

GỖ GHÉP NHIỀU LỚP CLT TRONG XÂY DỰNG HIỆN ĐẠI: CƠ SỞ VẬT LIỆU, CÔNG NGHỆ SẢN XUẤT VÀ ỨNG DỤNG

CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) IN MODERN CONSTRUCTION: MATERIAL BASIS, MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

Ths. Nguyễn Danh Hoàng - Giảng viên, Khoa xây dựng - Trường đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: hoangnd@hau.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo này trình bày một tổng quan về gỗ ghép nhiều lớp Cross-Laminated Timber (CLT) trong xây dựng hiện đại, tập trung vào cơ sở vật liệu, công nghệ sản xuất và các hướng ứng dụng trong thực tiễn kỹ thuật. Nội dung làm rõ mối liên hệ giữa cấu trúc lớp chéo của vật liệu, đặc tính của gỗ nền và chất kết dính với các quy trình chế tạo, kiểm soát chất lượng và các đặc trưng cơ học - hình học của tấm CLT. Trên cơ sở tổng hợp các tài liệu và nghiên cứu tiêu biểu, bài báo đề cập đến vai trò của CLT trong các kết cấu chịu lực dạng tấm, hệ tầng chế và công trình nhiều tầng, nhấn mạnh các lợi thế về khả năng chế tạo theo mô-đun, hiệu quả sử dụng vật liệu và tiềm năng mở rộng quy mô ứng dụng, đồng thời xem xét các khía cạnh môi trường như hiệu quả sử dụng tài nguyên gỗ và đóng góp của các hệ kết cấu CLT trong định hướng xây dựng bền vững.

Từ khóa: CLT; gỗ ghép nhiều lớp; cơ sở vật liệu; công nghệ sản xuất; ứng dụng xây dựng; xây dựng bền vững.

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh ngành xây dựng đang chuyển dịch theo hướng sử dụng vật liệu bền vững và tối ưu hóa hiệu quả tài nguyên, gỗ ghép nhiều lớp Cross-Laminated Timber (CLT) ngày càng khẳng định vai trò quan trọng trong các công trình dân dụng và công nghiệp. Khác với gỗ tự nhiên truyền thống, CLT được chế tạo theo cấu trúc nhiều lớp xếp chéo có kiểm soát, cho phép cải thiện độ đồng nhất, độ tin cậy cơ học và khả năng chế tạo theo mô-đun, từ đó mở rộng phạm vi ứng dụng của kết cấu gỗ trong xây dựng hiện đại [1,2]. Các tổng quan nền tảng về CLT cho thấy cấu hình lớp chéo và định hướng thớ gỗ không chỉ nâng cao độ cứng và khả năng chịu lực theo nhiều phương mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc tiên chế các cấu kiện quy mô lớn trong môi trường nhà máy [2,3].

Sự phát triển của công nghệ sản xuất và kiểm soát chất lượng đã thúc đẩy việc ứng dụng CLT trong các hệ kết cấu chịu lực dạng tấm, công trình nhiều tầng và các giải pháp xây dựng lắp ghép. Các nghiên cứu thực nghiệm và tổng quan kỹ thuật chỉ

Abstract: This paper presents an overview of cross-laminated timber (CLT) in modern construction, focusing on the material basis, manufacturing technologies, and practical applications. The paper clarifies the relationship between the cross-layered structure of CLT, the properties of the base wood and adhesive systems, and the fabrication and quality control processes, as well as the mechanical and geometric characteristics of CLT panels. Based on a synthesis of key references and representative studies, the paper discusses the role of CLT in load-bearing panel systems, prefabricated construction, and multi-story buildings, highlighting the advantages of modular fabrication, material-use efficiency, and the potential for scaling up applications, while also considering environmental aspects such as the efficient use of timber resources and the contribution of CLT systems to sustainable construction.

Keywords: CLT; cross-laminated timber; material basis; manufacturing technologies; construction applications; sustainable construction.

ra rằng hiệu quả làm việc của CLT phụ thuộc chặt chẽ vào cơ sở vật liệu (tính chất gỗ nền, cấu trúc vi mô của các thành phần cellulose-hemicellulose-lignin) cũng như đặc tính của chất kết dính và liên kết giữa các lớp [1,3,4]. Đặc biệt, đối với CLT, vai trò của keo kết cấu trong việc duy trì tính toàn vẹn lớp và hạn chế hiện tượng tách lớp (delamination) đã được chứng minh là yếu tố quyết định đến độ ổn định và an toàn của cấu kiện, nhất là trong các điều kiện chịu tác động nhiệt và cháy [5,6].

