

HƯỚNG TỚI MÔ HÌNH “ĐÔ THỊ BỌT BIỂN MIỀN NÚI” ĐỀ XUẤT KHUNG QUẢN LÝ THOÁT NƯỚC MƯA BỀN VỮNG CHO CAO BẰNG



Toward a "Mountain Sponge City" Model: A Sustainable Stormwater Management Framework for Cao Bang, Vietnam

/ GS. TS. Nguyễn Việt Anh¹

Tóm tắt: Biến đổi khí hậu làm mưa cực đoan xuất hiện dày hơn, lũ lụt đô thị cũng xảy ra thường xuyên hơn, nhất là ở những thành phố miền núi với địa hình dốc đứng và lưu vực nhỏ [9]. Những hệ thống cống rãnh truyền thống từng được xem là đủ, giờ lại bộc lộ nhiều hạn chế khi chế độ thủy văn khu vực ngày càng biến động [7]. Nghiên cứu này đề xuất một khung quản lý thoát nước mưa bền vững cho đô thị Cao Bằng, dựa trên việc tổng hợp các kinh nghiệm quốc tế về thoát nước đô thị bền vững (SUDS), phát triển tác động thấp (LID), Chương trình Đô thị bọt biển (SCP) [12], đồng thời phân tích kỹ các bối cảnh địa phương. Nếu bố trí LID hợp lý, tổng lưu lượng dòng chảy có thể giảm từ 18–90%, còn lưu lượng đỉnh giảm 10–25% trong các lưu vực dốc [14]. Vì thế, “Đô thị bọt biển miền núi” tập trung vào tiếp cận theo 3 tầng can thiệp với 6 nhóm giải pháp tích hợp: Quản lý vùng lưu vực ở thượng lưu, LID theo bậc thang dựa vào độ dốc, kết hợp hạ tầng xanh lam - xanh dương - xám - thông minh trong nội đô, bảo tồn hành lang sông, quy hoạch không gian thích ứng rủi ro, cùng cơ chế quản lý và tài chính [19]. Khung này mở ra hướng đi chiến lược cho các đô thị miền núi thích ứng với biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Cao Bằng, đô thị bọt biển, đô thị miền núi, lũ, mưa, ngập, thoát nước bền vững.

Abstract: Climate change is increasing the frequency of extreme rainfall events, leading to more frequent urban flooding, particularly in mountainous cities characterized by steep terrain and small catchments [9]. Conventional drainage systems, once considered adequate, are now revealing significant limitations as regional hydrological regimes become increasingly variable [7]. This study proposes a sustainable stormwater management framework for Cao Bang City, Vietnam, based on a synthesis of international experiences in Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Low Impact Development (LID), and Sponge City Program (SCP) [12], while carefully analyzing local geographic and hydrological conditions. With properly implemented LID measures, total runoff volume can be reduced by approximately 18–90%, while peak discharge may decrease by 10–25% in steep catchments [14]. Therefore, the concept of a “Mountain Sponge City” focuses on a three-tier intervention approach comprising six integrated solution groups: upstream watershed management; slope-adapted terraced LID measures; integration of blue

- green - grey - smart infrastructure within the urban core; protection of river corridors; risk-adaptive spatial planning; and supportive governance and financial mechanisms [19]. This framework provides a strategic pathway for mountainous cities to enhance climate resilience and adapt to increasingly extreme rainfalls.

Key words: Cao Bang, mountainous cities, flooding, rainfall, sustainable stormwater drainage, Sponge City, urban inundation.

Nhận bài ngày 25/01/2026, chỉnh sửa ngày 16/02/2026, chấp nhận đăng ngày 26/3/2026.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngập lụt đô thị đang trở thành một trong những thách thức lớn nhất đối với phát triển đô thị bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu. Theo các báo cáo gần đây, sự gia tăng của các trận mưa cực đoan kết hợp với quá trình đô thị hóa nhanh đã làm thay đổi đáng kể chế độ thủy văn tự nhiên, dẫn đến gia tăng tần suất và mức độ nghiêm trọng của ngập lụt tại nhiều đô thị trên thế giới [9]. Tại Việt Nam, tình trạng này ngày càng rõ rệt khi các đô thị phải đối mặt đồng thời với áp lực gia tăng dân số, mở rộng không gian xây dựng và suy giảm diện tích bề mặt thấm nước.

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Chủ tịch Hội đồng Giáo sư liên ngành Xây dựng - Kiến trúc

E-mail: AnhNV@HUCE.edu.vn

Các hệ thống thoát nước đô thị truyền thống chủ yếu được thiết kế theo nguyên tắc “thu – dẫn – xả nhanh”, nhằm nhanh chóng đưa nước mưa ra khỏi khu vực đô thị thông qua hệ thống cống và kênh dẫn. Tuy nhiên, cách tiếp cận này ngày càng bộc lộ nhiều hạn chế trong điều kiện biến đổi khí hậu. Khi cường độ mưa vượt quá năng lực thiết kế, hệ thống dễ bị quá tải, dẫn đến ngập úng cục bộ hoặc trên diện rộng. Đồng thời, việc tăng tốc độ thoát nước còn có thể làm gia tăng nguy cơ lũ hạ lưu, gây ra các tác động tiêu cực đối với hệ thống thủy văn tổng thể [7].

