

Phân tích những yếu tố định hình tương lai của kết cấu thép

Analysis of the factors that shape the future of steel structures

> TS LÊ ĐỨC TUẤN

Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn
Email: tuan.leduc@stu.edu.vn

TÓM TẮT

Mục tiêu của bài báo là phân tích những yếu tố định hình tương lai của kết cấu thép trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật và công nghệ cũng như các yêu cầu về phát triển bền vững. Các yếu tố được phân tích sẽ được chia làm hai nhóm: triển vọng và thách thức. Triển vọng tương lai của kết cấu thép đến từ nhu cầu sử dụng thép gia tăng, những đột phá trong công nghệ sản xuất thép, sự cải tiến trong kỹ thuật tái chế thép, xu hướng chuyển đổi kỹ thuật số, sự phát triển vũ bão của trí tuệ nhân tạo và tính đáp ứng của kết cấu thép đối với các yêu cầu về phát triển bền vững. Trong khi đó, tương lai của kết cấu thép cũng đối diện với những thách thức mang tính toàn cầu như: căng thẳng thương mại quốc tế, tác động của đại dịch COVID-19, sự biến động về giá thép, vấn đề an toàn lao động trong ngành thép cũng như những quan ngại về môi trường trong việc sản xuất và sử dụng kết cấu thép. Kết quả phân tích cho thấy rằng việc áp dụng những đổi mới về công nghệ trong việc sản xuất và tái chế thép cần đi kèm với cách thức giải quyết các mối quan tâm về an toàn và môi trường để đảm bảo tương lai đầy triển vọng cho ngành xây dựng thép.

Từ khóa: Kết cấu thép; phát triển bền vững; tái chế thép; trí tuệ nhân tạo; quan ngại về môi trường; thách thức toàn cầu.

ABSTRACT

This article aims to analyze the factors that shape the future of steel structures in the context of strong developments in engineering and technology as well as requirements for sustainable development. The analyzed factors will be divided into two groups: prospects and challenges. The future prospects of steel structures come from: demand for steel increases, breakthroughs in steel production technology, improvements in steel recycling techniques, digital transformation trends, amazing development of artificial intelligence and the adaptiveness of steel structures to sustainable development requirements. Meanwhile, the future of steel structures also faces global challenges such as: international trade tensions, the impact of the COVID-19 pandemic, fluctuations in steel prices, and labor safety issues in the steel industry as well as environmental concerns in the production and use of steel structures. The analysis shows that the adoption of technological innovations in steel production and recycling needs to be accompanied by solutions to address safety and environmental concerns to ensure a promising future for the steel construction industry.

Key words: Steel structures; sustainable development; steel recycling; artificial intelligence; environmental concerns; global challenges.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cơ sở hạ tầng đóng vai trò quan trọng trong công cuộc phát triển kinh tế, xã hội của mỗi quốc gia và rộng hơn là ở quy mô toàn thế giới. Điều đó cho thấy lĩnh vực công nghiệp xây dựng luôn có vị trí then chốt trong cấu trúc kinh tế và công nghiệp toàn cầu. Trong đó, với vai trò đa diện của mình trong cơ sở hạ tầng, giao thông, nhà ở, ..., thép là vật liệu không thể thiếu trong xây dựng hiện đại và ngành công nghiệp thép vẫn là nền tảng của xã hội phát triển bền vững. Điều này là nhờ vào những phẩm chất tuyệt vời của vật liệu thép: tính linh hoạt trong thiết kế, chế tạo và lắp dựng; sự dễ dàng và thuận tiện trong việc kết hợp với các loại vật liệu khác; tính an toàn và độ bền cao; thời gian thi công nhanh; sự phù hợp với xu hướng phát triển bền vững nhờ vào khả năng tái chế, ...

Ở quy mô ngành, cũng như ở nhiều nước xuất khẩu thép khác, ngành thép tại Việt Nam đã trải qua nhiều thăng trầm trong những năm gần đây, chứng kiến sự tăng trưởng đáng kể nhưng cũng đối mặt nhiều thách thức. Với hơn 90% lượng tiêu thụ thép trong nước đến từ ngành xây dựng, sự tăng trưởng của ngành thép tại Việt Nam nhờ sự vào bùng nổ của các dự án cơ sở hạ tầng và đô thị hóa ngày càng gia tăng. Dù có nhiều cơ sở sản xuất thép và là nước xuất khẩu thép xây dựng, Việt Nam vẫn phải nhập khẩu một lượng thép đáng kể, đặc biệt là thép chất lượng cao để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng [21-22]. Những thách thức mà ngành thép Việt Nam đang gặp phải bao gồm khả năng dư thừa công suất nếu tất cả các dự án theo kế hoạch đều được thực hiện, sự xung đột thương mại do phải đối mặt với các cuộc điều tra chống bán phá giá và chống trợ cấp

từ một số nước [14, 5] cũng như những quan ngại về môi trường.

