

PHARMACEUTICAL ENGINEERING: OVERVIEW OF ROLES, COMPETENCIES, AND FUTURE DIRECTIONS

Nguyen Tung Duong, Ngo Nguyen Quynh Anh, Ho Thi Thanh Mai*

Hai Duong Central College of Pharmacy - 324 Nguyen Luong Bang, Le Thanh Nghi Ward, Hai Phong City, Vietnam

Received: 13/09/2025

Revised: 02/10/2025; Accepted: 10/10/2025

ABSTRACT

Objective: This study provides an overview of the current development status of pharmaceutical engineering in Vietnam and globally, analyzes its core role within the pharmaceutical manufacturing value chain, and identifies future challenges and opportunities.

Methods: A systematic literature review was conducted using reputable scientific databases such as PubMed, Scopus, and Google Scholar, along with industry reports from organizations like the International Society for Pharmaceutical Engineering.

Results: Pharmaceutical engineering serves as the foundation of the pharmaceutical industry, responsible for the design, operation, and optimization of the entire drug manufacturing process. Engineers in this field are the primary force behind the implementation of GMP standards, ensuring product quality, safety, and efficacy. The role of Pharmaceutical Engineering is concentrated mainly in manufacturing plants and research and development institutes. However, the field faces challenges such as a dependence on imported technology, a gap between academic training and industrial demands, and a shortage of highly-skilled human resources in emerging areas like biotechnology.

Conclusion: Pharmaceutical engineering directly contributes to enhancing the competitiveness of the national pharmaceutical industry, ensuring health security and drug quality. For sustainable development, strategic investment is required to modernize educational programs, strengthen collaboration between academia and industry, and establish policies that encourage research, development, and technology transfer in pharmaceutical manufacturing.

Keywords: Pharmaceutical engineering, pharmaceutical industry, pharmaceutical manufacturing, good manufacturing practices.

*Corresponding author

Email: maiho1319@gmail.com **Phone:** (+84) 343679487 **https://doi.org/10.52163/yhc.v66iCD18.3478**

NGHỀ KỸ THUẬT DƯỢC: KHÁI QUÁT VỀ VAI TRÒ, NĂNG LỰC VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Nguyễn Tùng Dương, Ngô Nguyễn Quỳnh Anh, Hồ Thị Thanh Mai*

Trường Cao đẳng Dược Trung ương Hải Dương - 324 Nguyễn Lương Bằng, P. Lê Thanh Nghị, Tp. Hải Phòng, Việt Nam

Ngày nhận: 13/09/2025

Ngày sửa: 02/10/2025; Ngày đăng: 10/10/2025

ABSTRACT

Mục tiêu: Nghiên cứu này tổng quan thực trạng phát triển ngành kỹ thuật dược tại Việt Nam và trên thế giới, phân tích vai trò cốt lõi trong chuỗi giá trị sản xuất dược phẩm, đồng thời nhận diện các thách thức và cơ hội phát triển trong tương lai.

Phương pháp: Tổng quan tài liệu có hệ thống từ các nguồn khoa học uy tín như PubMed, Scopus, Google Scholar, cùng các báo cáo ngành từ các tổ chức như Hiệp hội Kỹ thuật Dược phẩm Quốc tế.

Kết quả: Ngành kỹ thuật dược là nền tảng của công nghiệp dược, đảm nhận vai trò thiết kế, vận hành, và tối ưu hóa toàn bộ quy trình sản xuất thuốc. Họ là lực lượng chính trong việc triển khai các tiêu chuẩn GMP, đảm bảo chất lượng, an toàn và hiệu quả của sản phẩm. Vai trò của kỹ thuật dược tập trung chủ yếu tại các nhà máy sản xuất, viện nghiên cứu và phát triển. Tuy nhiên, ngành này đang đối mặt với các thách thức như sự phụ thuộc vào công nghệ nhập khẩu, khoảng cách giữa đào tạo và thực tiễn công nghiệp, và sự thiếu hụt nguồn nhân lực chất lượng cao trong các lĩnh vực mới như công nghệ sinh học.

