

ĐÁNH GIÁ HIỆN TRẠNG MÁI HÚNG VÀ TIỀM NĂNG THU GOM, TÁI SỬ DỤNG NƯỚC MƯA KHU VỰC THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Vũ Thị Hoài Thu^{1,2,*}, Nguyễn Thanh Hương¹, Triệu Ánh Ngọc³

¹ Viện Công nghệ Tài nguyên nước và Môi trường

² Trường Đại học Giao thông vận tải thành phố Hồ Chí Minh

³ Phân hiệu Trường Đại học Thủy lợi tại tỉnh Bình Dương

*Email: hoaithu.vu@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Thu gom và tái sử dụng nước mưa (rainwater harvesting - RWH) được xem là một giải pháp hạ tầng xanh giúp bổ sung nguồn nước phi ăn uống, giảm dòng chảy mặt và hỗ trợ thích ứng ngập đô thị. Nghiên cứu đánh giá hiện trạng mái hứng và hạ tầng thoát nước mái khu vực thành phố Hồ Chí Minh (trước sáp nhập) trên cơ sở điều tra 270 công trình theo 5 vùng đô thị; kết hợp ước tính diện tích mái hứng từ phân tích viễn thám và đánh giá chất lượng nước mưa chảy tràn qua mái theo thời gian (100 mẫu) trong trận mưa. Kết quả cho thấy, mái tôn/kim loại chiếm ưu thế (81,9% mẫu khảo sát); 74,8% công trình có máng xối hoạt động tốt, nhưng 19,6% không có máng xối. Lượng nước mưa có thể thu gom lý thuyết đạt khoảng 216,5 triệu m³/năm, trong đó nhóm nhà ở chiếm 86,8%. Chất lượng nước chảy tràn đầu trận có TDS và EC cao hơn 54 - 81% so với giai đoạn ổn định, khẳng định sự cần thiết của cấu phần tách nước đầu trận và lọc thô. Xu thế gia tăng số ngày mưa lớn (R30 mm) tại nhiều trạm (1,5 - 2,8 ngày/thập kỷ), gợi ý cần cập nhật dung tích điều tiết và chiến lược vận hành bể chứa theo mùa. Từ các kết quả trên, nghiên cứu đề xuất khung giải pháp RWH gắn với “khu thu trữ nước” phân tán nhằm giảm đáng kể lưu lượng đỉnh và áp lực lên hệ thống thoát nước đô thị. Diện tích mái hứng được ước tính bằng viễn thám - GIS trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) với lớp dấu chân công trình Open Buildings V3.

Từ khóa: Thu gom nước mưa, mái hứng, chất lượng nước mưa, tiềm năng thu hoạch.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khu vực thành phố Hồ Chí Minh (trước sáp nhập) là đô thị chịu áp lực ngập do mưa lớn kết hợp triều cường và quá tải hệ thống thoát nước; đồng thời biến đổi khí hậu có thể làm gia tăng rủi ro mưa cực đoan [1 - 3]. Trong bối cảnh đó, thu gom và tái sử dụng nước mưa (rainwater harvesting - RWH) không chỉ bổ sung nguồn nước cho các mục đích phi ăn uống (tưới cây, rửa sân, xả bồn cầu...), mà còn góp phần giảm dòng chảy mặt từ mái nếu được thiết kế và vận hành phù hợp [4].

Tuy nhiên, hiệu quả của RWH phụ thuộc vào đặc trưng mái hứng (vật liệu, tình trạng vệ sinh, máng xối - ống đứng), đặc trưng mưa (thời điểm bắt đầu mùa mưa, xu thế mưa lớn) và chất lượng

nước chảy tràn đầu trận. Bên cạnh đó, việc tích hợp RWH với các “khu thu trữ nước” (hồ điều tiết, không gian trữ nước phân tán, bể ngầm...) là hướng tiếp cận quan trọng để giảm ngập theo nguyên lý “giữ nước tại chỗ” và giảm tải cho cống trong thời đoạn đỉnh mưa [1, 5].

Ngập đô thị tại thành phố Hồ Chí Minh chịu tác động đồng thời của mưa lớn, triều cường và sự gia tăng bề mặt không thấm do đô thị hóa, làm hệ thống thoát nước dễ quá tải [3, 6]. Các nghiên cứu trong nước đã nhấn mạnh vai trò của hồ điều hòa/hồ điều tiết và giải pháp trữ nước phân tán trong việc cắt giảm đỉnh dòng chảy, hỗ trợ giảm ngập cho thành phố [7 - 9].

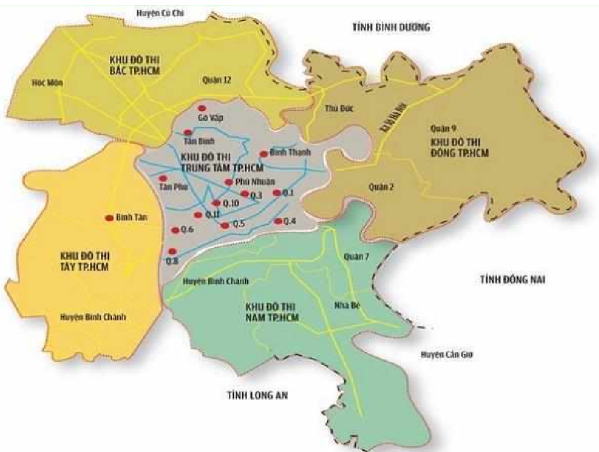
Nghiên cứu này nhằm: (i) điều tra - đánh giá đặc trưng mái hứng và hiện trạng thu gom/thoát

nước mưa từ mái khu vực thành phố Hồ Chí Minh; (ii) đánh giá chất lượng nước mưa (pH, EC, TDS) chảy tràn qua các loại mái điển hình và hiện tượng gột rửa dầu trần; (iii) lượng hóa diện tích mái hứng (A_{roof}) và tiềm năng thu hoạch theo nhóm chức năng công trình (nhà ở đô thị/nông thôn, nhà xưởng/kho, thương mại – dịch vụ, trường học – bệnh viện) bằng viễn thám - GIS trên nền tảng GEE; (iv) đề xuất định hướng tích hợp RWH với các khu thu trữ nước định hướng mục đích tái sử dụng và giảm ngập đô thị [3, 10].

