Vol.8 No.2 Hal.1141-1147
Desember 2025
BEST JOURNAL (Biology Education,Science & Technology) Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
ISSN (Print) : 2614 – 8064
ISSN (Online): 2654 – 4652

# Polimer Dalam Sediaan Patch Transdermal Berbasis Teknologi Nanopartikel

**Tasya Afriani Saputri[1], Devi Ratnasari[2] , Kharisma Zahrotul Aulia[3]**

Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Singaperbangsa Karawang

2310631210021@student.unsika.ac.id (1) devi.ratnasari@fkes.unsika.ac.id (2) ,
2310631210009@student.unsika.ac.id (3)

**ABSTRACT**

Sistem penghantaran obat transdermal (TDDS) merupakan metode non-invasif yang meningkatkan efektivitas terapi, namun penetrasi obat sering terhambat oleh stratum korneum. Teknologi nanopartikel dikembangkan untuk memperbaiki kelarutan, stabilitas, dan permeabilitas obat, dengan polimer berperan penting dalam mengatur pelepasan dan kestabilan patch. Kajian ini menelaah secara naratif untuk menganalisis peran polimer alami, semi-sintetik, dan sintetik dalam patch transdermal berbasis nanopartikel. Hasil menunjukkan bahwa polimer alami unggul dalam biokompatibilitas, semi-sintetik memberikan kestabilan mekanik, dan sintetik menawarkan fleksibilitas serta kontrol pelepasan optimal.

**Kata Kunci**: polimer, patch transdermal, nanopartikel, polimer cerdas, penghantaran obat

**ABSTRACK**

Transdermal drug delivery systems (TDDS) are non-invasive methods that enhance therapeutic efficacy, though drug penetration is often limited by the stratum corneum. Nanoparticle technology improves drug solubility, stability, and permeability, with polymers playing a key role in controlling release and patch stability. This narrative review analyzes to assess the roles of natural, semi-synthetic, and synthetic polymers in nanoparticle-based transdermal patches. Results indicate that natural polymers excel in biocompatibility, semi-synthetic ones provide mechanical stability, and synthetic types offer flexibility and controlled release.

**Keywords**: polymer, transdermal patch, nanoparticle, smart polymer, drug delivery

## I. PENDAHULUAN

### 1. Latar Belakang

Sistem penghantaran obat transdermal (Transdermal Drug Delivery System, TDDS) merupakan salah satu inovasi penting dalam bidang farmasi modern karena memungkinkan pemberian obat secara non-invasif melalui kulit (Li et al., 2020). Metode ini mampu meningkatkan kenyamanan dan kepatuhan pasien serta menghindari metabolisme lintas pertama di hati yang dapat menurunkan bioavailabilitas obat (Wang et al., 2025). TDDS telah diaplikasikan untuk terapi jangka panjang seperti pengobatan diabetes, penyakit kardiovaskular, dan manajemen nyeri, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan stabilitas kadar obat dalam plasma (Liu et al., 2025). Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, penerapan TDDS masih terkendala oleh hambatan fisiologis kulit, terutama pada lapisan stratum korneum yang berfungsi sebagai pelindung utama tubuh terhadap zat asing (Li et al., 2020). Lapisan ini tersusun atas lipid dan protein padat yang hanya dapat ditembus oleh molekul kecil, non-ionik, dan lipofilik (Wang et al., 2025). Akibatnya, banyak molekul obat yang memiliki berat molekul besar atau karakteristik hidrofilik sulit diformulasikan secara transdermal (Li et al., 2020). Tantangan tersebut mendorong penelitian untuk mengembangkan pendekatan baru yang dapat meningkatkan permeabilitas kulit tanpa merusak integritas jaringan (Wang et al., 2025). Kemajuan nanoteknologi telah memberikan solusi yang signifikan terhadap permasalahan tersebut. Teknologi nanopartikel terbukti mampu meningkatkan kelarutan obat dengan kelarutan rendah, melindungi molekul aktif dari degradasi enzimatik, serta memperpanjang waktu pelepasan obat di area target (Saadallah & Hamid, 2022). Penelitian oleh Kumar et al. (2019)

