



CÔNG NGHỆ VẬT LIỆU NANO VÀ CÁCH MẠNG TRONG Y HỌC CÁ THỂ HÓA VÀ DƯỢC PHẨM THÔNG MINH

Lương Minh Cừ, Vũ Bá Dũng*, Nguyễn Minh Tuấn

Trường Đại học Cửu Long

*Email: vubazung305@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/08/2025; Ngày phản biện: 16/09/2025; Ngày duyệt bài: 22/09/2025

TÓM TẮT

Công nghệ vật liệu nano đang trở thành một trong những nền tảng quan trọng nhất thúc đẩy đổi mới trong y học hiện đại, nó không chỉ nâng cao độ chính xác trong chẩn đoán và theo dõi sức khỏe mà còn mở ra khả năng phát triển dược phẩm thông minh và y học cá thể hóa. Các hệ dẫn truyền thuốc nano cho phép vận chuyển hoạt chất đến đúng đích, giảm tác dụng phụ và tối ưu hóa liều lượng cho từng bệnh nhân. Đồng thời, các cảm biến nano và vật liệu nano tiên tiến góp phần cải thiện khả năng phát hiện sớm và giám sát liên tục tình trạng bệnh. Trong tương lai, sự kết hợp giữa nano – AI – Big Data – sinh học phân tử hứa hẹn tạo nên một hệ sinh thái y tế thông minh, mở ra kỷ nguyên chăm sóc sức khỏe chính xác, an toàn và nhân văn hơn.

Từ khóa: Công nghệ vật liệu nano; Y học cá thể hóa; Dược phẩm thông minh; Hệ dẫn truyền thuốc nano; Cảm biến nano; Y tế 4.0; Chăm sóc sức khỏe chính xác.

ABSTRACT

Nanomaterial Technology is emerging as one of the most critical foundations driving innovation in modern medicine. With unique properties at the nanometer scale, it not only enhances the accuracy of diagnosis and health monitoring but also enables the development of smart pharmaceuticals and personalized medicine. Nano drug delivery systems allow targeted delivery of therapeutic agents, minimizing side effects and optimizing dosage for each patient. Meanwhile, nanosensors and advanced nanomaterials contribute to early disease detection and continuous monitoring of patient conditions. In the future, the integration of nanotechnology with AI, Big Data, and molecular biology is expected to create a smart healthcare ecosystem, ushering in a new era of precise, safe, and human-centered healthcare.

Keywords: Nanomaterial Technology; Personalized medicine; Smart pharmaceuticals; Nano drug delivery systems; Nanosensors; Medicine 4.0; Precision healthcare.

1. Mở đầu

Trong bối cảnh thế kỷ XXI, sự phát triển mạnh mẽ của khoa học và công nghệ đã làm thay đổi căn bản cách thức con người tiếp cận, chẩn đoán và điều trị bệnh tật. Một trong những lĩnh vực có ảnh hưởng sâu rộng nhất chính là công nghệ vật liệu nano – khoa

học nghiên cứu và ứng dụng vật liệu ở quy mô nanomet (10^{-9} m), nơi các tính chất lý – hóa – sinh của vật chất biểu hiện khác biệt so với kích thước vĩ mô [1,2]. Chính những đặc tính độc đáo này đã mở ra khả năng ứng dụng to lớn trong y học và dược học, đặc biệt trong xu thế y học cá thể hóa và dược

phẩm thông minh [3,4,5]. Y học cá thể hóa hướng đến mục tiêu tối ưu hóa điều trị dựa trên đặc điểm di truyền, sinh học và lối sống của từng bệnh nhân [6,7]. Công nghệ vật liệu nano có thể tạo ra các hạt nano sinh học, hệ dẫn truyền nano hay cảm biến nano đã chứng minh tiềm năng vượt trội trong việc: gia tăng độ chính xác của chẩn đoán hình ảnh và sinh học phân tử; nâng cao hiệu quả dẫn truyền thuốc, giảm thiểu tác dụng phụ ngoài ý muốn; cho phép phát triển các liệu pháp “trúng đích”, phù hợp với từng bệnh nhân [4,8,9,10,11].

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0, việc nghiên cứu, ứng dụng và phát triển công nghệ nano trong y – dược học không chỉ là xu thế tất yếu, mà còn là cơ hội để nâng cao chất lượng chăm sóc sức khỏe con người [12,13].

