải thiện môi trường đáng kể, nhấn mạnh lợi ích môi trường rõ rệt khi tích hợp kỹ thuật xử lý với chiến lược tái sử dụng tài nguyên và sử dụng năng lượng tái tạo. Trong bối cảnh thế giới hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng 0 thì việc giảm phát thải từ các nhà máy xử lý nước góp phần không nhỏ vào mục tiêu chung, đặc biệt là khi phát thải liên quan đến xử lý nước được ước tính khoảng 1,5% lượng phát thải khí nhà kính toàn cầu (Knappe et al., 2022).

Mặc dù, đã đạt được những kết quả nhất định nhưng nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được xem xét. Thứ nhất, việc thiếu dữ liệu xử lý bùn thải có thể ảnh hưởng đến tính chính xác trong đánh giá tổng thể. Thứ hai, hiệu quả môi trường của kịch bản thu hồi nhôm trong bùn thải, chưa đạt được mức tối ưu do yêu cầu sử dụng một lượng axit sulfuric tương đối lớn. Thứ ba, nghiên cứu chưa đánh giá được chi phí kinh tế, cũng như tác động môi trường từ việc sản xuất, lắp đặt và xử lý các tấm năng lượng mặt trời. Giải quyết được những hạn chế này sẽ giúp nâng cao độ tin cậy và hoàn thiện hơn mô hình đánh giá tác động môi trường của hệ thống xử lý nước cấp trong các nghiên cứu tương lai.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Bài báo này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu mã số CSB2024-40 được tài trợ bởi Trường Đại học Sài Gòn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Atamanchemicals. (2020). Retrieved 28/09/2025 from https://www.atamanchemicals.com/polyaluminium-chloride-white_u23795/
- Department of Climate Change. (2024). *Công bố kết quả tính toán hệ số phát thải của lưới điện Việt Nam năm 2023*. (1726/BĐKH-PTCBT) [Announcement of the calculation results of Vietnam's national grid emission factor for 2023 (No. 1726/BĐKH-PTCBT)]. Ministry of Natural Resources and Environment.
- Goga, T., Friedrich, E., & Buckley, C. (2019). Environmental life cycle assessment for potable water production - a case study of seawater desalination and mine-water reclamation in South Africa. *Water SA*, 45(4). <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i4.7552>
- Gui, Z., Qi, H., & Wang, S. (2024). Study on Carbon Emissions from an Urban Water System Based on a Life Cycle Assessment: A Case Study of a Typical Multi-Water County in China's River Network Plain. *Sustainability*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/su16051748>
- Hamawand, I. (2023). Energy Consumption in Water/Wastewater Treatment Industry-Optimisation Potentials. *Energies*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/en16052433>
- Hofs, B., van den Broek, W., van Eckveld, A., & van der Wal, A. (2022). Carbon footprint of drinking water over treatment plant life span (2025–2075) is probably dominated by construction phase. *Cleaner Environmental Systems*, 5, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100079>
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- ISO. (2006). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- Jacquez, R. B. (n.d.). *Characteristics of Wastewater Treatment Sludge (Unpublished material)*. CAGE Department NMSU.
- Knappe, J., Somlai, C., & Gill, L. W. (2022). Assessing the spatial and temporal variability of greenhouse gas emissions from different configurations of on-site wastewater treatment system using discrete and continuous gas flux measurement. *Biogeosciences*, 19(4), 1067-1085. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1067-2022>
- Liu, J., Zhang, J., Dai, Z., Li, B., Chen, X., & Meng, X. (2024). Recycling aluminum from polyaluminum chloride sludge through acid dissolution and cation resin separation/purification. *Water Research*, 262, 122096. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122096>
- Mo, W., Cornejo, P. K., Malley, J. P., Kane, T. E., & Collins, M. R. (2018). Life cycle environmental and economic implications of small drinking water system upgrades to reduce disinfection byproducts. *Water Research*, 143, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.047>
- Mora-León, A. G., Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., García A, E. F., & Correa-Ochoa, M. A. (2022). Aluminium recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131229>

- Ouattara, A., Azhaari, R. N., Hu, A. H., Kuo, C.-H., & Huang, H. (2024). Comparative Life Cycle Assessment Study on Carbon Footprint of Water Treatment Plants: Case Study of Indonesia and Taiwan. *Sustainability*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/su16198409>
- Shiu, H.-Y., Lee, M., Lin, Z.-E., & Chiueh, P.-T. (2023). Dynamic life cycle assessment for water treatment implications. *Science of The Total Environment*, 860, 160224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160224>
- Skoczko, I. (2025). Energy Efficiency Analysis of Water Treatment Plants: Current Status and Future Trends. *Energies*, 18(5). <https://doi.org/10.3390/en18051086>
- Wang, J.-J., Yang, D.-H., Yuan, S.-J., Ling, Z.-C., Dong, B., & Dai, X.-H. (2025). Drivers and mitigation of greenhouse gas emissions in drinking water treatment sludge management: A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 521, 146276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146276>
- Wang, L. Y., Tong, D. S., Zhao, L. Z., Liu, F. G., An, N., Yu, W. H., & Zhou, C. H. (2014). Utilization of alum sludge for producing aluminum hydroxide and layered double hydroxide. *Ceramics International*, 40(10, Part A), 15503-15514. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.07.012>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Xiong, W., Li, Y., Zhang, W., Ye, Q., Zhang, S., & Hou, X. (2018). Integrated multi-objective optimization framework for urban water supply systems under alternative climates and future policy. *Journal of Cleaner Production*, 195, 640-650. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.161>

APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) IN WATER TREATMENT SYSTEMS

Vu Thi Thuy*, Duong Thi Giang Huong

Sai Gon University, Vietnam

*Corresponding author: Vu Thi Thuy – Email: vtthuy@sgu.edu.vn

Received: October 05, 2025; Revised: November 07, 2025; Accepted: November 29, 2025

ABSTRACT

This study applied the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to a water treatment system, aiming to quantify the primary environmental impacts generated during the operational phase. The SimaPro software and the ReCiPe (H) v1.09 method were used to evaluate impact categories at both midpoint and endpoint levels. The research results indicate that electricity consumption and the chemical polyaluminium chloride (PAC) are the two largest contributors to overall environmental impacts. In particular, electricity is the main driver of global warming and fossil depletion, contributing 57.5%–77.3% to these respective categories, while PAC dominates impacts related to carcinogenic toxicity (78.4%) and mineral resource depletion (99.7%). The system's total endpoint damage was calculated at 9.97 mPt, with 9.19 mPt associated with human health. The study evaluated two alternative scenarios: aluminum recovery from PAC-containing sludge and the use of solar power for electricity supply. The results indicated that both scenarios achieved significant environmental improvements, with total midpoint impact indicators reduced by 5–65% and 40–74%, respectively, and total endpoint damages decreased by 23% and 41%. The findings highlight the potential of integrating water treatment processes with resource circularity strategies and renewable energy utilization to enhance sustainability in the water supply sector.

Keywords: life cycle assessment; water treatment system; environmental impact; recovery of alum coagulant; solar power