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu và nguồn dữ liệu

Khu vực nghiên cứu là thành phố Hồ Chí Minh trước sáp nhập, được phân chia thành 5 vùng đô thị (đô thị trung tâm và các đô thị vệ tinh phía Bắc, Nam, Tây, Đông) theo định hướng quy hoạch không gian (Hình 1). Nguồn dữ liệu sử dụng gồm: (i) phiếu điều tra thực địa về đặc trưng mái hứng và hiện trạng thu gom - thoát nước mưa; (ii) chuỗi số liệu mưa ngày giai đoạn 1980 - 2024 tại các trạm khí tượng, thủy văn trên địa bàn; (iii) số liệu pH nước mưa theo tháng giai đoạn 2018 - 2023; (iv) lớp dữ liệu không gian về dấu chân công trình/mái nhà và hiện trạng sử dụng đất phục vụ ước tính diện tích mái hứng [11].



Hình 1. Phân vùng 5 vùng đô thị thành phố Hồ Chí Minh và vị trí các điểm khảo sát

Trong nghiên cứu này, nền tảng Google Earth Engine (GEE) được sử dụng để xử lý dữ liệu không gian cho toàn thành phố Hồ Chí Minh [12]. Lớp dấu chân công trình (building footprints) được khai thác từ bộ dữ liệu Open Buildings V3 Polygons trên GEE từ ảnh vệ tinh kèm chỉ số tin

cậy (confidence) [13]. Lớp hiện trạng sử dụng đất phục vụ phân nhóm mái được tổng hợp từ bộ dữ liệu kiểm kê đất đai/bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2019 do Sở Tài nguyên và Môi trường thành phố Hồ Chí Minh (nay là Sở Nông nghiệp và Môi trường thành phố Hồ Chí Minh) công bố trên HCMC Geoportal [14].

2.2. Thiết kế điều tra mái hứng và chọn mẫu

Thiết kế điều tra mái hứng được xây dựng bằng điều tra xã hội học (phỏng vấn) và điều tra mô tả (quan sát - ghi nhận hiện trạng). Cỡ mẫu điều tra được xác định theo công thức thống kê: $N = (Z^2 U p U (1 - p)) / e^2$, với mức tin cậy 95% ($Z = 1,96$), $p = 0,5$ và sai số chấp nhận $e = 0,05$, cho kết quả $N \approx 267$ và được làm tròn thành 270 phiếu [15].

Mẫu điều tra được phân tầng theo 5 vùng đô thị. Trong mỗi vùng, các điểm khảo sát được lựa chọn theo tuyến nhằm đảm bảo tính đại diện về loại hình công trình, loại mái và bối cảnh hạ tầng thoát nước. Phỏng vấn được thực hiện trực tiếp với chủ hộ/đại diện đơn vị quản lý công trình; đồng thời nhóm khảo sát ghi nhận hiện trạng máng xối, ống đứng, điểm xả, dấu vết ngập và khả năng bố trí bể chứa. Dữ liệu sau khảo sát được kiểm tra logic, loại bỏ phiếu thiếu thông tin quan trọng và chuẩn hóa mã hóa biến.

Bảng 1. Phân bố mẫu khảo sát theo vùng đô thị ($N = 270$)

Vùng đô thị	Số phiếu	Tỷ lệ (%)
Đô thị phía Bắc	61	22,6
Đô thị phía Nam	16	5,9
Đô thị phía Tây	42	15,6
Đô thị phía Đông	110	40,7
Đô thị trung tâm	41	15,2
Tổng	270	100

Ghi chú: Phân vùng đô thị theo định hướng quy hoạch phát triển không gian thành phố Hồ Chí Minh giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050.

2.3. Nội dung phiếu điều tra và biến số nghiên cứu

Phiếu điều tra gồm hai phần: (i) thông tin chung về công trình/hộ dân (vị trí, loại hình sử dụng, quy mô, nguồn nước sử dụng hiện tại, ghi nhận ngập); (ii) thông tin chi tiết về mái hứng và

hệ thống thu - thoát nước mưa (vật liệu lọc, diện tích/số tầng, độ dốc, tình trạng vệ sinh, máng xối - ống đứng, điểm xả, khả năng đấu nối hệ thống thoát nước chung, hiện trạng/bố trí bể chứa và mục đích sử dụng nước mưa nếu có). Các câu hỏi kết hợp lựa chọn đơn - đa lựa chọn và một số trường mở để ghi nhận đặc thù địa phương; đồng thời nhóm khảo sát sử dụng bảng kiểm quan sát để giảm sai lệch do tự báo cáo. Phiếu điều tra vì vậy được dùng để: (i) quy chiếu kết quả theo nhóm loại hình công trình (nhà ở đô thị/nông thôn, nhà xưởng/kho, trường học - bệnh viện, thương mại - dịch vụ); (ii) đánh giá mức “sẵn sàng triển khai” RWH (máng xối, ống đứng, điểm xả, khả năng bố trí bể), là các thuộc tính không thể suy luận tin cậy chỉ từ footprint viễn thám.

2.4. Ước tính diện tích mái hứng và tiềm năng thu hoạch nước mưa

Ở quy mô thành phố, diện tích mái hứng được ước tính từ lớp dấu chân công trình/mái nhà (building footprint) được trích xuất từ ảnh viễn thám độ phân giải cao và chuẩn hóa. Diện tích mái được tổng hợp theo nhóm chức năng công trình (nhà ở; công nghiệp - sản xuất; thương mại - dịch vụ; giáo dục - y tế; các nhóm khác) thông qua chồng ghép GIS.

2.4.1. Ứng dụng viễn thám - GIS ước tính diện tích mái hứng trên nền tảng GEE

Diện tích mái hứng (A_{roof}) được xác định dựa trên lớp dấu chân công trình (footprint) và xử lý trên nền tảng GEE [12] theo các bước: (1) nạp ranh giới hành chính khu vực nghiên cứu; (2) trích xuất lớp footprint từ Open Buildings V3 Polygons trên GEE từ ảnh vệ tinh độ phân giải 50 cm [13]; (3) lọc theo chỉ số tin cậy confidence $\geq 0,75$ và loại bỏ các đa giác có diện tích $< 10 \text{ m}^2$ nhằm hạn chế nhiễu; (4) tính diện tích theo mặt bằng (m^2) theo diện tích hình học; (5) chồng ghép với lớp hiện trạng sử dụng đất [14] để tổng hợp diện tích mái hứng theo nhóm chức năng công trình (Bảng 2). Quy trình được sơ đồ hóa ở hình 2.