2. Phương pháp nghiên cứu và cơ sở lý thuyết

Bài báo cáo này được thực hiện theo phương pháp tổng quan tài liệu có hệ thống nhằm phân tích xu hướng và tiềm năng ứng dụng công nghệ vật liệu nano trong y học hiện đại. Các bước tiến hành bao gồm:

Nguồn dữ liệu: PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar và một số cơ sở dữ liệu trong nước (VD: VJOL, Tạp chí Y học Việt Nam).

Tiêu chí lựa chọn tài liệu bao gồm: các bài báo khoa học, báo cáo nghiên cứu, bài tổng quan, tài liệu chính sách có nội dung liên quan đến ứng dụng công nghệ nano trong chẩn đoán, điều trị, theo dõi bệnh và phát triển dược phẩm.

Phân tích và tổng hợp: Các tài liệu thu thập được phân loại theo nhóm chủ đề: (i) hệ dẫn truyền thuốc nano, (ii) cảm biến nano và giám sát sức khỏe, (iii) nano trong y học cá thể hóa, (iv) kết hợp nano với AI và Big Data.

Đảm bảo tính khách quan: Quá trình chọn lọc và phân tích tài liệu được tiến hành độc lập bởi ít nhất hai người nghiên cứu để giảm thiểu sai lệch; Các kết quả phân tích được đối chiếu với các báo cáo và chính sách y tế quốc tế (WHO, FDA, EMA) cũng như định hướng trong nước để bảo đảm tính toàn diện.

2.1. Công nghệ nano trong y – dược học

Công nghệ vật liệu nano là ngành khoa học – kỹ thuật nghiên cứu và chế tạo vật liệu ở kích thước nanomet. Ở cấp độ này, các hạt vật chất thể hiện những tính chất đặc biệt về diện tích bề mặt, tính chất quang học, từ tính, cũng như khả năng tương tác sinh học khác hẳn so với dạng khối thông thường [2,10]. Trong y – dược học, công nghệ nano được ứng dụng chủ yếu ở hai khía cạnh: **Nano chẩn đoán:** phát triển các hạt nano, cảm biến nano để phát hiện dấu ấn sinh học và hỗ trợ hình ảnh y khoa độ phân giải cao [3,10]; **Nano trị liệu:** chế tạo hệ dẫn truyền thuốc nano giúp vận chuyển hoạt chất tới đúng vị trí, điều khiển tốc độ và cơ chế giải phóng thuốc [4,8,9,11]. Điểm mạnh của công nghệ nano là khả năng tương thích sinh học, tăng độ chọn lọc và giảm độc tính toàn thân, nhờ đó mở ra hướng đi mới cho điều trị nhiều bệnh lý phức tạp [1,4,5].

2.2. Y học cá thể hóa

Y học cá thể hóa là mô hình chăm sóc sức khỏe dựa trên đặc điểm di truyền, sinh học phân tử, lối sống và môi trường của từng cá nhân [6,7]. Thay vì áp dụng phác đồ chung, phương pháp này hướng tới nguyên tắc “đúng thuốc – đúng bệnh nhân – đúng liều – đúng thời điểm” [6]. Công nghệ nano đóng vai trò như một cầu nối quan trọng giúp hiện thực hóa mục tiêu y học cá thể hóa, nhờ khả năng mang thuốc hoặc chất chỉ thị sinh học tới đúng tế bào đích, nâng cao độ chính xác và giảm thiểu tác dụng phụ [4,8,10].

2.3. Dược phẩm thông minh

Dược phẩm thông minh là thế hệ thuốc mới, được thiết kế với khả năng tự điều chỉnh quá trình hoạt động dựa trên các tín hiệu sinh học hoặc môi trường trong cơ thể [2,3]. Khác với thuốc truyền thống (thường phân tán khắp cơ thể sau khi dùng), dược phẩm thông minh có khả năng: Nhận biết và đáp ứng với những yếu tố như pH, nhiệt độ, enzyme, từ trường, ánh sáng hoặc tín hiệu điện sinh học [1,9]; Giải phóng thuốc theo điều kiện đặc thù của mô bệnh, ví dụ: môi trường acid của khối u hay sự hiện diện của enzyme đặc hiệu [9,10]; Tăng độ chính xác và hiệu quả điều trị, đồng thời giảm thiểu tác dụng phụ [4,11]; Các hệ dẫn truyền thuốc nano chính là nền tảng để phát triển dược phẩm thông minh. Ví dụ: liposome nano giải phóng thuốc khi gặp enzyme của tế bào ung thư, hoặc hạt nano từ tính được dẫn hướng đến vùng tổn thương nhờ từ trường [8,10].