Trước những thách thức đó, các mô hình quản lý nước mưa bền vững đã được phát triển và áp dụng rộng rãi trên thế giới. Các khái niệm như Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Low Impact Development (LID), Water Sensitive Urban Design (WSUD) và Sponge City đều hướng tới mục tiêu phục hồi và mô phỏng lại các quá trình thủy văn tự nhiên thông qua các giải pháp tăng cường thấm, trữ và làm chậm dòng chảy [12]. Thay vì tập trung vào việc thoát nước nhanh, các mô hình này nhấn mạnh việc giữ nước tại chỗ, phân tán dòng chảy và tận dụng nước mưa như một tài nguyên.

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của các giải pháp này trong việc giảm lưu lượng dòng chảy, giảm lưu lượng đỉnh và cải thiện chất lượng nước. Ví dụ, các hệ thống LID có thể giúp giảm đáng kể dòng chảy bề mặt và làm chậm quá trình tập trung dòng chảy, từ đó giảm nguy cơ ngập lụt trong các trận mưa vừa và nhỏ. Tuy nhiên, hiệu quả của các giải pháp này phụ thuộc mạnh vào điều kiện địa hình, cấu trúc đô thị và đặc điểm khí hậu của từng khu vực.

Phần lớn những nghiên cứu và ứng dụng thực tế hiện nay tập trung tại các đô thị đồng bằng hoặc ven biển, nơi địa hình tương đối bằng phẳng và điều kiện thủy văn ổn định hơn. Trong khi đó, các đô thị miền núi có những đặc điểm hoàn toàn khác biệt. Địa hình dốc làm tăng tốc độ dòng chảy và rút ngắn thời gian tập trung nước, dẫn đến nguy cơ hình thành dòng chảy lớn trong thời gian ngắn. Bên cạnh đó, các lưu vực nhỏ và bị chia cắt mạnh khiến khả năng điều tiết tự nhiên bị hạn

chế. Ngoài ra, quá trình đô thị hóa tại các khu vực này thường diễn ra dọc theo thung lũng và hành lang sông suối, làm gia tăng nguy cơ ngập lụt khi mưa lớn kết hợp với lũ sông [19].

Một đặc điểm quan trọng khác của đô thị miền núi là sự tương tác phức tạp giữa nhiều nguồn dòng chảy. Ngập lụt không chỉ xuất phát từ nước mưa tại chỗ mà còn chịu ảnh hưởng của dòng chảy từ sườn dốc và lũ từ thượng lưu đổ về. Điều này tạo ra các cơ chế ngập lụt phức hợp, trong đó các yếu tố địa hình, thủy văn và cấu trúc đô thị có mối liên hệ chặt chẽ. Do đó, việc áp dụng trực tiếp các mô hình SUDS hoặc LID từ đô thị đồng bằng vào đô thị miền núi thường không đạt hiệu quả như kỳ vọng.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về thoát nước đô thị bền vững chủ yếu tập trung vào các đô thị lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh, nơi các vấn đề ngập lụt đã được nghiên cứu tương đối đầy đủ. Trong khi đó, các đô thị miền núi như Cao Bằng, Lào Cai hay Hà Giang vẫn còn thiếu các nghiên cứu chuyên sâu về cơ chế ngập lụt và các giải pháp thích ứng phù hợp [13]. Điều này đặt ra yêu cầu cần phát triển các cách tiếp cận mới, phù hợp với điều kiện đặc thù của khu vực miền núi.

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và đề xuất một khung quản lý thoát nước mưa bền vững phù hợp với điều kiện đô thị miền núi là cần thiết. Khung này không chỉ cần tích hợp các giải pháp kỹ thuật mà còn phải xem xét đến các yếu tố quy hoạch, quản lý và vận hành. Đồng thời, cần có cách tiếp cận tổng thể ở quy mô lưu vực, thay vì chỉ tập trung vào phạm vi đô thị.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này nhằm mục tiêu đề xuất một mô hình “đô thị bọt biển miền núi” phù hợp với điều kiện của thành phố Cao Bằng. Nghiên cứu tập trung vào việc tổng hợp các kinh nghiệm quốc tế, phân tích đặc điểm địa phương và xây dựng một khung giải pháp tích hợp, bao gồm các tầng can thiệp và các nhóm giải pháp cụ thể. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học cho việc nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu của các đô thị miền núi tại Việt Nam.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện trên cơ sở kết hợp giữa phương pháp tổng hợp tài liệu, phân tích so sánh và phân tích trường hợp điển hình nhằm xây dựng một khung quản lý thoát nước mưa bền vững phù hợp với điều kiện đô thị miền núi. Cách tiếp cận này cho phép tích hợp kinh nghiệm quốc tế với điều kiện thực tiễn tại địa phương, từ đó đề xuất các giải pháp có tính khả thi cao.