Trong nghiên cứu này, diện tích mái hứng (A_{roof}) được hiểu là diện tích chiếu bằng của mái. Đối với mái dốc, diện tích bề mặt thực có thể lớn hơn diện tích chiếu bằng; do thiếu thông tin

góc dốc và cấu trúc mái ở quy mô thành phố, nghiên cứu sử dụng diện tích chiếu bằng như một xấp xỉ bảo thủ phù hợp cho tính toán cân bằng nước mưa và đánh giá tiềm năng thu gom.

$$V = P \times A \times C$$

Trong đó: V là thể tích nước mưa có thể thu ($\text{m}^3/\text{năm}$), P là lượng mưa năm trung bình ($\text{m}/\text{năm}$), A là diện tích mái hứng (m^2) và C là hệ số dòng chảy mái. Trong nghiên cứu này, P trung bình nhiều năm tại khu vực thành phố Hồ Chí Minh lấy bằng $1,732 \text{ m}/\text{năm}$ và C tham khảo $0,8$ cho các nhóm mái phổ biến trong đô thị.



Hình 2. Sơ đồ quy trình viễn thám - GIS trên nền tảng GEE để ước tính diện tích mái hứng (A_{roof}) theo nhóm chức năng công trình

2.4.2. Hiệu suất thu gom và phân tích bất định

Tiềm năng V theo công thức trên là giá trị lý thuyết ở quy mô mái (chưa xét mức độ trang bị hệ thống và tổn thất vận hành). Để phản ánh khả năng khai thác thực tế, nghiên cứu sử dụng thêm hệ số tham gia và hiệu suất hệ thống: $V_{\text{eff}} = V \times f_{\text{adopt}} \times \eta_{\text{sys}}$. Trong đó: f_{adopt} là tỷ lệ diện tích mái được lắp đặt hệ thống RWH ($0 - 1$); η_{sys} là hiệu suất tổng hợp ($0 - 1$) phản ánh tổn thất do tách nước đầu trận, thất thoát trên đường ống, tràn bể và mức độ sẵn có dung tích chứa trước mưa; đồng thời hệ số $C = 0,75 - 0,90$ để phản ánh bất định do đặc tính mái và điều kiện thu gom [1, 2, 5, 16].

2.5. Lấy mẫu và phân tích chất lượng nước mưa/chảy tràn mái

Chất lượng nước mưa/chảy tràn mái được đánh giá theo 2 nguồn: (i) số liệu pH nước mưa

theo tháng giai đoạn 2018 - 2023 tại khu vực thành phố Hồ Chí Minh; (ii) lấy mẫu nước chảy tràn mái theo thời gian trong các trận mưa mùa mưa năm 2025 tại 6 địa điểm đại diện cho các loại mái phổ biến (tôn/kim loại, bê tông, ngói, tấm lợp xi măng sợi) và một vị trí đối chứng (nước mưa trực tiếp), tổng cộng 100 mẫu [11, 17].

Mẫu nước chảy tràn được hứng trực tiếp tại ống xả đứng/điểm xả máng xối bằng chai nhựa 350 mL; lấy liên tục theo thời gian, định kỳ 5 phút/mẫu cho đến khi kết thúc trận mưa. Các chỉ tiêu pH, TDS, EC và DO được đo nhanh tại chỗ bằng thiết bị cầm tay (AZ8603). Trong phân tích hiệu ứng gột rửa đầu trận, “đầu trận” được xác định là mẫu đầu tiên và “ổn định” là giá trị trung bình của 3 mẫu cuối cùng trong mỗi chuỗi lấy mẫu. Việc lấy mẫu và xử lý mẫu tham khảo theo hướng dẫn của TCVN 5997:1995 [18].

2.6. Phân tích đặc trưng mưa và xu thế mưa lớn

Từ chuỗi số liệu mưa ngày giai đoạn 1980 - 2024, nghiên cứu tính số ngày mưa lớn R30 mm (số ngày có lượng mưa ≥ 30 mm) nhằm đặc trưng hóa xu thế mưa lớn theo thời gian. Xu thế được ước lượng bằng độ dốc Theil-Sen kết hợp kiểm định Mann-Kendall. Thời điểm bắt đầu mùa mưa (Onset of Rainy Season - ORS) được xác định theo tiêu chí tích lũy lượng mưa và số ngày mưa liên tiếp; kết quả được so sánh theo pha ENSO thông qua chỉ số ONI bằng tương quan Spearman [19].

2.7. Tiếp cận đánh giá khu thu trữ nước và khả năng giảm ngập

Để lượng hóa sơ bộ khả năng giảm ngập do mưa của giải pháp RWH phân tán, nghiên cứu tiếp cận theo cân bằng nước trên mái và giả thiết đường quá trình dòng chảy trực tiếp dạng tam giác (triangular hydrograph) để quy đổi từ thể tích giữ lại sang mức giảm đỉnh lưu lượng. Các tham số hệ số dòng chảy và cách quy đổi đơn vị tham khảo theo hướng dẫn thiết kế thoát nước đô thị TCVN 7957:2008 [16].

$$V_{ret} = \min\{(P_{event} - d_{ff})UA_{roof}UCUf_{adopt}, k_{avail}UV_{cap}\} \quad (1)$$

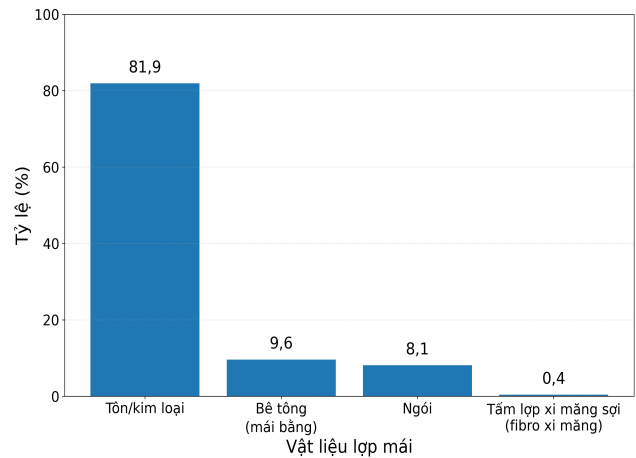
$$V_{runoff,sau} = P_{event}UA_{roof}UC - V_{ret} \quad (2)$$

Trong đó: P_{event} (m) là tổng lượng mưa của trận mưa thiết kế; d_{ff} (m) là độ sâu tách/xả bỏ đầu trận; A_{roof} (m²) là tổng diện tích mái hứng trong phạm vi xét (tiềm năng); f_{adopt} (-) là tỷ lệ diện tích mái được lắp đặt hệ RWH (diện tích tham gia = $f_{adopt}UA_{roof}$); C (-) là hệ số dòng chảy của mái; V_{cap} (m³) là tổng dung tích bể lắp đặt tương ứng với f_{adopt} ; k_{avail} (-) là tỷ lệ dung tích sẵn có trước mưa (phụ thuộc chế độ vận hành và nhu cầu sử dụng).