menunjukkan bahwa inkorporasi solid lipid nanoparticles (SLN) ke dalam patch transdermal timolol maleate dapat meningkatkan penetrasi kulit dan memperpanjang efek farmakologis. Sistem nanopartikel hibrida yang mengombinasikan lipid dan polimer juga menunjukkan peningkatan efisiensi penghantaran obat serta stabilitas fisik yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional (Lok et al., 2025). Pemilihan polimer sebagai matriks patch transdermal merupakan faktor penting yang menentukan efisiensi penghantaran obat. Polimer berfungsi dalam mengatur laju pelepasan obat, menjaga stabilitas mekanik, dan meningkatkan biokompatibilitas formulasi (Kumar et al., 2019). Polimer alami seperti kitosan dan natrium hialuronat memiliki keunggulan dalam hal biokompatibilitas dan biodegradabilitas, tetapi cenderung lemah dalam kekuatan mekanik (Liu et al., 2025). Sebaliknya, polimer sintetik seperti polivinil alkohol (PVA) dan hidroksipropil metilselululosa (HPMC) memiliki kestabilan fisik tinggi dan fleksibilitas formulasi yang lebih baik (Teno et al., 2025). Kombinasi antara polimer alami dan sintetik terbukti dapat menghasilkan patch dengan profil pelepasan obat yang lebih terkontrol serta kekuatan fisik yang optimal (Kotnala et al., 2025). Perkembangan terkini dalam bidang farmasi menunjukkan bahwa integrasi teknologi polimer fungsional dengan sistem penghantaran berbasis nanopartikel dapat menciptakan sistem penghantaran obat yang lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi fisiologis tubuh (Ha et al., 2023). Polimer cerdas yang mampu merespons perubahan pH, suhu, atau stimulasi listrik membuka peluang besar untuk menciptakan sistem penghantaran obat yang presisi dan efisien (Morris et al., 2024). Pendekatan ini menjadi arah utama penelitian TDDS modern yang berorientasi pada peningkatan efektivitas terapi sekaligus kenyamanan pasien (Bheemisetty et al., 2025).

### 2. Perumusan Masalah

Jenis polimer yang digunakan sebagai matriks patch memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas sistem penghantaran obat transdermal berbasis nanopartikel. Dalam hal kekuatan mekanis, pelepasan obat terkontrol, dan biokompatibilitas, setiap polimer alami, semi-sintetik, dan sintetis memiliki sifat yang khas. Oleh karena itu, diperlukan telaah untuk menentukan jenis atau kombinasi polimer yang paling efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kestabilan sistem.

### 3. Tujuan Penelitian

Review ini bertujuan membandingkan fungsi polimer alami, semi-sintetik, dan sintetis dalam formulasi patch transdermal berbasis nanopartikel dan menentukan teknik formulasi yang dapat menghasilkan sistem penghantaran obat yang paling efektif dan aman.

### 4. Manfaat Penelitian

Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dan panduan praktis dalam pemilihan polimer yang sesuai untuk pengembangan patch transdermal nanopartikel dengan performa tinggi dan biokompatibilitas yang baik.

## II. METODE PENELITIAN

Penelaahan ini dilakukan menggunakan pendekatan review naratif untuk menganalisis aplikasi polimer dalam pengembangan patch transdermal berbasis teknologi nanopartikel. Literatur yang relevan dicari melalui database ilmiah seperti PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar, dengan kata kunci “transdermal patch”, “polymer”, “nanoparticle”, “drug delivery”, serta kombinasi terkait teknologi microneedle, nanofiber, dan lipid-polymer hybrid nanoparticle. Artikel yang dipilih memenuhi kriteria inklusi, yaitu membahas penggunaan polimer natural maupun sintetis dalam patch transdermal berbasis nanopartikel, diterbitkan antara tahun 2019–2025, dan tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia. Setiap artikel yang lolos seleksi dianalisis secara menyeluruh untuk mengekstraksi informasi mengenai jenis polimer, jenis nanopartikel, obat yang dikirimkan, keunggulan dan keterbatasan formulasi, serta inovasi terkait polymer blend atau smart