2.1. Tổng hợp và phân tích tài liệu

Phương pháp tổng hợp tài liệu được sử dụng nhằm xây dựng nền tảng lý thuyết cho nghiên cứu. Tài liệu khoa học được thu thập từ các cơ sở dữ liệu quốc tế như Web of Science, Scopus và Google Scholar trong giai đoạn từ năm 2015 đến 2025. Các nghiên cứu được lựa chọn tập trung vào mô hình quản lý nước mưa bền vững, bao gồm Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Low Impact Development (LID), Water Sensitive Urban Design (WSUD) và Sponge City [12].

Các tài liệu được phân loại theo nhiều tiêu chí khác nhau nhằm phục vụ phân tích, bao gồm: Loại giải pháp (phân tán hoặc tập trung), quy mô áp dụng (lưu vực, khu đô thị hoặc công trình đơn lẻ), điều kiện địa hình (đồng bằng, ven biển, miền núi) và phương pháp đánh giá (mô hình thủy văn, quan trắc thực tế hoặc phân tích định tính). Việc phân loại này cho phép nhận diện các xu hướng chính trong nghiên cứu và ứng dụng, cũng như đánh giá khả năng chuyển giao các giải pháp vào bối cảnh đô thị miền núi.

Bên cạnh đó, các chỉ tiêu đánh giá hiệu quả của các giải pháp thoát nước bền vững cũng được tổng hợp và so sánh. Các chỉ tiêu chính bao gồm: Tỷ lệ giảm tổng lượng dòng chảy, mức độ giảm lưu lượng đỉnh, khả năng kéo dài thời gian tập trung dòng chảy và cải thiện chất lượng nước. Việc tổng hợp các chỉ tiêu này giúp đánh giá một cách toàn diện hiệu quả của các giải pháp trong các điều kiện khác nhau.

2.2. Phân tích so sánh các trường hợp điển hình

Phương pháp phân tích so sánh được sử dụng nhằm rút ra bài học kinh nghiệm từ các trường hợp ứng dụng thực tế trên thế giới. Trường hợp điển hình được lựa

chọn bao gồm các đô thị có điều kiện địa hình và khí hậu khác nhau, trong đó có một số đô thị miền núi hoặc có địa hình phức tạp như Quito (Ecuador) và Xining (Trung Quốc), cũng như các đô thị có mức độ phát triển cao như Shenzhen, Hong Kong và Tokyo [8], [14], [19], [20].

Đối với mỗi trường hợp, nghiên cứu phân tích các yếu tố chính bao gồm: loại giải pháp được áp dụng, quy mô triển khai, cách thức tích hợp với hệ thống hạ tầng hiện có và hiệu quả đạt được. Thông qua so sánh các trường hợp này, nghiên cứu làm rõ vai trò của các yếu tố như vị trí bố trí, quy mô giải pháp và điều kiện địa hình đối với hiệu quả kiểm soát ngập lụt.

Phân tích so sánh cũng cho thấy rằng không tồn tại một giải pháp duy nhất phù hợp cho mọi điều kiện, mà cần có sự kết hợp linh hoạt giữa các giải pháp khác nhau. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các đô thị miền núi, nơi điều kiện địa hình và thủy văn có sự biến động lớn trong không gian.

2.3. Phân tích trường hợp nghiên cứu đô thị Cao Bằng

Đô thị Cao Bằng được lựa chọn làm trường hợp nghiên cứu nhằm minh họa cho các đặc điểm điển hình của đô thị miền núi tại Việt Nam. Dữ liệu được thu thập từ các báo cáo khí tượng thủy văn, tài liệu quy hoạch đô thị, các báo cáo hiện trạng và thông tin về các sự kiện ngập lụt trong những năm gần đây [4], [17].

Phân tích tập trung vào các yếu tố chính ảnh hưởng đến ngập lụt đô thị, bao gồm: Đặc điểm địa hình (độ dốc, cấu trúc thung lũng), mạng lưới sông suối, hệ thống thoát nước hiện có và các khu vực có nguy cơ ngập cao. Đồng thời, nghiên cứu xem xét sự tương tác giữa các nguồn dòng chảy khác nhau, bao gồm dòng chảy từ mưa tại chỗ, dòng chảy từ sườn dốc và lũ từ thượng lưu.

Việc phân tích trường hợp Cao Bằng cho phép nhận diện các cơ chế gây ngập lụt đặc thù của đô thị miền núi, từ đó làm cơ sở để xây dựng các giải pháp phù hợp. Đặc biệt, nghiên cứu nhấn mạnh sự cần thiết của cách tiếp cận theo lưu vực, trong đó các giải pháp không chỉ được áp dụng trong phạm vi đô thị mà còn bao gồm các khu vực thượng lưu và sườn dốc.

2.4. Xây dựng khung giải pháp

Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, phân tích so sánh và phân tích trường hợp nghiên cứu, nghiên cứu tiến hành xây dựng một khung quản lý thoát nước mưa bền vững cho đô thị miền núi. Khung này được phát triển theo hướng tích hợp nhiều cấp độ không gian và nhiều nhóm giải pháp khác nhau.