Trước những yêu cầu về bền vững, hiệu quả và sáng tạo ở mọi lĩnh vực trong kỷ nguyên số, kết cấu thép ngày càng đóng vai trò quan trọng hơn trong ngành xây dựng hiện đại. Tuy nhiên, sự thay đổi nhanh chóng về mọi mặt trong thế giới hiện đại đã ảnh hưởng lớn đến sự phát triển của kết cấu thép và do vậy tương lai của kết cấu thép dự đoán sẽ được xác lập bởi nhiều yếu tố quan trọng khác nhau. Bài báo này nhằm mục đích phân tích những yếu tố định hình tương lai của kết cấu thép, không chỉ về mặt triển vọng tương lai mà còn bao gồm những thách thức mang tính toàn cầu.

2. TRIỂN VỌNG TƯƠNG LAI

Triển vọng tương lai của kết cấu thép là khá rõ ràng, được hỗ trợ bởi các yếu tố ảnh hưởng tích cực đến sự phát triển của kết cấu thép như: nhu cầu toàn cầu về thép gia tăng; sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật và công nghệ; xu hướng chuyển đổi kỹ thuật số và tính thích ứng của kết cấu thép đối với các yêu cầu về phát triển bền vững. Các yếu tố này sẽ được phân tích sau đây.

2.1. Nhu cầu toàn cầu

Quá trình đô thị hóa nhanh chóng, đặc biệt là ở các nước đang phát triển, đã thúc đẩy nhu cầu về kết cấu thép. Với các dự án cơ sở hạ tầng quy mô lớn và những yêu cầu cấp thiết phải mở rộng đô thị, Trung Quốc và Ấn Độ là những nước tiêu thụ thép đáng kể [21-22]. Theo số liệu của Hiệp hội thép Thế giới [21-22], nhu cầu sử dụng thép trên toàn cầu hiện nay đang ở mức cao. Theo đó, mức tiêu thụ thép thành phẩm trên toàn thế giới trong vòng 10 năm (từ 2008 đến 2018) tăng từ 1.230 triệu tấn lên 1.712 triệu tấn và dự kiến sẽ tiếp tục tăng. Trong tổng lượng thép sản xuất trên toàn cầu, 52% được sử dụng trong kết cấu xây dựng và hạ tầng.

2.2. Đột phá trong công nghệ sản xuất thép

Hiện nay, nhiều phương pháp sản xuất thép tiết kiệm năng lượng hơn được đẩy mạnh nghiên cứu và áp dụng. Phương pháp luyện bằng lò hồ quang điện (Electric Arc Furnace - EAF) sử dụng nhiều kim loại phế liệu hơn và tiêu hao ít năng lượng hơn các phương pháp luyện thép truyền thống như lò cao (Blast Furnace - BF) hoặc lò cao thổi oxy (Basic Oxygen Furnace - BOF) [11]. Bên cạnh đó, những công nghệ sản xuất thép mang tính đột phá như công nghệ sản xuất thép dựa trên hydro cũng đang được nghiên cứu để giảm lượng khí thải carbon [6].

Theo Cơ quan năng lượng Quốc tế (International Energy Agency - IEA), hiện tại, việc sản xuất thép dựa trên điện phân và quá trình khử cacbon đã có những tiến triển mang tính đột phá [7]. Sự thành công trong việc thử nghiệm các tuyến sản xuất thép theo công nghệ Điện phân nhiệt độ thấp (Low Temperature Electrolysis - LTE) và công nghệ Điện phân oxit nóng chảy (Molten Oxide Electrolysis - MOE) đã tạo cơ hội để việc khử cacbon trong sản xuất thép theo các công nghệ này có thể tiến hành được từ cuối thập kỷ này. Cũng trong năm 2023, dự án SIDERWIN (một dự án được tài trợ bởi Chương trình nghiên cứu và cải tiến European Union's Horizon 2020 để phát triển công nghệ sản xuất thép không phát thải CO₂) đã thử nghiệm thành công công nghệ LTE lần đầu tiên tại một đơn vị sản xuất với quy mô công nghiệp. Trong khi đó, Electra (một công ty ở Hoa Kỳ chuyên về sản xuất thép với lượng phát thải thấp) đang xây dựng một cơ sở với quy mô thương mại để lần đầu tiên sản xuất kim loại có giá trị cao sử dụng công nghệ MOE và dự kiến thép sản xuất bằng công nghệ này sẽ có mặt trên thị trường từ năm 2026.

