VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Thiết kế vì phát triển bền vững trong môi trường xây dựng: Khái niệm, đặc điểm và phạm vi tiếp cận

Ngô Văn Yên[1], Nguyễn Thế Quân[1*]

[1] Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Thiết kế vì phát triển bền vững
Môi trường xây dựng
Tư duy vòng đời
Quản lý thông tin vòng đời
Hệ thống xã hội – kỹ thuật

TÓM TẮT

Thiết kế vì phát triển bền vững (Design for Sustainability – DfS) ngày càng được quan tâm trong bối cảnh ngành xây dựng đối mặt với các thách thức liên quan đến biến đổi khí hậu, phát thải carbon, suy giảm tài nguyên và yêu cầu chuyển đổi bền vững của môi trường xây dựng. DfS được sử dụng ngày càng rộng rãi nhưng vẫn tồn tại tình trạng phân mảnh khái niệm và chồng lấn học thuật, đặc biệt khi được chuyển dịch từ lĩnh vực thiết kế sản phẩm sang môi trường xây dựng. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm làm rõ khái niệm, đặc điểm và logic tiếp cận của DfS trong môi trường xây dựng thông qua phương pháp tổng quan tài liệu tích hợp. Nghiên cứu tổng hợp, phân tích các công bố quốc tế liên quan đến DfS nhằm nhận diện sự phát triển khái niệm theo thời gian, các logic tiếp cận chủ đạo và những đặc điểm đặc thù của môi trường xây dựng ảnh hưởng đến DfS. Kết quả cho thấy DfS đã mở rộng từ các tiếp cận giảm tác động môi trường ở cấp độ sản phẩm sang các tiếp cận tích hợp, vòng đời, đa bên và định hướng hệ thống. Nghiên cứu đồng thời chỉ ra rằng DfS trong môi trường xây dựng cần được diễn giải và triển khai khác với DfS định hướng sản phẩm do các đặc điểm về tính dự án, vòng đời, cấu trúc đa bên, bối cảnh và dòng thông tin. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất hiểu DfS trong môi trường xây dựng là cách tiếp cận ra quyết định tích hợp, trong đó các mục tiêu môi trường, xã hội, kinh tế và khả năng chống chịu được chuyển hóa thành yêu cầu và lựa chọn thiết kế đối với công trình và hạ tầng trong phạm vi vòng đời xác định, thông qua sự phối hợp giữa các bên liên quan và việc sử dụng thông tin phù hợp với bối cảnh dự án.

KEYWORDS

Design for Sustainability
Built environment
Lifecycle thinking
Lifecycle information management
Socio-technical systems

ABSTRACT

Design for Sustainability (DfS) has received increasing attention as the construction industry faces growing pressures related to climate change, carbon reduction, resource depletion, and the sustainable transformation of the built environment. However, despite its expanding application, the concept of DfS remains academically fragmented, particularly when transferred from product design and industrial manufacturing to the built environment. This study aims to clarify the concept, characteristics, and major approaches of DfS in the built environment through an Integrative Literature Review. The study synthesizes and analyses international literature to identify the evolution of DfS, dominant sustainability approaches, and the distinctive characteristics of the built environment influencing DfS implementation. The findings show that DfS has evolved from product-oriented environmental optimisation towards integrated, lifecycle-oriented, multi-stakeholder, and system-oriented approaches. The study further demonstrates that DfS in the built environment requires a context-specific interpretation because of the project-based nature of construction, long asset lifecycles, fragmented information and complex stakeholder structures. Based on these findings, the study proposes an interpretation of DfS in the built environment as an integrated approach that embeds sustainability objectives into design decision-making and project delivery processes throughout the building lifecycle.

1. Mở đầu

Phát triển bền vững đã trở thành một định hướng trung tâm của ngành xây dựng trong bối cảnh biến đổi khí hậu, suy giảm tài nguyên, đô thị hóa nhanh và áp lực giảm phát thải carbon ngày càng gia tăng. Môi trường xây dựng hiện chiếm khoảng 37 % lượng phát thải CO_2 liên quan đến năng lượng trên toàn cầu, đồng thời tiêu thụ một tỷ trọng lớn năng lượng, vật liệu và tài nguyên tự nhiên [1]. Tác động của ngành không chỉ giới hạn ở phát thải và sử dụng tài nguyên mà còn liên quan đến sức khỏe con người, chất lượng môi trường sống, công bằng xã hội và khả năng chống chịu trước rủi ro khí hậu và thiên tai [2]. Vì vậy, tính bền vững không còn được xem là một yêu cầu bổ sung mà đã trở thành mục tiêu chiến lược trong quá trình phát triển công trình và hạ tầng.

*Liên hệ tác giả: quannt@huce.edu.vn
Nhận ngày 29/05/2026, sửa xong ngày 09/09/2026, chấp nhận đăng ngày 10/09/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1381

Thiết kế là một trong những điểm can thiệp quan trọng nhất để hiện thực hóa mục tiêu này. Những quyết định được đưa ra ở giai đoạn đầu về hình thái công trình, vật liệu, kết cấu, hệ thống kỹ thuật và phương án vận hành có thể ảnh hưởng lâu dài đến tiêu thụ năng lượng, phát thải vòng đời, chi phí vận hành, khả năng thích ứng và tái sử dụng công trình [3, 4]. Tuy nhiên, ở giai đoạn thiết kế ý tưởng, thông tin thường chưa đầy đủ, trong khi khả năng tác động đến kết quả bền vững lại cao. Điều này đặt ra nhu cầu tích hợp các mục tiêu bền vững vào chính quá trình hình thành, đánh giá và lựa chọn phương án, thay vì chỉ đánh giá tác động sau khi các quyết định thiết kế cơ bản đã được xác lập [5, 6].

Trong bối cảnh đó, Thiết kế vì phát triển bền vững (Design for Sustainability – DfS) được phát triển nhằm tích hợp các mục tiêu bền vững vào hoạt động thiết kế. Khái niệm này kế thừa những tiếp cận trước đó như thiết kế xanh, thiết kế sinh thái và Thiết kế vì môi trường, nhưng dần mở rộng từ giảm tác động môi trường ở cấp độ sản phẩm sang tư duy vòng đời, tích hợp các mục tiêu môi trường, xã hội và kinh tế, cũng như đổi mới ở cấp độ hệ thống [7-9]. Sự phát triển này phản ánh việc DfS không còn chỉ được nhìn nhận như một tập hợp giải pháp kỹ thuật để tạo ra sản phẩm "ít gây hại hơn", mà ngày càng được tiếp cận như một định hướng rộng hơn đối với quá trình ra quyết định và chuyển đổi bền vững.

Mặc dù vậy, nội hàm của DfS vẫn chưa hoàn toàn thống nhất. Các thuật ngữ thiết kế xanh, thiết kế sinh thái, Thiết kế vì môi trường, thiết kế bền vững và DfS đôi khi được sử dụng thay thế hoặc đan xen, mặc dù chúng khác nhau về đối tượng, mục tiêu và phạm vi vòng đời [8, 10]. Một số nghiên cứu tập trung chủ yếu vào hiệu quả sinh thái và giảm tác động môi trường, trong khi những nghiên cứu khác mở rộng DfS sang tính bền vững xã hội, kinh tế tuần hoàn, hệ thống sản phẩm–dịch vụ, đổi mới hệ thống và chuyển đổi xã hội–kỹ thuật [11, 12]. Sự đa dạng này cho thấy DfS là một lĩnh vực đang phát triển, nhưng đồng thời tạo ra sự phân mảnh khái niệm và khó khăn trong việc xác định ranh giới của nó khi áp dụng trong các bối cảnh ngành khác nhau.

Vấn đề trở nên rõ nét hơn khi DfS được chuyển từ thiết kế sản phẩm và chế tạo công nghiệp sang môi trường xây dựng. Phần lớn nền tảng DfS ban đầu được phát triển trong các lĩnh vực có sản phẩm tương đối tiêu chuẩn hóa, quy trình có khả năng lặp lại và mức độ kiểm soát tương đối cao. Ngược lại, công trình và hạ tầng thường được phát triển dưới hình thức dự án đơn chiếc, có vòng đời dài, chịu nhiều nguồn bất định và liên quan đến nhiều chủ thể có mục tiêu khác nhau [4, 13]. Một số chiến lược Design for X (DfX), chẳng hạn thiết kế để tháo dỡ, bảo trì, thích ứng hoặc giảm tác động môi trường, có thể được sử dụng như những phương thức triển khai các mục tiêu của DfS. Tuy nhiên, nghiên cứu về việc áp dụng các tiếp cận DfX trong xây dựng vẫn còn hạn chế so với lĩnh vực chế tạo; đồng thời, các phương pháp đánh giá bền vững trong dự án hạ tầng vẫn thiếu sự tích hợp có cấu trúc, đặc biệt ở các giai đoạn thiết kế và thi công [4, 6].

Mặc dù các nghiên cứu trước về môi trường xây dựng đã thảo luận rộng rãi các khái niệm như công trình xanh, thiết kế sinh thái, đánh giá vòng đời (LCA), kinh tế tuần hoàn và thiết kế chống chịu, những hướng tiếp cận này vẫn tồn tại sự phân mảnh nghiêm trọng và thường phát triển theo từng vấn đề kỹ thuật hoặc công cụ riêng biệt [5, 14]. Thay vì được tích hợp trong một khung khổ thống nhất hướng hệ thống, các nỗ lực bền vững thường bị giới hạn trong những "silo" chuyên môn, nơi các tiêu chuẩn định lượng về hiệu suất kỹ thuật thường lấn át các giá trị định tính về xã hội, văn hóa và bối cảnh địa phương [5, 15]. Hơn nữa, việc thiếu hụt một phương pháp luận tích hợp có cấu trúc để kết nối các công cụ đánh giá rời rạc với quy trình ra quyết định ở giai đoạn ý tưởng khiến các mục tiêu chiến lược khó chuyển hóa thành hành động cụ thể trong thực tế dự án [4, 6].

Ở Việt Nam, các nghiên cứu liên quan đến DfS trong môi trường xây dựng hiện vẫn còn khá hạn chế và phân tán. Phần lớn các nghiên cứu mới chỉ tiếp cận riêng lẻ một số khía cạnh của tính bền vững như phát triển nhà ở xã hội bền vững, tối ưu hóa thiết kế nhằm giảm giá thành và nâng cao hiệu quả tài nguyên, thiết kế nội thất bền vững hoặc tích hợp không gian xanh và hạ tầng sinh thái trong đô thị [16-18]. Các nghiên cứu này nhìn chung vẫn tiếp cận bền vững chủ yếu dưới góc độ tối ưu kỹ thuật, môi trường hoặc hình thái không gian, thay vì xem DfS như một quá trình tích hợp đa mục tiêu xuyên suốt vòng đời dự án. Đồng thời, mối liên hệ giữa DfS với quá trình ra quyết định thiết kế, phối hợp đa bên, quản trị thông tin và triển khai công trình trong môi trường xây dựng vẫn chưa được khái niệm hóa rõ ràng. Rà soát bổ trợ cho thấy một số công bố tại Việt Nam đã đề cập đến các thành phần gần với DfS, như kiến trúc bền vững, hiệu quả năng lượng, tối ưu hóa thiết kế, tái sử dụng thích ứng và giảm phát thải carbon. Tuy nhiên, do phạm vi rà soát tài liệu tiếng Việt còn hạn chế, các kết quả này chỉ cung cấp minh họa ban đầu về bối cảnh nghiên cứu trong nước và chưa đủ cơ sở để đánh giá toàn diện mức độ phát triển của DfS tại Việt Nam.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm làm rõ sự phát triển, đặc điểm và phạm vi tiếp cận của DfS trong môi trường xây dựng thông qua tổng quan tài liệu tích hợp. Nghiên cứu giải quyết bốn câu hỏi: (1) Khái niệm DfS đã phát triển như thế nào từ các tiếp cận thiết kế môi trường và thiết kế sản phẩm sang tư duy vòng đời và hệ thống? (2) Những hướng tiếp cận chủ đạo nào của DfS được thể hiện trong nghiên cứu về môi trường xây dựng? (3) Những đặc điểm nào của môi trường xây dựng ảnh hưởng đến cách diễn giải và áp dụng DfS? và (4) DfS trong môi trường xây dựng có thể được khái niệm hóa như thế nào trên cơ sở tổng hợp các hướng nghiên cứu hiện có?

Nghiên cứu có ba đóng góp chính. Thứ nhất, nghiên cứu hệ thống hóa sự phát triển và làm rõ ranh giới giữa DfS với các khái niệm thiết kế môi trường có liên quan. Thứ hai, nghiên cứu đối chiếu các nền tảng DfS có nguồn gốc từ thiết kế sản phẩm với các nghiên cứu trực tiếp về công trình và hạ tầng để nhận diện những đặc điểm chuyên biệt của môi trường xây dựng. Thứ ba, nghiên cứu tổng hợp các kết quả này thành một cách hiểu chuyên biệt theo ngành về DfS, tạo cơ sở khái niệm cho các nghiên cứu tiếp theo và cho việc phát triển các công cụ đánh giá hoặc hỗ trợ ra quyết định. Đóng góp của bài báo vì vậy nằm ở sự tổng hợp và tái cấu trúc tri thức hiện có cho bối cảnh môi trường xây dựng, từ nền tảng lý luận DfS được kế thừa từ các nghiên cứu trước đây.

2. Nền tảng khái niệm và phạm vi thuật ngữ

2.1. Sự phát triển và mối quan hệ giữa các khái niệm

Các cách tiếp cận thiết kế hướng tới phát triển bền vững được hình thành qua quá trình mở rộng dần về đối tượng, phạm vi vòng đời và các khía cạnh tác động được xem xét. Những thảo luận ban đầu nhấn mạnh trách nhiệm môi trường và xã hội của hoạt động thiết kế, phê phán việc thiết kế chỉ phục vụ sản xuất và tiêu dùng mà không xem xét đầy đủ các hệ quả đối với con người và hệ sinh thái [19]. Trên nền tảng đó, các thuật ngữ như thiết kế xanh (*green design*), thiết kế sinh thái (*eco-design*) và Thiết kế vì môi trường (*Design for Environment* – DfE) lần lượt được phát triển để đưa các vấn đề môi trường vào quyết định thiết kế.