Bên cạnh các khía cạnh về cơ học và công nghệ, CLT còn được quan tâm dưới góc độ môi trường và phát triển bền vững. Nhiều tài liệu ghi nhận khả năng sử dụng hiệu quả nguồn tài nguyên gỗ, tiềm năng tích trữ carbon trong vòng đời công trình và khả năng thay thế một phần vật liệu truyền thống có cường độ phát thải cao như những lợi thế quan trọng của hệ kết cấu CLT trong xây dựng hiện đại [2,3]. Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng việc mở rộng quy mô ứng dụng cần đi kèm với hiểu biết đầy đủ về mối quan hệ giữa cấu trúc vật liệu - quy trình sản xuất - đặc trưng kỹ thuật và giới

hạn sử dụng, nhằm bảo đảm độ tin cậy và an toàn lâu dài của công trình [4,6,7].

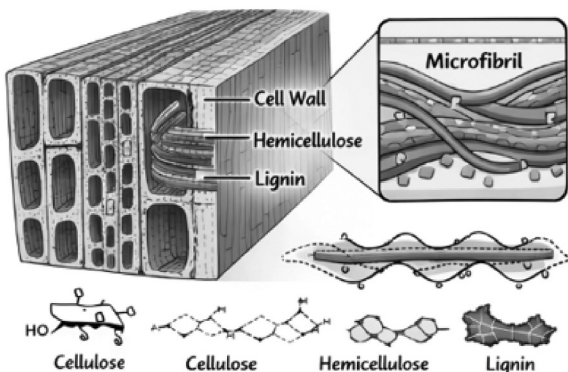
Trên cơ sở đó, bài báo này cung cấp một tổng quan có hệ thống về CLT trong xây dựng hiện đại, tập trung vào cơ sở vật liệu và cấu trúc lớp chéo, làm rõ vai trò của gỗ nền, hướng thớ và chất kết dính; công nghệ sản xuất và kiểm soát chất lượng, từ các công đoạn chế tạo đến các yếu tố ảnh hưởng đến tính toàn vẹn liên kết và độ ổn định lâu dài của tấm CLT và các hướng ứng dụng trong xây dựng, bao gồm kết cấu chịu lực dạng tấm, hệ tiền chế và công trình nhiều tầng, đồng thời xem xét các lợi thế kỹ thuật, giới hạn ứng dụng và các khía cạnh môi trường liên quan.

2. Cơ sở vật liệu của gỗ ghép nhiều lớp CLT

2.1. Nền tảng vật liệu gỗ và cấu trúc vi mô

Gỗ là vật liệu sinh học có cấu trúc phân cấp, trong đó các thành phần chính gồm cellulose, hemicellulose và lignin tạo nên mạng lưới vi sợi và ma trận polymer tự nhiên quyết định tính trực hướng và ứng xử cơ-nhiệt của vật liệu. Ở cấp độ vi mô, cellulose đóng vai trò pha gia cường chịu kéo dọc thớ, trong khi hemicellulose và lignin đảm nhiệm chức năng liên kết và ổn định hình học của thành tế bào. Cấu trúc này dẫn đến sự khác biệt rõ rệt giữa các đặc trưng cơ học theo phương dọc thớ, ngang thớ và xuyên tâm, là nền tảng cho việc thiết kế các hệ gỗ kỹ thuật nhiều lớp nhằm khai thác có kiểm soát tính trực hướng của vật liệu nền [1].

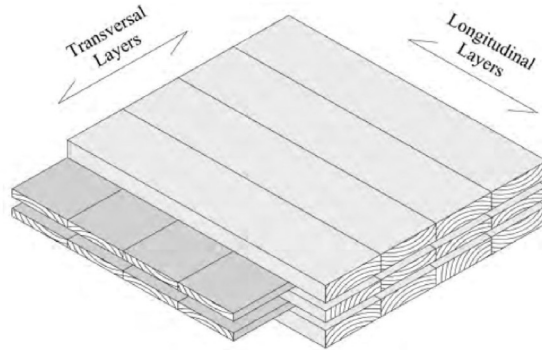
Các tổng quan khoa học cho thấy sự thay đổi độ ẩm và nhiệt độ có ảnh hưởng đáng kể đến mô đun đàn hồi, cường độ và các tham số nhiệt của gỗ, từ đó chi phối trực tiếp đến độ ổn định hình học và độ tin cậy lâu dài của các cấu kiện CLT trong điều kiện khai thác thực tế. Việc kiểm soát trạng thái ẩm của gỗ nền trước và trong quá trình chế tạo vì vậy được xem là điều kiện tiên quyết để bảo đảm chất lượng liên kết giữa các lớp và hạn chế biến dạng dài hạn của tấm CLT [1,2].