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

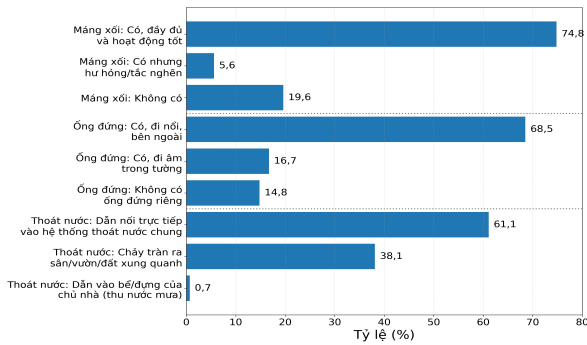
3.1. Đặc trưng mái hứng và hiện trạng thu gom - thoát nước mưa

Trong 270 công trình khảo sát, nhóm nhà ở riêng lẻ/thấp tầng chiếm 77,4%; các nhóm còn lại gồm: Cơ sở giáo dục (8,5%), thương mại - dịch vụ (7,0%), cơ sở tôn giáo (2,6%), y tế (2,2%), trụ sở hành chính (1,9%) và nhà chung cư/khu tập thể (0,4%). Về vật liệu lợp mái, mái tôn/kim loại chiếm 81,9%, tiếp đến là mái bê tông (9,6%), mái ngói (8,1%) và tấm lợp xi măng sợi (0,4%) (Hình 3).



Hình 3. Phân bố vật liệu lợp mái chính trong mẫu khảo sát (N = 270)

Kết quả ghi nhận hạ tầng thu - thoát nước mái cho thấy, 74,8% công trình có máng xối đầy đủ và hoạt động tốt, 5,6% có nhưng hư hỏng/tắc nghẽn và 19,6% không có máng xối. Về ống đứng, 68,5% đi nổi bên ngoài, 16,7% đi âm trong tường và 14,8% không có ống đứng riêng. Dòng chảy từ mái chủ yếu đầu nối trực tiếp vào hệ thống thoát nước chung (61,1%) hoặc chảy tràn ra sân/vườn/đất xung quanh (38,1%); tỷ lệ dẫn vào bể/dụng cụ chứa nước mưa còn rất thấp (0,7%) (Hình 4).



Hình 4. Hiện trạng máng xối, ống đứng và phương thức thoát nước mưa từ mái (N = 270)

Từ góc độ RWH, các đặc trưng trên gợi ý 2 vấn đề: (i) tỷ lệ công trình đã có máng xối và ống đứng tương đối cao, tạo điều kiện kỹ thuật thuận lợi để cải tạo lắp đặt thiết bị tách nước đầu trận và đấu nối về bể chứa; (ii) tỷ lệ không có máng xối và hiện tượng xả tràn ra sân/vườn khá lớn, có thể làm gia tăng cuốn trôi chất bẩn và làm giảm chất lượng

nước đầu trận, đồng thời gây xói mòn tại điểm xả. Do đó, tiêu chuẩn hóa cấu phần thu nước (máng xối - ống đứng) và hướng dẫn vận hành/bảo trì là điều kiện tiên quyết để nâng hiệu quả RWH và giảm dòng chảy mặt.

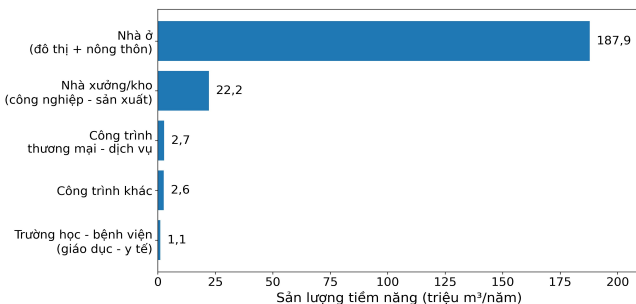
3.2. Tiềm năng thu hoạch nước mưa theo nhóm chức năng công trình

Dựa trên diện tích mái hứng ước tính từ dữ liệu không gian (tổng 156,26 triệu m²) và lượng mưa năm trung bình 1,732 m/năm với hệ số dòng chảy 0,8, tổng lượng nước mưa có thể thu gom lý thuyết trên địa bàn thành phố đạt 216,5 triệu m³/năm. Theo nhóm chức năng công trình, nhóm nhà ở (đô thị + nông thôn) chiếm 187,9 triệu m³/năm (86,8%); tiếp theo là nhóm nhà xưởng/kho (công nghiệp - sản xuất) 22,2 triệu m³/năm (10,2%); các nhóm còn lại chiếm khoảng 3,0% (Bảng 2).

Bảng 2. Ước tính tiềm năng thu hoạch nước mưa theo nhóm chức năng công trình (P = 1,732 m/năm; C = 0,8)

Nhóm chức năng công trình	Diện tích mái hứng (triệu m ²)	Tỷ lệ (%)	Sản lượng tiềm năng (triệu m ³ /năm)
Nhà ở (đô thị + nông thôn)	135,61	86,8	187,9
Nhà xưởng/kho (công nghiệp và sản xuất)	16,02	10,3	22,2
Công trình thương mại và dịch vụ	1,93	1,2	2,7
Trường học - bệnh viện (giáo dục và y tế)	0,79	0,5	1,1
Công trình khác	1,91	1,2	2,6
Tổng cộng	156,26	100	216,5

Diện tích mái hứng (A_{roof}) ở bảng 2 được tổng hợp từ lớp dấu chân công trình sau khi lọc confidence $\geq 0,75$ trên GEE và tính theo diện tích mặt bằng (m²) [12, 13]. Sau đó, A_{roof} được chồng ghép với lớp hiện trạng sử dụng đất [14] và gom nhóm theo 5 nhóm chức năng (không tính diện tích đất nông nghiệp/cây lâu năm).



Hình 5. Tiềm năng thu hoạch nước mưa theo nhóm chức năng công trình (P = 1,732 m/năm; C = 0,8)

Kết quả ước tính tiềm năng theo nhóm chức năng công trình (Bảng 2 và hình 5) cho thấy, tiềm năng RWH tập trung chủ yếu ở nhóm nhà ở (mái nhỏ nhưng số lượng lớn, phân bố rộng), trong khi nhóm nhà xưởng/kho và công trình công cộng có lợi thế mái lớn liên tục, thuận lợi thu gom tập trung và vận hành theo cụm. Do đó, định hướng triển khai nên kết hợp: (i) RWH hộ gia đình trong khu dân cư để giảm dòng chảy từ mái tại nguồn; (ii) RWH quy mô công trình/cụm công trình cho các mái lớn (nhà xưởng, trường học, bệnh viện) để tạo dung tích trữ đáng kể phục vụ nhu cầu phi uống và dự phòng phòng cháy, chữa cháy.