Kết luận: Kỹ thuật dược đóng góp trực tiếp vào việc nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành công nghiệp dược quốc gia, đảm bảo an ninh y tế và chất lượng thuốc. Để phát triển bền vững, cần có sự đầu tư chiến lược vào việc hiện đại hóa chương trình đào tạo, tăng cường hợp tác giữa nhà trường và doanh nghiệp, và xây dựng chính sách khuyến khích nghiên cứu, phát triển và chuyển giao công nghệ sản xuất dược phẩm.

Từ khóa: Kỹ thuật dược, công nghiệp dược, sản xuất dược phẩm, thực hành tốt sản xuất.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành Dược Việt Nam đang trong giai đoạn chuyển mình mạnh mẽ, tiệm cận với các tiêu chuẩn quốc tế. Chiến lược quốc gia phát triển ngành Dược Việt Nam giai đoạn đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đã đặt ra mục tiêu then chốt là xây dựng nền công nghiệp dược phẩm trong nước vững mạnh, tự chủ, có khả năng cạnh tranh, đáp ứng nhu cầu chăm sóc sức khỏe nhân dân và từng bước hội nhập sâu rộng vào chuỗi giá trị toàn cầu [1]. Để hiện thực hóa mục tiêu này, việc phát triển và tối ưu hóa năng lực sản xuất công nghiệp là một yêu cầu cấp thiết, không chỉ dừng lại ở việc đầu tư máy móc mà còn phải chú trọng vào nguồn nhân lực chất lượng cao vận hành và làm chủ công nghệ.

Trong bối cảnh đó, ngành kỹ thuật dược (pharmaceutical engineering) khẳng định vị thế là một bộ phận xương sống, là động lực trung tâm cho sự phát triển của công nghiệp dược phẩm hiện đại.

Khác với dược sĩ lâm sàng tập trung vào tương tác thuốc trên bệnh nhân hay dược sĩ tại cộng đồng, các chuyên gia kỹ thuật dược tập trung vào toàn bộ vòng đời công nghiệp của sản phẩm thuốc. Họ là những người chịu trách nhiệm nghiên cứu, thiết kế, triển khai, vận hành, thẩm định và tối ưu hóa các quy trình, thiết bị và nhà máy sản xuất, đảm bảo mọi khía cạnh về chất lượng, an toàn và hiệu quả tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn quốc tế như thực hành tốt sản xuất thuốc (GMP) [2-3].

Tuy nhiên, tại Việt Nam vẫn tồn tại một khoảng cách đáng kể giữa chương trình đào tạo và yêu cầu của các doanh nghiệp dược phẩm hiện đại, sự thiếu hụt nguồn nhân lực có chuyên môn sâu trong các lĩnh vực mới như sản xuất dược phẩm sinh học, và sự phụ thuộc lớn vào công nghệ, thiết bị nhập khẩu... [4]. Xuất phát từ thực tiễn đó, bài tổng quan hệ thống này được thực hiện nhằm các mục tiêu làm rõ vai

*Tác giả liên hệ

Email: maiho1319@gmail.com Điện thoại: (+84) 343679487 <https://doi.org/10.52163/yhc.v66iCD18.3478>

trò, năng lực cốt lõi và phạm vi hoạt động của ngành kỹ thuật dược trong chuỗi giá trị dược phẩm.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu bao gồm các tài liệu khoa học, bài báo, luật và quy định, báo cáo ngành và các hướng dẫn thực hành liên quan đến vai trò, đào tạo và hoạt động của kỹ thuật dược (hoặc các chức danh tương đương) tại Việt Nam và quốc tế.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu có hệ thống. Các cơ sở dữ liệu khoa học như PubMed, Scopus, ScienceDirect và Google Scholar được truy vấn để thu thập các nghiên cứu liên quan. Đồng thời, các văn bản pháp quy như Luật Dược 2016, các thông tư của Bộ Y tế về thực hành tốt nhà thuốc (GPP), hoạt động kho dược, và các báo cáo ngành từ các tổ chức uy tín được phân tích để xây dựng một bức tranh toàn cảnh về nghề.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Khái niệm và phạm vi ngành kỹ thuật dược