Hình 1: Cấu trúc vi mô của gỗ và các thành phần chính của thành tế bào (cellulose, hemicellulose và lignin) trong mối liên hệ với cấu trúc microfibril [1]

2.2. Nguyên lý cấu trúc lớp chéo của CLT

Cross-Laminated Timber (CLT) là hệ vật liệu dạng tấm lớn được tạo thành từ các lớp ván gỗ xếp chồng theo cấu hình chéo, trong đó hướng thớ của mỗi lớp thường được đặt vuông góc với lớp kế. Cấu trúc này tạo ra một hệ vật liệu gắn với composite nhiều lớp, cho phép phân bố tải trọng theo hai phương chính trong mặt phẳng tấm, đồng thời nâng cao độ cứng uốn và độ ổn định hình học tổng thể của cấu kiện [2,3].



Hình 2: Cấu trúc lớp chéo và mẫu tấm CLT sau chế tạo [4]

Số lớp phổ biến của CLT là 3, 5 hoặc 7, với lớp ngoài cùng thường được bố trí theo phương chịu lực chính để tối ưu hóa khả năng chịu uốn và kéo dọc thớ. Các nghiên cứu tổng quan cho thấy việc lựa chọn số lớp và chiều dày từng lớp có ảnh hưởng trực tiếp đến tỷ lệ cứng-khối lượng, khả năng chịu tải và đặc trưng dao động của tấm CLT, đặc biệt trong các ứng dụng sàn và vách chịu lực của công trình nhiều tầng [2,3].

2.3. Chất kết dính và liên kết giữa các lớp

Trong CLT, keo kết cấu đóng vai trò quyết định trong việc hình thành tính toàn vẹn vật liệu và khả năng truyền lực giữa các lớp. Các hệ keo như phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF), melamine-urea-formaldehyde (MUF) và polyurethane (PU) thường được lựa chọn tùy theo yêu cầu về cường độ liên kết, khả năng chịu ẩm và điều kiện khai thác của cấu kiện [1,3].

Các nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của CLT trong điều kiện nhiệt và cháy cho thấy loại keo và mức độ ổn định nhiệt của liên kết ảnh hưởng trực tiếp đến hiện tượng tách lớp (delamination) và tốc

độ suy giảm tiết diện chịu lực của tấm. Các hệ keo ổn định hơn cho phép duy trì tính toàn vẹn lớp và ứng xử gần với gỗ nguyên khối, trong khi keo nhạy nhiệt có thể dẫn đến rơi lớp than và làm suy giảm nhanh khả năng chịu lực của cấu kiện [5,6].

2.4. Liên hệ giữa cơ sở vật liệu và khả năng ứng dụng trong xây dựng

Từ góc độ vật liệu, cấu trúc lớp chéo và đặc trưng liên kết giữa các lớp của CLT cho phép tấm vật liệu này làm việc hiệu quả như một hệ kết cấu dạng tấm chịu tải hai phương, trong đó tải trọng được phân bố đồng thời theo phương dọc và phương ngang trong mặt phẳng tấm. Cơ chế này làm tăng độ cứng mặt phẳng và khả năng chống mất ổn định cục bộ của cấu kiện, đặc biệt có ý nghĩa đối với các ứng dụng sàn và vách chịu lực trong các hệ kết cấu tiền chế và công trình nhiều tầng, nơi yêu cầu cao về khả năng chịu uốn, cắt và truyền lực màng trong mặt phẳng.

Việc lựa chọn gỗ nền với các tham số cơ học phù hợp, bao gồm khối lượng riêng, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo-nén dọc thớ, chi phối trực tiếp đến độ cứng và khả năng chịu tải của toàn bộ tấm CLT. Sự kết hợp có kiểm soát giữa các lớp có chất lượng gỗ khác nhau còn cho phép tối ưu hóa phân bố vật liệu theo chiều dày, trong đó các lớp ngoài cùng thường đảm nhiệm vai trò chịu uốn chính, còn các lớp trong góp phần tăng khả năng chịu cắt và ổn định hình học tổng thể.