Đối với nhóm nhà ở, khảo sát cho thấy, vật liệu phổ biến là tôn/kim loại (mái nghiêng) và một phần mái bê tông (mái bằng) hoặc ngói. Trong phân tích A_{roof} , nhóm nhà ở được tổng hợp chung; phân tách định lượng đô thị/nông thôn cần

lớp dữ liệu phân loại chi tiết hơn. Nhà ở đô thị (nhà phố/nhà ống) thường có mái phân mảnh và không gian bố trí bể hạn chế, phù hợp bể nhỏ/treo và vận hành theo mùa; trong khi nhà ở ven đô/nông thôn có diện tích mái lớn hơn và thuận lợi bố trí bể để phục vụ tưới vườn, rửa sân. Do hiệu ứng gột rửa đầu trận, nước chảy tràn từ mái tôn/kim loại có TDS và EC cao hơn 54 - 81% so với giai đoạn ổn định (Bảng 3), vì vậy cần cấu phần tách nước đầu trận và lọc thô trước khi đưa vào bể. Nước sau tách đầu trận phù hợp cho các mục đích phi uống (tưới cây, rửa sân/xe...); trường hợp nhu cầu nhạy cảm hơn cần bổ sung xử lý theo quy chuẩn hiện hành.

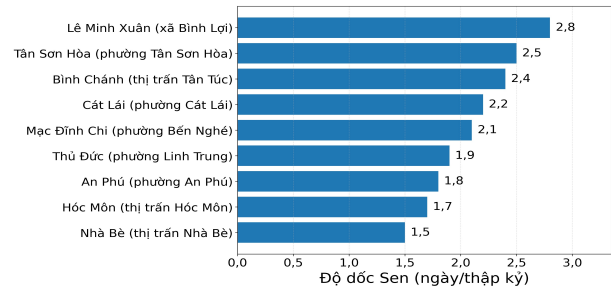
Đối với các mái lớn, bảng 2 cho thấy: (i) nhóm nhà xưởng/kho (10,2% A_{roof}) có tiềm năng thu gom đáng kể cho vệ sinh nhà xưởng, làm mát và dự phòng phòng cháy, chữa cháy; (ii) nhóm trường học - bệnh viện tuy tỷ lệ nhỏ (0,5%) nhưng nhu cầu phi uống ổn định, phù hợp mô hình RWH quy mô công trình; (iii) nhóm thương mại - dịch vụ (1,2%) có thể tận dụng cho vệ sinh và tưới cảnh quan. Ở các nhóm này, cần tăng cường kiểm soát chất lượng (tách đầu trận, lọc) do ảnh hưởng bụi/khí thải đô thị - công nghiệp.

3.3. Biến động chế độ mưa và gợi ý thiết kế hệ thống RWH

Phân tích xu thế chỉ số mưa lớn R30 mm cho thấy, nhiều trạm quan trắc trong khu vực thành phố Hồ Chí Minh có xu hướng tăng số ngày mưa ≥ 30 mm, với độ dốc Theil-Sen khoảng 1,5 - 2,8 ngày/thập kỷ (Hình 6). Xu thế này cho thấy rủi ro xuất hiện các trận mưa lớn với tần suất cao hơn, làm tăng khả năng quá tải hệ thống cống. Do đó, khi thiết kế hệ thống RWH cần xem xét đồng thời: (i) duy trì dung tích hữu dụng trước mùa mưa (k_{avail}) thông qua vận hành - xả cận hợp lý; (ii) bố trí xả tràn có điều tiết/kết hợp giải pháp thấm - trữ tại chỗ để cắt giảm đỉnh dòng chảy.

Bên cạnh mưa lớn, thời điểm bắt đầu mùa mưa (ORS) và các pha ENSO có thể ảnh hưởng đến tính sẵn có của nước mưa và chiến lược vận hành bể chứa (tích nước đầu mùa, xả đón mưa giữa mùa). Do đó, các thiết kế RWH tại khu vực thành phố Hồ Chí Minh cần kết hợp đặc trưng mùa mưa - mùa khô và xem xét cơ chế “xả chủ động” trước

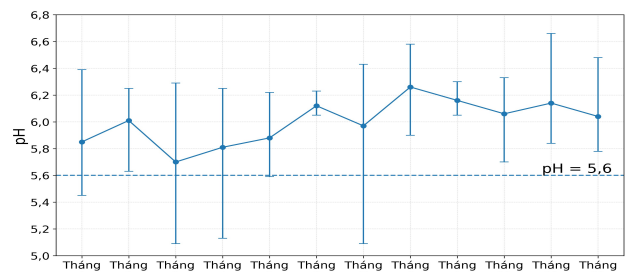
các đợt mưa lớn theo dự báo để đảm bảo dung tích điều tiết.



Hình 6. Xu thế số ngày mưa lớn (R30 mm) tại một số trạm ở thành phố Hồ Chí Minh (giai đoạn 1980 - 2024)

3.4. Chất lượng nước mưa và hiện tượng gột rửa đầu trận từ mái húng

Số liệu pH nước mưa theo tháng giai đoạn 2018 - 2023 tại thành phố Hồ Chí Minh cho thấy, pH trung bình toàn giai đoạn đạt 6,01, dao động 5,08 - 6,66; có 7/62 tháng (11,2%) có pH < 5,6 - ngưỡng thường dùng để nhận diện mưa axit (Hình 7). Nhìn chung, nước mưa tại khu vực thành phố Hồ Chí Minh chưa bị axit hóa nghiêm trọng, song vẫn tồn tại các thời điểm mưa có tính axit hơn, cần lưu ý khi thu gom cho các mục đích nhạy cảm và đối với vật liệu kim loại [17].