Thực ra, chất lượng của thép đã luôn được cải thiện liên tục kể từ khi thép được sản xuất lần đầu tiên vào thời kỳ đồ sắt với những nỗ lực không ngừng như: giảm hàm lượng cacbon, bổ sung thêm các kim loại và vật liệu khác nhằm làm cho vật liệu thép bền hơn và đáp ứng được tốt hơn các yêu cầu cụ thể nào đó. Những nỗ lực này đã thành công nhưng đi kèm với chi phí gia tăng và làm ảnh hưởng đến giá thép toàn cầu. Hơn nữa, với phương pháp sản xuất thép truyền thống thì thép đạt cường độ cao thường phải trả giá bởi sự mất đi tính dẻo và điều này làm hạn chế rất nhiều ứng dụng của vật liệu thép. Để giải quyết vấn đề đó, năm 2020, các nhà nghiên cứu tại khoa kỹ thuật cơ khí của Đại học Hồng Kông và Phòng thí nghiệm quốc gia Lawrence Berkeley đã phát hiện ra một cách khả thi để tạo ra thứ có thể được mô tả là “siêu thép” [9]. Theo đó, thép được sản xuất theo cách thức mới có tên gọi là “phương pháp biến dạng và tách lớp ranh giới hạt mới”. Với phương pháp này, thép được sản xuất ra có cường độ cao ở mức độ kháng nứt chưa từng có, nhưng vẫn đạt được độ dai siêu cao giúp ngăn ngừa sự phá hoại giòn sớm của vật liệu. Ngoài ra, “siêu thép” được cho là có tiềm năng lớn được sử dụng trong các ứng dụng khác nhau bao gồm: áo siêu chống đạn; dây cáp cầu; xe hơi và xe quân sự trọng lượng nhẹ; hàng không vũ trụ; bulông và đai ốc cường độ cao. Đặc biệt, các nhà nghiên cứu nhận định rằng “siêu thép” có những ưu điểm nổi bật như chi phí nguyên vật liệu thấp, gia công công nghiệp đơn giản bằng các quy trình cán và ủ thông thường.

2.3. Kỹ thuật tái chế thép tiên tiến

Thép là một trong những loại vật liệu xây dựng bền vững nhất hiện nay nhờ vào khả năng có thể tái chế liên tục của nó. Tuy nhiên, hàm lượng đồng (Cu) cao trong thép tái chế (0,1%) làm cho thép tái chế dễ nứt trong quá trình chế tạo, với sự phát triển và cải tiến không ngừng, kỹ thuật tái chế vòng kín và pha loãng phế liệu liên tục, được phát triển bởi một nhóm các nhà khoa học Anh [1] đã có thể giúp kéo giảm được hàm lượng đồng xuống dưới mức 0,1% trong thép tái chế.