3. Vai trò của công nghệ vật liệu nano trong Y học cá thể hóa

Y học cá thể hóa đặt trọng tâm vào việc thiết kế chiến lược điều trị phù hợp với từng cá nhân, thay vì áp dụng một phác đồ chung cho mọi bệnh nhân. Công nghệ nano đóng vai trò then chốt trong việc hiện thực mục tiêu này, nhờ khả năng tác động chính xác ở cấp độ phân tử và tế bào.

3.1. Chẩn đoán chính xác và phát hiện sớm

Nano-biosensors (cảm biến sinh học nano) có khả năng phát hiện dấu ấn sinh học ở nồng độ cực thấp, từ đó hỗ trợ phát hiện sớm các bệnh lý như ung thư, bệnh tim mạch hay rối loạn chuyển hóa [1,3]. Các hạt nano tương phản được ứng dụng trong chẩn đoán hình ảnh nhằm nâng cao độ phân giải và tăng khả năng phân biệt mô bệnh so với mô lành [9,10]. Nhờ công nghệ vật liệu nano, thông tin chẩn đoán trở nên chi tiết và chính xác

hơn, tạo cơ sở quan trọng để xây dựng liệu pháp điều trị cá thể hóa [4,6].

3.2. Định hình đặc điểm sinh học riêng của từng bệnh nhân

Hạt nano có thể được thiết kế để gắn với các phân tử đặc hiệu trên bề mặt tế bào, từ đó giúp xác định chính xác kiểu hình và gen đặc trưng của bệnh nhân [4,8]. Điều này cho phép bác sĩ phân loại bệnh nhân thành các nhóm nhỏ theo cơ chế bệnh sinh, thay vì chỉ dựa trên triệu chứng lâm sàng [1,6]. Kết quả là quá trình lựa chọn thuốc và liệu pháp điều trị trở nên chính xác hơn, tránh tình trạng dùng thuốc đại trà kém hiệu quả [7,10].

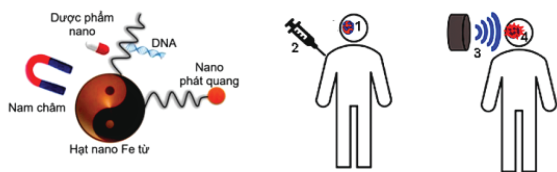
3.3. Theo dõi và giám sát sức khỏe theo thời gian thực

Các hệ thống nano cảm biến có thể được cấy ghép hoặc đeo trên cơ thể, cho phép ghi nhận liên tục các thông số sinh học như glucose, lactate, oxy, hay hormone [1,3]. Dữ liệu thu được sẽ được truyền đến hệ thống phân tích dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI) và dữ liệu lớn (Big Data), từ đó giúp bác sĩ điều chỉnh phác đồ điều trị theo thời gian thực, phù hợp với diễn biến sinh lý của từng bệnh nhân [7,13]. Đây là bước tiến quan trọng trong quản lý các bệnh mạn tính như tiểu đường, tim mạch hay ung thư, vốn đòi hỏi sự theo dõi lâu dài và điều chỉnh linh hoạt [4,6,9].

3.4. Điều trị trúng đích và giảm tác dụng phụ

Các hệ dẫn truyền thuốc nano có khả năng đưa hoạt chất đến đúng cơ quan, mô hoặc thậm chí là tế bào đích. Nhờ đó, thuốc phát huy tác dụng tối đa tại vị trí bệnh, đồng thời giảm thiểu sự phân tán trong cơ thể, giúp hạn chế đáng kể tác dụng phụ toàn thân [4, 8,10]. Đây chính là nền tảng quan trọng để chuyển từ “điều trị đại trà” sang “điều trị cá thể hóa”, phù hợp với cơ địa và tình trạng của từng bệnh nhân [1,6].