Thiết kế xanh thường tập trung vào một hoặc một số vấn đề môi trường riêng lẻ, chẳng hạn giảm tiêu thụ năng lượng, hạn chế vật liệu độc hại hoặc tăng tỷ lệ vật liệu tái chế. Cách tiếp cận này có ý nghĩa trong việc đưa yêu cầu môi trường vào thiết kế nhưng thường chỉ xử lý từng tác động hoặc từng giai đoạn riêng biệt, chưa nhất thiết xem xét đầy đủ sự dịch chuyển tác động giữa các giai đoạn vòng đời [7]. Trong môi trường xây dựng, thiết kế xanh thường được thể hiện thông qua các giải pháp tiết kiệm năng lượng, lựa chọn vật liệu thân thiện môi trường hoặc cải thiện chất lượng môi trường trong nhà. Tuy nhiên, sự đa dạng trong cách diễn giải "xanh" khiến thuật ngữ này có thể bao hàm nhiều định hướng thiết kế khác nhau và không phải lúc nào cũng có ranh giới rõ ràng [20].

So với thiết kế xanh, thiết kế sinh thái mở rộng trọng tâm sang toàn bộ vòng đời sản phẩm, từ khai thác nguyên liệu, sản xuất và sử dụng đến xử lý cuối vòng đời. Mục tiêu chính là tích hợp các khía cạnh môi trường vào quá trình phát triển sản phẩm và hạn chế việc giảm tác động ở một giai đoạn nhưng làm gia tăng tác động ở giai đoạn khác [8, 21]. Trong xây dựng, logic này được thể hiện qua đánh giá vòng đời công trình, lựa chọn vật liệu trên cơ sở tác động vòng đời và xem xét đồng thời năng lượng hàm chứa, năng lượng vận hành và các phương án cuối vòng đời [22].

DfE có quan hệ gần với thiết kế sinh thái nhưng nhấn mạnh việc xem xét một cách có hệ thống các mục tiêu môi trường, sức khỏe và an toàn trong thiết kế sản phẩm và quy trình xuyên suốt vòng đời [10]. DfE vì vậy cung cấp một định hướng có cấu trúc để đưa yêu cầu môi trường vào quá trình ra quyết định. Tuy nhiên, cả thiết kế sinh thái và DfE về cơ bản vẫn tập trung chủ yếu vào khía cạnh môi trường; các mục tiêu xã hội, kinh tế và thay đổi ở cấp độ hệ thống thường chưa phải là trọng tâm trung tâm của hai cách tiếp cận này.

Song song với các tiếp cận môi trường, Thiết kế định hướng xuất sắc (Design for Excellence – DfX) được phát triển như một họ phương pháp thiết kế, trong đó "X" biểu thị một mục tiêu hoặc thuộc tính ưu tiên, chẳng hạn khả năng chế tạo, lắp ráp, bảo trì, tháo dỡ, tái chế hoặc thích ứng. DfX không đồng nghĩa với DfS và cũng không phải là một giai đoạn phát triển tất yếu từ DfE sang DfS. Thay vào đó, các chiến lược DfX phù hợp có thể được sử dụng như những phương thức cụ thể để thực hiện một số mục tiêu của DfS. Chẳng hạn, thiết kế để tháo dỡ, tái chế, bảo trì hoặc thích ứng có thể hỗ trợ kéo dài vòng đời công trình và duy trì giá trị tài nguyên [4, 23].

DfS đánh dấu sự mở rộng trọng tâm từ giảm tác động môi trường của sản phẩm sang việc xem xét đồng thời các hệ quả môi trường, xã hội và kinh tế của quyết định thiết kế. DfS cũng mở rộng đối tượng can thiệp từ sản phẩm riêng lẻ sang hệ thống sản phẩm–dịch vụ và, trong những cách tiếp cận gần đây, sang đổi mới hệ thống và chuyển đổi xã hội–kỹ thuật [8, 11, 24]. Sự phát triển này không có nghĩa là DfS thay thế hoàn toàn các tiếp cận trước đó. Thiết kế xanh, thiết kế sinh thái, DfE và các chiến lược DfX vẫn cung cấp những nguyên tắc và công cụ quan trọng, nhưng được đặt trong một phạm vi tích hợp rộng hơn.

Thuật ngữ *sustainable design* có nội hàm gần với DfS và trong một số công bố được sử dụng gần như tương đương. Tuy nhiên, *sustainable design* thường mô tả định hướng hoặc đặc tính bền vững của hoạt động và kết quả thiết kế, trong khi cụm từ *Design for Sustainability* nhấn mạnh rõ hơn việc chủ động thiết kế "vì" các mục tiêu bền vững. Sự phân biệt này không mang tính tuyệt đối vì cách sử dụng hai thuật ngữ còn phụ thuộc vào lĩnh vực và truyền thống nghiên cứu. Trong bài báo này, DfS được sử dụng như thuật ngữ trung tâm nhằm nhấn mạnh việc tích hợp các mục tiêu bền vững vào quá trình ra quyết định thiết kế.

Thiết kế tuần hoàn (*circular design*) là một hướng tiếp cận có quan hệ chặt chẽ với DfS nhưng có trọng tâm cụ thể hơn vào việc duy trì giá trị của sản phẩm, cấu kiện và vật liệu thông qua các chiến lược kéo dài tuổi thọ, thích ứng, tái sử dụng, sửa chữa, tháo dỡ và tái chế. Trong môi trường xây dựng, thiết kế tuần hoàn thường được triển khai thông qua thiết kế để thích ứng, thiết kế để tháo dỡ và thiết kế để tái sử dụng hoặc tái chế [12, 23]. Vì vậy, thiết kế tuần hoàn được xem là một định hướng quan trọng trong DfS, nhưng không bao quát đầy đủ các mục tiêu xã hội, quản trị và chuyển đổi hệ thống mà DfS có thể đề cập.

2.2. Phạm vi thuật ngữ được sử dụng trong nghiên cứu

Mặc dù có sự giao thoa, các thuật ngữ trên khác nhau về trọng tâm, đối tượng và phạm vi phân tích. Sự phân biệt được tổng hợp trong Bảng 1.

Việc xác lập phạm vi thuật ngữ có ý nghĩa trực tiếp đối với chiến lược tìm kiếm. Nghiên cứu lựa chọn cụm từ chính xác **"Design for Sustainability"** làm thuật ngữ tìm kiếm trung tâm vì đối tượng cần làm rõ là DfS, không phải toàn bộ các nghiên cứu về công trình xanh, thiết kế sinh thái hoặc phát triển bền vững trong xây dựng. Truy vấn chuyên biệt kết hợp thuật ngữ này với các từ chỉ môi trường xây dựng, gồm *construction*, *buildings*, *built environment*, *infrastructure* và *housing*. Các thuật ngữ gần nghĩa như *green design*, *eco-design*, DfE, DfX, *sustainable design* và *circular design* không được dùng thay thế DfS trong truy vấn chính mà được sử dụng để xác lập ranh giới khái niệm, diễn giải sự phát triển của lĩnh vực và thực hiện truy vết lùi nhằm nhận diện các công trình nền tảng.

Cách lựa chọn này tăng tính nhất quán và khả năng tái lập của quá trình tìm kiếm nhưng cũng tạo ra một giới hạn: các nghiên cứu có nội dung phù hợp nhưng chỉ sử dụng thuật ngữ gần nghĩa có thể không xuất hiện trong kết quả truy vấn ban đầu. Vì vậy, truy vết lùi được sử dụng như một bước bổ sung để tăng phạm vi bao trùm của tài liệu được tổng quan.

Bảng 1. Phân biệt các thuật ngữ thiết kế liên quan đến DfS.

	Trọng tâm chủ yếu	Đối tượng phổ biến	Phạm vi vòng đời	Quan hệ với DfS	Giới hạn chính
Thiết kế xanh (*green design*)	Giảm một hoặc một số tác động môi trường	Sản phẩm, vật liệu hoặc công trình	Thường tập trung vào một số giai đoạn hoặc vấn đề	Tiếp cận môi trường ban đầu có thể hỗ trợ DfS	Có thể mang tính đơn vấn đề và chưa xem xét sự dịch chuyển tác động vòng đời
Thiết kế sinh thái (*eco-design*)	Tích hợp khía cạnh môi trường vào thiết kế	Sản phẩm, quy trình và công trình	Toàn bộ vòng đời	Cung cấp nền tảng môi trường và tư duy vòng đời cho DfS	Chủ yếu tập trung vào khía cạnh môi trường
Thiết kế vì môi trường (DfE)	Đưa mục tiêu môi trường, sức khỏe và an toàn vào quyết định thiết kế	Sản phẩm và quy trình	Toàn bộ vòng đời sản phẩm và quy trình	Cung cấp nguyên tắc và công cụ môi trường có thể sử dụng trong DfS	Chưa nhất thiết bao quát đầy đủ mục tiêu xã hội, kinh tế và chuyển đổi hệ thống
Thiết kế định hướng xuất sắc (DfX)	Tối ưu hóa một mục tiêu hoặc thuộc tính "X"	Sản phẩm, cấu kiện, quy trình hoặc công trình	Phụ thuộc vào mục tiêu X	Một số chiến lược DfX là phương thức triển khai các mục tiêu cụ thể của DfS	Có thể tối ưu từng mục tiêu riêng lẻ mà chưa giải quyết các đánh đổi tổng thể
Thiết kế bền vững (*sustainable design*)	Tích hợp các mục tiêu bền vững vào hoạt động và kết quả thiết kế	Sản phẩm, công trình, dịch vụ và hệ thống	Thường bao quát vòng đời	Có nội hàm gần và đôi khi được dùng tương đương với DfS	Ranh giới với DfS không hoàn toàn thống nhất
Thiết kế tuần hoàn (*circular design*)	Duy trì giá trị tài nguyên thông qua các vòng lặp	Vật liệu, sản phẩm, cấu kiện và hệ thống	Nhiều vòng đời hoặc chu trình sử dụng	Một định hướng quan trọng của DfS về tài nguyên và vòng đời	Không tự thân bao quát đầy đủ mọi khía cạnh xã hội và quản trị
Thiết kế vì phát triển bền vững (DfS)	Tích hợp các mục tiêu môi trường, xã hội và kinh tế vào quyết định thiết kế	Sản phẩm, dịch vụ, công trình và hệ thống xã hội–kỹ thuật	Toàn bộ vòng đời và có thể mở rộng đến cấp hệ thống	Thuật ngữ trung tâm của nghiên cứu	Phạm vi rộng, phụ thuộc bối cảnh và chưa có cách diễn giải hoàn toàn thống nhất

Nguồn: Tổng hợp từ [4, 7, 8, 10-12, 21, 23].

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu tích hợp nhằm tổng hợp và tái cấu trúc các dòng nghiên cứu liên quan đến DfS trong môi trường xây dựng. Phương pháp này phù hợp với các chủ đề liên ngành, phân tán về thuật ngữ và bao gồm nhiều loại đóng góp lý thuyết cũng như ứng dụng [25, 26]. Nghiên cứu không nhằm đánh giá hiệu quả của một can thiệp cụ thể mà tập trung làm rõ sự phát triển của DfS, các cách tiếp cận chủ đạo, phạm vi khái niệm và cách những nền tảng hình thành từ thiết kế sản phẩm được chuyển hóa khi áp dụng vào môi trường xây dựng. Quy trình nghiên cứu gồm bốn bước: tìm kiếm thăm dò; tìm kiếm chuyên biệt và phân loại tài liệu; truy vết lùi để bổ sung các công trình nền tảng; và mã hóa, tổng hợp chủ đề để phát triển cách hiểu DfS trong môi trường xây dựng.

Việc tìm kiếm trên Scopus được thực hiện nhiều lần từ tháng 4 năm 2026. Nghiên cứu không áp dụng giới hạn về năm công bố; kết quả bao quát các tài liệu được Scopus lập chỉ mục đến ngày 11 tháng 8 năm 2026. Ở bước thăm dò, cụm từ "Design for Sustainability" được tìm kiếm trong tiêu đề, tóm tắt và từ khóa, thu được 918 bản ghi. Sau khi giới hạn loại tài liệu là bài báo và ngôn ngữ tiếng Anh, 353 bản ghi được giữ lại để lập bản đồ sơ bộ phạm vi ứng dụng và nhận diện các bối cảnh nghiên cứu chính của DfS.

Trên cơ sở kết quả thăm dò, truy vấn chuyên biệt sau được sử dụng:

TITLE-ABS-KEY (("Design for Sustainability") AND (construction OR buildings OR "built environment" OR infrastructure OR housing))

Truy vấn thu được 155 bản ghi; sau khi giới hạn loại tài liệu là bài báo và ngôn ngữ tiếng Anh, 67 bài được giữ lại để sàng lọc theo tiêu đề, tóm tắt, từ khóa và toàn văn. Trong số này, 40 bài liên quan đến công trình, vật liệu hoặc cấu kiện xây dựng, kiến trúc, hạ tầng, khu dân cư hoặc các hệ thống thuộc môi trường xây dựng; 27 bài còn lại thuộc các lĩnh vực như thiết kế sản phẩm, chế tạo, dịch vụ, thời trang, giáo dục và đổi mới xã hội. Việc phân nhóm không đồng nghĩa với loại bỏ toàn bộ tài liệu ngoài xây dựng. Các tài liệu này được giữ lại khi cung cấp cơ sở để phân tích nguồn gốc, sự phát triển và các logic chung của DfS, nhưng không được sử dụng làm bằng chứng trực tiếp cho những kết luận chuyên biệt về môi trường xây dựng.

Đối với nhóm xây dựng, tài liệu được lựa chọn khi: (i) đề cập trực tiếp đến DfS hoặc một cách tiếp cận thiết kế bền vững có liên hệ rõ với DfS; (ii) nghiên cứu công trình, vật liệu hoặc cấu kiện xây dựng, kiến trúc, hạ tầng hoặc hệ thống môi trường xây dựng; và (iii) cung cấp nội dung liên quan đến khái niệm DfS, mục tiêu bền vững, phạm vi vòng đời, quá trình ra quyết định, khả năng thích ứng, phối hợp các bên hoặc cấp độ hệ thống. Đối với nhóm DfS nói chung, tài liệu được giữ lại nếu làm rõ ít nhất một trong các nội dung: nguồn gốc và sự phát triển của DfS; quan hệ giữa DfS với thiết kế xanh, thiết kế sinh thái, DfE, DfX, thiết kế tuần hoàn hoặc thiết kế bền vững; tư duy vòng đời; hệ thống sản phẩm–dịch vụ; tính bền vững xã hội; đổi mới hệ thống; hoặc chuyển đổi xã hội–kỹ thuật.