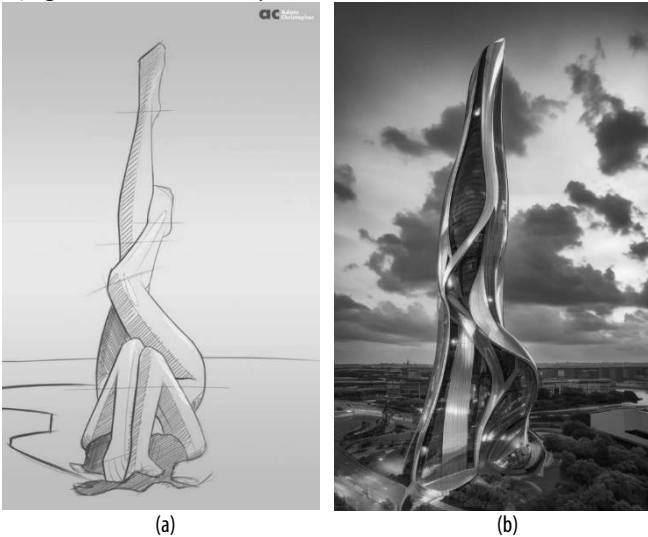
2.4. Xu hướng chuyển đổi kỹ thuật số

Một ví dụ xuất sắc cho việc chuyển đổi số thời kỳ đầu trong xây dựng là mô hình thông tin xây dựng (Building Information Modeling - BIM). Xuất hiện từ năm 2002 và được quan tâm nhiều trong hai thập kỷ qua, BIM được đánh giá là một quá trình toàn diện để tạo và quản lý thông tin cho một tài sản được xây dựng. Ý tưởng chủ đạo của BIM là xây dựng một tòa nhà ảo trước khi xây dựng nó trên thực tế để giải quyết các vấn đề cũng như để mô phỏng và phân tích các tác động tiềm ẩn [3]. Dựa trên một mô hình thông minh và được kích hoạt bởi nền tảng đám mây, BIM tích hợp dữ liệu đa ngành, có cấu trúc để tạo ra một đại diện kỹ thuật số của một tài sản trong suốt vòng đời của nó, từ lập kế hoạch và thiết kế đến xây dựng và vận hành, bao gồm cả việc hỗ trợ những quá trình như: quản lý chi phí, quản lý xây dựng và quản lý dự án. Với sự hỗ trợ mạnh mẽ từ bộ sưu tập các phần mềm trong hệ sinh thái của BIM (AutoCAD, Civil 3D, Revit, Autodesk Forma, Navisworks Manage, Advance Steel, Insight, ReCap Pro, ...), việc lên kế hoạch, thiết kế, xây dựng và vận hành các công trình thép trở nên thuận tiện hơn bao giờ hết và luôn đảm bảo được các tiêu chí về chi phí, tiến độ cũng như chất lượng công trình.

Hiện nay, cũng như nhiều ngành công nghiệp khác, ngành Xây dựng thép cũng đang trải qua quá trình chuyển đổi kỹ thuật số. Các kỹ thuật công nghệ 4.0, phân tích dữ liệu và tự động hóa đang được áp dụng ngày càng phổ biến hơn để tăng hiệu quả, giảm chi phí và nâng cao khả năng cạnh tranh cho ngành công nghiệp này [16].

2.5. Sự phát triển vũ bão của trí tuệ nhân tạo

Trong một thế giới chuyển động nhanh chóng, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI) giúp phát triển các mô hình thông minh để hỗ trợ đắc lực cho mọi khía cạnh trong xây dựng. Liên quan đến lĩnh vực thiết kế, rất nhiều phần mềm và các bộ công cụ mã AI nguồn mở xuất hiện trong năm 2022, trong đó Stable Diffusion và Midjourney đang được đón nhận và thử nghiệm bởi đông đảo cộng đồng kiến trúc sư và kỹ sư xây dựng. Stable Diffusion [15] giúp người sử dụng có thể tạo ra bất kỳ hình ảnh nào theo ý muốn chỉ bằng các câu lệnh chữ đơn giản. Midjourney [10] là một chương trình trí tuệ nhân tạo để tạo ra hình ảnh từ các mô tả văn bản, tương tự như Stable Diffusion và sử dụng công nghệ cơ bản được suy đoán dựa trên Stable Diffusion. Hình 1b thể hiện phối cảnh một công trình thép được thiết kế với sự hỗ trợ kết hợp giữa hai công cụ Stable Diffusion và Midjourney từ bản họa gốc của Adam Christopher ở Hình 1a [2].



Hình 1. Phối cảnh công trình thép (b) được dựng bằng các công cụ AI là Stable Diffusion và Midjourney từ bản họa gốc (a)

Chưa bàn đến tính khả thi về giải pháp kết cấu cho những phối cảnh do AI tạo ra nhưng có một điều rất rõ ràng rằng AI đã định hình lại quy trình thiết kế một công trình xây dựng. Theo đó, phối cảnh kiến trúc có thể được tạo ra chỉ bởi vài câu lệnh văn bản đơn giản.

Bên cạnh đó, việc sử dụng các robot thông minh giúp rút ngắn tiến độ thi công công trình đáng kể, nhất là đối với công trình thép được xây dựng theo môđun. Công nghệ AI cũng còn có thể giúp quá trình vận chuyển các phần của công trình thép hay toàn bộ công trình được sản xuất trước tại nhà xưởng đến công trường để sẵn sàng cho việc lắp dựng.

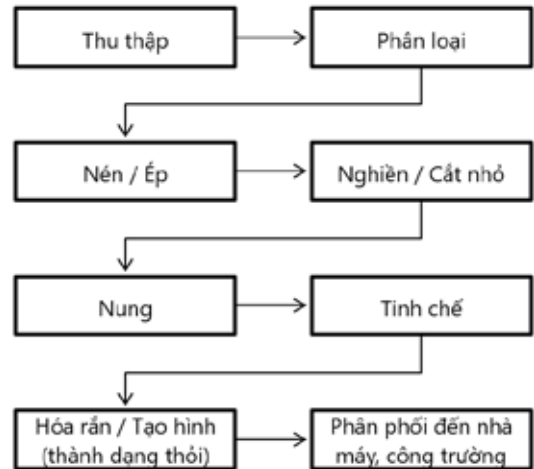
2.6. Kết cấu thép đáp ứng được yêu cầu phát triển bền vững