Kỹ thuật dược là một lĩnh vực kỹ thuật đa ngành, tích hợp sâu sắc các nguyên lý của kỹ thuật hóa học, kỹ thuật cơ khí, công nghệ sinh học và khoa học dược phẩm. Mục tiêu cốt lõi của ngành là nghiên cứu, thiết kế, phát triển, thẩm định và tối ưu hóa các quy trình, thiết bị và nhà máy phục vụ cho việc sản xuất dược phẩm và các sản phẩm liên quan đến sức khỏe ở quy mô công nghiệp [1-2]. Khác với dược sĩ lâm sàng tập trung vào tương tác thuốc trên bệnh nhân, kỹ thuật dược tập trung vào vòng đời của sản phẩm thuốc, từ giai đoạn xây dựng công thức ban đầu đến đóng gói thành phẩm và phân phối, đảm bảo mọi khía cạnh chất lượng, an toàn, hiệu quả và tuân thủ các tiêu chuẩn thực hành sản xuất tốt (GMP) nghiêm ngặt nhất [3-4].

Các nguyên tắc cốt lõi và trách nhiệm chính [4-5]:

- Thiết kế và tối ưu hóa: kỹ thuật dược là kiến trúc sư của quy trình sản xuất. Họ chịu trách nhiệm thiết kế, cải tiến và tối ưu hóa toàn bộ hệ thống sản xuất, từ cơ sở hạ tầng nhà máy, hệ thống phụ trợ (HVAC, nước tinh khiết) đến các thiết bị cụ thể. Mục tiêu là tạo ra một quy trình sản xuất hiệu quả, ổn định, đồng nhất và có khả năng nhân rộng (scalable).

- Kiểm soát chất lượng: đảm bảo an toàn, hiệu quả và chất lượng của dược phẩm là ưu tiên hàng đầu. Kỹ thuật dược thiết lập và triển khai các biện pháp kiểm soát chất lượng khắt khe trong suốt quá trình sản xuất, từ kiểm tra nguyên liệu đầu vào, giám sát

các thông số tới hạn của quy trình (critical process parameters) đến kiểm nghiệm bán thành phẩm và thành phẩm, đảm bảo tuân thủ tuyệt đối tiêu chuẩn GMP.

- Tuân thủ quy định: ngành dược được quản lý bởi một hệ thống quy định chặt chẽ. Kỹ thuật dược phải đảm bảo mọi hoạt động sản xuất, tài liệu và hồ sơ đều tuân thủ các quy định của cơ quan quản lý quốc gia (Cục Quản lý Dược Việt Nam) và các tiêu chuẩn quốc tế (FDA, EMA, PIC/S), từ đó đảm bảo sản phẩm được cấp phép lưu hành và an toàn cho sức khỏe cộng đồng.

- Kỹ thuật quy trình: đây là trái tim của ngành, bao gồm việc nghiên cứu và phát triển các công nghệ để chuyển đổi các thành phần hóa học và sinh học thành dược phẩm hoàn chỉnh. Các hoạt động cụ thể bao gồm các quá trình như trộn, nghiền, tạo hạt, dập viên, bao phim, đông khô, lên men, tinh chế và chiết xuất.

Phạm vi công việc của một kỹ thuật dược rất rộng, bao gồm các lĩnh vực chuyên sâu sau [2], [6]:

- Nghiên cứu công thức và phát triển sản phẩm: tham gia vào giai đoạn đầu của việc phát triển thuốc, đặc biệt trong việc xây dựng các hệ thống phân phối thuốc mới (ví dụ: viên nén giải phóng có kiểm soát, hệ nano, liposome) và tối ưu hóa công thức bào chế để phù hợp với sản xuất quy mô lớn.

- Thiết kế nhà máy sản xuất: lập kế hoạch, thiết kế, xây dựng và thẩm định các nhà máy sản xuất dược phẩm, đảm bảo dòng di chuyển của nguyên liệu, nhân sự và sản phẩm hợp lý (material and personnel flow), chống nhiễm chéo và đáp ứng các tiêu chuẩn phòng sạch.

- Thiết kế và vận hành thiết bị: chịu trách nhiệm lựa chọn, thiết kế, vận hành, bảo trì và thẩm định các máy móc, hệ thống tự động hóa trong dây chuyền sản xuất (máy dập viên, máy ép vỉ, hệ thống phản ứng sinh học, hệ thống tinh lọc...).