Bên cạnh đó, cấu hình lớp và chiều dày từng lớp ảnh hưởng đáng kể đến hành vi biến dạng và đặc trưng dao động của tấm CLT trong điều kiện tải trọng tĩnh và động. Các nghiên cứu tổng quan chỉ ra rằng việc tăng số lớp và tối ưu hóa tỷ lệ chiều dày có thể cải thiện tỷ lệ độ cứng-khối lượng và giảm độ võng dài hạn, từ đó mở rộng phạm vi ứng dụng của CLT cho các nhịp lớn và không gian mở trong công trình nhiều tầng.

Ở cấp độ liên kết vật liệu, hệ keo kết cấu đóng vai trò trung tâm trong việc duy trì tính toàn vẹn lớp và bảo đảm cơ chế truyền lực cắt liên lớp. Sự suy giảm chất lượng liên kết do tác động của độ ẩm, nhiệt độ và tải trọng dài hạn có thể dẫn đến hiện tượng tách lớp và phân bố ứng suất không đồng đều, làm suy giảm hiệu quả làm việc tổng thể của tấm CLT. Do đó, việc lựa chọn loại keo và kiểm soát điều kiện ép không chỉ là yêu cầu công nghệ mà còn là yếu tố quyết định đến độ bền lâu dài và độ tin cậy kết cấu của công trình.

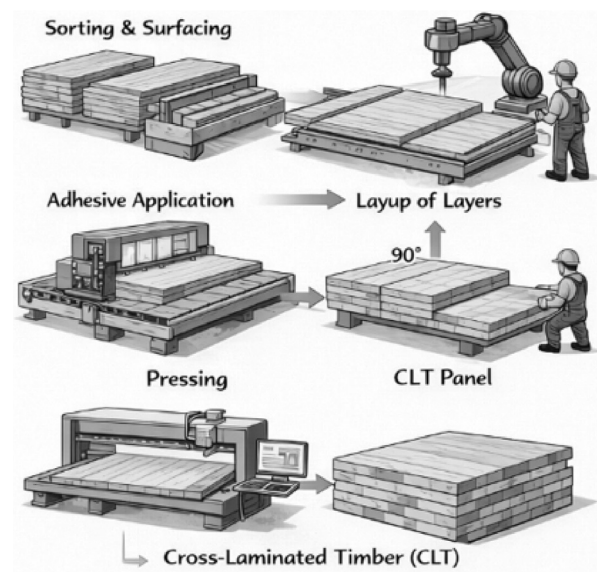
Từ góc độ môi trường, các quyết định về gỗ nền, cấu hình lớp và công nghệ liên kết cũng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả sử dụng tài nguyên và tác động vòng đời của hệ kết cấu CLT. Việc tối ưu hóa

phân bố vật liệu theo chiều dày cho phép giảm khối lượng gỗ sử dụng trên một đơn vị diện tích sàn mà vẫn duy trì khả năng chịu lực cần thiết, trong khi lựa chọn các hệ keo có hàm lượng phát thải thấp và quy trình sản xuất tiết kiệm năng lượng góp phần nâng cao tính bền vững của toàn bộ chuỗi giá trị. Những yếu tố này củng cố vai trò của CLT như một giải pháp kết cấu không chỉ hiệu quả về mặt kỹ thuật mà còn phù hợp với định hướng phát triển xây dựng bền vững trong bối cảnh hiện nay.

3. Công nghệ sản xuất và kiểm soát chất lượng của gỗ ghép nhiều lớp CLT

3.1. Quy trình sản xuất gỗ ghép nhiều lớp CLT theo dây chuyền công nghiệp

Quy trình sản xuất gỗ ghép nhiều lớp Cross-Laminated Timber (CLT) được tổ chức theo chuỗi công đoạn liên tục trong môi trường nhà máy nhằm bảo đảm tính đồng nhất vật liệu, độ chính xác hình học và chất lượng liên kết giữa các lớp. Trước hết, các thanh gỗ xẻ được phân loại và gia công bề mặt (sorting & surfacing) theo các chỉ tiêu về độ ẩm, khuyết tật tự nhiên và đặc trưng cơ học. Công đoạn này nhằm tối ưu hóa phân bố vật liệu theo chiều dày tấm, trong đó các lớp ngoài cùng thường sử dụng gỗ có chất lượng cơ học cao hơn để nâng cao khả năng chịu uốn của cấu kiện [2,3].