Hình 7. Biến động pH nước mưa theo tháng tại thành phố Hồ Chí Minh (giai đoạn 2018 - 2023)

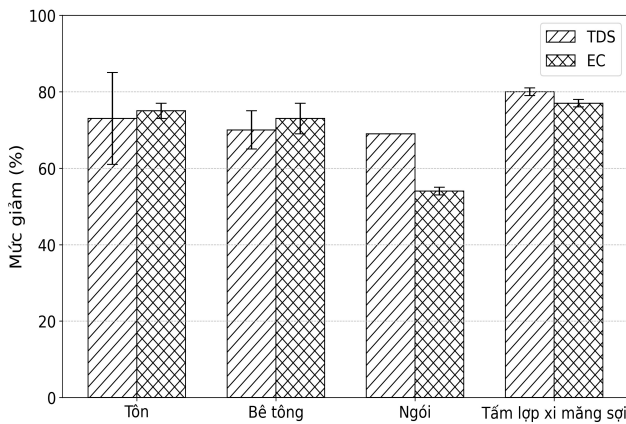
Kết quả quan trắc theo chuỗi mẫu trong trận mưa cho thấy, TDS và EC giảm nhanh theo thời gian sau khi mưa bắt đầu, phản ánh hiện tượng gột rửa các hạt bụi và chất bám tích tụ trên bề mặt mái. So sánh “mẫu đầu tiên” với “trung bình 3 mẫu cuối” (Bảng 3) cho thấy, mức giảm TDS và EC dao động khoảng 54 - 81% tùy loại mái (Hình 8). Kết quả này gợi ý, cần tích hợp cơ cấu tách nước đầu trận và/hoặc xả bỏ một phần thể tích đầu trận, kết hợp lọc thô trước khi đưa vào bể chứa để nâng cao chất lượng nước thu gom [5, 20, 21]. Trường hợp

nước mưa được xả tràn ra kênh rạch hoặc thấm bổ lượng nước mặt và nước dưới đất tương ứng [22, cập, có thể tham chiếu thêm các quy chuẩn chất 23].

Bảng 3. So sánh chất lượng nước mưa chảy tràn đầu trận và giai đoạn ổn định theo loại mái

Loại mái	pH (đầu trận/ổn định)	TDS (mg/L) (đầu trận/ổn định)	EC ($\mu\text{S/cm}$) (đầu trận/ổn định)
Tôn/kim loại	6,26 - 6,97/6,78 - 6,94	19,5 - 80,7/8,1 - 16,3	75,8 - 109,7/19,3 - 22,8
Bê tông	6,67 - 7,03/6,67 - 6,83	35,6 - 36,7/9,2 - 12,5	50,3 - 112,4/15,6 - 25,4
Ngói	6,85/7,02	120,2/36,9	116,7/53,8
Tấm lợp xi măng sợi	6,77/7,10	96,5/18,2	120,7/25,8

Ghi chú: “Đầu trận” là mẫu đầu tiên; “Ổn định” là giá trị trung bình của 3 mẫu cuối trong mỗi chuỗi lấy mẫu.



Hình 8. Hiệu ứng gột rửa đầu trận: Mức giảm TDS và EC theo loại mái (thanh sai số biểu thị khoảng nhỏ nhất - lớn nhất giữa các địa điểm)

3.5. Vai trò của khu thu trữ nước và khả năng giảm ngập

Về nguyên lý, RWH có thể góp phần giảm ngập thông qua: (i) giảm lượng nước chảy tràn phát sinh từ mái vào hệ thống thoát nước; (ii) làm chậm thời điểm xả nhờ trữ tạm thời trong bể, qua đó có thể làm giảm đỉnh lưu lượng tại các tiểu lưu vực/đoạn cống quá tải [2, 3].

Ở cấp đô thị, RWH cần được tích hợp với các khu thu trữ nước tập trung như hồ điều tiết, công viên trữ nước, bể điều tiết ngầm dưới quảng trường/bãi đỗ xe. Cách tiếp cận đa tầng (công trình - khu phố - thành phố) cho phép “chia nhỏ” lưu lượng, giảm áp lực lên hệ thống thoát nước trong giai đoạn đỉnh mưa và tăng tính linh hoạt vận hành theo dự báo. Đồng thời, yêu cầu đảm bảo chất lượng nước cần được đặt đúng mục tiêu sử dụng: nước sau tách đầu trận và lọc thô phù hợp cho các nhu cầu phi ăn uống; trường hợp dùng cho sinh hoạt cần bổ sung xử lý nâng cao và kiểm soát chất lượng theo quy chuẩn hiện hành [3, 10].

Trong phạm vi nghiên cứu này, “giảm ngập” được hiểu là giảm tải thể tích và đỉnh lưu lượng chảy tràn từ bề mặt mái vào hệ thống thoát nước. Nghiên cứu lựa chọn trận mưa thiết kế có tổng lượng $P_{\text{event}} = 122,4$ mm trong 3 giờ (chu kỳ lặp $T = 10$ năm, trạm Tân Sơn Hòa - theo đường quan hệ IDF tại thành phố Hồ Chí Minh) làm cơ sở tính toán đại diện [24].

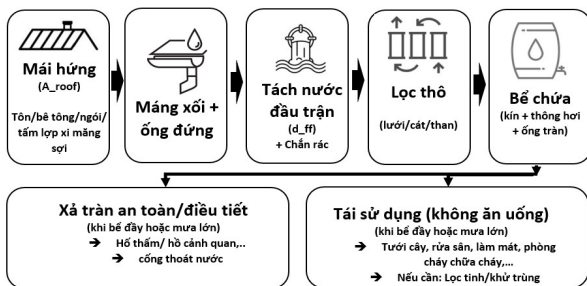
Bảng 4. Ước tính hiệu quả giảm tải dòng chảy từ mái theo các kịch bản thu - trữ nước ($P_{\text{event}} = 122,4$ mm)

Kịch bản	V_{ret} (10^6 m ³)	V_{runoff} sau trữ (10^6 m ³)	C_{eff}	Giảm V_{runoff} (%)
Hiện trạng (không trữ)	0,000	15,301	0,80	0,0
GP1 - trữ phân tán 10% mái ($d_{\text{store}} = 30$ mm)	0,375	14,926	0,78	2,5
GP2 - trữ phân tán 20% mái ($d_{\text{store}} = 30$ mm)	0,750	14,551	0,76	4,9

Ghi chú: V_{ret} được tính theo công thức (1) với $d_{\text{ff}} = 1$ mm; $V_{\text{cap}} \approx d_{\text{store}} U_{\text{f}} \text{adopt} U_{\text{A_roof}}$; $k_{\text{avail}} = 0,8$; d_{store} là chiều sâu trữ quy đổi (thể tích bể hữu dụng trên 1 đơn vị diện tích mái tham gia).