Cụ thể, khung đề xuất bao gồm ba tầng can thiệp chính tương ứng với các khu vực thượng lưu, sườn dốc và thung lũng đô thị. Mỗi tầng được gắn với các nhóm giải pháp cụ thể, bao gồm các giải pháp kỹ thuật, quy hoạch và quản lý. Cách tiếp cận này cho phép xem xét đồng thời các yếu tố tự nhiên và nhân sinh, cũng như đảm bảo tính liên kết giữa các khu vực trong toàn lưu vực.

Khung giải pháp được xây dựng với mục tiêu không chỉ giảm thiểu ngập lụt mà còn hướng tới phát triển đô thị bền vững, thông qua việc tích hợp các chức năng sinh thái, cải thiện chất lượng môi trường và nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiệu quả của các giải pháp SUDS/LID trong điều kiện địa hình khác nhau

Các nghiên cứu về hệ thống thoát nước bền vững cho thấy các giải pháp SUDS và LID có khả năng giảm đáng kể dòng chảy bề mặt và lưu lượng đỉnh, từ đó góp phần giảm nguy cơ ngập lụt đô thị. Cơ chế chính của các giải pháp này là tăng cường khả năng thấm, trữ và làm chậm dòng chảy thông qua các biện pháp phân tán như mái xanh, bãi thấm, hồ điều hòa và hệ thống thoát nước sinh học [7], [12].

Trong điều kiện mưa vừa, các giải pháp LID thường cho hiệu quả cao do có thể hấp thụ và lưu trữ phần lớn lượng nước mưa ngay tại chỗ. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng việc áp dụng các giải pháp này có thể làm giảm đáng kể tổng lượng dòng chảy và kéo dài thời gian tập trung dòng chảy, từ đó làm giảm áp lực lên hệ thống thoát nước truyền thống. Tuy nhiên, hiệu quả của các giải pháp này giảm dần khi cường độ mưa tăng cao, đặc biệt trong các trận mưa cực đoan.

Một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả của SUDS/LID là điều kiện địa hình. Trong các khu vực địa hình bằng phẳng, nước mưa có xu hướng phân bố đều và thời gian lưu nước dài hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho các quá trình thấm và trữ nước.

Ngược lại, trong các khu vực địa hình dốc, nước mưa nhanh chóng tập trung và chảy tràn, làm giảm thời gian tương tác giữa nước và bề mặt thấm, từ đó làm giảm hiệu quả của các giải pháp phân tán.

Các nghiên cứu tại các lưu vực có địa hình phức tạp cho thấy rằng hiệu quả của LID không chỉ phụ thuộc vào diện tích áp dụng mà còn phụ thuộc mạnh vào vị trí bố trí. Việc đặt các công trình LID tại các vị trí chiến lược như khu vực thượng lưu hoặc các điểm tập trung dòng chảy có thể mang lại hiệu quả cao hơn so với việc phân bố đồng đều trên toàn bộ khu vực [20]. Điều này cho thấy rằng việc tối ưu hóa vị trí bố trí là yếu tố quan trọng trong thiết kế hệ thống thoát nước bền vững.

Ngoài ra, các nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng SUDS/LID cần được kết hợp với các giải pháp quy mô lớn hơn để đạt hiệu quả tối ưu trong các điều kiện mưa cực đoan. Các giải pháp này có thể bao gồm hồ điều tiết lớn, hệ thống kênh dẫn hoặc các công trình ngầm có khả năng lưu trữ nước tạm thời. Sự kết hợp giữa các giải pháp phân tán và tập trung cho phép tăng cường khả năng chống chịu của hệ thống thoát nước đô thị trong nhiều kịch bản khác nhau.

3.2. Kinh nghiệm quốc tế về quản lý thoát nước bền vững

Các kinh nghiệm quốc tế cung cấp những minh chứng quan trọng về hiệu quả và hạn chế của các giải pháp quản lý nước mưa bền vững trong các điều kiện khác nhau. Những nghiên cứu này không chỉ giúp đánh giá hiệu quả của các giải pháp cụ thể mà còn cung cấp cơ sở để xây dựng các khung giải pháp tích hợp.

Tại Quito (Ecuador), nghiên cứu cho thấy việc áp dụng các giải pháp kết hợp giữa hệ thống thoát nước truyền thống và các biện pháp bền vững có thể giúp giảm đáng kể lượng dòng chảy, với mức giảm lên tới khoảng 90% trong một số kịch bản [14]. Kết quả này cho thấy tiềm năng lớn của việc tích hợp các giải pháp khác nhau trong quản lý nước mưa.

Tại Shenzhen (Trung Quốc), các nghiên cứu chỉ ra rằng vị trí bố trí các giải pháp LID có ảnh hưởng lớn hơn so với tổng diện tích áp dụng [20]. Việc tập trung các giải pháp tại các khu vực có vai trò quan trọng trong lưu vực, chẳng hạn như các điểm tập trung dòng chảy, có thể mang lại hiệu quả cao hơn so với việc phân bố đồng đều. Điều này

đặc biệt quan trọng đối với các đô thị có địa hình phức tạp.

Trong khi đó, tại Xining (Trung Quốc), cách tiếp cận quản lý theo lưu vực được nhấn mạnh, các giải pháp không chỉ được triển khai trong phạm vi đô thị mà còn mở rộng ra khu vực thượng lưu [19]. Cách tiếp cận này cho phép kiểm soát dòng chảy ngay từ nguồn, từ đó giảm áp lực cho khu vực đô thị phía hạ lưu.