Phát triển bền vững là xu thế không thể đảo ngược. Tất cả các quốc gia thành viên Liên hợp quốc đã thông qua chương trình nghị sự 2030 vì sự phát triển bền vững với trọng tâm là 17 mục tiêu phát triển bền vững [18]. Theo đó, nội hàm của mục tiêu số 11 là “Làm cho các thành phố và những khu định cư của con người trở nên kiên cố, an toàn và bền vững”, đã đặt ra yêu cầu đối với những nhà thiết kế và thi công công trình trong việc thúc đẩy việc sử dụng hiệu quả các nguồn tài nguyên, việc duy trì và phục hồi các hệ sinh thái cũng như việc giảm thiểu chất thải. Trong nỗ lực chung đó, ngành xây dựng cũng có những bước tiến quan trọng trong việc phát triển các loại vật liệu “xanh” như: thép tái chế, gạch không nung, đá chẻ, bê tông nhẹ, tấm lợp sinh thái, sơn sinh thái, xốp cách nhiệt, ... Là một trong những vật liệu được sử dụng làm kết cấu chịu lực chính cho

công trình xây dựng, thép đáp ứng được các yêu cầu về phát triển bền vững dựa vào những đặc điểm nổi bật sau.

2.6.1. Vật liệu thép có thể được tái chế liên tục

Thép là loại vật liệu có khả năng tái chế rất cao nhờ vào đặc tính luyện kim độc đáo của nó, không bị phân hủy theo thời gian như các loại vật liệu khác đồng thời luôn giữ được cường độ của nó cho dù được tái chế bao nhiêu lần. Bên cạnh đó, các đặc tính từ tính của phế liệu thép, đặc biệt là tính chất có thể nung chảy và khả năng đúc linh hoạt làm cho việc xử lý và tái chế trở nên đơn giản và tiết kiệm. Hơn nữa, quy trình tái chế thép (Hình 2) cũng khá đơn giản và không tiêu thụ nhiều năng lượng so với việc tái chế các vật liệu khác như bê tông cốt thép. Việc tái chế thép đóng vai trò quan trọng trong việc kéo giảm việc lãng phí nguồn tài nguyên thiên nhiên. Trung bình khoảng 1.085 triệu tấn thép được tái chế mỗi năm trên toàn thế giới, chiếm 40% lượng thép sản xuất được. So với việc sản xuất thép từ khai thác quặng kim loại, việc tái chế thép đã giúp kéo giảm 950 triệu tấn khí thải CO₂, 1 tỷ tấn quặng sắt và mức năng lượng tương đương để đốt khoảng 280 triệu tấn than [19]. Hơn nữa, quá trình khử cacbon trong sản xuất thép từ phế liệu cũng đang tiến triển với các giải pháp như thay thế khí đốt tự nhiên bằng hydro, sinh khối, cacbon sinh học [6].



Hình 2. Quy trình tái chế thép

2.6.2. Việc gia công vật liệu thép ít lãng phí

Việc tối ưu hóa ngay từ giai đoạn thiết kế và việc chọn lựa khuôn đúc phù hợp với yêu cầu thiết kế giúp tránh lãng phí trong quá trình gia công kết cấu thép. Những phần thừa sau gia công sẽ được tái chế để tận dụng triệt để vật liệu. Bên cạnh đó, sự hỗ trợ của những công cụ thiết kế và quản lý tiên tiến trong hệ sinh thái của BIM và các quy trình gia công hợp lý trong từng công đoạn hoàn thiện sản phẩm (vệ sinh bề mặt, phun bi, sơn phủ, ...) giúp hạn chế đến mức tối đa hao hụt trong quá trình gia công vật liệu thép, tiết kiệm nguồn tài nguyên, góp phần bảo vệ môi trường.

2.6.3. Kết cấu thép giúp tối ưu chi phí xây dựng

Ngày nay, kết cấu thép đã trở thành lựa chọn hấp dẫn về mặt kinh tế cho nhiều dự án xây dựng do có thể tối ưu hóa chi phí theo nhiều cách khác nhau dựa trên các khía cạnh khác nhau như được phân tích trong Bảng 1.

Những khía cạnh tối ưu hóa chi phí trong việc sử dụng kết cấu thép như đã trình bày trong Bảng 1 cũng phần nào phản ánh được những xu hướng mới của kết cấu thép. Thật vậy, nếu các khía cạnh tối ưu hóa chi phí đã nêu được hiện thực hóa thì có thể thúc đẩy mạnh mẽ những xu hướng khả dĩ của kết cấu thép [12] như được trình bày trong Bảng 2 cùng với những tác động của các xu hướng liên quan đến chi phí xây dựng thép.