- Đảm bảo chất lượng: xây dựng và duy trì hệ thống quản lý chất lượng toàn diện, đảm bảo mọi khâu trong quy trình sản xuất, từ nguyên liệu thô đến thành phẩm, đều đáp ứng các tiêu chuẩn chất lượng đã được xác định trước.

- Đóng gói và phân phối: giám sát việc thiết kế bao bì cấp 1 (tiếp xúc trực tiếp với thuốc) và cấp 2 để bảo vệ sản phẩm, đồng thời quản lý các khía cạnh kỹ thuật của chuỗi cung ứng và hậu cần, đặc biệt là duy trì dây chuyền lạnh (cold chain) đối với các sản phẩm sinh học và vắc-xin.

3.2. Vai trò và tác động của nghề kỹ thuật dược và hệ thống y tế

Kỹ thuật dược là động lực trung tâm cho sự phát triển của ngành công nghiệp dược phẩm và có tác

động sâu rộng đến hệ thống y tế quốc gia. Vai trò của họ không chỉ giới hạn trong nhà máy mà còn là nền tảng cho an ninh y tế và khả năng tiếp cận thuốc của người dân [2].

Nâng cao năng lực sản xuất quốc gia: kỹ thuật dược trực tiếp nâng cao năng lực tự chủ về dược phẩm của một quốc gia. Bằng cách thiết kế các nhà máy hiện đại và tối ưu hóa quy trình sản xuất, họ giúp sản xuất trong nước các loại thuốc generic chất lượng cao, thuốc thiết yếu, vắc-xin và các sản phẩm sinh học, giảm sự phụ thuộc vào nhập khẩu và đảm bảo nguồn cung ổn định, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp về y tế công cộng [7-8].

Đảm bảo chất lượng thuốc lưu hành: vai trò của kỹ thuật dược trong việc triển khai và giám sát hệ thống GMP là yếu tố quyết định đến chất lượng của mọi viên thuốc được sản xuất. Tác động của họ đảm bảo rằng thuốc đến tay người bệnh không chỉ hiệu quả về mặt điều trị mà còn an toàn tuyệt đối, không có tạp chất, không bị nhiễm khuẩn và có độ ổn định trong suốt vòng đời sản phẩm.

Thúc đẩy đổi mới và phát triển sản phẩm: họ là cầu nối quan trọng giữa phòng thí nghiệm R&D và thị trường. Bằng cách phát triển các công nghệ bào chế tiên tiến và quy trình sản xuất khả thi, kỹ thuật dược giúp thương mại hóa các phát minh khoa học, đưa các loại thuốc mới, các hệ phân phối thuốc thông minh đến gần hơn với bệnh nhân [9].

Tối ưu hóa chi phí và tăng khả năng tiếp cận thuốc: việc cải tiến quy trình, tăng hiệu suất và giảm lãng phí trong sản xuất giúp hạ giá thành sản phẩm. Điều này có tác động trực tiếp đến hệ thống y tế bằng cách làm cho các liệu pháp điều trị trở nên hợp lý hơn về chi phí, tăng khả năng chi trả của hệ thống bảo hiểm y tế và của người dân.

3.3. Triển vọng phát triển ngành nghề

Tương lai của ngành kỹ thuật dược gắn liền với sự phát triển của y học hiện đại và chiến lược tự chủ y tế của quốc gia, với nhiều cơ hội rộng mở [11]:

- Việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI), internet vạn vật (IoT), và phân tích dữ liệu lớn (big data) vào sản xuất đang mở ra một kỷ nguyên mới. Kỹ thuật dược sẽ là người tiên phong trong việc ứng dụng các công nghệ này để xây dựng các “nhà máy thông minh”, giám sát quy trình thời gian thực, dự đoán lỗi và tối ưu hóa hiệu suất một cách liên tục [9].