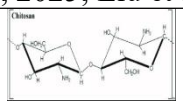
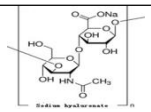
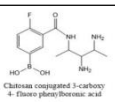
polymer. Hasil temuan disusun dalam bentuk tabel ringkasan dan dianalisis secara naratif untuk menyoroti tren, kekuatan, serta keterbatasan teknologi patch transdermal. Pendekatan naratif ini memungkinkan penjelasan mendalam mengenai peran polimer, interaksi dengan nanopartikel, dan prospek inovasi, sehingga pembaca memperoleh gambaran menyeluruh mengenai topik.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil telaah terhadap sepuluh jurnal yang relevan, pembahasan berikut menguraikan secara sistematis peran berbagai jenis polimer dalam pengembangan sediaan patch transdermal berbasis nanopartikel. Untuk mempermudah analisis, polimer diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama, yaitu polimer alami dan turunannya, polimer semi-sintetik, serta polimer sintetik, dengan masing-masing kelompok memiliki karakteristik struktural dan fungsional yang berbeda dalam memengaruhi performa sistem penghantaran obat. Setiap kelompok akan dibahas secara rinci mencakup keunggulan, keterbatasan, serta potensi pengembangannya pada aplikasi patch transdermal modern.

### A. Polimer Alami dan Turunannya

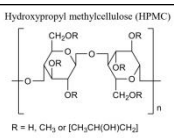
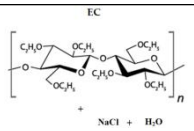
Polimer alami baik murni maupun yang dimodifikasi sangat penting dalam pengembangan patch transdermal berbasis nanopartikel. Berdasarkan tinjauan literatur, natrium hialuronat (HA) dan kitosan (baik murni maupun turunannya) merupakan polimer alami yang paling banyak digunakan. Ketiga jenis polimer ini memiliki fungsi yang berbeda dalam sistem penghantaran obat, mulai dari perlindungan molekuler dan enkapsulasi hingga pengendalian laju pelepasan dan reaksi terhadap rangsangan fisiologis (Patel et al., 2022; Wang et al., 2025; Liu et al., 2025).

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| *Gambar 1. Struktur Kimia Chitosan* | *Gambar 2. Struktur Kimia Sodium Hyaluronate* | *Gambar 3. Struktur Kimia Phenylboronic - chitosan* |

Patel et al. (2022) menggunakan kitosan murni sebagai bahan dasar untuk metode gelasi ionotropik dalam pembuatan nanopartikel. Telah diketahui secara luas bahwa muatan positif polimer ini dapat berinteraksi dengan kulit bermuatan negatif untuk meningkatkan permeabilitas obat. Dibandingkan dengan patch tanpa nanopartikel, efisiensi enkapsulasi dan laju penetrasi kulit meningkat secara signifikan dengan formulasi nanopartikel kitosan dalam matriks semi-sintetik (HPMC/PVA). Kemampuan kitosan murni untuk melindungi molekul obat dari degradasi enzimatik merupakan keunggulan lain; namun, stabilitas mekanis patch merupakan kelemahan yang masih perlu diperkuat dengan penambahan polimer lain.Turunan kitosan, seperti fenilboronat-kitosan Wang et al. (2025), telah dikembangkan sebagai polimer pintar yang dapat bereaksi terhadap variasi kadar glukosa darah, berbeda dengan kitosan murni.

### B. Polimer Semi_Sintetik

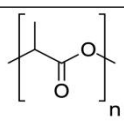
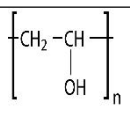
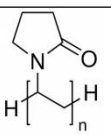
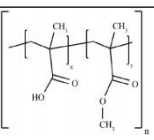
Polimer semi-sintetik berfungsi penting dalam meningkatkan kestabilan mekanik dan mengatur pelepasan obat pada sistem patch transdermal berbasis nanopartikel. Jenis yang paling banyak digunakan ialah hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) dan ethylcellulose (EC), keduanya sering dipadukan dengan polimer lain untuk menyeimbangkan kelarutan dan ketahanan struktural patch (Kotnala et al., 2025; Kumar et al., 2019).

| | |
|---|---|
|  |  |
| *Gambar 4. Struktur Kimia HPMC* | *Gambar 5. Struktur Kimia Etilselulosa* |