Hình 3: Quy trình sản xuất tấm CLT theo dây chuyền công nghiệp

Sau khi chuẩn bị bề mặt, các lớp gỗ được phủ keo kết cấu với lượng và phương pháp phân bố được kiểm soát nhằm bảo đảm hình thành liên kết liên tục trên toàn bộ diện tích tiếp xúc. Các hệ keo như PRF, MUF hoặc PU được lựa chọn tùy theo yêu cầu về cường độ liên kết, khả năng chịu ẩm và điều kiện khai thác của tấm CLT [1,3].

Tiếp theo, các lớp được xếp chồng theo cấu hình chéo $0^\circ/90^\circ$ (layup of layers), trong đó hướng thớ của mỗi lớp vuông góc với lớp kế để tạo cơ chế làm việc hai phương trong mặt phẳng tấm. Số lớp và chiều dày từng lớp được lựa chọn dựa trên yêu cầu về độ cứng, khả năng chịu tải và ổn định hình học của cấu kiện trong ứng dụng thực tế [2,3].

Khối tấm sau khi xếp lớp được đưa vào hệ thống ép (pressing) dưới áp suất và, trong một số công nghệ, kết hợp gia nhiệt để kích hoạt và hoàn thiện quá trình đóng rắn của keo. Các tham số ép như áp suất, thời gian và nhiệt độ được kiểm soát chặt chẽ nhằm bảo đảm sự tiếp xúc bề mặt đồng đều, hình thành liên kết bền vững giữa các lớp và hạn chế phát sinh ứng suất dư trong cấu kiện [3,4].

Cuối cùng, tấm CLT sau khi ổn định hình học được gia công hoàn thiện và tiến chế bằng CNC, bao gồm cắt biên dạng, khoan lỗ và tạo chi tiết liên kết phục vụ lắp dựng tại công trường. Công đoạn này cho phép đạt độ chính xác cao và mức độ tích hợp lớn giữa thiết kế và thi công, đồng thời rút ngắn thời gian lắp dựng và giảm sai số trong các hệ kết cấu tiên chế và công trình nhiều tầng [2,3].

Quy trình khép kín này thể hiện mối liên hệ chặt chẽ giữa cơ sở vật liệu – công nghệ liên kết - kiểm soát hình học và chất lượng sản phẩm, qua đó quyết định trực tiếp đến khả năng chịu lực, độ bền lâu dài và phạm vi ứng dụng của CLT trong xây dựng hiện đại, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về độ tin cậy kết cấu và tính bền vững môi trường [1,5,6].

3.2. Kiểm soát chất lượng và đánh giá sản phẩm

Kiểm soát chất lượng trong sản xuất CLT bao gồm các phương pháp không phá hủy và phá hủy nhằm đánh giá đồng thời đặc trưng vật liệu, hình học và chất lượng liên kết lớp. Các chỉ tiêu thường được theo dõi bao gồm độ ẩm, độ phẳng bề mặt, cường độ liên kết keo, mô đun đàn hồi, cường độ chịu uốn và khả năng chịu cắt của tấm [1,3].

Các nghiên cứu cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm tra khả năng chống tách lớp (delamination), đặc biệt đối với các ứng dụng chịu tác động nhiệt và môi trường khắc nghiệt. Các thí nghiệm nhiệt và cháy cho thấy mối liên hệ trực tiếp giữa chất lượng liên kết keo và tốc độ suy giảm tiết diện chịu lực của tấm CLT, qua đó ảnh hưởng đến độ an toàn tổng thể của hệ kết cấu [5,6].

3.3. Liên hệ giữa công nghệ sản xuất và hiệu quả ứng dụng

Mức độ kiểm soát công nghệ trong các khâu từ chuẩn bị gỗ nền, xếp lớp, ép và gia công hoàn thiện có mối liên hệ trực tiếp với phạm vi, độ tin cậy và

hiệu quả ứng dụng của CLT trong xây dựng. Ở cấp độ vật liệu, việc kiểm soát độ ẩm, chất lượng bề mặt và phân loại cơ học của gỗ nền quyết định khả năng hình thành liên kết keo đồng đều và liên tục giữa các lớp, từ đó ảnh hưởng đến cơ chế truyền lực cắt liên lớp và độ cứng tổng thể của tấm CLT. Các tấm có chất lượng liên kết cao và sai số hình học nhỏ cho phép triển khai hiệu quả các hệ kết cấu dạng tấm chịu tải hai phương, các hệ lõi chịu lực và các giải pháp mô-đun tiên chế cho công trình nhiều tầng, nơi yêu cầu cao về độ chính xác lắp dựng, khả năng chịu tải và tốc độ thi công.