Tài liệu bị loại khi: (i) sử dụng "sustainability" theo nghĩa duy trì lâu dài một chương trình hoặc can thiệp nhưng không liên quan đến thiết kế vì phát triển bền vững; (ii) không cung cấp nội dung phù hợp với câu hỏi nghiên cứu; (iii) trùng lặp; hoặc (iv) không thể tiếp cận toàn văn. Yêu cầu toàn văn được áp dụng vì việc mã hóa khái niệm và tổng hợp chủ đề đòi hỏi kiểm tra đầy đủ nền tảng lý thuyết, phương pháp, kết quả và thảo luận của từng tài liệu. Trong 40 bài thuộc nhóm xây dựng, toàn văn của 37 bài được thu thập và ba bài bị loại do không tiếp cận được. Trong 27 bài thuộc các lĩnh vực khác, một bài bị loại do sử dụng "sustainability" theo nghĩa duy trì một can thiệp y tế, ba bài không có toàn văn và 23 bài được đưa vào phân tích ban đầu.

Truy vết lùi được thực hiện bằng cách kiểm tra danh mục tài liệu tham khảo của các bài có toàn văn nhằm bổ sung những công trình nền tảng hoặc nghiên cứu liên quan không xuất hiện trong kết quả tìm kiếm trực tiếp do sử dụng các thuật ngữ gần nghĩa như green design, eco-design, DfE, DfX, sustainable design, circular design, hệ thống sản phẩm–dịch vụ hoặc chuyển đổi xã hội–kỹ thuật. Truy vết lùi từ nhóm xây dựng bổ sung sáu tài liệu có toàn văn liên quan trực tiếp đến công trình và hạ tầng, nâng tập phân tích chuyên biệt từ 37 lên 43 tài liệu. Bước này đồng thời xác định tám tài liệu nền tảng về DfS nói chung; một tài liệu không có toàn văn nên bảy tài liệu được bổ sung.

Truy vết lùi riêng từ 23 bài DfS ngoài xây dựng xác định thêm 19 tài liệu có khả năng liên quan. Trong đó, ba tài liệu không có toàn văn và một tài liệu trùng với kết quả truy vết lùi trước đó; 15 tài liệu mới được đưa vào phân tích. Các trường hợp trùng lặp được kiểm tra theo tiêu đề, tác giả, năm xuất bản và DOI. Như vậy, nhóm DfS nói chung gồm 23 bài từ Scopus, bảy tài liệu từ truy vết lùi nhóm xây dựng và 15 tài liệu mới từ truy vết lùi nhóm ngoài xây dựng, tổng cộng 45 tài liệu. Kết hợp với 43 tài liệu chuyên biệt về xây dựng, tập tài liệu phân tích quốc tế cuối cùng gồm 88 tài liệu có toàn văn (Bảng 2).

Bên cạnh tập tài liệu phân tích quốc tế, nghiên cứu thực hiện một lượt tìm kiếm bổ trợ trên Google Scholar trong tháng 8 năm 2026 nhằm đánh giá sự hiện diện và cách sử dụng các khái niệm liên quan đến DfS trong học thuật Việt Nam. Các cụm từ tìm kiếm gồm "Thiết kế vì phát triển bền vững", "Design for Sustainability", "thiết kế bền vững", "kiến trúc bền vững", "thiết kế nội thất bền vững", "tái sử dụng thích ứng", "Thiết kế định hướng xuất sắc" và "Design for X", kết hợp với "xây dựng", "công trình", "kiến trúc", "nhà ở" và "giảm phát thải carbon". Do Google Scholar không cung cấp chức năng truy vấn và xuất dữ liệu ổn định như Scopus, lượt rà soát này chỉ được sử dụng để bổ sung bối cảnh Việt Nam, không được coi là một tìm kiếm hệ thống độc lập.

Bảng 2. Quá trình hình thành tập tài liệu phân tích quốc tế.

Nguồn và bước xử lý	Nhóm xây dựng	Nhóm DfS nói chung
Kết quả tập tài liệu nghiên cứu được phân loại	40	27
Loại do không đúng nội hàm DfS	0	1
Không tiếp cận được toàn văn	3	3
Đưa vào phân tích từ Scopus	37	23
Bổ sung từ truy vết lùi nhóm xây dựng	6	7
Bổ sung từ truy vết lùi nhóm DfS nói chung	0	15
Tập tài liệu để phân tích cuối cùng	43	45
Tổng cộng	88	

Các kết quả được sàng lọc theo tiêu đề, tóm tắt và toàn văn. Tài liệu được giữ lại khi: (i) là công bố học thuật bằng tiếng Việt hoặc nghiên cứu rõ ràng về bối cảnh Việt Nam; (ii) có nội dung thực chất về thiết kế gắn với ít nhất một mục tiêu môi trường, xã hội hoặc kinh tế; và (iii) liên quan đến công trình, kiến trúc, nội thất, nhà ở, hạ tầng hoặc cung cấp nền tảng khái niệm có thể hỗ trợ diễn giải DfS. Những tài liệu chỉ đề cập chung đến phát triển bền vững mà không phân tích nội dung thiết kế bị loại. Sau sàng lọc, chín bài có toàn văn được giữ lại để phân tích bổ trợ.

Trong số này, bảy bài liên quan trực tiếp đến môi trường xây dựng, gồm: ba nghiên cứu về tính bền vững trong kiến trúc và đô thị, kiến trúc trường học thích ứng với điều kiện tự nhiên–văn hóa địa phương và đào tạo thiết kế hướng tới kiến trúc bền vững [18, 27, 28]; hai nghiên cứu về thiết kế nội thất bền vững và tái sử dụng thích ứng công trình hiện hữu [17, 29]; một nghiên cứu về tối ưu hóa thiết kế nhà ở xã hội gắn với giảm giá thành và phát triển bền vững [16]; và một nghiên cứu sử dụng các chiến lược DfX để phân tích khả năng giảm phát thải carbon trong vòng đời công trình [30]. Hai bài còn lại nghiên cứu thiết kế bền vững trong sản xuất tuần hoàn và mô hình đào tạo thiết kế liên ngành có hỗ trợ của công nghệ số [31, 32]. Hai tài liệu này được sử dụng để hỗ trợ diễn giải nền tảng DfS nói chung, không được coi là bằng chứng trực tiếp về thực hành DfS trong môi trường xây dựng.

Các tài liệu tiếng Việt được mã hóa theo các nội dung tương ứng với khung phân tích của nghiên cứu, gồm mục tiêu bền vững, đối tượng thiết kế, phạm vi vòng đời, sự phụ thuộc bối cảnh, quá trình ra quyết định và công cụ hỗ trợ. Nhóm tài liệu này được phân tích tách biệt, không tính vào tập tài liệu phân tích quốc tế gồm 88 tài liệu và chỉ được sử dụng để mô tả bối cảnh, nhận diện các chủ đề hiện có và xem xét mức độ phù hợp của cách hiểu DfS đề xuất đối với Việt Nam. Do lượt tìm kiếm mang tính bổ trợ và số lượng tài liệu còn hạn chế, kết quả không được sử dụng để đưa ra kết luận khái quát về toàn bộ lĩnh vực DfS tại Việt Nam.

Phân tích nội dung định tính kết hợp với tổng hợp chủ đề được

thực hiện theo hai tầng. Ở tầng thứ nhất, toàn bộ 88 tài liệu phân tích quốc tế được mã hóa theo định nghĩa và cách sử dụng DfS; đối tượng thiết kế; mục tiêu môi trường, xã hội và kinh tế; phạm vi vòng đời; quá trình ra quyết định; vai trò của các bên liên quan; và cấp độ can thiệp từ sản phẩm đến hệ thống. Tầng này được sử dụng để làm rõ sự phát triển và các logic tiếp cận chung của DfS. Ở tầng thứ hai, 43 tài liệu liên quan trực tiếp đến xây dựng được phân tích chuyên sâu theo đối tượng và quy mô thiết kế; giai đoạn vòng đời; mục tiêu bền vững; quá trình ra quyết định; đặc điểm dự án; cấu trúc bên liên quan; sự phụ thuộc bối cảnh; khả năng thích ứng; và vai trò của thông tin. Kết quả được sử dụng để nhận diện các cách tiếp cận, các đặc điểm chi phối, phạm vi khái niệm và phát triển cách hiểu DfS trong môi trường xây dựng.

Các mã ban đầu được hình thành từ câu hỏi nghiên cứu và được bổ sung trong quá trình đọc toàn văn. Những mã có nội dung tương đồng được nhóm thành các chủ đề bậc cao, sau đó được đối chiếu với các bảng bằng chứng và khung khái niệm. Một tác giả thực hiện mã hóa ban đầu; tác giả còn lại kiểm tra việc áp dụng mã, cách nhóm chủ đề và các trường hợp chưa rõ. Những khác biệt được đối chiếu với nội dung toàn văn, thảo luận và giải quyết bằng sự thống nhất giữa các tác giả. Do quá trình kiểm tra dựa trên rà soát và đồng thuận thay vì hai lượt mã hóa độc lập, nghiên cứu không tính hệ số tin cậy liên mã hóa.

4. Sự phát triển của khái niệm Thiết kế vì phát triển bền vững

Sự phát triển của DfS không nên được hiểu như một chuỗi giai đoạn tuyến tính, trong đó cách tiếp cận mới hoàn toàn thay thế cách tiếp cận trước đó. Thay vào đó, đây là quá trình mở rộng và tích hợp dần về đối tượng thiết kế, mục tiêu bền vững, phạm vi vòng đời và cấp độ can thiệp. Các cách tiếp cận như thiết kế xanh, thiết kế sinh thái, Thiết kế vì môi trường và thiết kế vòng đời vẫn tiếp tục tồn tại như những bộ phận hoặc công cụ chuyên biệt trong phạm vi rộng hơn của DfS [7, 8].

4.1. Nguồn gốc của Thiết kế vì phát triển bền vững

Các tiền đề của DfS xuất hiện từ những thảo luận về trách nhiệm xã hội và môi trường của thiết kế trong thập niên 1960–1970, khi vai trò của thiết kế trong thúc đẩy tiêu dùng, khai thác tài nguyên và tạo ra chất thải bắt đầu được xem xét một cách phê phán [33]. Đến thập niên 1980 và đầu thập niên 1990, những quan tâm này được cụ thể hóa thông qua các cách tiếp cận như thiết kế xanh, thiết kế sinh thái, Thiết kế vì môi trường (Design for Environment – DfE) và thiết kế có ý thức về môi trường. Các cách tiếp cận này cùng hướng tới giảm tác động môi trường, nhưng khác nhau về phạm vi và mức độ tích hợp vào quá trình thiết kế [7, 8].

Thiết kế xanh chủ yếu tập trung vào việc cải thiện một số thuộc tính môi trường của sản phẩm, chẳng hạn giảm vật liệu độc hại, tiết kiệm năng lượng hoặc tăng khả năng tái chế. Thiết kế sinh thái và DfE mở rộng phạm vi đánh giá bằng cách xem xét các tác động môi trường ở nhiều giai đoạn của vòng đời sản phẩm, từ khai thác nguyên liệu, sản xuất và phân phối đến sử dụng và xử lý cuối vòng đời [9, 10, 21]. Vì vậy, sự khác biệt chủ yếu không nằm ở việc các cách tiếp cận này theo đuổi những mục tiêu hoàn toàn khác nhau, mà ở mức độ chúng mở rộng ranh giới của bài toán thiết kế.

Trong giai đoạn này, tư duy vòng đời và Đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment – LCA) trở thành nền tảng quan trọng để nhận diện sự chuyển dịch tác động giữa các giai đoạn và so sánh các phương án thiết kế. Thiết kế nhờ đó dịch chuyển từ xử lý ô nhiễm sau khi sản phẩm đã được tạo ra sang phòng ngừa tác động ngay từ giai đoạn hình thành ý tưởng [9, 34]. Tuy nhiên, trọng tâm phân tích vẫn chủ yếu là sản phẩm vật lý, hiệu quả tài nguyên và tác động môi trường có thể định lượng; các chiều cạnh xã hội, thể chế và hành vi chưa được tích hợp đầy đủ.

Trong môi trường xây dựng, dấu ấn của giai đoạn này thể hiện ở việc sử dụng LCA và các phương pháp đánh giá môi trường để xem xét năng lượng, vật liệu và phát thải trong vòng đời công trình. Các nghiên cứu về LCA công trình cho thấy tư duy vòng đời giúp mở rộng đánh giá từ tác động trong giai đoạn vận hành sang cả vật liệu và năng lượng hàm chứa, nhưng việc tích hợp kết quả đánh giá vào quyết định thiết kế ban đầu vẫn còn hạn chế [22, 35]. Đây là sự tiếp nhận các nguyên lý của thiết kế sinh thái và DfE vào xây dựng, chưa đồng nghĩa với sự hình thành đầy đủ của DfS trong môi trường xây dựng.

Như vậy, đóng góp quan trọng của giai đoạn khởi đầu không chỉ là một tập hợp giải pháp kỹ thuật nhằm giảm tác động môi trường, mà còn là việc xác lập nguyên tắc phòng ngừa: các vấn đề bền vững cần được xem xét trong quá trình thiết kế thay vì chỉ được xử lý sau khi sản phẩm hoặc công trình đã hình thành.

4.2. Mở rộng từ thiết kế môi trường sang thiết kế tích hợp

Từ cuối thập niên 1990 và đầu những năm 2000, giới hạn của việc tối ưu hóa từng sản phẩm riêng lẻ ngày càng được nhận diện rõ hơn. Giảm tác động môi trường ở cấp độ sản phẩm không nhất thiết tạo ra kết quả bền vững nếu các mô hình sản xuất, tiêu dùng và tổ chức xã hội liên quan không thay đổi. DfS vì vậy được mở rộng từ trọng tâm môi trường sang việc xem xét đồng thời các mục tiêu môi trường, xã hội và kinh tế [36, 37]. Sự mở rộng này không loại bỏ yêu cầu về hiệu quả môi trường mà đặt yêu cầu đó trong một khung ra quyết định đa mục tiêu.