Kotnala et al. (2025) menyatakan bahwa jarum mikro terlarut berbasis HPMC dibuat untuk penghantaran labetalol berbasis nanopartikel. Untuk meningkatkan penetrasi kulit dan mencegah metabolisme lintas pertama, labetalol dipilih sebagai obat antihipertensi. Berbeda dengan bentuk sediaan oral, sistem nanopartikel diintegrasikan ke dalam jarum yang mudah terurai setelah penetrasi, menghasilkan pelepasan yang lebih cepat dan bioavailabilitas yang lebih tinggi. HPMC menawarkan kelarutan yang tinggi sehingga memungkinkan pelarutan cepat setelah aplikasi dan kekuatan mekanis yang cukup untuk menembus kulit. Hasil uji in vitro menunjukkan bahwa lebih dari 85% labetalol dilepaskan dalam enam jam pertama, menunjukkan kemampuan HPMC untuk memfasilitasi pelepasan cepat obat yang larut dalam air. Sementara itu, Etilselulosa (EC) adalah polimer utama dalam matriks film transdermal padat patch yang dibuat oleh Kumar et al. (2019) dan mengandung nanopartikel lipid padat (SLN) timolol maleat. Karena EC tidak larut dalam air, ia memperlambat pelepasan obat dan menjaga kadar plasma timolol lebih stabil, sehingga digunakan. Dibandingkan dengan patch tanpa nanopartikel, hasilnya menunjukkan peningkatan penetrasi kulit sebesar 1,8 kali lipat dan profil pelepasan obat yang bertahap selama periode 24 jam. Selain itu, EC meningkatkan ketahanan mekanis film terhadap deformasi yang disebabkan oleh kelembapan. Perbandingan kedua studi ini menunjukkan bahwa EC lebih cocok untuk kontrol jangka panjang dan pelepasan bertahap, sementara HPMC lebih cocok untuk formulasi yang bertujuan mencapai kelarutan tinggi dan pelepasan cepat, seperti penghantaran obat antihipertensi yang harus memberikan efek segera. Kedua polimer semi-sintetik ini sering dikombinasikan untuk menyeimbangkan kelarutan dan kekuatan mekanis, terutama dalam sistem nanopartikel yang membutuhkan stabilitas tinggi dan efisiensi penghantaran obat terbaik (Kumar et al., 2019; Kotnala et al., 2025).

**C. Polimer Sintetik**

Polimer sintetik memainkan peran penting dalam pengembangan sistem patch transdermal berbasis nanopartikel karena kemampuannya untuk direkayasa secara presisi dari segi kekuatan mekanik, struktur, dan laju degradasi. Tidak seperti polimer alami yang kadang memiliki variasi komposisi biologis, polimer sintetik memungkinkan pembuatan patch dengan karakteristik fisik yang konsisten, daya rekat tinggi, serta kestabilan yang lebih baik terhadap kelembapan dan suhu (Saadallah & Hamid, 2022; Teno et al., 2025). Beberapa penelitian terkini menyoroti efektivitas polimer sintetik seperti polylactic acid (PLA), Eudragit L100, serta kombinasi polyvinyl alcohol (PVA)–polyvinylpyrrolidone (PVP) dalam meningkatkan kinerja penghantaran obat melalui kulit untuk berbagai indikasi terapi.

| | | | |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| *Gambar 6. Struktur Kimia PLA* | *Gambar 7. Struktur Kimia PVA* | *Gambar 8. Struktur Kimia PVP* | *Gambar 8. Struktur Kimia PVP* |

Penelitian oleh Samiotaki et al. (2024) mengembangkan patch mikroneedle berbasis PLA yang dimuat dengan nanopartikel chitosan termodifikasi Transcutol untuk penghantaran