Ở cấp độ cấu kiện và hệ kết cấu, độ chính xác hình học đạt được thông qua gia công CNC cho phép tích hợp trực tiếp các chi tiết liên kết, khe kỹ thuật và đường dẫn cơ điện ngay từ giai đoạn sản xuất, qua đó giảm đáng kể khối lượng công việc tại công trường và hạn chế sai số lắp dựng. Điều này không chỉ rút ngắn thời gian thi công mà còn nâng cao mức độ lặp lại và chuẩn hóa trong các hệ kết cấu tiên chế, đặc biệt đối với các dự án quy mô lớn và công trình nhiều tầng có yêu cầu nghiêm ngặt về tiến độ và chất lượng.

Từ góc độ độ bền lâu dài và an toàn kết cấu, công nghệ sản xuất ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng duy trì tính toàn vẹn lớp và ổn định hình học của tấm CLT trong suốt vòng đời khai thác. Các nghiên cứu về tác động của nhiệt và cháy cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa chất lượng liên kết keo, điều kiện ép và hiện tượng tách lớp (delamination), qua đó chi phối tốc độ suy giảm tiết diện chịu lực và ứng xử chịu tải của cấu kiện trong các kịch bản khắc nghiệt. Do đó, việc lựa chọn hệ keo và kiểm soát chặt chẽ các tham số công nghệ không chỉ là vấn đề sản xuất mà còn là yếu tố nền tảng bảo đảm an toàn và độ tin cậy của công trình.

Từ góc độ môi trường và hiệu quả tài nguyên, tối ưu hóa công nghệ sản xuất và tiên chế cho phép giảm hao hụt vật liệu, nâng cao hiệu suất sử dụng gỗ nền và hạn chế phát sinh phế thải trong cả giai đoạn chế tạo và lắp dựng. Việc chuẩn hóa quy trình và gia công chính xác trong nhà máy cũng góp phần giảm nhu cầu điều chỉnh tại công trường, từ đó tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải liên quan đến vận chuyển, thi công và xử lý chất thải. Đồng thời, khả năng tối ưu hóa phân bố vật liệu theo chiều dày và cấu hình lớp cho phép đạt được tỷ lệ độ cứng–khối lượng cao, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên gỗ trên một đơn vị diện tích sàn.

Những mối liên hệ trên cho thấy công nghệ sản xuất CLT không chỉ đóng vai trò như một chuỗi công đoạn chế tạo, mà còn là cầu nối giữa nền tảng khoa học vật liệu, yêu cầu kỹ thuật của hệ kết cấu và các mục tiêu phát triển bền vững. Việc tiếp tục

hoàn thiện và chuẩn hóa các quy trình sản xuất, kiểm soát chất lượng và tiến chế vì vậy được xem là điều kiện then chốt để mở rộng quy mô ứng dụng CLT trong xây dựng hiện đại, đặc biệt đối với các công trình nhiều tầng và các hệ kết cấu mô-đun có yêu cầu cao về độ tin cậy, hiệu quả và tác động môi trường.

4. Ứng dụng của gỗ ghép nhiều lớp CLT trong xây dựng hiện đại

4.1. CLT trong hệ kết cấu sàn và tường chịu lực

Nhờ đặc trưng làm việc như tấm chịu tải hai phương, CLT được ứng dụng rộng rãi trong các hệ sàn và tường chịu lực của công trình dân dụng và công nghiệp. Trong các hệ sàn, tấm CLT đóng vai trò vừa là phần tử chịu uốn chính vừa là màng truyền lực trong mặt phẳng, cho phép phân bố tải trọng đều đến các hệ dầm, cột hoặc lõi chịu lực. Các tổng quan kỹ thuật cho thấy cấu hình lớp chéo giúp CLT đạt được độ cứng mặt phẳng cao và hạn chế biến dạng do tải trọng không đối xứng, đặc biệt trong các nhịp trung bình và lớn của công trình nhiều tầng [2,3].

Đối với hệ tường, CLT không chỉ làm việc như phần tử chịu nén và uốn ngoài mặt phẳng, mà còn đảm nhiệm chức năng phần tử chịu lực trong mặt phẳng để truyền tải trọng gió và động đất đến hệ móng. Khả năng này cho phép hình thành các hệ kết cấu tường-sàn tích hợp, trong đó các tấm CLT được lắp ghép theo mô-đun, tạo nên các khối không gian ổn định và có độ tin cậy cao về mặt kết cấu [2,3].