Như vậy, công nghệ vật liệu nano không chỉ đóng vai trò là công cụ hỗ trợ chẩn đoán chính xác, mà còn là nền tảng để hiện thực hóa y học cá thể hóa thông qua phân tích gen, theo dõi sức khỏe và điều trị trúng đích [3,7, 9].



Hình 1. Các hệ dẫn truyền thuốc nano (nanocarriers) có thể đưa hoạt chất đến đúng đích (cơ quan, mô hoặc tế bào): 1) Khối u trong não; 2) Đưa dược chất nano hoặc hạt nano phát quang gắn với nano sắt từ vào cơ thể; 3) Từ trường thu hút các dược chất nano có gắn với nano sắt từ tập trung vào khối u não.

4. Dược phẩm thông minh dựa trên công nghệ nano

Nếu y học cá thể hóa nhấn mạnh vào việc điều trị đúng người, đúng thời điểm, thì dược phẩm thông minh chính là công cụ hiện thực hóa mục tiêu này. Dựa trên nền tảng công nghệ nano, dược phẩm thông minh có khả năng tự điều chỉnh quá trình giải phóng hoạt chất theo các tín hiệu sinh học hoặc điều kiện môi trường bên trong cơ thể.

4.1. Hệ dẫn truyền thuốc nano

Một số hệ dẫn truyền thuốc nano tiêu biểu bao gồm: **Liposome nano**: mang thuốc trong cấu trúc lớp kép phospholipid, có khả năng hòa tan cả dược chất ưa nước lẫn ưa béo [10,11]; **Micelle polymer nano**: hình thành từ các polymer ưa nước và kỵ nước, đặc biệt hữu ích trong việc vận chuyển các thuốc khó tan [1,4]; **Dendrimer**: có cấu trúc phân nhánh đa chiều, bề mặt có thể gắn nhiều loại thuốc hoặc phân tử hướng đích cùng lúc [2,3]; **Hạt nano kim loại và oxit kim loại** (như vàng, bạc, oxit sắt...): được ứng dụng trong cả trị liệu (nhiệt trị, quang trị) và chẩn đoán hình ảnh (tác nhân tương phản MRI,

CT, PET) [3,8,9]. Những hệ dẫn truyền này cho phép kiểm soát chính xác liều lượng, vị trí và tốc độ giải phóng thuốc, từ đó tối ưu hóa hiệu quả điều trị và giảm thiểu tác dụng phụ [4,10].

4.2. Cơ chế giải phóng thuốc có kiểm soát

Các hạt dược nano có thể được thiết kế để giải phóng thuốc theo những cơ chế nhạy cảm với môi trường hoặc tín hiệu kích thích: **Theo pH**: thuốc chỉ được phóng thích trong môi trường acid, điển hình là vi môi trường của khối u [8,10]; **Theo enzyme**: thuốc chỉ được giải phóng khi gặp enzyme đặc hiệu trong mô bệnh, giúp tăng độ chọn lọc điều trị [1,4]; **Theo nhiệt độ hoặc ánh sáng**: các hạt nano nhạy nhiệt hoặc quang có thể được kích hoạt bằng tia laser hoặc trường nhiệt từ bên ngoài [3,9]; **Theo từ trường hoặc điện trường**: hạt nano từ tính được dẫn hướng đến vùng tổn thương nhờ từ trường ngoài cơ thể, cho phép tập trung thuốc tại vị trí đích [2,3].

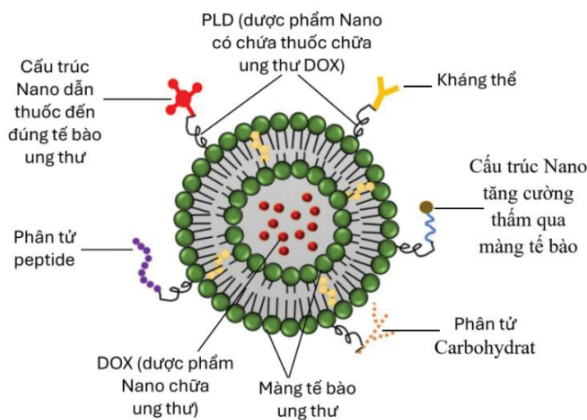
Những cơ chế này giúp giảm thiểu lãng phí thuốc, đồng thời hạn chế tác dụng phụ không mong muốn tại các cơ quan lành [4,11].