levofloxacin, antibiotik fluoroquinolone yang digunakan dalam terapi infeksi kulit akibat bakteri. Dalam sistem ini, PLA berperan sebagai polimer utama pembentuk matriks patch, sedangkan chitosan termodifikasi bertindak sebagai carrier polymer yang meningkatkan kelarutan dan stabilitas obat. Integrasi kedua polimer tersebut memungkinkan peningkatan penetrasi obat melalui lapisan kulit tanpa menimbulkan kerusakan jaringan (Samiotaki et al., 2024). Penambahan chitosan bertujuan untuk mengatasi sifat hidrofobik PLA, memperkuat interaksi elektrostatik dengan kulit, dan mengontrol pelepasan obat. Hasil studi menunjukkan peningkatan signifikan pada efisiensi enkapsulasi, bioavailabilitas, serta efek antimikroba yang lebih stabil dibandingkan sistem patch konvensional. Sistem ini secara fungsional dikategorikan sebagai polimer sintetik, karena PLA merupakan matriks utama pembentuk patch, meskipun secara formulatif bersifat hybrid polymeric system. Studi lain oleh Saadallah dan Hamid (2022) mengembangkan sistem nanopartikel berbasis Eudragit L100 untuk penghantaran rosuvastatin kalsium, obat golongan statin yang digunakan dalam terapi hiperlipidemia. Polimer Eudragit L100, yang merupakan kopolimer anionik dari asam metakrilat dan metil metakrilat, dikenal bersifat pH-sensitif dan larut pada kondisi basa. Sifat ini memungkinkan obat dilepaskan secara selektif di lingkungan fisiologis kulit dengan pH tertentu, menghasilkan profil pelepasan yang terkontrol dan memperpanjang waktu kerja obat. Sistem patch berbasis Eudragit ini menunjukkan peningkatan penyerapan obat dan kestabilan fisik yang tinggi, menjadikannya kandidat potensial untuk penghantaran transdermal jangka panjang (Saadallah & Hamid, 2022). Namun demikian, keterbatasan biokompatibilitas dan potensi iritasi kulit pada penggunaan berulang masih menjadi tantangan formulatif yang perlu dioptimalkan lebih lanjut. Selain itu, Teno et al. (2025) mengembangkan patch multilapis berbasis kombinasi PVA–PVP untuk penghantaran kafein, yang digunakan sebagai agen stimulasi dan peningkat sirkulasi mikro kulit. Formulasi ini menggunakan teknologi elektrospinning untuk menghasilkan nanofiber patch dengan ketebalan seragam dan luas permukaan tinggi. Dalam sistem ini, PVA berperan memberikan kekuatan mekanik dan daya adhesi, sedangkan PVP bersifat hidrofilik dan mempercepat difusi obat dari matriks ke jaringan kulit. Kombinasi kedua polimer sintetik ini menghasilkan patch yang elastis, nyaman digunakan, dan memiliki profil pelepasan obat yang stabil hingga 24 jam (Teno et al., 2025). Keunggulan sistem ini dibandingkan patch monokomponen adalah kemampuannya menjaga fleksibilitas tanpa mengorbankan ketahanan mekanik. Berdasarkan ketiga studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa polimer sintetik memberikan fleksibilitas formulatif dan performa tinggi dalam sistem patch transdermal berbasis nanopartikel. Sistem berbasis Eudragit L100 unggul dalam kontrol pelepasan dan kestabilan, sementara kombinasi PVA–PVP menonjol dalam kenyamanan penggunaan dan efisiensi difusi obat. Adapun sistem PLA–chitosan menunjukkan kompromi ideal antara biokompatibilitas, kekuatan mekanik, dan peningkatan bioavailabilitas obat (Samiotaki et al., 2024; Saadallah & Hamid, 2022; Teno et al., 2025). Dengan demikian, pemilihan dan kombinasi polimer sintetik yang tepat dapat menjadi kunci dalam pengembangan patch transdermal modern untuk berbagai aplikasi terapeutik, mulai dari antibiotik, antihiperlipidemia, hingga stimulasi sirkulasi kulit.

**D. Analisis Keseluruhan dan Implifikasi Formulas**

Hasil komparatif dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa setiap kelompok polimer alami, semi-sintetik, dan sintetik memiliki kontribusi spesifik terhadap performa sistem patch transdermal berbasis nanopartikel. Polimer alami seperti kitosan dan natrium hialuronat dikenal memiliki biokompatibilitas tinggi serta kemampuan membentuk sistem penghantaran yang responsif secara biologis (Patel et al., 2022; Wang et al., 2025; Liu et al., 2025). Namun, stabilitas mekanik dari patch berbasis polimer alami cenderung rendah, sehingga memerlukan dukungan dari polimer semi-sintetik untuk menjaga integritas