Bảng 1. Tối ưu hóa chi phí xây dựng khi sử dụng kết cấu thép

Khía cạnh tối ưu hóa chi phí	Mô tả
Tính hiệu quả của vật liệu thép nhờ vào tỷ lệ “trọng lượng riêng / cường độ tính toán” của vật liệu thép [8]	Kết cấu thép có thể đạt được cường độ và tính năng tương tự như các vật liệu “nặng” hơn (ví dụ như bê tông cốt thép) nhưng với ít vật liệu hơn. Điều này giúp kéo giảm chi phí vật liệu.
Giảm chi phí đầu tư cho hạng mục nền móng	Do thép tương đối “nhẹ” hơn so với các vật liệu xây dựng khác [8] nên tải trọng do công trình thép truyền lên nền móng nhỏ hơn. Từ đó, chi phí thiết kế và thi công nền móng được tiết kiệm hơn.
Sự linh hoạt trong thiết kế nhờ vào tính linh hoạt của kết cấu thép	Tính linh hoạt của thép cho phép tạo ra các thiết kế sáng tạo và hiệu quả, ví dụ như việc thiết kế không gian rộng (không cần nhiều cột bên trong), góp phần làm giảm chi phí vật liệu và nhân công. Ngoài ra, kết cấu thép có thể đáp ứng những thay đổi trong thiết kế dễ dàng hơn so với một số vật liệu khác, và do đó tránh được những chỉnh sửa tốn kém.
Thời gian thi công ngắn	Kết cấu thép có thể được chế tạo tại nhà xưởng và được vận chuyển đến công trường, giúp giảm đáng kể thời gian thi công, tiết kiệm chi phí về nhân công và rút ngắn tiến độ thực hiện dự án.
Khả năng phục hồi trước thiên tai nhờ vào khả năng chống chọi với thiên tai (động đất, bão)	Chi phí ban đầu liên quan đến kỹ thuật phục hồi có thể cao nhưng về lâu dài có thể giúp tiết kiệm chi phí khắc phục hậu quả do tránh được thiệt hại do thiên tai.
Sử dụng năng lượng hiệu quả thông qua các giải pháp thiết kế và kỹ thuật	Sử dụng vật liệu cách nhiệt thích hợp, vật liệu lợp phản chiếu, bố trí cửa sổ và cửa ra vào hợp lý nhằm giảm tiêu thụ năng lượng để sưởi ấm, làm mát và chiếu sáng cho công trình thép, giúp tiết kiệm chi phí vận hành lâu dài.
Tiết giảm chi phí nguyên vật liệu, chi phí xử lý vật liệu nhờ vào khả năng tái sử dụng và khả năng tái chế của thép	Các thành phần kết cấu thép có thể được tháo rời và tái sử dụng cho các dự án trong tương lai. Đồng thời, các cấu kiện thép có thể được tái chế sau khi công trình thép kết thúc vòng đời.
Dự đoán và kiểm soát được chi phí công trình	Tính tiêu chuẩn hóa cao trong quy trình sản xuất và thi công kết cấu thép giúp dự đoán và kiểm soát được hầu hết các chi phí và tránh nguy cơ vượt ngân sách với những chi phí phát sinh bất ngờ.

Bảng 2. Xu hướng sử dụng kết cấu thép trong tương lai và những tác động đến chi phí xây dựng thép