Một biểu hiện quan trọng của sự mở rộng này là sự phát triển của hệ thống sản phẩm–dịch vụ bền vững. Thay vì chỉ cải thiện đặc tính của sản phẩm vật chất, cách tiếp cận này tập trung vào hệ thống kết hợp giữa sản phẩm, dịch vụ và các chủ thể nhằm đáp ứng nhu cầu của người sử dụng [24, 38, 39]. Đối tượng của thiết kế do đó được mở rộng từ sản phẩm sang phương thức cung cấp giá trị, mô hình kinh doanh và quan hệ giữa nhà sản xuất, nhà cung cấp dịch vụ và người sử dụng.

Tư duy vòng đời cũng được mở rộng từ một công cụ đánh giá môi trường thành cơ sở hỗ trợ lựa chọn giữa các mục tiêu bền vững có thể cạnh tranh với nhau. Việc tích hợp tính bền vững vào các hệ thống công nghiệp đòi hỏi sự kết hợp giữa đánh giá môi trường, hiệu quả kinh tế, khả năng thực hiện về kỹ thuật và các hệ quả xã hội, thay vì chỉ dựa trên một nhóm chỉ số riêng lẻ [34, 40]. Theo cách hiểu này, DfS

không chỉ trả lời câu hỏi sản phẩm có thể giảm bao nhiêu tác động, mà còn xem xét nhu cầu nào cần được đáp ứng, giá trị được tạo ra cho ai và tác động được phân bổ như thế nào trong vòng đời.

Khía cạnh xã hội của DfS được thể hiện rõ hơn qua thiết kế xã hội, đồng thiết kế và các phương pháp có sự tham gia. Vai trò của nhà thiết kế chuyển dần từ người đưa ra giải pháp đơn phương sang người hỗ trợ trao đổi, dung hòa các giá trị và tổ chức sự tham gia của các bên liên quan. Các nghiên cứu về thiết kế công trình và tiện ích công cộng cho thấy sự tham gia của người sử dụng và cộng đồng có thể giúp giải pháp phù hợp hơn với hành vi, điều kiện văn hóa và nhu cầu địa phương [41, 42]. Vì vậy, kết quả bền vững không chỉ phụ thuộc vào chất lượng kỹ thuật của phương án mà còn phụ thuộc vào quá trình hình thành và chấp nhận phương án đó.

Trong xây dựng, logic tích hợp được phản ánh qua quá trình thiết kế tích hợp, trong đó các mục tiêu môi trường, kinh tế và xã hội được xem xét đồng thời với yêu cầu kỹ thuật của dự án. Tuy nhiên, sự tích hợp này chịu ảnh hưởng của cấu trúc dự án và sự tham gia của nhiều chủ thể có mục tiêu khác nhau. Goubran and Cucuzzella [14] phân biệt giữa cải tiến tăng dần trong phạm vi các quy trình hiện có và đổi mới sâu hơn làm thay đổi cách xác lập mục tiêu, tổ chức dự án và phối hợp các bên. Marinelli [4], từ góc nhìn DfX, cũng cho thấy việc tích hợp tính bền vững vào quy hoạch dự án hạ tầng cần kết nối nhiều yêu cầu thiết kế và tiêu chí ra quyết định. Nghiên cứu này cung cấp bằng chứng về khả năng sử dụng logic DfX để tích hợp tính bền vững, nhưng không nên được diễn giải như bằng chứng cho thấy DfX và DfS là hai khái niệm đồng nhất.

Nhìn chung, sự chuyển dịch trong giai đoạn này nằm ở việc mở rộng DfS theo ba chiều: từ mục tiêu môi trường sang các mục tiêu bền vững đa chiều; từ sản phẩm vật lý sang hệ thống cung cấp giá trị; và từ hoạt động của một chuyên gia sang quá trình thiết kế có sự tham gia và phối hợp đa ngành.

4.3. Sự dịch chuyển sang các tiếp cận theo hệ thống

Từ khoảng sau năm 2010, DfS tiếp tục được mở rộng sang đổi mới hệ thống và chuyển đổi bền vững. Ceschin and Gaziulusoy [8] cho rằng lĩnh vực DfS đang dịch chuyển từ các can thiệp ở cấp độ sản phẩm sang các tiếp cận có phạm vi hệ thống rộng hơn. Tuy nhiên, đây là sự mở rộng về cấp độ can thiệp chứ không phải sự thay thế hoàn toàn các giải pháp ở cấp độ sản phẩm. Thiết kế sản phẩm, hệ thống sản phẩm–dịch vụ, đổi mới xã hội–không gian và đổi mới hệ thống có thể cùng tồn tại và bổ trợ cho nhau trong một chiến lược DfS.

Tiền đề của sự dịch chuyển này là nhận thức rằng nhiều vấn đề bền vững mang bản chất phức hợp, phát sinh từ sự tương tác giữa công nghệ, hạ tầng, thể chế, thị trường, hành vi người sử dụng và giá trị xã hội. Vì vậy, việc cải thiện một thành phần riêng lẻ có thể không tạo ra thay đổi đáng kể ở cấp độ hệ thống, thậm chí có thể dẫn tới chuyển dịch tác động hoặc hiệu ứng bật lại. Tiếp cận hệ thống xã hội - kỹ thuật đặt đối tượng thiết kế trong mạng lưới quan hệ rộng hơn và xem xét đồng thời cấu trúc kỹ thuật với các điều kiện xã hội và thể chế duy trì cấu trúc đó [11, 43, 44].

Thiết kế chuyển đổi tiếp tục mở rộng vai trò của thiết kế từ cải tiến giải pháp hiện có sang xây dựng tầm nhìn dài hạn, định hình lộ trình thay đổi và tổ chức các thử nghiệm có khả năng tác động đến hệ thống. Theo đó, nhà thiết kế không nhất thiết kiểm soát toàn bộ quá trình chuyển đổi mà tham gia nhận diện vấn đề, xây dựng tầm nhìn, kết nối các chủ thể và hỗ trợ những can thiệp tại các cấp độ khác nhau [45, 46]. Đây là điểm khác biệt đáng chú ý so với các tiếp cận DfS ban đầu vốn chủ yếu tập trung vào hiệu suất của một sản phẩm xác định.

Kinh tế tuần hoàn và thiết kế tuần hoàn là một hướng phát triển nổi bật trong phạm vi mở rộng này. Thiết kế không chỉ nhằm giảm lượng chất thải phát sinh mà còn hướng tới duy trì giá trị của sản phẩm, bộ phận và vật liệu thông qua kéo dài tuổi thọ, bảo trì, thích ứng, tái sử dụng, tái sản xuất và tái chế [12]. Trong môi trường xây dựng, logic này được cụ thể hóa qua thiết kế để tháo dỡ, thiết kế để thích ứng và thiết kế để tái sử dụng vật liệu [23]. Tuy nhiên, thiết kế tuần hoàn nên được xem là một hướng tiếp cận có liên quan trong phạm vi DfS, không phải là thuật ngữ thay thế cho toàn bộ DfS.

Khả năng chống chịu cũng được kết nối ngày càng rõ hơn với tư duy hệ thống. Một giải pháp có hiệu suất cao trong điều kiện bình thường chưa chắc bền vững nếu không thể thích ứng với biến đổi khí hậu, thay đổi nhu cầu sử dụng hoặc gián đoạn kỹ thuật và xã hội. Do đó, đánh giá vòng đời công trình và hạ tầng cần xem xét đồng thời hiệu suất, tính dễ bị tổn thương, khả năng thích ứng và phục hồi [13]. Sự kết nối này mở rộng DfS từ việc giảm tác động dự kiến sang chuẩn bị cho những thay đổi và bất định trong tương lai.

Trong môi trường xây dựng, bằng chứng hiện có cho thấy tư duy hệ thống được thể hiện qua việc xem xét công trình như một bộ phận của hệ thống xã hội - kỹ thuật rộng hơn, nơi hiệu quả bền vững phụ thuộc vào tương tác giữa công nghệ, người sử dụng, cơ chế quản trị và điều kiện địa phương [14, 15, 47]. Tuy nhiên, tập tài liệu nghiên cứu lĩnh vực xây dựng chưa cung cấp nhiều nghiên cứu thực chứng trực tiếp về thiết kế chuyển đổi. Vì vậy, trong nghiên cứu này, thiết kế chuyển đổi chủ yếu được sử dụng như nền tảng lý thuyết để diễn giải sự mở rộng phạm vi của DfS, thay vì được coi là một thực hành đã phổ biến trong ngành xây dựng.

Tóm lại, sự phát triển của DfS có thể được nhận diện qua sự mở rộng đồng thời từ sản phẩm sang hệ thống, từ mục tiêu môi trường sang các mục tiêu bền vững đa chiều, và từ tối ưu hóa kỹ thuật sang quá trình phối hợp và định hướng chuyển đổi. Nền tảng lý thuyết này là cơ sở để xem xét cách DfS được tiếp nhận trong môi trường xây dựng; các đặc điểm của việc áp dụng DfS trong lĩnh vực này sẽ được phân tích tại Mục 5.

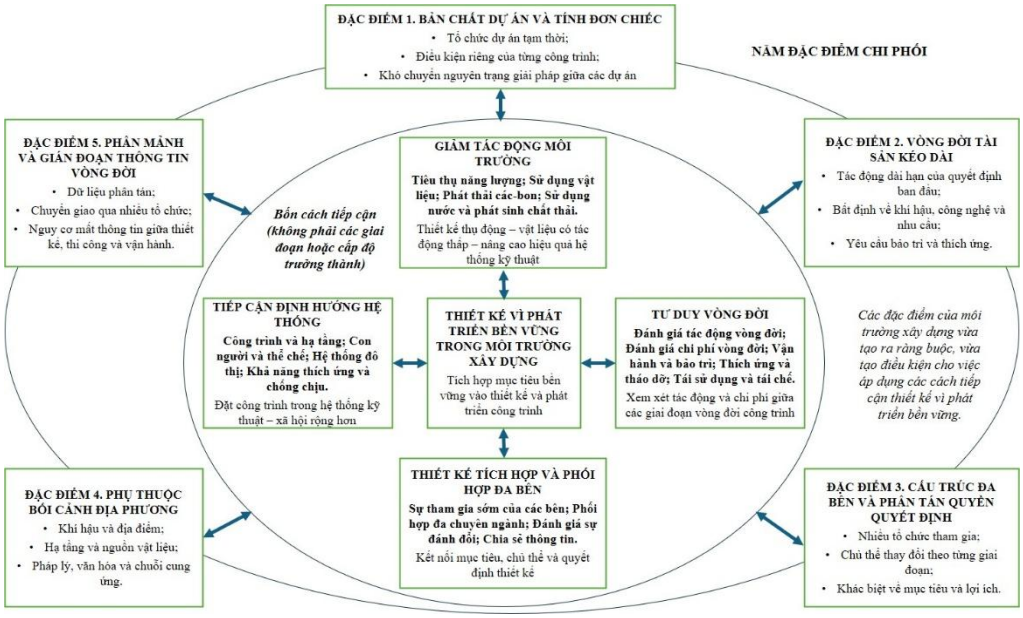
5. Khái niệm DfS trong môi trường xây dựng

Việc chuyển DfS từ thiết kế sản phẩm sang môi trường xây dựng không đơn thuần là thay đổi đối tượng từ “sản phẩm” thành “công trình”. Công trình và hạ tầng được hình thành, sử dụng và biến đổi trong những điều kiện dự án, tổ chức và địa điểm cụ thể; do đó, việc

tích hợp mục tiêu bền vững chịu ảnh hưởng của vòng đời tài sản kéo dài, cấu trúc đa bên, sự phụ thuộc bối cảnh và tính gián đoạn của thông tin giữa các giai đoạn.

Phân tích chuyên sâu 43 tài liệu liên quan trực tiếp đến xây dựng cho thấy DfS chưa được sử dụng theo một định nghĩa thống nhất. Bên cạnh những nghiên cứu sử dụng trực tiếp thuật ngữ DfS, nhiều nghiên cứu tiếp cận các nội dung tương ứng thông qua thiết kế bền vững, thiết kế tích hợp, đánh giá vòng đời, thiết kế tuần hoàn, thiết kế thích ứng hoặc thiết kế hạ tầng bền vững. Vì vậy, thay vì áp đặt trước một định nghĩa duy nhất, nghiên cứu tổ chức kết quả theo hai lớp phân tích: bốn cách tiếp cận DfS được nhận diện trong tài liệu xây dựng và năm đặc điểm của môi trường xây dựng chi phối việc thực hiện các cách tiếp cận đó.

Hình 1 trình bày cấu trúc phân tích được sử dụng cho toàn bộ Mục 5. Lớp bên trong gồm bốn cách tiếp cận có thể cùng tồn tại và kết hợp trong một nghiên cứu hoặc dự án; lớp bên ngoài gồm năm đặc điểm vừa tạo ra ràng buộc, vừa tạo điều kiện cho việc thực hiện DfS. Vị trí của các cách tiếp cận trong hình không biểu thị trình tự phát triển hoặc cấp độ trưởng thành.



Hình 1. Cấu trúc phân tích DfS trong môi trường xây dựng: bốn cách tiếp cận và năm đặc điểm chi phối.

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả từ kết quả mã hóa 43 tài liệu liên quan trực tiếp đến xây dựng, tiêu biểu gồm [4, 6, 13-15, 22, 35, 48])

5.1. Các cách tiếp cận về DfS trong xây dựng

Quá trình mã hóa và tổng hợp chủ đề nhận diện bốn cách tiếp cận DfS: (1) giảm tác động môi trường; (2) tư duy vòng đời; (3) thiết kế tích hợp và phối hợp đa bên; và (4) định hướng hệ thống. Các cách tiếp cận này có thể cùng tồn tại và kết hợp trong một nghiên cứu hoặc dự án (xem Bảng 3).