Ở cấp lưu vực, nhiều nghiên cứu trong nước đã nhấn mạnh vai trò của các giải pháp tăng dung tích trữ (hồ điều hòa/hồ điều tiết và trữ phân tán) trong giảm ngập đô thị [7 - 9]. Kết quả ở bảng 4 cho thấy, với $A_{\text{roof}} \approx 156,26$ triệu m^2 và hệ số dòng chảy mái $C = 0,8$, tổng thể tích nước chảy tràn từ mái trong trận mưa thiết kế đạt khoảng 15,301 triệu m^3 . Nếu 10 - 20% diện tích mái được trang bị bể hữu dụng tương đương $d_{\text{store}} = 30$ mm và đảm bảo dung tích sẵn có $k_{\text{avail}} \approx 0,8$ trước mưa lớn, thể tích có thể giữ lại ngay trong thời đoạn mưa đạt khoảng 0,375 - 0,750 triệu m^3 , tương ứng giảm 2,5 - 4,9% thể tích và đỉnh lưu lượng quy đổi của dòng chảy từ mái. Riêng nhóm nhà ở ($A_{\text{roof}} \approx 135,61$ triệu m^2), thể tích nước chảy tràn từ mái trong trận mưa thiết kế ước $\approx 13,279$ triệu m^3 ; thể tích giữ lại tương ứng $\approx 0,325 - 0,651$ triệu m^3 khi áp dụng GP1 - GP2 trên mái nhóm nhà ở.

Về tính khả thi, RWH hộ gia đình/công trình quy mô nhỏ (bể đặt nổi/áp mái) có ưu thế triển khai nhanh và không đòi hỏi không gian ngầm; hiệu quả giảm đỉnh dòng chảy phụ thuộc vào nhu cầu tái sử dụng (tưới cây, vệ sinh, xả bồn cầu) giúp tạo dung tích trống trước các trận mưa. Đối với bể ngầm/công trình trữ nước quy mô lớn trong khu vực mật độ xây dựng cao, cần xem xét quy hoạch không gian ngầm và phương án vận hành xả trước mưa (bơm/cửa xả có kiểm soát) nhằm đảm bảo dung tích sẵn có – điều kiện tiên quyết để giải pháp trữ nước phát huy tác dụng giảm ngập [6].



Hình 9. Sơ đồ đề xuất hệ thống thu gom - xử lý - lưu trữ và tái sử dụng nước mưa tại công trình

Ghi chú: Sơ đồ áp dụng cho mái cứng (tôn/kim loại, bê tông, ngói, tấm lợp xi măng sợi) thuộc nhóm nhà ở, công trình công cộng, thương mại - dịch vụ và công nghiệp. Với khu vực công viên/đất thấm hoặc mái xanh, ưu tiên giải pháp

thấm - trữ tại chỗ (SUDS) hoặc hồ cảnh quan; trường hợp thu gom để tái sử dụng cần bổ sung lớp lọc phù hợp và kiểm soát chất lượng.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Mái tôn/kim loại chiếm tỷ trọng lớn (81,9% mẫu khảo sát); tổng diện tích mái hứng toàn thành phố Hồ Chí Minh ước tính $A_{\text{roof}} \approx 156,26$ triệu m^2 . Theo nhóm chức năng công trình, mái nhà ở (dân cư đô thị + nông thôn) chiếm 86,8% ($A_{\text{roof}} \approx 135,61$ triệu m^2) - tiềm năng lớn do số lượng mái nhiều nhưng phân mảnh; nhóm nhà xưởng/kho (công nghiệp - sản xuất) chiếm 10,2% ($A_{\text{roof}} \approx 16,02$ triệu m^2) - lợi thế mái lớn liên tục phù hợp bố trí bể quy mô cụm (Bảng 2).

Với lượng mưa trung bình năm $P \approx 1.732$ mm và hệ số dòng chảy mái $C = 0,8$, lượng nước mưa có thể thu gom lý thuyết đạt $\approx 216,5$ triệu m^3 /năm. Trong đó, nhóm nhà ở đóng góp $\approx 187,9$ triệu m^3 /năm (86,8%), nhóm nhà xưởng/kho $\approx 22,2$ triệu m^3 /năm (10,2%), các nhóm còn lại $\approx 6,4$ triệu m^3 /năm (3,0%). Quy đổi theo diện tích mái, 1 m^2 mái có thể thu gom $\approx 1,386$ m^3 /năm ($\approx 3,8$ L/ m^2 /ngày), hỗ trợ ước tính nhanh quy mô nguồn nước phi uống tiềm năng ở cấp hộ/công trình. Với trận mưa thiết kế $P_{\text{event}} = 122,4$ mm/T = 10 năm, ước tính tổng thể tích nước chảy tràn từ mái đạt khoảng 15,301 triệu m^3 . Nếu 10 - 20% diện tích mái được trang bị bể hữu dụng thì thể tích giữ lại trong thời đoạn mưa đạt khoảng 0,375 - 0,750 triệu m^3 , tương ứng giảm khoảng 2,5 - 4,9% thể tích và đỉnh lưu lượng quy đổi của dòng chảy từ mái. Riêng nhóm nhà ở, thể tích nước chảy tràn từ mái trong trận mưa thiết kế ước $\approx 13,279$ triệu m^3 ; với GP1 - GP2, thể tích giữ lại tương ứng $\approx 0,325 - 0,651$ triệu m^3 . Nước chảy tràn đầu trận có xu hướng có TDS và EC cao hơn giai đoạn ổn định; do đó cần bố trí tách đầu trận và lọc thô trước khi tái sử dụng. Trường hợp sử dụng cho mục đích có tiếp xúc trực tiếp/ăn uống cần bổ sung các bước xử lý nâng cao và giám sát chất lượng phù hợp quy chuẩn.

Phân tích chuỗi mưa ngày tại trạm Tân Sơn Hòa giai đoạn 2010 - 2024 cho thấy, chỉ số mưa cực đoan R30 có xu hướng tăng trong một số năm gần đây; vì vậy quy mô trữ và năng lực thoát tràn cần

được xem xét theo các kịch bản mưa lớn hơn trong thiết kế công trình RWH.

4.2. Kiến nghị

Ưu tiên triển khai RWH quy mô hộ gia đình (nhóm nhà ở) do chiếm 86,8% A_{roof} vừa tái sử dụng nước phi uống vừa giảm tải dòng chảy đỉnh.