4.2. Hệ lõi chịu lực và công trình nhiều tầng

Một trong những hướng ứng dụng nổi bật của CLT là trong các hệ lõi chịu lực và công trình nhiều tầng, nơi yêu cầu cao về độ cứng tổng thể và khả năng truyền lực ngang. Các nghiên cứu tổng quan chỉ ra rằng việc kết hợp CLT trong lõi thang, lõi kỹ thuật và các tường vách chính cho phép hình thành hệ khung-vách lai, trong đó CLT đóng vai trò phần tử chịu cắt và uốn chủ đạo theo phương ngang, trong khi các phần tử khác đảm nhiệm chức năng chịu tải trọng thẳng đứng [2].

Ở cấp độ hệ kết cấu, tính đồng nhất và khả năng tiến chế của CLT giúp giảm sai số lắp dựng và nâng cao độ chính xác hình học của toàn bộ công trình, yếu tố đặc biệt quan trọng đối với các công trình cao tầng có yêu cầu nghiêm ngặt về độ thẳng đứng và ổn định tổng thể. Đồng thời, việc tích hợp các tấm CLT lớn trong lõi chịu lực cho phép rút ngắn thời gian thi công và giảm sự phụ thuộc vào các hệ ván khuôn và giàn giáo truyền thống [3].

4.3. Xây dựng tiến chế và mô-đun

CLT là vật liệu nền tảng cho các hệ xây dựng tiến chế và mô-đun, trong đó các tấm tường, sàn và vách được gia công hoàn thiện trong nhà máy và lắp dựng nhanh chóng tại công trường. Cách tiếp cận này cho phép chuyển phần lớn các công đoạn thi công từ hiện trường sang môi trường sản xuất có kiểm soát, từ đó nâng cao chất lượng, giảm sai số và cải thiện điều kiện an toàn lao động [2,3].

Các tài liệu tổng quan nhấn mạnh rằng khả năng tích hợp sẵn các chi tiết kỹ thuật như lỗ xuyên, rãnh kỹ thuật và liên kết cơ khí trong giai đoạn gia công CNC giúp giảm đáng kể khối lượng công việc hoàn thiện tại công trường. Điều này không chỉ rút ngắn thời gian xây dựng mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc chuẩn hóa và lặp lại thiết kế trong các dự án nhà ở, công trình công cộng và các tổ hợp xây dựng quy mô lớn [3].

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày một tổng quan có hệ thống về gỗ ghép nhiều lớp Cross-Laminated Timber (CLT) trong xây dựng hiện đại, tập trung vào cơ sở vật liệu, công nghệ sản xuất và các hướng ứng dụng trong thực tiễn kỹ thuật. Trên nền tảng cấu trúc lớp chéo và đặc trưng liên kết giữa các lớp, CLT được làm rõ như một hệ vật liệu dạng tấm có khả năng làm việc hai phương, cho phép phân bố tải trọng hiệu quả và đạt được độ cứng, độ ổn định hình học và độ tin cậy cao trong các hệ kết cấu sàn, tường và lõi chịu lực của công trình nhiều tầng.

Phân tích mối quan hệ giữa gỗ nền, cấu hình lớp và hệ keo kết cấu cho thấy chất lượng liên kết và mức độ kiểm soát công nghệ trong quá trình chế tạo là những yếu tố quyết định đến khả năng truyền lực cắt liên lớp, độ bền lâu dài và ứng xử của cấu kiện trong các điều kiện khai thác và môi trường khắc nghiệt. Các kết quả tổng hợp từ tài liệu tham khảo cũng nhấn mạnh vai trò của công nghệ ép, gia công CNC và kiểm soát chất lượng trong việc bảo đảm độ chính xác hình học, tính đồng nhất sản phẩm và hiệu quả triển khai các hệ kết cấu tiến chế và mô-đun ở quy mô công nghiệp.

Từ góc độ môi trường, CLT được khẳng định là một giải pháp kết cấu có tiềm năng đóng góp tích cực cho định hướng xây dựng bền vững, thông qua hiệu quả sử dụng tài nguyên gỗ, khả năng tích trữ carbon trong vòng đời công trình và việc giảm phát thải liên quan đến thi công nhờ cách tiếp cận tiến chế và lắp dựng nhanh. Những lợi thế này, kết hợp với khả năng mở rộng ứng dụng trong các hệ kết cấu và công trình nhiều tầng, cho thấy vai trò ngày càng quan trọng của CLT trong bối cảnh chuyển dịch sang nền xây dựng phát thải thấp.