Giảm tác động môi trường. Cách tiếp cận này tập trung vào giảm tiêu thụ năng lượng và tài nguyên, phát thải carbon, nước sử dụng và chất thải thông qua thiết kế thụ động, cải thiện vỏ công trình, nâng cao hiệu quả hệ thống kỹ thuật và lựa chọn vật liệu có tác động thấp hoặc khả năng tái chế cao [3, 49-52]. Tuy nhiên, tối ưu hóa một chỉ tiêu hoặc bộ phận công trình có thể chuyển tác động sang giai đoạn khác và bỏ qua các hệ quả kinh tế, xã hội. Vì vậy, giảm tác động môi trường là nền tảng nhưng không đại diện cho toàn bộ DfS.

Tư duy vòng đời. Ranh giới phân tích được mở rộng từ một giai đoạn riêng lẻ sang khai thác nguyên liệu, sản xuất vật liệu, thi công, vận hành, bảo trì, cải tạo và kết thúc vòng đời. LCA và đánh giá chi phí vòng đời hỗ trợ nhận diện các điểm nóng, so sánh phương án và xem xét đồng thời carbon hàm chứa với carbon vận hành [3, 22, 48, 53, 54]. Thiết kế để thích ứng, tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế tiếp tục mở rộng phạm vi sang khả năng duy trì giá trị của cấu kiện và vật liệu [23]. BIM có thể hỗ trợ kết nối dữ liệu thiết kế với LCA, nhưng hiệu quả phụ thuộc vào chất lượng và khả năng tương thích của dữ liệu [35]. Những công cụ và chiến lược này hỗ trợ DfS nhưng không đồng nhất với DfS.

Thiết kế tích hợp và phối hợp đa bên. Cách tiếp cận này xem tính bền vững là kết quả của quá trình hình thành, đánh giá và lựa chọn phương án, thay vì chỉ là thuộc tính của phương án cuối cùng. Việc đưa mục tiêu bền vững vào giai đoạn sớm đòi hỏi sự phối hợp giữa chủ đầu tư, kiến trúc sư, kỹ sư, nhà thầu, đơn vị vận hành, người sử dụng và cơ quan quản lý [14]. Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí có thể hỗ trợ cân nhắc đồng thời chi phí, môi trường, an toàn, khả năng chống chịu và mục tiêu xã hội [6, 13]. Tuy nhiên, việc quy đổi tính bền vững thành hệ thống chỉ số có thể đơn giản hóa những giá trị khó định lượng; vì vậy, công cụ đánh giá cần được đặt trong quá trình thảo luận minh bạch về mục tiêu, tiêu chí và sự đánh đổi [55].

Marinelli [4] sử dụng khung dựa trên DfX để đưa các yêu cầu bền vững vào quy hoạch dự án hạ tầng. Trường hợp này minh họa khả năng

chuyển hóa mục tiêu bền vững thành yêu cầu thiết kế, nhưng không hàm ý DfX đồng nhất với DfS. Trong nghiên cứu này, DfX được xem là một logic hoặc tập hợp phương pháp có thể hỗ trợ thực hiện DfS.

Định hướng hệ thống. Cách tiếp cận này đặt công trình trong mạng lưới tương tác giữa hạ tầng, năng lượng, hệ sinh thái, thể chế, công nghệ và hành vi người sử dụng. Công trình vừa là tập hợp các hệ thống tương tác, vừa là một bộ phận của hệ thống xã hội - kỹ thuật ở quy mô khu vực hoặc đô thị [15, 47]. Theo đó, phạm vi thiết kế được mở rộng sang quan hệ giữa công trình với môi trường xung quanh, các hệ thống cung cấp dịch vụ và cơ chế quản trị; khả năng thích ứng và chống chịu cũng trở thành những nội dung quan trọng [13, 56]. Tuy nhiên, bằng chứng thực chứng ở cấp hệ thống còn hạn chế hơn đáng kể so với bằng chứng về vật liệu, năng lượng và vòng đời công trình.

Bảng 3. Các cách tiếp cận DfS được nhận diện trong tập tài liệu phân tích trong ngành xây dựng.

Cách tiếp cận	Trọng tâm và biểu hiện chủ yếu	Nguồn bằng chứng tiêu biểu	Giới hạn nếu áp dụng riêng lẻ
Giảm tác động môi trường	Giảm năng lượng, vật liệu, carbon, nước và chất thải; thiết kế thụ động và vật liệu tác động thấp	[3, 49, 52]	Có thể tối ưu cục bộ và chuyển tác động sang giai đoạn khác
Tư duy vòng đời	LCA, chi phí vòng đời, thiết kế để thích ứng, tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế	[22, 23, 48, 53]	Có thể thiên về các chỉ số định lượng và chưa xử lý đầy đủ xung đột lợi ích
Thiết kế tích hợp và phối hợp đa bên	Tham gia sớm, phối hợp chuyên ngành, đánh giá đa tiêu chí và chia sẻ thông tin	[6, 13, 14]	Phụ thuộc vào cơ chế phối hợp, quyền quyết định và chất lượng thông tin
Định hướng hệ thống	Quan hệ giữa công trình, hạ tầng, con người, thể chế và môi trường; thích ứng và chống chịu	[13, 15, 47]	Bằng chứng thực chứng còn hạn chế; phạm vi can thiệp khó xác định và kiểm soát

5.2. Những đặc điểm của môi trường xây dựng ảnh hưởng đến DfS

Việc thực hiện bốn cách tiếp cận trên chịu ảnh hưởng của năm đặc điểm chính của môi trường xây dựng.

Bản chất dự án và tính đơn chiếc. Mỗi công trình thường được hình thành như một dự án tạm thời với các điều kiện riêng về địa điểm, công năng, kỹ thuật, pháp lý và tài chính. Ngay cả khi sử dụng cấu kiện tiêu chuẩn hoặc phương pháp chế tạo sẵn, cấu hình cuối cùng và điều kiện triển khai vẫn mang tính đặc thù [4, 57]. Vì vậy, các nguyên tắc và dữ liệu có thể được tái sử dụng, nhưng giải pháp DfS cần được hiệu chỉnh theo từng dự án.

Vòng đời kéo dài và nhiều bất định. Công trình và hạ tầng tồn tại trong nhiều thập kỷ, làm gia tăng ảnh hưởng của quyết định thiết kế ban đầu cũng như bất định về khí hậu, công nghệ, nhu cầu sử dụng, yêu cầu pháp lý và chi phí vận hành [5, 48]. Do đó, DfS cần xem xét khả năng bảo trì, thay thế, chuyển đổi công năng, nâng cấp và tháo dỡ. Tuổi thọ dài cũng không tự động đồng nghĩa với bền vững nếu công trình trở nên lạc hậu hoặc tiếp tục tiêu thụ nhiều tài nguyên.

Cấu trúc đa bên và phân tán quyền quyết định. Quyền quyết định và trách nhiệm được phân bổ giữa nhiều chủ thể và thay đổi theo các giai đoạn dự án. Chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu, nhà cung cấp, đơn vị vận hành, cơ quan quản lý và người sử dụng có thể theo đuổi những mục tiêu và thời hạn lợi ích khác nhau [13, 14]. Hiệu quả của DfS vì vậy phụ thuộc vào thời điểm tham gia, quyền tiếp cận thông tin và cơ chế xử lý sự đánh đổi giữa các bên.

Sự phụ thuộc vào điều kiện địa phương. Công trình gắn với địa điểm và chịu ảnh hưởng của khí hậu, địa hình, nguồn vật liệu, hạ tầng, pháp luật và điều kiện văn hóa–xã hội. Các tiêu chí bền vững cần được lựa chọn phù hợp với loại hình dự án và bối cảnh địa phương [58]. Chẳng hạn, điều kiện khí hậu có thể làm thay đổi tương quan giữa tác động của vật liệu, yêu cầu cách nhiệt và năng lượng vận hành [54]. Các bộ tiêu chí chung do đó chỉ cung cấp cơ sở tham chiếu, không thay thế đánh giá theo địa điểm.

Phân mảnh và gián đoạn thông tin vòng đời. Dữ liệu về yêu cầu, thiết kế, vật liệu, thi công và vận hành thường do các tổ chức khác nhau tạo lập và chuyển giao. Việc phải nhập lại dữ liệu hoặc trình bày thông tin không phù hợp với nhiệm vụ thiết kế làm tăng chi phí, sai lệch và nguy cơ mất thông tin [5, 35]. BIM và các nền tảng dữ liệu có thể hỗ trợ tích hợp thông tin nhưng không tự khắc phục sự phân mảnh về tổ chức, trách nhiệm và quy trình.

Bảng 4 khái quát sự khác biệt điển hình giữa điều kiện thực hiện DfS trong thiết kế sản phẩm và môi trường xây dựng. So sánh này chỉ thể hiện xu hướng chung, không hàm ý mọi sản phẩm công nghiệp đều có vòng đời ngắn, ít bên liên quan hoặc được quản lý tập trung.

5.3. Bối cảnh nghiên cứu tại Việt Nam

Rà soát bổ trợ các công bố trong nước cho thấy những nội dung liên quan đến DfS trong xây dựng chủ yếu được nghiên cứu thông qua kiến trúc bền vững, hiệu quả năng lượng, lựa chọn vật liệu, thiết kế nội thất bền vững, tái sử dụng thích ứng, mô-đun hóa và tổ chức không gian phù hợp với điều kiện khí hậu–văn hóa [16, 17, 29, 32]. Các công

bố này cung cấp bằng chứng cho từng thành phần của DfS nhưng chưa cho thấy DfS đã hình thành như một hướng nghiên cứu thống nhất tại Việt Nam.

Đặc biệt, bằng chứng về cách chuyển hóa mục tiêu bền vững thành tiêu chí lựa chọn phương án, phối hợp đa bên và quản lý thông tin xuyên suốt vòng đời công trình còn hạn chế. Do việc rà soát tài liệu tiếng Việt chỉ mang tính bổ trợ, kết quả này được sử dụng để mô tả bối cảnh, không đại diện cho một tổng quan hệ thống độc lập về DfS tại Việt Nam.

Như vậy, khác biệt khi áp dụng DfS vào môi trường xây dựng không chỉ nằm ở quy mô hoặc loại hình đối tượng thiết kế mà còn ở những điều kiện chi phối quá trình hình thành và duy trì quyết định bền vững. Bốn cách tiếp cận và năm đặc điểm được phân tích trong mục này là cơ sở để Mục 6 xác định phạm vi tiếp cận và Mục 7 xây dựng cách hiểu tổng hợp về DfS trong môi trường xây dựng.

Bảng 4. So sánh điều kiện thực hiện DfS trong thiết kế sản phẩm và môi trường xây dựng.

Khía cạnh	DfS định hướng sản phẩm	DfS trong môi trường xây dựng	Cơ sở diễn giải
Đối tượng thiết kế	Sản phẩm, linh kiện hoặc hệ thống sản phẩm–dịch vụ	Công trình, hạ tầng và quan hệ với hệ thống đô thị	[8, 15]
Tính chất tạo lập	Thường có khả năng tiêu chuẩn hóa và lặp lại tương đối cao	Mang tính dự án, đơn chiếc và phụ thuộc địa điểm	[4, 57]
Phạm vi thời gian	Thường ngắn hơn và dễ xác định chu kỳ thay thế	Vòng đời dài, nhiều thay đổi và bất định	[5, 48]
Cấu trúc bên liên quan	Thường tập trung hơn quanh nhà sản xuất, chuỗi cung ứng và khách hàng	Nhiều tổ chức tham gia và thay đổi theo từng giai đoạn dự án	[13, 14, 55]
Sự phụ thuộc bối cảnh	Có thể được phân phối và sử dụng trong nhiều địa điểm	Gắn cố định với điều kiện khí hậu, pháp lý, hạ tầng và văn hóa địa phương	[54, 58]
Dòng thông tin	Có khả năng được quản lý tương đối tập trung	Phân tán giữa thiết kế, thi công, vận hành và nhiều chủ thể	[5, 35]
Cấu trúc quyết định	Thường gắn với quy trình phát triển sản phẩm và quyết định của doanh nghiệp	Gắn với cơ chế dự án, hợp đồng, quy định và phối hợp đa bên	[4, 14]
Khả năng thích ứng	Có thể thực hiện thông qua thay đổi phiên bản hoặc thay thế sản phẩm	Cần được dự liệu từ thiết kế do chi phí cải tạo hoặc thay thế lớn	[23, 48]

6. Phạm vi tiếp cận của DfS trong môi trường xây dựng

Trong khi Mục 5 nhận diện các cách thức mà DfS được tiếp cận trong văn liệu xây dựng, Mục 6 xác định ranh giới phân tích của khái niệm này. Hai nội dung có liên quan nhưng không đồng nhất: "cách tiếp cận" phản ánh logic chủ đạo của nghiên cứu, còn "phạm vi" trả lời các câu hỏi DfS can thiệp vào đối tượng nào, xem xét những giai đoạn nào, theo đuổi mục tiêu gì và các quyết định được hình thành như thế nào.

Trên cơ sở mã hóa 43 tài liệu liên quan trực tiếp đến xây dựng, nghiên cứu xác định bốn chiều phạm vi gồm: (1) đối tượng thiết kế; (2) vòng đời công trình; (3) mục tiêu bền vững; và (4) quá trình ra quyết định. Các chiều này được hình thành bằng cách nhóm các mã về quy mô đối tượng, giai đoạn vòng đời, loại kết quả bền vững, công cụ đánh giá, chủ thể tham gia và thông tin hỗ trợ quyết định. Chúng không phải là bốn giai đoạn phát triển tuần tự mà là bốn chiều giao cắt: một nghiên cứu có thể xem xét vật liệu ở nhiều giai đoạn vòng đời, theo đuổi nhiều mục tiêu và sử dụng nhiều cơ chế hỗ trợ quyết định. Các nội dung, biểu hiện, hướng mở rộng và nguồn bằng chứng tiêu biểu của bốn chiều phạm vi này được tổng hợp trong Bảng 5.

Bảng 5. Các chiều phạm vi của DfS trong môi trường xây dựng.