struktur selama aplikasi. Polimer semi-sintetik seperti HPMC dan EC berperan penting dalam memperkuat kekuatan mekanik dan mengatur profil pelepasan obat (Kumar et al., 2019; Kotnala et al., 2025). HPMC meningkatkan kelarutan dan laju disolusi, sedangkan EC memberikan sifat hidrofobik yang memungkinkan pelepasan terkendali dalam jangka waktu lama. Kombinasi keduanya telah terbukti menghasilkan patch dengan karakteristik fisik yang seimbang dan bioavailabilitas obat yang lebih baik dibandingkan formulasi monokomponen.Di sisi lain, polimer sintetik seperti PLA, PVA, PVP, dan Eudragit L100 menawarkan keunggulan dalam hal kestabilan termal, presisi struktur, serta kemampuan rekayasa untuk mengatur laju degradasi dan adhesivitas (Saadallah & Hamid, 2022; Teno et al., 2025; Samiotaki et al., 2024). Sistem berbasis polimer sintetik juga menunjukkan peningkatan homogenitas, fleksibilitas patch, dan kemampuan mengontrol pelepasan nanopartikel obat hingga 24 jam atau lebih.Berdasarkan analisis kolektif dari literatur tersebut, tampak bahwa penggabungan karakteristik dari ketiga kelompok polimer berpotensi menghasilkan sistem penghantaran obat yang lebih optimal. Polimer alami memberikan biokompatibilitas dan respon fisiologis, semi-sintetik menambah stabilitas dan kemampuan pengaturan pelepasan, sedangkan sintetik memberikan ketahanan mekanik dan konsistensi struktural. Beberapa studi juga mendukung efektivitas pendekatan kombinatif ini dalam meningkatkan kestabilan formulasi, fleksibilitas patch, serta efisiensi pelepasan obat (Kumar et al., 2019; Patel et al., 2022; Kotnala et al., 2025; Teno et al., 2025).Dengan demikian, arah pengembangan formulasi patch transdermal ke depan sebaiknya difokuskan pada optimalisasi sistem polimer hibrida, yang memadukan keunggulan dari masing-masing kelas polimer untuk menyesuaikan dengan sifat fisikokimia obat serta kebutuhan terapi pasien secara spesifik. Kesimpulan ini merupakan hasil sintesis dari berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan adanya tren sinergis antara polimer alami, semi-sintetik, dan sintetik dalam sistem penghantaran obat transdermal berbasis nanopartikel (Patel et al., 2022; Kumar et al., 2019; Wang et al., 2025; Teno et al., 2025).

## IV. KESIMPULAN

Kajian ini menyoroti pentingnya rekayasa dan pemilihan polimer dalam pengembangan sediaan patch transdermal berbasis nanopartikel. Polimer alami memiliki keunggulan dalam hal biokompatibilitas dan keamanan, polimer semi-sintetik menawarkan keseimbangan antara kelarutan dan stabilitas mekanis, sementara polimer sintetik menawarkan kontrol formulasi dan daya tahan tinggi. Kombinasi multi-polimer telah terbukti mampu mengatasi keterbatasan masing-masing kelompok sekaligus meningkatkan difusi obat, stabilitas sistem, dan kenyamanan pengguna (Wang et al., 2025; Li et al., 2025). Untuk meningkatkan akurasi pelepasan obat, penelitian di masa mendatang dapat difokuskan pada pembuatan polimer pintar yang dapat menyesuaikan diri dengan parameter fisiologis seperti pH, suhu, atau kadar glukosa (Singh & Mehta, 2022). Untuk menciptakan patch transdermal generasi mendatang yang akan meningkatkan efikasi terapeutik, kenyamanan, dan kepatuhan pasien seiring waktu, kombinasi penggunaan teknologi nanopartikel mutakhir dengan pemilihan polimer yang tepat sangatlah penting.