Các nghiên cứu tại Palembang (Indonesia) cho thấy rằng ngay cả với diện tích áp dụng tương đối nhỏ, giải pháp LID vẫn có thể mang lại hiệu quả đáng kể nếu được bố trí hợp lý [1]. Điều này cho thấy hiệu quả của các giải pháp không chỉ phụ thuộc vào quy mô mà còn phụ thuộc vào thiết kế và vị trí.

Ngoài các giải pháp phân tán, nhiều đô thị phát triển đã áp dụng các công trình quy mô lớn để kiểm soát ngập lụt. Ví dụ, tại Tokyo, hệ thống công trình ngầm quy mô lớn được xây dựng để điều tiết dòng chảy và giảm nguy cơ ngập lụt trong các trận mưa cực đoan [10]. Tại Hong Kong, các công trình lưu trữ nước ngầm cũng được triển khai nhằm tăng cường khả năng chống chịu của hệ thống thoát nước đô thị [8].

Các kinh nghiệm này cho thấy: Không tồn tại một giải pháp duy nhất có thể áp dụng cho mọi điều kiện. Thay vào đó, cần có sự kết hợp linh hoạt giữa các giải pháp khác nhau, từ quy mô nhỏ đến quy mô lớn, và từ cấp công trình đến cấp lưu vực.

3.3. Bài học rút ra cho đô thị miền núi

Từ các phân tích về hiệu quả của SUDS/LID và các kinh nghiệm quốc tế, có thể rút ra một số bài học quan trọng đối với việc quản lý thoát nước mưa tại các đô thị miền núi.

Thứ nhất, kiểm soát dòng chảy tại khu vực thượng lưu có vai trò đặc biệt quan trọng. Trong các lưu vực miền núi, nước mưa từ thượng lưu có thể nhanh chóng tập trung và gây ngập lụt tại khu vực đô thị. Do đó, việc áp dụng các giải pháp giữ nước và làm chậm dòng chảy tại khu vực này có thể giúp giảm đáng kể áp lực cho khu vực hạ lưu.

Thứ hai, hiệu quả của các giải pháp LID phụ thuộc mạnh vào điều kiện mưa và địa hình. Trong các trận mưa vừa, các giải pháp phân tán có thể phát huy hiệu quả tốt. Tuy nhiên, trong các trận mưa lớn, cần kết hợp với các giải pháp quy mô lớn hơn để đảm bảo an toàn cho hệ thống.

Thứ ba, vị trí bố trí các giải pháp có ý nghĩa quyết định đối với hiệu quả tổng thể. Việc lựa chọn các vị trí chiến lược, chẳng hạn như các điểm tập trung dòng chảy hoặc các khu vực có nguy cơ ngập cao, có thể giúp tối ưu hóa hiệu quả của hệ thống.

Thứ tư, cần có cách tiếp cận tích hợp giữa quản lý lưu vực và quản lý đô thị. Trong các đô thị miền núi, các yếu tố tự nhiên và nhân sinh có mối liên hệ chặt chẽ, do đó các giải pháp cần được thiết kế theo hướng tổng thể, thay vì chỉ tập trung vào từng khu vực riêng lẻ.

Thứ năm, các giải pháp thoát nước bền vững cần được tích hợp với mục tiêu phát triển đô thị bền vững, bao gồm cải thiện môi trường, tăng cường không gian xanh và nâng cao chất lượng sống của người dân. Điều này giúp tăng tính chấp nhận của cộng đồng và đảm bảo tính bền vững lâu dài của các giải pháp.

3.4. Đặc điểm và cơ chế ngập lụt tại đô thị Cao Bằng

Cao Bằng có đô thị miền núi điển hình với cấu trúc không gian phát triển dọc theo các thung lũng và hành lang sông suối. Địa hình khu vực có độ dốc lớn, bị chia cắt mạnh bởi các dãy núi và hệ thống sông suối ngấn, dốc. Đặc điểm này làm cho quá trình tập trung dòng chảy diễn ra nhanh, đặc biệt trong các trận mưa lớn, dẫn đến nguy cơ hình thành lũ cục bộ trong thời gian ngắn.

Trong những năm gần đây, đô thị Cao Bằng đã ghi nhận nhiều sự kiện ngập lụt nghiêm trọng, đặc biệt trong các đợt mưa lớn kéo dài kết hợp với lũ sông. Các khu vực trung tâm đô thị, nơi tập trung dân cư và các hoạt động kinh tế, thường xuyên bị ngập với mức độ ngày càng gia tăng. Tình trạng này phản ánh rõ những hạn chế của hệ thống thoát nước hiện tại trong việc ứng phó với các điều kiện khí hậu cực đoan.