- Xu hướng chuyển dịch từ thuốc hóa dược truyền thống sang các sản phẩm sinh học (kháng thể đơn dòng, vắc-xin, liệu pháp gen) tạo ra một lĩnh vực hoạt động hoàn toàn mới và đầy tiềm năng. Kỹ thuật dược sẽ đóng vai trò chủ chốt trong việc thiết kế các quy trình sản xuất phức tạp cho các sản phẩm này.

- Sau đại dịch COVID-19, nhận thức về tầm quan trọng của việc tự chủ sản xuất thuốc và vắc-xin đã

tăng lên rõ rệt. Chính phủ và các doanh nghiệp đang đầu tư mạnh mẽ vào việc xây dựng các nhà máy công nghệ cao, tạo ra nhu cầu rất lớn về kỹ thuật dược có tay nghề cao để dẫn dắt các dự án này.

4. BÀN LUẬN

Các chuyên gia trong lĩnh vực kỹ thuật dược chính là lực lượng nòng cốt, quyết định năng lực công nghệ và khả năng cạnh tranh của một nền công nghiệp sản xuất dược phẩm. Họ không chỉ vận hành dây chuyền mà còn là những người thiết kế, thẩm định, cải tiến và làm chủ công nghệ sản xuất, trực tiếp hiện thực hóa các tiêu chuẩn GMP quốc tế.

Tại Việt Nam, sự phát triển chưa đồng bộ giữa hạ tầng công nghệ và nguồn nhân lực chất lượng cao, cùng với đó là sự phụ thuộc lớn vào công nghệ nhập khẩu. Nhiều nhà máy đã đầu tư hàng triệu đô la cho dây chuyền hiện đại, nhưng lại gặp khó khăn trong việc tuyển dụng các chuyên gia đủ năng lực để tối ưu hóa vận hành, thực hiện các quy trình thẩm định phức tạp hoặc dẫn dắt các dự án nghiên cứu phát triển (R&D) sản phẩm mới. Nhìn ra thế giới, bức tranh này trở nên rõ nét hơn khi so sánh với các mô hình phát triển khác. Tại các quốc gia có nền công nghiệp dược hàng đầu (Mỹ, Đức, Thụy Sĩ, Nhật Bản), họ đã xây dựng một hệ sinh thái hoàn chỉnh, nơi có sự liên kết hữu cơ và chặt chẽ giữa Viện nghiên cứu - Trường đại học - Doanh nghiệp. Các chuyên gia kỹ thuật dược được đào tạo trong môi trường thực tiễn, tham gia vào các dự án R&D từ sớm và có một lộ trình sự nghiệp được chuẩn hóa. Họ không chỉ là người ứng dụng công nghệ, mà còn là người tạo ra công nghệ lõi, giúp quốc gia giữ vững vị thế tiên phong. Trong khi đó, bài học từ các cường quốc dược phẩm mới nổi trong khu vực lại mang tính tham khảo thực tiễn hơn cho Việt Nam. Ấn Độ, từ một quốc gia phụ thuộc, đã vươn lên thành “công xưởng generic của thế giới” nhờ các chính sách ưu đãi mạnh mẽ của chính phủ và tập trung đầu tư vào đào tạo nguồn nhân lực quy mô lớn, chuyên sâu về tối ưu hóa quy trình sản xuất. Hàn Quốc lại chọn con đường đi vào công nghệ cao dược phẩm sinh học nhờ chiến lược đầu tư tập trung của nhà nước vào R&D và xây dựng các khu công nghệ sinh học quy mô lớn, thu hút nhân tài từ khắp nơi trên thế giới.

Từ sự so sánh trên, có thể rút ra những định hướng phát triển với ngành kỹ thuật dược tại Việt Nam:

- Sự phát triển của ngành kỹ thuật dược không thể chỉ trông chờ vào nỗ lực của riêng doanh nghiệp. Cần có một chiến lược quốc gia với các chính sách đột phá về thuế, tín dụng, và pháp lý để khuyến khích R&D, chuyển giao công nghệ và sản xuất các dược phẩm có giá trị cao, đặc biệt là dược phẩm sinh học.