## DAFTAR PUSTAKA

Bheemisetty, B., . S., yarlagadda, D. lakshman, Gurram, P., . L. kumar, Shenoy, R. R., & Lewis, S. A. (2025). Dissolving microneedle patch incorporated with insulin nanoparticles for the management of Type-I Diabetes Mellitus: Formulation development and in vivo monitoring. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. https://doi.org/10.34172/apb.025.42583

Ha, J. H., Lim, J. H., Lee, J. M., & Chung, B. G. (2023). Electro-responsive conductive blended hydrogel patch. *Polymers, 15*(12), 2608. https://doi.org/10.3390/polym15122608

Kotnala, M., Upasana, S., Sharma, A., Sharma, B., Sadik Mohammed, J., Deepthi, K., Jafar, M., Mart, J., Bhadane, S., Teacher, S., Al Fayedha Charter School Abu Dhabi, A., & Ain, A. (2025). *Development and Evaluation of Nanoparticle-Loaded Dissolvable Microneedle Patches for Enhanced Transdermal Drug Delivery of Labetalol: A Novel Therapeutic Strategy*.

Kumar, P., Shrivastava, B., Gupta, M. M., & Sharma, A. K. (2019). Optimization and preparation of solid lipid nanoparticle incorporated transdermal patch of timolol maleate using factorial design. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, *11*(6), 100–107. https://doi.org/10.22159/ijap.2019v11i6.35184

Li, B., Huang, G., Ma, Z., & Qin, S. (2020). Ultrasound-assisted transdermal delivery of alendronate for the treatment of osteoporosis. *Acta Biochimica Polonica*, *67*(2), 173–179. https://doi.org/10.18388/ABP.2020_5162

Liu, Q., Zhao, R., Zhang, D., Lou, Z., Wu, J., Hou, S., Yang, B., Lu, Y., Yuan, M., Lin, S., Wang, T., Jin, L., & Zhang, L. (2025). Biodegradable Microneedle Patch Confers Crocin with Outstanding Effects in the Treatment of Myocardial Infarction. *ACS Omega*, *10*(14), 14176–14187. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11540

Lok, K. H., Loo, H. L., & Chuah, L.-H. (2025). Topical and transdermal lipid–polymer hybrid nanoparticles (LPN): An integration in advancing dermatological treatments. *Drug Delivery and Translational Research, 15*, 4277–4313. https://doi.org/10.1007/s13346-025-01940-7

Morris, G., Goodman, S., Sorzabal Bellido, I., Milanese, C., Girella, A., Pallavicini, P., Taglietti, A., Gaboardi, M., Jäckel, F., Diaz Fernandez, Y. A., & Raval, R. (2024). Temperature and pH stimuli-responsive system delivers location-specific antimicrobial activity with natural products. *ACS Applied Bio Materials, 7*(1), 131–143. https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00588

Saadallah, M. S., & Hamid, O. A. (2022). Eudragit ® L100 nanoparticles for transdermal delivery of rosuvastatin calcium. In *J. Excipients and Food Chem* (Vol. 13, Issue 3).

Samiotaki, C., Koumentakou, I., Christodoulou, E., Bikiaris, N. D., Vlachou, M., Karavas, E., Tourlouki, K., Kehagias, N., & Barmpalexis, P. (2024). Fabrication of PLA-Based Nanoneedle Patches Loaded with Transcutol-Modified Chitosan Nanoparticles for the Transdermal Delivery of Levofloxacin. *Molecules*, *29*(18). https://doi.org/10.3390/molecules29184289

Teno, J., Evtoski, Z., Prieto, C., & Lagaron, J. M. (2025). The Development of a Multilayer Transdermal Patch Platform Based on Electrospun Nanofibers for the Delivery of Caffeine. *Pharmaceutics*, *17*(7). https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070921

Wang, S., Guan, J., Gong, W., & Bao, B. (2025). Transdermal delivery of traditional Chinese medicine patch vs. NSAIDs patch for alleviating inflammation and relieving pain for early-stage knee osteoarthritis: a retrospective case control study. *Frontiers in Pharmacology*, *16*. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1549883

Wang, X., Liu, S., Jing, S., Zhang, S., Jin, Y., Zhang, W., Ruan, Q., & Li, W. (2025). Nanozyme-Engineered Probiotic Microneedle Patch for Chronic Diabetic Wound Therapy. *Advanced Science*. https://doi.org/10.1002/advs.202512127.



| Accepted Date | Revised Date | Decided Date | Accepted to Publish |
|---|---|---|---|
| 21 November 2025 | 28 November 2025 | 05 Desember 2025 | Ya |