Xu hướng sử dụng kết cấu thép	Tác động đến chi phí xây dựng thép
Kết cấu thép thích ứng và thông minh (được trang bị hệ thống thông minh nhờ vào những tiến bộ trong công nghệ cảm biến và phân tích dữ liệu)	Có thể theo dõi tình trạng kết cấu của thép theo thời gian thực, cho phép bảo trì chủ động và phát hiện sớm các khiếm khuyết cũng như tính an toàn được nâng cao. Điều này cho phép tiết giảm chi phí bảo trì.
Thép tự phục hồi (dựa vào vật liệu cải tiến, thép tự động sửa chữa các vết nứt hoặc hư hỏng nhỏ)	Vật liệu cải tiến có thể giúp kéo dài đáng kể tuổi thọ của kết cấu thép, giảm chi phí bảo trì và tăng cường khả năng phục hồi của kết cấu.
Thiết kế thích ứng và theo mô đun (cho phép dễ dàng mở rộng, sửa đổi hoặc di dời và cải thiện khả năng mở rộng nhờ vào tính linh hoạt của kết cấu thép)	Khả năng thích ứng của kết cấu thép cho phép thời gian xây dựng nhanh hơn, giảm lãng phí.
In 3D kết cấu thép (kết cấu thép có thể được in tại chỗ dựa vào kỹ thuật chế tạo bồi đắp theo lớp)	Công nghệ in 3D sử dụng cho kết cấu thép mang lại tiềm năng cho các thiết kế kết cấu thép phức tạp và tùy chỉnh, đồng thời giúp giảm nhu cầu vận chuyển và lắp ráp và do đó tiết giảm nhiều chi phí xây dựng thép.
Kết cấu thép kết hợp các công nghệ khai thác năng lượng (các tấm pin mặt trời tích hợp vào mặt tiền tòa nhà, tua-bin gió gắn trên tháp thép cao)	Kết cấu thép trong tương lai có thể kết hợp các công nghệ khai thác năng lượng để tạo ra điện từ các nguồn tái tạo (pin mặt trời, tua-bin gió) đồng thời sử dụng các thiết kế cách nhiệt và tiết kiệm năng lượng tiên tiến, giúp cải thiện hiệu suất năng lượng tổng thể và do đó giảm chi phí sử dụng và vận hành công trình.

3. THÁCH THỨC TOÀN CẦU

Việc sản xuất và sử dụng kết cấu thép đang đối mặt với nhiều thách thức mang tính toàn cầu như: căng thẳng thương mại quốc tế, tác động của đại dịch, sự biến động giá thép, vấn đề an toàn lao động và những quan ngại về môi trường.

3.1. Căng thẳng thương mại

Trong những năm gần đây, thị trường thép toàn cầu đã trở thành trung tâm của các tranh chấp thương mại. Các vấn đề như dư thừa công suất ở những nước xuất khẩu thép đã dẫn đến các biện pháp bảo hộ như thuế quan và hạn ngạch

của một số nước, điển hình là Hoa Kỳ và các thành viên châu Âu [14, 5].

3.2. Tác động của đại dịch COVID-19 và khả năng phục hồi sau đại dịch

Đại dịch COVID-19 trên toàn cầu ban đầu đã làm gián đoạn chuỗi cung ứng sản phẩm này kèm theo nhu cầu sụt giảm cũng như việc ngừng sản xuất ở một số thị trường trọng điểm [13]. Tuy nhiên, từ nửa cuối năm 2020, ngành thép đã cho thấy khả năng phục hồi khi nhu cầu tăng trở lại nhờ vào việc đầu tư cơ sở hạ tầng và các gói kích thích ở nhiều nước [4].

3.3. Sự biến động giá thép

Có một thực tế là ngành thép luôn phải đối mặt với những biến động về giá nguyên liệu cũng như giá thành phẩm do nhiều yếu tố như: sự gián đoạn chuỗi cung ứng, căng thẳng địa chính trị và nhu cầu biến động. Điều này được phản ánh rõ nét qua dữ liệu về giá thép những năm gần đây [17, 23].

3.4. An toàn lao động trong ngành thép

Do các cơ sở sản xuất thép thuộc loại môi trường làm việc rủi ro cao nên vấn đề đảm bảo an toàn cho người lao động là mối quan tâm lớn của ngành. Điều đáng mừng là có nhiều nỗ lực liên tục đang được thực hiện để cải thiện các tiêu chuẩn an toàn và giảm thiểu tai nạn tại nơi làm việc. Ví dụ điển hình là Hiệp hội thép Thế giới thường xuyên cập nhật những khuyến cáo, tiêu chuẩn an toàn lao động trong ngành cũng như nghiên cứu và công bố các giải pháp giảm thiểu rủi ro do tai nạn lao động trong ngành thép [20].

3.5. Những quan ngại về môi trường

Sản xuất và sử dụng thép là một trong những tác nhân đóng góp lớn vào lượng khí thải CO₂ trên toàn cầu. Theo Carbon Brief [11], sản phẩm thép chịu trách nhiệm cho 11% tổng lượng khí thải CO₂ và 7 ÷ 9% lượng khí thải gây hiệu ứng nhà kính. Điều này đã dẫn đến áp lực buộc ngành công nghiệp thép phải có sự chuyển đổi mạnh mẽ như áp dụng các phương pháp sản xuất bền vững hơn, đầu tư vào nghiên cứu và phát triển công nghệ sản xuất thép sạch hơn cũng như tăng cường nỗ lực tái chế thép.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xác lập và phân tích những yếu tố định hình tương lai của kết cấu thép ở cả hai thái cực: triển vọng tương lai và thách thức toàn cầu. Kết quả phân tích cho thấy tương lai của kết cấu thép là xán lạn, điều này được hỗ trợ bởi các yếu tố có tác động tích cực đến sự phát triển của ngành xây dựng thép, trong đó nổi bật là những đột phá và cải tiến trong công nghệ sản xuất và tái chế thép; việc áp dụng trí tuệ nhân tạo vào các bước thiết kế, xây dựng, vận hành và quản lý công trình thép theo xu hướng chuyển đổi kỹ thuật số; cũng như sự thích ứng của kết cấu thép với các yêu cầu về phát triển bền vững. Tuy nhiên, tương lai của kết cấu thép cũng đối mặt với những thách thức không nhỏ, bao gồm: căng thẳng thương mại quốc tế, sự biến động của giá thép, khả năng phục hồi sau đại dịch COVID-19, những quan ngại về an toàn lao động và môi trường trong xây dựng thép.