Chiều phạm vi	Nội dung được xem xét	Biểu hiện trong tập tài liệu nghiên cứu xây dựng	Hướng mở rộng được nhận diện	Nguồn bằng chứng tiêu biểu
Theo đối tượng	Vật liệu, cấu kiện, công trình, hạ tầng, khu vực đô thị và quan hệ kỹ thuật–xã hội	Từ lựa chọn vật liệu đến thiết kế công trình và đánh giá hệ thống hạ tầng	Mở rộng từ thành phần riêng lẻ sang quan hệ giữa nhiều cấp độ; bằng chứng ở cấp đô thị chủ yếu còn mang tính khái niệm	[15, 47, 59]
Theo vòng đời	Sản xuất vật liệu, thiết kế, thi công, vận hành, bảo trì, cải tạo, tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế	LCA, đánh giá chi phí vòng đời, thiết kế để thích ứng, tháo dỡ và thu hồi vật liệu	Mở rộng từ hiệu suất vận hành sang tác động toàn vòng đời và các vòng lặp tuần hoàn	[22, 23, 35]
Theo mục tiêu	Môi trường, kinh tế, xã hội, sức khỏe, khả năng thích ứng và	Năng lượng, carbon, chi phí, sức khỏe người sử dụng, giá	Mở rộng từ một mục tiêu môi trường riêng lẻ sang đánh giá đa	[13-15]

Chiều phạm vi	Nội dung được xem xét	Biểu hiện trong tập tài liệu nghiên cứu xây dựng	Hướng mở rộng được nhận diện	Nguồn bằng chứng tiêu biểu
	chống chịu	trị xã hội và khả năng duy trì chức năng	mục tiêu; mức độ tích hợp giữa các mục tiêu còn khác nhau	
Theo quá trình ra quyết định	Xác lập tiêu chí, tạo lập và so sánh phương án, phối hợp các bên, sử dụng dữ liệu và phản hồi kết quả	LCA, đánh giá đa tiêu chí, quy trình thiết kế tích hợp và tích hợp BIM–LCA	Mở rộng từ đánh giá hiệu suất sau thiết kế sang hỗ trợ lựa chọn phương án ở giai đoạn sớm	[5, 6, 35]

6.1. Phạm vi theo vòng đời

Theo chiều vòng đời, DfS mở rộng ranh giới thiết kế từ giai đoạn hình thành phương án sang các tác động phát sinh trước, trong và sau quá trình sử dụng công trình. Najjar và cộng sự [35] phân chia vòng đời công trình thành các giai đoạn trước xây dựng, xây dựng và sau xây dựng, bao quát từ khai thác nguyên liệu và sản xuất vật liệu đến vận hành, phá dỡ và tái chế. Zabalza và cộng sự [22] cũng nhấn mạnh sự cần thiết của các công cụ đánh giá và hỗ trợ quyết định để nhận diện cơ hội cải thiện môi trường trong toàn bộ vòng đời công trình.

Trong giai đoạn trước xây dựng, các quyết định về loại vật liệu, nguồn cung, phương án kết cấu và quy mô sử dụng vật liệu ảnh hưởng đến năng lượng và carbon hàm chứa. Trong giai đoạn thiết kế và thi công, DfS liên quan đến khả năng thi công, kiểm soát chất thải và chuyển hóa các mục tiêu bền vững thành yêu cầu kỹ thuật. Trong giai đoạn vận hành, phạm vi được mở rộng sang tiêu thụ năng lượng, bảo trì, sức khỏe và tiện nghi của người sử dụng, và khả năng duy trì hiệu suất theo thời gian [3, 15].

Ở giai đoạn sau sử dụng, thiết kế để thích ứng, tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế giúp duy trì giá trị của công trình, cấu kiện và vật liệu trong các chu kỳ tiếp theo [23]. Tuy nhiên, tuổi thọ dài của công trình làm cho các điều kiện cuối vòng đời khó dự báo, trong khi thông tin về vật liệu và quyết định thiết kế có thể bị thất lạc qua nhiều lần chuyển giao. Vì vậy, phạm vi vòng đời của DfS không chỉ là mở rộng số lượng giai đoạn được đánh giá mà còn đặt ra yêu cầu duy trì mục tiêu và thông tin đủ lâu để hỗ trợ các quyết định trong tương lai.

Các giai đoạn vòng đời cũng không nên được hiểu như những phần độc lập. Quyết định giảm năng lượng vận hành có thể làm tăng lượng vật liệu hoặc carbon hàm chứa; kéo dài tuổi thọ có thể làm giảm nhu cầu thay thế nhưng đồng thời duy trì một hệ thống đã lạc hậu. Do đó, giá trị của tư duy vòng đời nằm ở khả năng làm rõ sự đánh đổi và tránh chuyển dịch tác động giữa các giai đoạn, thay vì mặc nhiên coi mọi giải pháp kéo dài tuổi thọ hoặc tái chế là bền vững.

6.2. Phạm vi theo mục tiêu bền vững

Theo chiều mục tiêu, các nghiên cứu ban đầu trong xây dựng tập trung mạnh vào năng lượng, vật liệu, carbon và chất thải. tập tài liệu nghiên cứu gần đây thể hiện phạm vi rộng hơn, trong đó các mục tiêu môi trường được xem xét cùng chi phí, lợi ích xã hội, sức khỏe người sử dụng và khả năng duy trì chức năng của công trình. Goubran và Cucuzzella (2019) cho rằng việc tích hợp các Mục tiêu Phát triển Bền vững vào dự án công trình đòi hỏi xem xét đồng thời các chiều môi trường, xã hội và kinh tế, thay vì chỉ lựa chọn những mục tiêu dễ lượng hóa.

Khía cạnh xã hội trong môi trường xây dựng bao gồm sức khỏe, tiện nghi, khả năng tiếp cận, sự tham gia và mức độ phù hợp của công trình với nhu cầu của người sử dụng. Clements-Croome [15] cho thấy hiệu suất của công trình không chỉ được đánh giá bằng năng lượng mà còn liên quan đến chất lượng môi trường trong nhà, sức khỏe và hiệu quả hoạt động của con người. Các mục tiêu này có thể khó quy đổi thành một chỉ số chung nhưng không vì thế mà ít quan trọng hơn các chỉ tiêu kỹ thuật.

Khả năng thích ứng và chống chịu tiếp tục mở rộng phạm vi mục tiêu trong bối cảnh biến đổi khí hậu và bất định dài hạn. Mosalam và cộng sự [13] đề xuất xem xét tính bền vững và khả năng chống chịu trong cùng một khung vòng đời đối với hạ tầng dân dụng. Tuy nhiên, hai khái niệm không hoàn toàn đồng nhất: tính bền vững tập trung vào kết quả dài hạn trên nhiều chiều, trong khi khả năng chống chịu nhấn mạnh năng lực chuẩn bị, hấp thụ, phục hồi và thích ứng trước gián đoạn.

Bằng chứng trong tập tài liệu nghiên cứu không cho thấy mọi nghiên cứu DfS đều tích hợp đầy đủ các mục tiêu trên. Nhiều nghiên cứu vẫn tập trung vào một hoặc hai nhóm chỉ tiêu, đặc biệt là môi trường và kinh tế. Vì vậy, xu hướng mở rộng phạm vi mục tiêu cần được hiểu là sự gia tăng số lượng và tính đa dạng của mục tiêu được xem xét, không phải bằng chứng cho thấy các mục tiêu này đã được cân bằng thành công trong thực hành.

6.3. Phạm vi theo quá trình ra quyết định

Chiều thứ tư chuyển trọng tâm từ nội dung của phương án sang cách thức phương án được hình thành, đánh giá và lựa chọn. Theo chiều này, DfS bao gồm việc xác lập mục tiêu, lựa chọn tiêu chí, tạo lập phương án, đánh giá sự đánh đổi, phối hợp các chủ thể và sử dụng thông tin để phản hồi vào thiết kế. Đây là cơ chế liên kết ba chiều còn lại: đối tượng nào được xem xét, giai đoạn vòng đời nào được đưa vào và mục tiêu nào được ưu tiên đều phụ thuộc vào cấu trúc của quá trình ra quyết định.

Trong các dự án hạ tầng, đánh giá tính bền vững thường được đặt thành bài toán lựa chọn hoặc xếp hạng các phương án theo nhiều tiêu chí [6]. Các phương pháp đánh giá đa tiêu chí và phân tích hữu dụng có thể hỗ trợ xử lý đồng thời các yếu tố môi trường, kinh tế, xã hội và kỹ thuật [13]. Tuy nhiên, kết quả phụ thuộc vào cách lựa chọn tiêu chí, xác định trọng số, chất lượng dữ liệu và chủ thể có quyền tham

gia đánh giá. Vì vậy, công cụ định lượng không thay thế việc làm rõ giá trị và sự đánh đổi giữa các bên liên quan.

LCA cung cấp thông tin về tác động môi trường của phương án, trong khi tích hợp BIM–LCA có thể giảm thao tác nhập lại dữ liệu và đưa phản hồi môi trường vào giai đoạn thiết kế sớm hơn [35]. Tuy nhiên, BIM trong trường hợp này là phương tiện tổ chức và trao đổi dữ liệu hỗ trợ quyết định, không phải bản thân DfS. Tương tự, Marinelli [4] sử dụng logic DfX để cấu trúc các yêu cầu và lựa chọn trong quy hoạch dự án hạ tầng; đây là một phương thức hỗ trợ tích hợp mục tiêu bền vững chứ không phải cơ sở để đồng nhất DfX với DfS.

Tập tài liệu nghiên cứu cũng chỉ ra khoảng cách giữa thông tin đánh giá và thực hành thiết kế. Acharya và Chakrabarti [5] nhận thấy nhà thiết kế có thể gặp khó khăn khi sử dụng các hướng dẫn DfE và báo cáo LCA do nội dung phức tạp, khó hiểu hoặc không phù hợp với thời gian ra quyết định. Điều này cho thấy quản trị thông tin trong DfS không chỉ là lưu trữ dữ liệu mà còn bao gồm việc chuyển hóa kết quả phân tích thành thông tin kịp thời, dễ hiểu và phù hợp với nhiệm vụ thiết kế.

Tập tài liệu được phân tích chưa cung cấp đủ bằng chứng để xem AI và Digital Twin là những thành tố phổ biến hoặc cốt lõi của DfS trong môi trường xây dựng. Vì vậy, các công nghệ này không được tích hợp vào các chiều phạm vi của DfS trong nghiên cứu hiện tại. Tương tự, bằng chứng về vai trò của môi trường dữ liệu chung trong duy trì thông tin phục vụ DfS xuyên suốt vòng đời vẫn còn hạn chế. Đây là những chủ đề cần được kiểm chứng trong các nghiên cứu tiếp theo.

Nhìn tổng thể, bốn chiều phạm vi cho thấy DfS trong môi trường xây dựng không được xác định chỉ bởi quy mô của đối tượng hoặc một danh mục giải pháp kỹ thuật. Khái niệm này đồng thời liên quan đến ranh giới vòng đời được xem xét, tập hợp mục tiêu được theo đuổi và cơ chế đưa thông tin cùng giá trị của các bên vào quyết định thiết kế. Kết quả phân tích này cung cấp cấu trúc bằng chứng cho cách hiểu DfS được đề xuất tại Mục 7; do đó, định nghĩa tổng hợp và các thành tố cốt lõi của khái niệm sẽ được trình bày ở mục tiếp theo, thay vì lặp lại tại đây.

7. Đề xuất cách hiểu DfS trong môi trường xây dựng

Các kết quả tại Mục 5 và Mục 6 cho thấy DfS trong môi trường xây dựng không thể được xác định chỉ bằng một loại giải pháp kỹ thuật, một công cụ đánh giá hoặc một đặc tính của công trình. Bốn cách tiếp cận được nhận diện tại Mục 5 phản ánh những logic khác nhau trong văn liệu, trong khi bốn chiều phạm vi tại Mục 6 làm rõ đối tượng, vòng đời, mục tiêu và quá trình ra quyết định mà DfS có thể bao quát. Tổng hợp hai nhóm kết quả này cho thấy điểm chung xuyên suốt của DfS nằm ở việc chuyển hóa các mục tiêu bền vững thành yêu cầu và lựa chọn thiết kế trong những điều kiện cụ thể của dự án xây dựng.

Việc chuyển hóa này đặc biệt quan trọng vì các mục tiêu bền vững ở cấp chiến lược không tự động trở thành hành động ở cấp dự án. Ugwu và cộng sự. [6] chỉ ra khó khăn trong việc chuyển các mục tiêu bền vững thành hành động cụ thể và nhấn mạnh nhu cầu sử dụng cách tiếp cận tổng thể để hỗ trợ quyết định. Goubran và Cucuzzella [14] cũng cho thấy việc tích hợp các Mục tiêu Phát triển Bền vững vào dự án công trình đòi hỏi kết nối mục tiêu tổng quát với ý định thiết kế, tiêu chí đánh giá và sự tham gia của các bên liên quan. Vì vậy, DfS nên được hiểu trước hết như một logic tổ chức quá trình ra quyết định, thay vì một nhãn gọi chung cho các công trình có hiệu suất môi trường cao.

Trên cơ sở tổng hợp và diễn giải các kết quả của nghiên cứu, bài báo đề xuất cách hiểu như sau:

DfS trong môi trường xây dựng là cách tiếp cận ra quyết định tích hợp, trong đó các mục tiêu bền vững về môi trường, xã hội, kinh tế và khả năng chống chịu được chuyển hóa thành yêu cầu và lựa chọn thiết kế đối với công trình và hạ tầng trong phạm vi vòng đời được xác định, thông qua sự phối hợp giữa các bên liên quan và việc sử dụng thông tin phù hợp với bối cảnh dự án.

Định nghĩa này không nhằm thay thế các định nghĩa DfS đã có bằng một định nghĩa mang tính phổ quát. Nó là kết quả tổng hợp theo bối cảnh, được xây dựng để làm rõ cách DfS có thể được nhận diện và phân tích trong môi trường xây dựng. So với thiết kế xanh hoặc thiết kế sinh thái vốn thường tập trung nhiều hơn vào giảm tác động môi trường của giải pháp, cách hiểu này nhấn mạnh thêm quá trình chuyển hóa mục tiêu, phạm vi vòng đời và điều kiện phối hợp để hình thành quyết định. So với DfS định hướng sản phẩm, định nghĩa này phản ánh rõ hơn bản chất dự án, vòng đời tài sản kéo dài, sự phân tán quyền quyết định và tính phụ thuộc địa điểm của công trình và hạ tầng.

7.1. Các thành tố của cách hiểu được đề xuất

Định nghĩa đề xuất gồm bốn thành tố có quan hệ tương hỗ: tích hợp đa mục tiêu; quá trình ra quyết định thiết kế; phạm vi vòng đời; và các điều kiện thực hiện liên quan đến bên tham gia, thông tin và bối cảnh. Các thành tố này không phải là một danh sách giải pháp, mà tạo thành cấu trúc để phân tích cách mục tiêu bền vững được đưa vào và duy trì trong quá trình phát triển công trình.