Lồng ghép yêu cầu bố trí thu - trữ nước mưa vào các chương trình giảm ngập và dự án nhà ở/khu dân cư mới, ưu tiên khu vực mật độ xây dựng cao.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự phối hợp khảo sát từ các đơn vị liên quan, đặc biệt cảm ơn Sở Khoa học và Công nghệ thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ kinh phí thực hiện nghiên cứu này thông qua đề tài “Nghiên cứu đề xuất cơ chế, chính sách, giải pháp thu gom, tái sử dụng nước mưa tại thành phố Hồ Chí Minh”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., *et al.* (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195 - 209.
2. Freni, G., Liuzzo, L. (2019). Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas. *Water*, 11(7), 1389.
3. World Bank (2013). *Ho Chi Minh city: Urban flood risk management*. Washington, DC.
4. Lê Thị Thủy Hằng, Lê Thị Thu Hương (2019). Domestic use of rainwater in Ho Chi Minh city, Vietnam: Exploring the barriers from the citizens' perspective. *Journal of Water and Climate Change*, 10(1): 210 - 222. DOI:10.2166/wcc.2018.077.
5. Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., *et al.* (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45, 2049 - 2059.
6. Nguyễn Thị Mai Lan, Trần Đức Dũng, Châu Nguyễn Xuân Quang và cs (2021). Đánh giá khả năng áp dụng giải pháp thoát nước đô thị bền vững (SUDS) trong quy hoạch thoát nước đô thị tại huyện Bình Chánh, thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, (732): 49 - 64. DOI:10.36335/VNJHM.2021(732).49-64.
7. Lê Sâm, Nguyễn Đình Vượng, Trần Minh Tuấn (2010). Tận dụng khả năng trữ nước của hồ điều hòa để giảm thiểu ngập lụt trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 9, 39 - 45.
8. Lê Sâm, Nguyễn Tất Đắc, Nguyễn Đình Vượng, Trần Minh Tuấn, Huỳnh Ngọc Tuyên (2019). *Giải pháp chống ngập cho các thành phố lớn*. Nhà xb Nông nghiệp, Hà Nội.
9. Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam (2011). *Nghiên cứu đề xuất giải pháp chống ngập cho thành phố Hồ Chí Minh*. Đề tài cấp Nhà nước.
10. Cổng Thông tin điện tử Chính phủ (2014). *Trung tâm điều hành chống ngập TPHCM quy hoạch mạng lưới hồ điều tiết giảm ngập úng*. <https://tphcm.chinhphu.vn/trung-tam-dieu-hanh-chong-ngap-tphcm-quy-hoach-mang-luoi-ho-dieu-tiet-giam-ngap-ung-1013006.htm>. Ngày truy cập 17/12/2025.
11. Viện Công nghệ Tài nguyên nước và Môi trường (2025). *Bộ dữ liệu không gian và tính toán tiềm năng thu gom, tái sử dụng nước mưa tại thành phố Hồ Chí Minh. Tài liệu nội bộ của nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp thành phố: “Nghiên cứu đề xuất cơ chế, chính sách, giải pháp thu gom, tái sử dụng nước mưa tại thành phố Hồ Chí Minh”*.
12. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18 - 27.
13. Sirko, W., Kashubin, S., Ritter, M., *et al.* (2021). Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. arXiv:2107.12283.
14. Sở Tài nguyên và Môi trường thành phố Hồ Chí Minh (2020). *Kế hoạch số 5817/KH-STNMT-QLĐ ngày 14/7/2020 về kiểm kê đất đai và lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2019, dữ liệu hiện trạng sử dụng đất thành phố Hồ Chí Minh cung cấp trên HCMC Geoportal*.
15. Yamane, T. (1967). *Statistics: An Introductory Analysis (2nd ed.)*. New York: Harper & Row.

16. Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7957:2008. Thoát nước - Mạng lưới và công trình bên ngoài - Tiêu chuẩn thiết kế.
17. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) (2018 - 2024). *Acid deposition monitoring data (Viet Nam) – Wet deposition (pH, EC, ions)*.
18. Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5997:1995 (ISO 5667-8:1993). Chất lượng nước - Lấy mẫu - Hướng dẫn lấy mẫu nước mưa.
19. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center (2024-2025). *Oceanic Niño Index (ONI) dataset*.
20. World Health Organization (2017). *Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum)*. Geneva.
21. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT về Chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.
22. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 08:2023/BTNMT về Chất lượng nước mặt.
23. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 09:2023/BTNMT về Chất lượng nước dưới đất.
24. Viện Môi trường và Tài nguyên, ĐHQG-HCM (2023). *Báo cáo chuyên đề: Tính khả thi và hiệu quả của tiếp cận trữ nước mưa tại đô thị thành phố Hồ Chí Minh*. Thuộc đề tài “Đề xuất các giải pháp trữ nước mưa góp phần quản lý ngập lụt bền vững cho thành phố Hồ Chí Minh dưới tác động của tốc độ đô thị hóa và biến đổi khí hậu”. Sở Khoa học và Công nghệ thành phố Hồ Chí Minh.

ASSESSMENT OF ROOF CATCHMENT CHARACTERISTICS, RAINWATER QUALITY AND RAINWATER HARVESTING POTENTIAL IN HO CHI MINH CITY

Vu Thi Hoai Thu^{1,2}, Nguyen Thanh Huong¹, Trieu Anh Ngoc³

¹*Institute for Water Resources and Environment Technology*

²*University of Transport Ho Chi Minh city*

³*Thuyloi University*

Abstract

Rainwater harvesting and reuse (RWH) is increasingly considered a green infrastructure option to supplement non-potable water supply, reduce roof runoff and support urban flood adaptation. This study assesses roof catchment characteristics and roof-drainage conditions in Ho Chi Minh city based on a household/building survey of 270 sites across five urban zones, combined with remote-sensing-based roof area estimation and event-based monitoring of roof runoff quality (100 samples). Results indicate that metal-sheet roofs dominate (81.9% of surveyed roofs); 74.8% of buildings have functional gutters, while 19.6% lack gutters. The theoretical harvestable volume is about 216.5 million m³/year, with residential land accounting for 86.8%. First-flush runoff exhibits substantially higher TDS and EC than the stable phase (by 54 - 81%), highlighting the need for first-flush diversion and coarse filtration. Increasing trends in heavy-rain days (R30 mm) at multiple stations (1.5 - 2.8 days/decade) suggest that storage sizing and seasonal operation should be updated. Based on these findings, an RWH framework integrated with distributed detention/retention areas is proposed to mitigate peak runoff and alleviate pressure on the urban drainage system. Roof catchment area was mapped using remote sensing and GIS on the Google Earth Engine platform (Open Buildings V3 building footprints).

Keywords: *Rainwater harvesting, roof catchment, rainwater quality, harvestable potential.*

Ngày nhận bài: 22/9/2025

Ngày chuyển phản biện: 10/11/2025

Ngày thông qua phản biện: 28/11/2025

Ngày duyệt đăng: 10/02/2026