Trên cơ sở tổng quan, các định hướng nghiên cứu và phát triển tiếp theo được đề xuất bao gồm việc hoàn thiện hệ keo kết cấu có độ ổn định nhiệt và môi trường cao hơn, chuẩn hóa các quy trình kiểm soát chất lượng ở quy mô công nghiệp, cũng như phát triển các tiếp cận thiết kế và mô hình hóa nhằm đánh giá toàn diện hành vi dài hạn, an toàn cháy và hiệu quả vòng đời của hệ kết cấu CLT. Những hướng đi này được xem là điều kiện then chốt để mở rộng phạm vi ứng dụng và nâng cao độ tin cậy của CLT như một vật liệu kết cấu chủ đạo trong xây dựng hiện đại. □

Tài liệu tham khảo

1. Forest Products Laboratory. (2010). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison, WI: USDA Forest Service.
2. Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 331–351.
3. FPInnovations. (2019). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. Vancouver, Canada.
4. Menis, A. (2012). Fire resistance of laminated veneer lumber (LVL) and cross laminated timber (XLAM) elements. PhD Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Italy.
5. Frangi, A., Fontana, M., Hugi, E., & Jöbstl, R. (2009). Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1078–1087.
6. Suzuki, J. I., Mizukami, T., Naruse, T., & Kawai, S. (2016). Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*, 52, 1337–1360.
7. Tran, T. T. (2021). Comportement au feu des structures bois assemblées par des tourillons en bois densifié. PhD Thesis, Université de Lorraine, France.

NHỮNG TẤM HỘ CHIẾU QUYỀN LỰC NHẤT THẾ GIỚI NĂM 2026

➔Thụy Liên

Theo báo cáo mới nhất của Henley Passport Index, ba vị trí dẫn đầu đều thuộc về các quốc gia châu Á: Singapore giữ ngôi vương (số 1), trong khi Nhật Bản và Hàn Quốc đồng hạng 2.

Cụ thể, công dân Singapore được hưởng quyền miễn thị thực tới 192 trong số 227 quốc gia và vùng lãnh thổ được theo dõi bởi chỉ số này. Nhật Bản và Hàn Quốc theo sát phía sau với quyền miễn thị thực tới 188 điểm đến.

Do Henley tính các quốc gia có cùng điểm số vào một vị trí xếp hạng, nên có tới 5 quốc gia châu Âu cùng chia sẻ vị trí thứ 3: Đan Mạch, Luxembourg, Tây Ban Nha, Thụy Điển và Thụy Sĩ. Tất cả đều được miễn thị thực tới 186 quốc gia và vùng lãnh thổ.

Vị trí thứ 4 cũng hoàn toàn thuộc về châu Âu với điểm số 185, bao gồm: Áo, Bỉ, Phần Lan, Pháp, Đức, Hy Lạp, Ireland, Ý, Hà Lan và Na Uy.

Vị trí thứ 5, với 184 điểm, thuộc

về Hungary, Bồ Đào Nha, Slovakia, Slovenia và Các Tiểu vương quốc Ả Rập Thống nhất (UAE).

UAE là quốc gia có thành tích ấn tượng nhất trong lịch sử 20 năm của Henley Passport Index, bổ sung thêm 149 điểm đến miễn thị thực kể từ năm 2006 và leo 57 bậc trên bảng xếp hạng.

Báo cáo cho biết thành quả này đến từ nỗ lực ngoại giao bền bỉ và chính sách tự do hóa thị thực của UAE.

Trong khi đó, Vương quốc Anh là quốc gia có mức sụt giảm mạnh nhất theo năm trên chỉ số này, hiện chỉ được miễn thị thực tới 182 điểm đến, ít hơn 8 điểm so với 12 tháng trước.

Mỹ đã trở lại vị trí thứ 10 với 179 điểm, sau khi rớt khỏi top đầu lần đầu tiên vào cuối năm 2025. Tuy nhiên, đây không hẳn là sự phục hồi như về



bề ngoài. Do nhiều quốc gia có thể cùng đứng một thứ hạng, thực tế có tới 37 quốc gia xếp trên Mỹ, nhiều hơn một quốc gia so với thời điểm cuối năm 2025, theo hãng tin CNN.

Ở chiều ngược lại của bảng xếp hạng, tại vị trí 101, Afghanistan vẫn đứng cuối với quyền miễn thị thực chỉ tới 24 điểm đến. Syria đứng thứ 100 (26 điểm đến) và Iraq đứng thứ 99 (29 điểm đến).

Điều này tạo ra khoảng cách rất lớn về quyền tự do đi lại lên tới 168 điểm đến giữa hộ chiếu đứng đầu và cuối bảng. □