Tích hợp đa mục tiêu

Thành tố thứ nhất là việc xem xét đồng thời các mục tiêu môi trường, xã hội và kinh tế, cùng khả năng thích ứng hoặc chống chịu khi phù hợp với loại hình dự án. Trong tập tài liệu nghiên cứu, các mục tiêu này được thể hiện qua năng lượng, carbon, tài nguyên, chi phí vòng đời, sức khỏe người sử dụng, giá trị xã hội và khả năng duy trì chức năng trước các gián đoạn [13-15].

Tích hợp đa mục tiêu không có nghĩa mọi mục tiêu đều có thể được tối ưu hóa đồng thời. Giữa chi phí đầu tư, tác động môi trường, tiện nghi, khả năng chống chịu và lợi ích dài hạn có thể tồn tại những sự đánh đổi. Vì vậy, DfS đòi hỏi các mục tiêu, tiêu chí và ưu tiên phải được trình bày minh bạch, thay vì giả định rằng một phương án đạt hiệu suất tốt ở một chỉ tiêu sẽ mặc nhiên bền vững trên tất cả các chiều.

Quá trình ra quyết định thiết kế

Thành tố thứ hai xác định DfS là một quá trình ra quyết định thay vì tập hợp các thuộc tính kỹ thuật có sẵn. Quá trình này bao gồm xác lập vấn đề, chuyển hóa mục tiêu thành tiêu chí, tạo lập phương án, đánh giá sự đánh đổi, lựa chọn giải pháp và phản hồi kết quả vào thiết kế. Các

phương pháp đánh giá đa tiêu chí, LCA và đánh giá chi phí vòng đời có thể cung cấp bằng chứng cho lựa chọn phương án, nhưng không thay thế phán đoán thiết kế hoặc quá trình thương lượng giữa các bên [6, 13].

Việc tích hợp sớm có ý nghĩa đặc biệt vì khả năng thay đổi phương án thường lớn hơn ở giai đoạn ý tưởng, trong khi chi phí điều chỉnh tăng lên khi dự án đã chuyển sang các bước triển khai sau [5, 53]. Theo đó, DfS không chỉ đánh giá liệu phương án cuối cùng có "bền vững" hay không mà còn xem xét tính bền vững đã ảnh hưởng đến quá trình hình thành và lựa chọn phương án như thế nào.

Phạm vi vòng đời

Thành tố thứ ba là việc xác định và xem xét những giai đoạn vòng đời chịu ảnh hưởng của quyết định thiết kế. Tùy theo câu hỏi và đối tượng nghiên cứu, phạm vi có thể bao gồm sản xuất vật liệu, thi công, vận hành, bảo trì, cải tạo, tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế. LCA giúp nhận diện sự chuyển dịch tác động giữa các giai đoạn, trong khi thiết kế để thích ứng hoặc tháo dỡ giúp mở rộng khả năng duy trì giá trị của công trình, cấu kiện và vật liệu [22, 23, 35].

Việc đưa "vòng đời" vào định nghĩa không hàm ý rằng mọi nghiên cứu DfS phải phân tích với mức độ chi tiết như nhau toàn bộ vòng đời công trình. Yêu cầu quan trọng là nghiên cứu hoặc dự án phải xác định rõ ranh giới vòng đời được xem xét và không bỏ qua những giai đoạn có khả năng làm thay đổi kết luận về phương án.

Điều kiện thực hiện: phối hợp, thông tin và bối cảnh

Thành tố thứ tư liên quan đến các điều kiện để quyết định DfS có thể được hình thành và thực hiện. Quy trình thiết kế tích hợp hướng tới kết nối ý định và tri thức của các bên liên quan, trong khi việc quản lý thông tin tạo cơ sở cho đánh giá và chuyển giao quyết định giữa các giai đoạn [14, 15]. Trong môi trường xây dựng, các điều kiện này đặc biệt quan trọng do chủ thể tham gia thay đổi theo vòng đời và quyền quyết định được phân tán giữa nhiều tổ chức.

Thông tin trong DfS không chỉ bao gồm dữ liệu kỹ thuật mà còn gồm yêu cầu của chủ đầu tư, giá trị của người sử dụng, đặc điểm địa điểm, dữ liệu vật liệu, chi phí và kết quả đánh giá vòng đời. BIM có thể hỗ trợ kết nối dữ liệu hình học và vật liệu với LCA ở giai đoạn thiết kế [35], nhưng chỉ là một trong các công cụ thực hiện. BIM không phải điều kiện bắt buộc để một quá trình được coi là DfS, và bản thân việc sử dụng BIM cũng không bảo đảm kết quả bền vững.

Các công nghệ số mới nổi không được đưa vào định nghĩa vì vai trò của chúng chưa được xác lập đầy đủ trong tập tài liệu nghiên cứu. Các công nghệ này có thể hỗ trợ dự báo, giám sát và phản hồi trong tương lai, nhưng vai trò cụ thể cần được kiểm chứng bằng các nghiên cứu chuyên sâu hơn. Trên cơ sở bốn thành tố được phân tích trên, Bảng 6 tổng hợp cơ sở bằng chứng và hàm ý của từng thành tố đối với cách hiểu DfS trong môi trường xây dựng.

Bảng 6 cho thấy cách hiểu đề xuất không được hình thành từ một công cụ hoặc một dòng nghiên cứu riêng lẻ, mà là kết quả tổng hợp các bằng chứng về mục tiêu bền vững, quá trình ra quyết định, phạm vi vòng đời và điều kiện thực hiện.

Bảng 6. Cơ sở hình thành các thành tố của cách hiểu DfS được đề xuất.

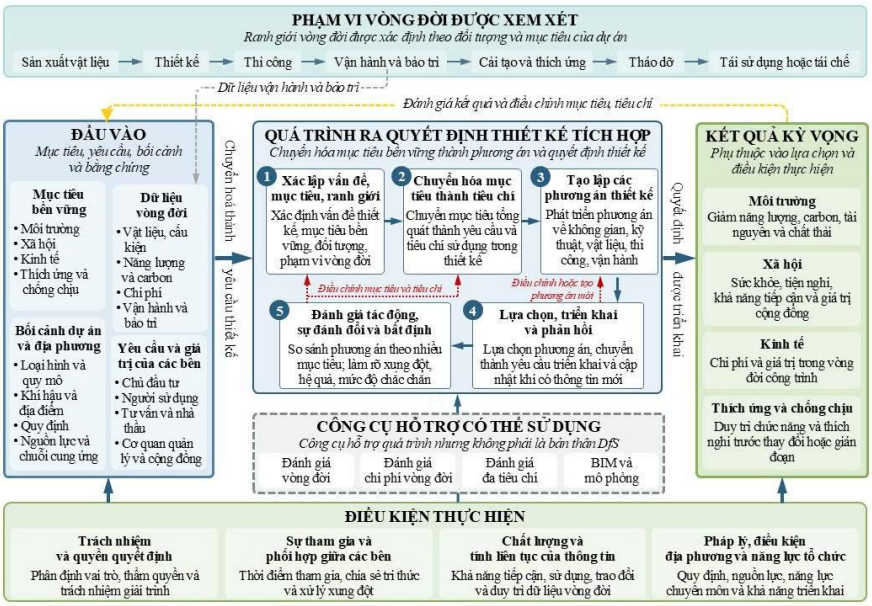
Thành tố	Kết quả tổng hợp từ tập tài liệu nghiên cứu	Nguồn bằng chứng tiêu biểu	Hàm ý đối với DfS trong môi trường xây dựng
Tích hợp đa mục tiêu	Các nghiên cứu mở rộng từ năng lượng và carbon sang chi phí, sức khỏe, giá trị xã hội và khả năng chống chịu	[13-15]	Phải công khai các mục tiêu và sự đánh đổi; không đánh đồng hiệu suất của một chỉ tiêu với tính bền vững tổng thể
Ra quyết định thiết kế	Mục tiêu bền vững cần được chuyển thành tiêu chí và phương án ở cấp dự án; đánh giá đa tiêu chí hỗ trợ lựa chọn	[5, 6, 53]	DfS được nhận diện qua ảnh hưởng của mục tiêu bền vững đến quá trình hình thành và lựa chọn phương án
Phạm vi vòng đời	Tác động được xem xét từ vật liệu và thi công đến vận hành, cải tạo, tháo dỡ và tái sử dụng	[22, 23, 35]	Phải xác định rõ ranh giới vòng đời và kiểm soát nguy cơ chuyển dịch tác động giữa các giai đoạn
Phối hợp, thông tin và bối cảnh	Kết quả phụ thuộc vào sự tham gia của các bên, khả năng sử dụng thông tin và đặc điểm của từng dự án	[14, 15, 35]	Công nghệ chỉ hỗ trợ; hiệu quả phụ thuộc vào trách nhiệm, quyền quyết định, chất lượng thông tin và điều kiện địa phương

7.2. DfS như một hệ thống ra quyết định tích hợp

Trên cơ sở bốn thành tố trên, DfS trong môi trường xây dựng có thể được mô tả như một hệ thống ra quyết định gồm bốn nhóm cấu phần: đầu vào, quá trình chuyển hóa, điều kiện thực hiện và kết quả kỳ vọng (Hình 2).

Đầu vào bao gồm mục tiêu bền vững, yêu cầu của các bên liên quan, dữ liệu vòng đời và điều kiện của dự án. Quá trình chuyển hóa bao gồm xác lập tiêu chí, tạo lập phương án, đánh giá sự đánh đổi, lựa chọn và phản hồi vào thiết kế. Điều kiện thực hiện bao gồm cơ cấu trách nhiệm, sự tham gia của các bên, chất lượng và khả năng trao đổi thông tin, yêu cầu pháp lý và năng lực tổ chức. Kết quả kỳ vọng được thể hiện qua hiệu suất môi trường, giá trị kinh tế, kết quả xã hội và khả năng thích ứng hoặc chống chịu của công trình.

Quan hệ giữa các cấu phần không hoàn toàn tuyến tính. Kết quả đánh giá có thể làm thay đổi mục tiêu, tiêu chí hoặc phương án; thay đổi yêu cầu của bên liên quan có thể làm thay đổi ranh giới vòng đời; và hạn chế dữ liệu có thể ảnh hưởng đến mức độ chắc chắn của quyết định.



Hình 2. DfS trong môi trường xây dựng như một hệ thống ra quyết định tích hợp.

(Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp [6, 8, 13, 14, 35], kết hợp với kết quả mã hóa của nghiên cứu)

7.3. Phạm vi đóng góp của cách hiểu đề xuất

Điểm đóng góp của cách hiểu trên không nằm ở việc phát hiện riêng lẻ các nguyên tắc vòng đời, đa mục tiêu hoặc thiết kế tích hợp, vì những nội dung này đã được đề cập trong văn liệu quốc tế. Đóng góp của nghiên cứu là liên kết các nguyên tắc đó với những điều kiện đặc thù của môi trường xây dựng và tổ chức chúng thành một cấu trúc có thể sử dụng để phân tích quá trình chuyển hóa mục tiêu bền vững thành quyết định thiết kế.

Cách hiểu đề xuất cũng cho phép phân biệt ba cấp độ thường bị trộn lẫn trong thảo luận về DfS: mục tiêu bền vững cần đạt được; quá trình ra quyết định để chuyển hóa mục tiêu; và công cụ hỗ trợ quá trình đó. Theo cách phân biệt này, giảm carbon hoặc nâng cao sức khỏe là mục tiêu; thiết kế tích hợp và đánh giá sự đánh đổi là quá trình; còn LCA, BIM hoặc phương pháp đánh giá đa tiêu chí là công cụ. Một dự án sử dụng công cụ kỹ thuật số hoặc đạt chứng nhận xanh chưa đủ để được xem là áp dụng DfS nếu các mục tiêu bền vững không thực sự ảnh hưởng đến phạm vi và lựa chọn thiết kế.

Do nghiên cứu mang tính tổng quan khái niệm, khung đề xuất chưa phải là mô hình nhân quả đã được kiểm định thực nghiệm. Các mối quan hệ trong Hình 2 là kết quả tổng hợp và diễn giải từ tập tài liệu nghiên cứu, cần được kiểm tra tiếp thông qua nghiên cứu tình huống, phỏng vấn các bên liên quan hoặc áp dụng thử trong các loại hình dự án và điều kiện địa phương khác nhau.

8. Kết luận

Nghiên cứu đã hệ thống hóa sự phát triển của DfS từ các tiếp cận giảm tác động môi trường ở cấp độ sản phẩm sang tư duy tích hợp, vòng đời và định hướng hệ thống. Phân tích tài liệu cho thấy DfS trong môi trường xây dựng được thể hiện qua bốn cách tiếp cận chính: giảm tác động môi trường; tư duy vòng đời; thiết kế tích hợp và phối hợp đa bên; và định hướng hệ thống. Phạm vi của DfS đồng thời được xác định theo bốn chiều gồm đối tượng thiết kế, vòng đời công trình, mục tiêu bền vững và quá trình ra quyết định.

So với DfS định hướng sản phẩm, DfS trong môi trường xây dựng chịu ảnh hưởng rõ rệt của tính chất dự án và tính đơn chiếc, vòng đời tài sản kéo dài, cấu trúc đa bên, sự phụ thuộc vào điều kiện địa phương và tình trạng phân mảnh thông tin. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất hiểu DfS trong môi trường xây dựng là cách tiếp cận ra quyết định tích hợp, trong đó các mục tiêu môi trường, xã hội, kinh tế và khả năng chống chịu được chuyển hóa thành yêu cầu và lựa chọn thiết kế trong phạm vi vòng đời xác định, thông qua sự phối hợp giữa các bên và việc sử dụng thông tin phù hợp với bối cảnh dự án. Đóng góp của nghiên cứu không phải là đề xuất một lý thuyết DfS hoàn toàn mới, mà là tái cấu trúc các nguyên tắc hiện có thành một khung diễn giải phù hợp hơn với đặc thù của công trình và hạ tầng.