4.3. Ưu thế vượt trội so với thuốc truyền thống

Những ưu điểm nổi bật của các hệ dược phẩm nano có thể kể đến: **Tăng tính chọn lọc và khả năng nhắm trúng đích**, nhờ đó thuốc tác động chủ yếu tại vùng bệnh lý [4,8]; **Giảm tần suất sử dụng thuốc** nhờ cơ chế giải phóng kéo dài và có kiểm soát [1,10]; **Nâng cao hiệu quả điều trị** đối với các bệnh khó chữa như ung thư, bệnh thần kinh hay HIV/AIDS [2,3,9].; **Giảm nguy cơ kháng thuốc** thông qua tối ưu hóa liều và phân bố thuốc trong cơ thể [4,11]. Những ưu thế này khẳng định vai trò then chốt của công nghệ nano trong việc đổi mới chiến lược điều trị, hướng tới mô hình y học chính xác và cá thể hóa [6,7].

4.4. Ứng dụng thực tiễn nổi bật

Ứng dụng của **nano-dược phẩm** trong lâm sàng hiện nay rất đa dạng: **Điều trị ung thư**: nhiều chế phẩm đã được Cơ quan Quản lý Thực phẩm và Dược phẩm Hoa Kỳ (FDA) phê duyệt, tiêu biểu như Doxil (liposome doxorubicin) và Abraxane (albumin-bound paclitaxel) [8,9,10];



Hình 2. Mô hình PEGylated liposomal doxorubicin (PLD) thâm nhập vào mô u và cách thuốc được giải phóng trong môi trường khối u: PLD lọt vào khoảng kẽ của mô u, nơi có các mạch máu “không kín” do tính bất thường của mạch máu u. Sau khi vào mô kẽ u, thuốc –DOX được giải phóng từ liposome và khuếch tán trong mô u. PLD được tập trung tại u nhờ hiệu ứng EPR.

Bệnh thần kinh – tâm thần: các hệ **nano-carriers** hỗ trợ vận chuyển thuốc vượt qua hàng rào máu – não (*blood–brain barrier*), mở ra cơ hội điều trị mới cho bệnh Alzheimer, Parkinson và trầm cảm [1,4]; **Bệnh tim mạch và tiểu đường:** hạt nano sinh học được phát triển để hỗ trợ liệu pháp gen và cung cấp insulin giải phóng chậm, giúp cải thiện tuân thủ điều trị [2,3]; **Liệu pháp miễn dịch:** các **nano-vaccine** và hạt nano kích hoạt miễn dịch đang mở ra kỷ nguyên mới trong phòng chống bệnh truyền nhiễm và ung thư [3,5]. Những ứng dụng này chứng minh công nghệ nano không chỉ dừng ở tiềm năng nghiên cứu mà đã và đang trở thành công cụ quan trọng trong thực hành

lâm sàng [7,9,10]. Như vậy, dược phẩm thông minh dựa trên công nghệ nano không chỉ mở rộng khả năng điều trị mà còn tạo ra một mô hình hoàn toàn mới: điều trị cá thể hóa, trúng đích, an toàn và hiệu quả hơn.

5. Triển vọng phát triển trong tương lai

Mặc dù còn tồn tại những thách thức về an toàn, kỹ thuật và pháp lý, công nghệ nano trong y học và dược phẩm vẫn được đánh giá là một trong những lĩnh vực tiềm năng nhất của thế kỷ XXI. Sự hội tụ của nhiều tiến bộ khoa học đang mở ra những triển vọng mới đầy hứa hẹn.

5.1. Tích hợp công nghệ số và trí tuệ nhân tạo

Việc kết hợp AI và Big Data với công nghệ nano sẽ giúp dự đoán phản ứng sinh học của hạt nano trong cơ thể, từ đó tối ưu hóa thiết kế dược phẩm thông minh [3,4,8]. AI còn có khả năng phân tích dữ liệu lâm sàng và mô phỏng tương tác thuốc – gen – môi trường, hỗ trợ xây dựng các chiến lược điều trị cá thể hóa chính xác hơn [6,7]. Các mô hình học máy (machine learning) được kỳ vọng sẽ rút ngắn thời gian thử nghiệm, giảm chi phí nghiên cứu và tăng tốc quá trình thương mại hóa nano-dược phẩm [3,13, 14, 15].