- Đầu tư vào con người phải đi trước một bước: công nghệ có thể mua được, nhưng nhân tài thì phải đào

tạo. Việt Nam cần một cuộc cách mạng trong giáo dục đại học và sau đại học cho ngành này. Chương trình đào tạo phải được cải cách triệt để theo hướng ứng dụng, gắn liền với nhu cầu của doanh nghiệp, và phải được quốc tế hóa để bắt kịp các tiêu chuẩn toàn cầu.

- Liên kết “ba nhà” (Nhà nước - Viện/Trường - Doanh nghiệp) là chìa khóa thành công: mô hình hợp tác lỏng lẻo hiện nay cần được thay thế bằng các cơ chế liên kết sâu sắc, nơi doanh nghiệp “đặt hàng” đào tạo, viện/trường tham gia giải quyết bài toán công nghệ của doanh nghiệp, và nhà nước tạo ra hành lang pháp lý và nguồn lực hỗ trợ.

5. KẾT LUẬN

Ngành kỹ thuật dược có vai trò nền tảng và mang tính chiến lược trong việc nâng cao năng lực tự chủ và sức cạnh tranh của công nghiệp dược phẩm quốc gia để thực hiện và triển khai GMP, làm chủ công nghệ và đảm bảo chất lượng sản phẩm từ khâu nghiên cứu đến sản xuất. Kỹ thuật dược đóng góp trực tiếp vào việc nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành công nghiệp dược quốc gia, đảm bảo an ninh y tế và chất lượng thuốc. Để phát triển bền vững, cần có sự đầu tư chiến lược vào việc hiện đại hóa chương trình đào tạo, tăng cường hợp tác giữa nhà trường và doanh nghiệp, và xây dựng chính sách khuyến khích nghiên cứu, phát triển và chuyển giao công nghệ sản xuất dược phẩm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1165/QĐ-TTg năm 2023 phê duyệt Chiến lược quốc gia phát triển ngành Dược Việt Nam giai đoạn đến năm 2030 và tầm nhìn đến năm 2045.
- [2] Role and impact of pharmaceutical engineering in drug development [Internet]. Longdom, 2023 Jun 11. [cited 2025 Aug 30]. Available from: <https://www.longdom.org/open-access/the-role-and-impact-of-pharmaceutical-engineering-in-drug-development-102202.html>
- [3] World Health Organization. Good Manufacturing Practice (GMP) standards [Internet]. [cited 2025 Aug 30]. Available from: <https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/gmp>
- [4] Công ty Cổ phần Nghiên cứu ngành và Tư vấn Việt Nam (VIRAC). Báo cáo ngành Dược phẩm 3Q/2023.
- [5] White C.L, Hohmeier K.C. Pharmacy Informatics: Current and Future Roles for the Pharmacy Technician. J Pharm Technol, 2015 Dec, 31 (6): 247-52.
- [6] Steinhubl S.R, Muse E.D, Topol E.J. Technology and the Future of Healthcare [Internet], 2013 Nov 30 [cited 2025 Aug 30]. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4147743/>
- [7] University of Brighton. Technology in pharmacy: shaping the future of healthcare [Internet], 2018 Dec 31. Available from: <https://www.brighton.ac.uk/studying-here/subject-areas/applied-sciences/pharmacy/technology-in-pharmacy.aspx>
- [8] Pharma Korea, Pharmaceutical and Biopharmaceutical Industry in Korea, 2022. Available from: <https://www.khidi.or.kr/board/view?pageNum=1&rowCnt=3&no1=&linkId=48869269&menuId=MENU02296>
- [9] Zellmer W. The Future of Health-System Pharmacy: Opportunities and Challenges in Practice Model Change. Ann Pharmacother, 2012, 46 (Suppl 1): S41-5.
- [10] Gordon Liu, Eric Q. Wu, The Development of Health Technology Assessment in Asia: Current Status and Future Trends, Value in Health Regional Issues, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.vhri.2019.08.472>.
- [11] Chenected. Process Engineers in the Pharmaceutical Industry - AIChE [Internet]. [cited 2025 Aug 30]. Available from: <https://chenected.aiche.org/2023/08/process-engineers-pharmaceutical-industry>
- [12] NCBI - PMC. Artificial Intelligence and Internet of Things Integration in Pharmaceutical Manufacturing [Internet]. [cited 2025 Aug 30]. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11944607/>