Nghiên cứu còn một số hạn chế. Tập tài liệu phân tích quốc tế được thu thập chủ yếu từ Scopus và truy vết lùi; rà soát tài liệu tiếng Việt chỉ mang tính bổ trợ; còn khung đề xuất chưa được kiểm chứng thực nghiệm. Các nghiên cứu tiếp theo cần kiểm tra khả năng áp dụng của khung trong những loại hình dự án và điều kiện địa phương khác nhau, đồng thời làm rõ vai trò của các công cụ đánh giá, quản lý thông tin và hỗ trợ ra quyết định trong việc chuyển hóa mục tiêu bền vững thành lựa chọn thiết kế.

Tài liệu tham khảo

[1]. UNEP, "Global status report for buildings and construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector," United Nations Environment Programme, Nairobi, 978-92-807-4131-5, 2024. Available: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095

[2]. WGBC, "Beyond the business case: Why you can't afford not to invest in a sustainable built environment," World Green Building Council, London, 2021. [Online]. Available: https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/08/WorldGBC-Beyond-the-Business-Case.pdf

[3]. J. Kneifel, E. O'Rear, D. Webb, and C. O'Fallon, "An exploration of the relationship between improvements in energy efficiency and life-cycle energy and carbon emissions using the BIRDS low-energy residential database," Energy and Buildings, vol. 160, pp. 19-33, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.030.

[4]. M. Marinelli, "A DfX-based approach for incorporating sustainability in infrastructure project planning," Built Environment Project and Asset Management, vol. 12, no. 1, pp. 20-37, 2022, doi: 10.1108/BEPAM-05-2020-0083.

[5]. S. Acharya and A. Chakrabarti, "A conceptual tool for environmentally benign design: Development and evaluation of a proof of concept," Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM, vol. 34, no. 1, pp. 30-44, 2020, doi: 10.1017/S0890060419000313.

[6]. O. O. Ugwu, M. M. Kumaraswamy, A. Wong, and S. T. Ng, "Sustainability appraisal in infrastructure projects (SUSAIP): Part 1. Development of indicators and computational methods," Automation in Construction, vol. 15, no. 2, pp. 239-251, 2006, doi: 10.1016/j.autcon.2005.05.006.

[7]. V. Lofthouse and T. Bhamra, Design for sustainability: a practical approach. Gower Publishing, Ltd., 2012.

[8]. F. Ceschin and I. Gaziulusoy, "Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions," Design Studies, vol. 47, pp. 118-163, 2016, doi: 10.1016/j.destud.2016.09.002.

[9]. C. Vezzoli and E. Manzini, Design for environmental sustainability. Springer, 2008.

[10]. J. R. Fiksel, Design for environment: creating eco-efficient products and processes. McGraw-Hill, 1996.

[11]. A. I. Gaziulusoy and H. Brezet, "Design for system innovations and transitions: A conceptual framework integrating insights from sustainability science and theories of system innovations and transitions," Journal of Cleaner Production, vol. 108, pp. 558-568, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.066.

[12]. R. J. Hernandez, "Sustainable product-service systems and circular economies," Sustainability, vol. 11, no. 19, 2019, Art no. 5383, doi: 10.3390/su11195383.

[13]. K. M. Mosalam, U. Alibrandi, H. Lee, and J. Armengou, "Performance-based engineering and multi-criteria decision analysis for sustainable and resilient building design," Structural Safety, vol. 74, pp. 1-13, 2018, doi: 10.1016/j.strusafe.2018.03.005.

[14]. S. Goubran and C. Cucuzzella, "Integrating the sustainable development goals in building projects," Journal of Sustainability Research, vol. 1, no. 2, 2019, Art no. e190010, doi: 10.20900/jsr20190010.

[15]. D. Clements-Croome, "Sustainable intelligent buildings for people: A review," Intelligent Buildings International, vol. 3, no. 2, pp. 67-86, 2011, doi: 10.1080/17508975.2011.582313.

[16]. A. Hoàng, "Tối ưu hoá thiết kế nhà ở xã hội nhằm giảm giá thành và phát triển bền vững," Tạp chí Kiến trúc, vol. 3.2016, 2016.

[17]. V. C. Lê, "Thiết kế nội thất bền vững lý thuyết và thực tiễn," Tạp chí Kiến trúc, vol. 10.2015, 2015.

[18]. P. A. Nguyễn, "Đào tạo thiết kế hướng tới kiến trúc bền vững," Tạp chí khoa học Kiến trúc và Xây dựng, vol. 61, no. 8.2025, pp. 33-39, 2025.

[19]. V. Papanek, Design for the real world. Thames and Hudson London, 1972.

[20]. S. Guy and G. Farmer, "Reinterpreting sustainable architecture: the place of technology," Journal of Architectural Education, vol. 54, no. 3, pp. 140-148, 2001, doi: 10.1162/10464880152632451.

[21]. C. Luttropp and J. Lagerstedt, "EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development," Journal of Cleaner Production, vol. 14, no. 15-16, pp. 1396-1408, 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.11.022.

[22]. I. Zabalza, S. Scarpellini, A. Aranda, E. Llera, and A. Jáñez, "Use of LCA as a tool for building ecodesign. A case study of a low energy building in Spain," Energies, vol. 6, no. 8, pp. 3901-3921, 2013, doi: 10.3390/en6083901.

[23]. F. P. R. Marino, F. Lembo, and C. Di Lucchio, "The circular design for a school in conditioned quercus cerris hardwood glulam," Vitruvio, vol. 6, no. 1, pp. 72-91, 2021, doi: 10.4995/vitruvio-ijats.2021.15403.

[24]. E. Manzini and C. Vezzoli, "A strategic design approach to develop sustainable product service systems: examples taken from the 'environmentally friendly innovation' Italian prize," Journal of Cleaner Production, vol. 11, no. 8, pp. 851-857, 2003, doi: 10.1016/S0959-6526(02)00153-1.

[25]. R. J. Torraco, "Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples," Human Resource Development Review, vol. 4, no. 3, pp. 356-367, 2005.

[26]. H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," Journal of Business Research, vol. 104, pp. 333-339, 2019.

[27]. Q. Đ. Nguyễn, "Tính bền vững trong thiết kế Kiến trúc và Đô thị," Tạp chí Kiến trúc, no. 04, 2014. [Online]. Available: https://www.tapchikientruc.com.vn/chuyen-muc/phat-trien-ben-vung/tinh-ben-vung-trong-thiet-ke-kien-truc-va-thi.html.

[28]. D. T. Nguyễn, "Kiến trúc trường học vùng núi phía Bắc Việt Nam: Thực trạng và định hướng phát triển bền vững," Tạp chí Xây dựng, no. 04, pp. 131-136, 2025. [Online]. Available: https://tapchixaydung.vn/kien-truc-truong-hoc-vung-nui-phia-bac-viet-nam-thuc-trang-va-dinh-huong-phat-trien-ben-vung-20201224000030637.html.

[29]. T. M. C. Võ, "Xu hướng tái sử dụng thích ứng: Thực trạng và giải pháp thiết kế nội thất các công trình hiện hữu tại Thành phố Hồ Chí Minh," Tạp chí Khoa học & Công nghệ - Đại học Nguyễn Tất Thành, vol. 8, no. 4, pp. 45-52, 2025, doi: 10.55401/1vxbmx14.

[30]. T. B. Phạm and T. Q. Nguyễn, "Phân tích các giải pháp Thiết kế định hướng xuất sắc (DfX) đối với mục tiêu giảm khí thải carbon trong ngành Xây dựng," Xây dựng & Đô thị, no. 102, pp. 65-69, 2025.

[31]. M. T. Bùi, "Số hóa tri thức và thực hành thiết kế bền vững: Mô hình đào tạo liên ngành trong bối cảnh Việt Nam," Tạp chí Khoa học Trường Đại học Mở Hà Nội, no. 8A, pp. 207-215, 2025, doi: 10.59266/houjs.2025.872.

[32]. T. B. L. Nguyễn and T. T. H. Đỗ, "Thiết kế bền vững trong sự phát triển công nghệ hiện nay," Tạp chí khoa học - Viện Đại học Mở Hà Nội, vol. 64, no. 2, pp. 70-74, 2020.

[33]. V. Papanek, Design for the Real World; Human Ecology and Social Change, 2nd edition ed. Chicago: Academy Chicago Publishers, 1985.

[34]. M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann, and M. Traverso, "Towards life cycle sustainability assessment," Sustainability, vol. 2, no. 10, pp. 3309-3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309

[35]. M. Najjar, K. Figueiredo, M. Palumbo, and A. Haddad, "Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an

early stage of designing a typical office building," Journal of Building Engineering, vol. 14, pp. 115-126, 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.10.005.

[36]. M. R. M. Crul and J. C. Diehl, Design for sustainability: A practical approach for developing economies, 1 ed. Paris, France: United Nations Environment Programme (UNEP) (in English), 2006.

[37]. C. Montana-Hoyos and C. Fiorentino, "Bio-utilization, bio-inspiration, and bio-affiliation in design for sustainability: Biotechnology, biomimicry, and biophilic design," International Journal of Designed Objects, vol. 10, no. 3, pp. 1-18, 2016, doi: 10.18848/2325-1379/CGP/v10i03/1-18.

[38]. O. K. Mont, "Clarifying the concept of product–service system," Journal of Cleaner Production, vol. 10, no. 3, pp. 237-245, 2002, doi: 10.1016/S0959-6526(01)00039-7.

[39]. A. Tukker, "Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet," Business strategy and the environment, vol. 13, no. 4, pp. 246-260, 2004, doi: 10.1002/bse.414.

[40]. B. C. McLellan, G. D. Corder, D. Giurco, and S. Green, "Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations–Review and analysis of current approaches," Journal of Cleaner Production, vol. 17, no. 16, pp. 1414-1425, 2009.

[41]. K. W. M. Siu and J. X. Xiao, "Public facility design for sustainability: Participatory action research on household recycling in Hong Kong," Action Research, vol. 18, no. 4, pp. 448-468, 2020, doi: 10.1177/1476750317698027.

[42]. J. X. Xiao and K. W. M. Siu, "Challenges in food waste recycling in high-rise buildings and public design for sustainability: A case in Hong Kong," Resources, Conservation and Recycling, vol. 131, pp. 172-180, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.007.

[43]. F. W. Geels, "From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory," Research Policy, vol. 33, no. 6-7, pp. 897-920, 2004, doi: 10.1016/j.respol.2004.01.015.

[44]. R. Wasserbaur and T. Sakao, "Conceptualising design fixation and design limitation and quantifying their impacts on resource use and carbon emissions," Sustainability, vol. 12, no. 19, 2020, Art no. 8104, doi: 10.3390/su12198104.

[45]. T. Irwin, "Transition design: A proposal for a new area of design practice, study, and research," Design and culture, vol. 7, no. 2, pp. 229-246, 2015, doi: 10.1080/17547075.2015.1051829.

[46]. F. Ceschin, "How the design of socio-technical experiments can enable radical changes for sustainability," International Journal of Design, vol. 8, no. 3, pp. 1-21, 2014. [Online]. Available: http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/1308/650.

[47]. A. Fetanat, M. Tayebi, G. Shafipour, and M. Moteraghi, "A novel integrated method of fsQCA and digital design for sustainability monitoring and assessment in building energy management systems: a case study," Journal of Building Performance Simulation, vol. 16, no. 1, pp. 107-130, 2023, doi: 10.1080/19401493.2022.2112758.

[48]. A. Kendall, G. A. Keoleian, and M. D. Lepech, "Materials design for sustainability through life cycle modeling of engineered cementitious composites," Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 41, no. 6, pp. 1117-1131, 2008, doi: 10.1617/s11527-007-9310-5.

[49]. H. Dahy, "Natural fibre-reinforced polymer composites (NFRP) fabricated from lignocellulosic fibres for future sustainable architectural applications, case studies: Segmented-shell construction, acoustic panels, and furniture," Sensors, vol. 19, no. 3, 2019, Art no. 738, doi: 10.3390/s19030738.

[50]. H. Gündoğan, İ. Dikmen, and G. Atasoy, "Perceptions of built environment professionals on intelligent office buildings: The interplay between technology, design for sustainability and responsiveness," Journal of Building Engineering, vol. 95, 2024, Art no. 110088, doi: 10.1016/j.jobe.2024.110088.

[51]. M. Aslan and T. Pekdogan, "Design for sustainability approach on material selection prefer-ences of LEED certificated buildings," Revista de la Construccion, vol. 24, no. 1, pp. 152-171, 2025, doi: 10.7764/RDLC.24.1.152.

[52]. M. H. Baqershahi, C. Ayas, and E. Ghafoori, "Design optimisation for hybrid metal additive manufacturing for sustainable construction," Engineering Structures, vol. 301, 2024, Art no. 117355, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117355.

[53]. R. Zeng, A. Chini, and R. Ries, "Innovative design for sustainability: Integrating embodied impacts and costs during the early design phase," Engineering, Construction and Architectural Management, vol. 28, no. 3, pp. 747-764, 2021, doi: 10.1108/ECAM-09-2019-0491.

[54]. A. Nouri and M. Hu, "Decoding carbon footprints: How U.S. climate zones shape building emissions," Climate, vol. 12, no. 12, 2024, Art no. 212, doi: 10.3390/cli12120212.

[55]. C. Cucuzzella, "Creativity, sustainable design and risk management," Journal of Cleaner Production, vol. 135, pp. 1548-1558, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.076.

[56]. F. Spanedda, "Weaving artificiality and nature. Architecture, context and techniques as interacting agents," TECHNE, vol. 2, pp. 93-96, 2021, doi: 10.13128/techne-10689.

[57]. P. Piroozfar, H. Altan, and O. Popovic-Larsen, "Design for sustainability: A comparative study of a customized modern method of construction versus conventional methods of construction," Architectural Engineering and Design Management, vol. 8, no. 1, pp. 55-75, 2012, doi: 10.1080/17452007.2012.650935.

[58]. O. O. Ugwu and T. C. Haupt, "Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability-a South African construction industry perspective," Building and Environment, vol. 42, no. 2, pp. 665-680, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.018.

[59]. M. D. Lepech, V. C. Li, and G. A. Keoleian, "Sustainable infrastructure material design," in Advances in Life-cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems: Proceedings of the 4th International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, Cocoa Beach, FL, United States, A. S. Nowak and D. M. Frangopol, Eds., 2005.