5.2. Vật liệu nano thế hệ mới

Xu hướng phát triển vật liệu nano sinh học đang được chú trọng nhằm tăng tính tương thích sinh học và giảm độc tính tiềm ẩn khi ứng dụng trong cơ thể [1,4]. Một hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn khác là nano-robot y học, được ví như những “bác sĩ tí hon” có khả năng di chuyển trong hệ tuần hoàn để thực hiện các chức năng như chẩn đoán, vận chuyển thuốc và thậm chí can thiệp ở mức vi phẫu [3,8]. Ngoài ra, các hệ lai nano kết hợp nhiều loại vật liệu khác nhau cũng đang được phát triển nhằm tận dụng đồng thời nhiều cơ chế trị liệu, mở rộng phạm vi ứng dụng và nâng cao hiệu quả điều trị [2,9].

5.3. Mở rộng ứng dụng lâm sàng

Trong tương lai, các liệu pháp nano sẽ được ứng dụng mạnh mẽ hơn trong điều trị ung thư, bệnh thần kinh – tâm thần, bệnh tim mạch và tiểu đường [4,8,9]. Các nano-vaccine và liệu pháp miễn dịch nano đang mở ra triển vọng trong phòng chống bệnh truyền nhiễm, bệnh tự miễn và ung thư [3,5,10]. Bên cạnh đó, công nghệ nano còn được kỳ vọng sẽ đóng góp quan trọng vào tái tạo mô và y học tái sinh, hỗ trợ phục hồi chức năng sau chấn thương hoặc phẫu thuật [1,2].

5.4. Hình thành hệ sinh thái y tế thông minh

Trong tương lai, công nghệ nano sẽ trở thành trung tâm của hệ sinh thái y tế thông minh: từ dự đoán nguy cơ bệnh, chẩn đoán sớm, điều trị trúng đích cho đến theo dõi và chăm sóc lâu dài [3,8,10]. Mô hình này không chỉ giúp giảm tải cho hệ thống y tế, mà còn góp phần giảm chi phí điều trị và nâng cao chất lượng cuộc sống bệnh nhân [4,7,9].

Tại Việt Nam, việc ứng dụng công nghệ nano cần được gắn kết chặt chẽ với Chiến lược Chuyển đổi số y tế, đồng thời chú trọng đào tạo nhân lực và đầu tư nghiên cứu, nhằm nắm bắt cơ hội từ làn sóng công nghệ toàn cầu [5, 10-13].

Như vậy, công nghệ nano hứa hẹn trở thành nền tảng của một nền y học cá thể hóa, chính xác và toàn diện, mở ra kỷ nguyên mới cho chăm sóc sức khỏe nhân loại [6,7,13].

6. Kết luận

Công nghệ vật liệu nano đã và đang mở ra một chân trời mới cho y học và dược học hiện đại, đặc biệt trong hai lĩnh vực tiên phong là y học cá thể hóa và dược phẩm thông minh. Nhờ những đặc tính độc đáo ở quy mô nanomet, công nghệ này không chỉ cải thiện độ chính xác trong chẩn đoán và theo dõi sức khỏe, mà còn nâng cao hiệu quả điều trị nhờ các hệ dẫn truyền thuốc trúng

đích, giảm thiểu tác dụng phụ và tối ưu hóa liều lượng cho từng bệnh nhân.

Mặc dù còn tồn tại những thách thức về an toàn, sản xuất, pháp lý và chi phí, triển vọng phát triển trong tương lai là vô cùng rộng mở. Sự kết hợp giữa nano – AI – Big Data – sinh học phân tử sẽ hình thành một hệ sinh thái y tế thông minh, nơi chăm sóc sức khỏe được cá thể hóa tối đa, dựa trên nền tảng dữ liệu chính xác và công nghệ tiên tiến.