Như vậy, việc áp dụng những đổi mới về công nghệ trong kỷ nguyên chuyển đổi kỹ thuật số đi kèm với các giải pháp cũng như cách thức giải quyết các mối quan tâm về vấn đề an toàn và môi trường ngành xây dựng thép là những yếu tố then chốt định hình tương lai của kết cấu thép.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Baniasadi, M., Graves, J.E., Ray, D.A. et al., Closed-Loop Recycling of Copper from Waste Printed Circuit Boards Using Bioleaching and Electrowinning Processes, *Waste Biomass Valor* 12, 3125–3136, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01128-9>.
- [2]. Civitai: <https://civitai.com/models/126660/architectureexteriorsdlifechiasedammev60>.

- [3]. Deke Smith, An Introduction to Building Information Modeling (BIM), *Journal of Building Information Modeling*, Matrix Group Publishing, inaugural issue, 2007.

- [4]. Fabien Mercier, Tomohiro Hijikata, Gianpiero Mattera, Valentina Burrai and Luciano Giua, *Steel market developments Q4-2021*; OECD Directorate for Science, Technology and Innovation; the OECD Secretariat, 2021.

- [5]. Halina Yermolenko, *EU will extend protective measures on steel imports for another year*, GMK Center, 2023.

- [6]. IEA (Report), *Tracking Clean Energy Progress 2023: Assessing critical energy technologies for global clean energy transitions*, July, 2023.

- [7]. IEA: the IEA's Clean Energy Technology Guide, 2023. <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>.

- [8]. Lê Đức Tuấn, Đỗ Đào Hải, *Giáo trình Kết cấu thép*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2023. ISBN: 978-604-67-2830-6.

- [9]. L. Liu, Q. Yu, Z. Wang, J. Ell, M.X. Huang, Robert O. Ritchie, *Making ultrastrong steel tough by grain-boundary delamination*, *Science*, 2020. DOI: 10.1126/science.aba9413.

- [10]. *Midjourney: phòng thí nghiệm độc lập*, *midjourney.com*, 2022.

- [11]. Molly Lempriere, *Steel industry makes 'pivotal' shift towards lower-carbon production*, *International Policy*, Carbon Brief, 2023.

- [12]. Navin Baskar, *Future Trends in Steel Structures: Advanced Materials & Construction Techniques*, Skill-Lync courses, 2023, <https://skill-lync.com/blogs/future-trends-in-steel-structures-advanced-materials--construction-techniques>.

- [13]. PricewaterhouseCoopers Limited, *Executive summary, Impact of COVID-19 on the supply chain industry*, 2020.

- [14]. Proclamation No. 9705, 83 Fed. Reg. 11,625 (Mar. 8, 2018).

- [15]. *Stable Diffusion 2.0*: released in November 2022, *Stability AI*. Ltd.

- [16]. Teresa Annunziata Branca, Barbara Fornai, Valentina Colla, Maria Maddalena Murri, Eliana Streppe and Antonius Schröder, *The Challenge of Digitalization in the Steel Sector*, *Metals*, 2020. DOI: 10.3390/met10020288.

- [17]. The MetalMiner Team, *Steel Prices and Global Market: a 2022 Review*, *MetalMiner*, 2022.

- [18]. The 17 Sustainable Development Goals (SDGs), United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development, 2015. <https://sdgs.un.org/goals>.

- [19]. *The World Counts: Global Challenges, Advantages of recycling steel*, 2023. <https://www.theworldcounts.com>.

- [20]. World Steel Association, *Safety and health in the steel industry, public policy paper*, 2020.

- [21]. *World steel in figures 2019*, World Steel Association.

- [22]. *World steel in figures 2020*, World Steel Association.

- [23]. Yuriy Grigorenko, *Prices on the global steel and raw materials market went down*, GMK Center, 2023.