Hình 1. Tháng 10/2025, mực nước sông Bằng Giang vượt đỉnh lũ lịch sử năm 1986 (Ảnh: Hà Cương, Vietnamnet)



Hình 2. Nước ngập sân vận động TP. Cao Bằng (phường Thục Phán) (Ảnh: Hà Cương, Vietnamnet)

Ngập lụt tại Cao Bằng không phải là kết quả của một yếu tố đơn lẻ mà là sự tương tác phức tạp giữa nhiều nguồn dòng chảy khác nhau. Có thể phân tích ba thành phần chính góp phần hình thành ngập lụt đô thị tại khu vực này.

Thứ nhất, dòng chảy do mưa tại chỗ trong khu vực đô thị. Khi mưa lớn xảy ra, nước mưa không thể thấm xuống đất do diện tích bề mặt không thấm tăng cao, dẫn đến hình thành dòng chảy bề mặt và gây quá tải hệ thống thoát nước. Đây là nguyên nhân phổ biến trong nhiều đô thị, nhưng tại Cao Bằng, yếu tố này chỉ là một phần của vấn đề.

Thứ hai, dòng chảy từ sườn dốc xung quanh đô thị. Do đặc điểm địa hình, nước mưa từ các khu vực đồi núi xung quanh nhanh chóng chảy xuống khu vực thấp hơn, mang theo lượng nước lớn trong thời gian ngắn. Dòng chảy này thường có vận tốc cao và có thể mang theo đất đá, làm gia tăng nguy cơ tắc nghẽn hệ thống thoát nước.

Thứ ba, lũ từ các sông chính chảy qua khu vực đô thị. Khi mực nước sông dâng cao, khả năng tiêu thoát nước từ hệ thống thoát nước đô thị ra sông bị hạn chế, thậm chí xảy ra hiện tượng nước chảy ngược vào hệ thống. Sự kết hợp giữa mưa lớn và lũ sông làm gia tăng đáng kể mức độ và thời gian ngập lụt.

Ba thành phần này tương tác với nhau tạo thành một cơ chế ngập lụt phức hợp, trong đó các yếu tố địa hình, thủy văn và cấu trúc đô thị có mối liên hệ chặt chẽ. Điều này cho thấy rằng việc giải quyết vấn đề ngập lụt tại Cao Bằng không thể chỉ dựa vào việc nâng cấp hệ thống thoát nước đô thị mà cần có cách tiếp cận tổng thể ở quy mô lưu vực.

3.5. Đề xuất mô hình “đô thị bọt biển miền núi”

Trên cơ sở phân tích các đặc điểm của đô thị miền núi và tổng hợp kinh nghiệm quốc tế, nghiên cứu đề xuất mô hình “đô thị bọt biển miền núi” (Mountain Sponge City) nhằm quản lý nước mưa theo hướng bền vững và thích ứng với điều kiện địa phương. Mô hình được xây dựng theo cách tiếp cận không gian tích hợp, trong đó toàn bộ lưu vực đô thị được xem xét như một hệ thống liên kết bao gồm ba tầng chính là thượng lưu, sườn dốc và thung lũng đô thị. Cách tiếp cận này cho phép kiểm soát dòng chảy ngay từ nguồn, giảm dần cường độ và lưu lượng dòng chảy trước khi nước tập trung vào khu vực đô thị trung tâm, qua đó góp phần giảm nguy cơ ngập lụt.

Tầng thượng lưu bao gồm các khu vực đồi núi và lưu vực phía trên đô thị, nơi đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành dòng chảy ban đầu. Tại đây, các giải pháp ưu tiên là tăng cường khả năng giữ nước và làm chậm dòng chảy thông qua bảo vệ thảm phủ rừng, xây dựng các hồ điều tiết quy mô nhỏ và áp dụng các biện pháp sinh thái nhằm nâng cao khả năng thấm. Việc kiểm soát dòng chảy tại khu vực này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng vì có thể giảm đáng kể lượng nước chảy xuống khu vực đô thị trong các trận mưa lớn.

Tầng sườn dốc là khu vực chuyển tiếp giữa vùng đồi núi và khu đô thị, nơi dòng chảy có xu hướng tăng tốc và tập trung nhanh. Tại khu vực này, các giải pháp LID được đề xuất theo dạng bậc thang nhằm tăng thời gian lưu nước và giảm vận tốc dòng chảy. Các biện pháp như bãi thấm, rãnh sinh học và các công trình trữ nước nhỏ có thể được bố trí dọc theo sườn dốc để phân tán dòng chảy và giảm áp lực cho khu vực phía dưới. Việc tổ chức các giải pháp theo dạng phân tầng giúp tối ưu hóa hiệu quả trong điều kiện địa hình dốc.

Tầng thung lũng đô thị bao gồm khu vực trung tâm, nơi tập trung dân cư và các hoạt động kinh tế. Tại đây, cần kết hợp giữa các giải pháp hạ tầng xanh, hạ tầng xám và các giải pháp thông minh

nhằm nâng cao khả năng quản lý nước mưa. Các giải pháp có thể bao gồm hồ điều hòa, công viên ngập nước, hệ thống cống cải tiến và các hệ thống giám sát, điều khiển dòng chảy. Việc kết hợp các loại hạ tầng khác nhau cho phép tăng cường khả năng thích ứng của hệ thống trước các điều kiện mưa khác nhau.