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và Cách mạng công nghiệp 4.0, việc đầu tư nghiên cứu và ứng dụng công nghệ vật liệu nano không chỉ mang lại lợi ích khoa học – kinh tế, mà còn góp phần nâng cao chất lượng cuộc sống, tuổi thọ và sức khỏe cộng đồng. Đối với Việt Nam, đây là cơ hội để rút ngắn khoảng cách với thế giới, thúc đẩy đổi mới sáng tạo trong lĩnh vực y – dược học, và khẳng định vị thế trong kỷ nguyên y học chính xác.

Tóm lại, công nghệ vật liệu nano chính là chìa khóa mở ra cuộc cách mạng trong y học cá thể hóa và dược phẩm thông minh, hướng tới một nền y học an toàn, hiệu quả và nhân văn hơn cho toàn nhân loại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Etheridge, M. L., Campbell, S. A., Erdman, A. G., Haynes, C. L., Wolf, S. M., & McCullough, J. (2013). The big picture on nanomedicine: The state of investigational and approved nanomedicine products. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2012.05.013>
- [2] Ventola, C. L. (2012). The nanomedicine revolution: Part 1—Emerging concepts. *Pharmacy and Therapeutics*, 37(9), 512–525. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3466122/>
- [3] Zhang, L., Gu, F. X., Chan, J. M., Wang, A. Z., Langer, R. S., & Farokhzad, O. C. (2008).

- Nanoparticles in medicine: Therapeutic applications and developments. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 83(5), 761–769. <https://doi.org/10.1038/sj.clpt.6100400>
- [4] Bregoli, L., Movia, D., Gavigan-Imedio, J. D., Lysaght, J., Reynolds, J., & Prina-Mello, A. (2016). Nanomedicine applied to translational oncology: A future perspective on cancer treatment. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 12(1), 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.09.010>
- [5] Peer, D., Karp, J. M., Hong, S., Farokhzad, O. C., Margalit, R., & Langer, R. (2007). Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Nature Nanotechnology*, 2(12), 751–760. <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.387>
- [6] Lê Thị Lan Anh, & Nguyễn Văn Minh (2020). Tiềm năng và thách thức của y học cá thể hóa trong điều trị ung thư tại Việt Nam. *Tạp chí Ung thư học Việt Nam*, 8(3), 12–20.
- [7] Tổ chức Y tế Thế giới (WHO). (2021). *Báo cáo toàn cầu về công nghệ số và y tế chính xác* (Bản dịch tiếng Việt). Hà Nội: Nhà xuất bản Y học.
- [8] Bộ Khoa học và Công nghệ (2021). *Chiến lược phát triển và ứng dụng công nghệ nano ở Việt Nam trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp lần thứ tư*. Hà Nội.
- [9] UNESCO. (2022). *Trí tuệ nhân tạo trong y tế và giáo dục: Cơ hội và thách thức* (Bản dịch tiếng Việt). Hà Nội: UNESCO Việt Nam.
- [10] Pelaz, B., Alexiou, C., Alvarez-Puebla, R. A., Alves, F., Andrews, A. M., Ashraf, S., ... & Parak, W. J. (2017). Diverse applications of nanomedicine. *ACS Nano*, 11(3), 2313–2381. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06040>
- [11] Kaur, I. P., Kakkar, V., Deol, P. K., Yadav, M., Singh, M., & Sharma, I. (2014). Nanomedicine and nanopharmaceuticals: Promises and challenges. *Indian Journal of Pharmacology*, 46(6), 605–612. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.144891>
- [12] Đỗ Ngọc Hiếu, & Phạm Hồng Anh (2019). Ứng dụng công nghệ nano trong bào chế dược phẩm tại Việt Nam. *Tạp chí Y Dược học Cần Thơ*, 25(2), 45–53.
- [13] Bộ Y tế (2020). *Chiến lược quốc gia phát triển ngành Dược Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045*. Hà Nội: Nhà xuất bản Y học.
- [14] Akhtar, Y. et al (2024). Machine learning-a new paradigm in nanoparticle-mediated drug delivery to cancerous tissues through the human cardiovascular system enhanced by magnetic field, *Sci Rep*. 14(1):22048. doi: 10.1038/s41598-024-72629-z
- [15] I. Khokhlov et al. (2024). Prediction of Dynamic Toxicity of Nanoparticles Using Machine Learning Models. *Toxics*, 12(10), 750; <https://doi.org/10.3390/toxics12100750>