Mô hình ba tầng quản lý thoát nước được đề xuất như thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Đề xuất mô hình ba tầng can thiệp để quản lý thoát nước đô thị miền núi

Bên cạnh cấu trúc không gian, nghiên cứu cũng đề xuất sáu nhóm giải pháp tích hợp nhằm đảm bảo tính toàn diện của hệ thống. Các nhóm giải pháp này bao gồm quản lý thượng lưu, áp dụng các giải pháp LID phân tán, phát triển hạ tầng blue-green-grey-smart, bảo vệ hành lang sông suối, tích hợp yếu tố rủi ro vào quy hoạch đô thị và xây dựng cơ chế quản lý – tài chính phù hợp. Các giải pháp này không tồn tại độc lập mà cần được triển khai đồng bộ và có sự liên kết chặt chẽ giữa các cấp độ không gian khác nhau.

Trong đó, quản lý thượng lưu đóng vai trò nền tảng nhằm kiểm soát nguồn phát sinh dòng chảy; các giải pháp LID giúp phân tán và làm chậm dòng chảy trong khu vực sườn dốc; hạ tầng tích hợp blue-green-grey-smart hỗ trợ điều tiết và kiểm soát dòng chảy trong khu vực đô thị; bảo vệ hành lang sông giúp duy trì khả năng thoát lũ tự nhiên; quy hoạch thích ứng rủi ro góp phần hạn chế phát triển tại các khu vực dễ bị tổn thương; và cơ chế quản lý – tài chính đảm bảo tính khả thi và bền vững trong quá trình triển khai.

Khung sáu nhóm giải pháp được thể hiện trong Hình 4.



Hình 4. Đề xuất sáu nhóm giải pháp quản lý tích hợp cho thoát nước bền vững đô thị miền núi

3.6. Hạn chế của nghiên cứu

Mặc dù nghiên cứu đã đề xuất một khung quản lý thoát nước mưa bền vững cho đô thị miền núi dựa trên tổng hợp lý thuyết và phân tích trường hợp điển hình, vẫn tồn tại một số hạn chế cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Trước hết, nghiên cứu chủ yếu sử dụng phương pháp tổng hợp tài liệu và phân tích định tính, do đó chưa lượng hóa được đầy đủ hiệu quả của các giải pháp đề xuất trong các kịch bản mưa khác nhau. Việc thiếu các mô hình mô phỏng thủy văn – thủy lực, chẳng hạn như SWMM hoặc các mô hình kết hợp 1D–2D, khiến cho khả năng đánh giá chi tiết về mức độ giảm ngập, lưu lượng đỉnh và thời gian ngập còn hạn chế.

Bên cạnh đó, dữ liệu đầu vào phục vụ phân tích trường hợp Cao Bằng còn hạn chế, đặc biệt là dữ liệu quan trắc dài hạn về mưa, dòng chảy và vận hành hệ thống thoát nước. Điều này ảnh hưởng đến khả năng xây dựng các kịch bản đánh giá chính xác và toàn diện. Ngoài ra, nghiên cứu chưa xem xét đầy đủ các yếu tố kinh tế – xã hội như chi phí đầu tư, chi phí vận hành, khả năng chấp nhận của cộng đồng và cơ chế quản lý liên ngành, trong khi đây là những yếu tố có vai trò quyết định đến tính khả thi của các giải pháp trong thực tế.

Cuối cùng, khung giải pháp đề xuất mang tính định hướng tổng thể và cần được kiểm chứng thông qua các nghiên cứu cụ thể hơn ở quy mô chi tiết, bao

gồm thiết kế kỹ thuật, mô phỏng định lượng và đánh giá hiệu quả theo từng khu vực chức năng trong đô thị. Do đó, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc tích hợp mô hình hóa, dữ liệu thực đo và phân tích chi phí – lợi ích nhằm hoàn thiện và nâng cao khả năng ứng dụng của mô hình “đô thị bọt biển miền núi” trong thực tiễn.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phân tích các thách thức trong quản lý thoát nước mưa tại các đô thị miền núi trong bối cảnh biến đổi khí hậu, với trọng tâm là trường hợp đô thị Cao Bằng. Kết quả cho thấy rằng ngập lụt đô thị tại khu vực này không chỉ xuất phát từ lượng mưa tại chỗ mà còn là hệ quả của sự tương tác phức tạp giữa dòng chảy sườn dốc, lũ sông và cấu trúc không gian đô thị. Đặc điểm địa hình dốc, lưu vực nhỏ và khả năng tập trung dòng chảy nhanh khiến các giải pháp thoát nước truyền thống khó đáp ứng hiệu quả trong điều kiện mưa cực đoan ngày càng gia tăng.

Tên cơ sở tổng hợp các mô hình quản lý nước mưa bền vững như SUDS, LID và Sponge City, nghiên cứu đã chỉ ra rằng hiệu quả của các giải pháp này phụ thuộc không chỉ vào quy mô mà còn vào vị trí bố trí và điều kiện địa hình. Các kinh nghiệm quốc tế cho thấy việc kiểm soát dòng chảy từ thượng lưu, kết hợp với các giải pháp phân tán và hạ tầng quy mô lớn, có thể nâng cao đáng kể khả năng chống chịu của hệ thống thoát nước đô thị.

Từ đó, nghiên cứu đề xuất mô hình “đô thị bọt biển miền núi” với cách tiếp cận tích hợp theo ba tầng không gian gồm thượng lưu, sườn dốc và thung lũng đô thị, kết hợp với sáu nhóm giải pháp liên kết chặt chẽ. Cách tiếp cận này cho phép kiểm soát dòng chảy một cách liên tục trong toàn bộ lưu vực, thay vì xử lý cục bộ tại từng khu vực riêng lẻ, qua đó góp phần giảm thiểu nguy cơ ngập lụt và nâng cao hiệu quả quản lý nước mưa.

Mô hình đề xuất không chỉ hướng tới mục tiêu giảm ngập lụt mà còn đóng góp vào phát triển đô thị bền vững thông qua việc tích hợp các yếu tố sinh thái, cải thiện môi trường và nâng cao chất lượng

sống. Tuy nhiên, để khẳng định hiệu quả của mô hình, cần có các nghiên cứu tiếp theo áp dụng các công cụ mô phỏng định lượng và phân tích kinh tế – kỹ thuật nhằm đánh giá chi tiết hơn trong các điều kiện cụ thể.

Nhìn chung, nghiên cứu cung cấp một cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc phát triển các giải pháp thoát nước mưa bền vững tại các đô thị miền núi ở Việt Nam, đồng thời mở ra hướng tiếp cận mới trong quy hoạch và quản lý hạ tầng thích ứng với biến đổi khí hậu.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Amin, J. Sujono, and R. Triatmadja, “Urban Flood Mitigation by Implementing LIDs (Case Study: Bendung Watershed in Palembang City),” *Journal of Water Management Modeling*, 2024. doi: 10.14796/JWMM.C526.
- [2]. Báo Dân tộc và Miền núi, “Thông tin về vận hành xả lũ thủy điện trên sông Bằng Giang,” 2025.
- [3]. Báo Lao Động, “Đập dâng nước thành phố Cao Bằng vận hành tích nước,” 2025.
- [4]. UBND tỉnh Cao Bằng, “Điều kiện tự nhiên và phát triển đô thị,” 2024.
- [5]. M. Dumont, C. Gomez, G. Arnaud-Fassetta, C. Lissak, and V. Viel, “The Disaster Protection System of Mountainous Rivers in Japan: The Example of the Akatani Watershed’s Reconstruction,” *Sustainability*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/su152115331.
- [6]. European Environment Agency, “Water Sensitive Urban and Building Design,” *Climate-ADAPT*, 2025.
- [7]. T. D. Fletcher et al., “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage,” *Urban Water Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 525–542, 2015. doi: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- [8]. Hong Kong Environment and Ecology Bureau, “Happy Valley Underground Stormwater Storage Scheme Fully Commissioned,” 2023.
- [9]. IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[10]. Japan Up Close, “G-Cans Project: Tokyo’s Massive Underground Flood Control System,” 2022.

[11]. S. Miremad, G. Concilio, and A. Azzellino, “Sustainable Urban Drainage Systems for Reducing Flood Risk at the Seveso River Basin,” *Athens Journal of Technology and Engineering*, vol. 12, 2025.

[12]. A. P. Monachese et al., “Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus,” *Water*, vol. 17, no. 1, 2025, doi: 10.3390/w17010076.

[13]. N. V. Anh, “Giải pháp bảo vệ môi trường nước và phát triển hạ tầng xanh cho thành phố Hà Nội,” *Tạp chí Xây dựng*, no. 4, pp. 14–25, 2025.

[14]. D. Paredes, “Hydraulic Analysis of Urban Drainage Systems with Conventional Solutions and Sustainable Technologies: Case Study in Quito, Ecuador,” *Journal of Water Management Modeling*, vol. 26, 2018, doi: 10.14796/JWMM.C440.

[15]. Y. Qi et al., “Exploring the Development of the Sponge City Program (SCP): The Case of Gui’an New District, Southwest China,” *Frontiers in Water*, vol. 3, 2021, doi: 10.3389/frwa.2021.676965.

[16]. X. J. Qiao, K. H. Liao, and T. B. Randrup, “Sustainable Stormwater Management: A Qualitative Case Study of the Sponge Cities Initiative in China,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 53, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101963.

[17]. VietnamNet, “Toàn cảnh trung tâm Cao Bằng chìm trong nước lũ lớn nhất 40 năm qua,” 2025.

[18]. Wikipedia, “Sông Bằng Giang và hệ thống sông suối Cao Bằng,” 2024.

[19]. R. Wu, Y. Yang, J. He, and J. Zhu, “A Core Framework of ‘Mountain Management – Water Management – Moist City’ for Sponge City Planning,” *Frontiers in Public Health*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fpubh.2022.994137.

[20]. J. Wu, R. Yang, and J. Song, “Effectiveness of Low-Impact Development for Urban Inundation Risk Mitigation under Different Scenarios: A Case Study in Shenzhen, China,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 9, pp. 2525–2536, 2018. doi: 10.5194/nhess-18-2525-2018.