

## Tinjauan Komprehensif Jenis Dan Teknik Fabrikasi Microneedle Sebagai Sistem Penghantaran Obat Transdermal

Rianingsih Dwi Astuti Mundandar<sup>1\*</sup>, Hesti Riasari<sup>2</sup>, Revika Rachmaniar<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Magister Farmasi, Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia

Open Access Freely Available Online

Dikirim: 20 Mei 2026

Direvisi: 29 Mei 2026

Diterima: 30 Mei 2026

\*Penulis Korespondensi:

E-mail:

[rianingsihdwiastuti@gmail.com](mailto:rianingsihdwiastuti@gmail.com)

### ABSTRAK

**Pendahuluan:** *Microneedle* merupakan teknologi inovatif dalam sistem penghantaran obat transdermal yang berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Berbagai jenis dan metode fabrikasi telah dikembangkan, namun belum banyak kajian yang membandingkan keduanya secara terintegrasi. **Tujuan:** Artikel ini bertujuan mengulas tren penelitian, jenis, metode fabrikasi, serta aplikasi *microneedle* di bidang farmasi dan kosmetik dalam suatu kerangka analisis komparatif. **Metode:** Studi literatur sistematis dilakukan dengan penelusuran pada basis data PubMed, Scopus, dan Google Scholar menggunakan kata kunci “*microneedle*”, “*microneedle types*”, “*microneedle fabrication*”, dan “*transdermal drug delivery*”. Kriteria inklusi mencakup artikel penelitian dan tinjauan berbahasa Inggris yang dipublikasikan pada rentang 2000–2025 dan relevan dengan topik. Kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak tersedia secara penuh, duplikasi, dan studi yang tidak berfokus pada pengembangan *microneedle*. Berdasarkan proses seleksi diperoleh 65 artikel yang dianalisis secara komprehensif. **Hasil:** *Dissolving microneedle* merupakan jenis yang paling dominan dalam tren penelitian terkini, dengan perkembangan signifikan pada metode fabrikasi berbasis *micromolding* dan *3D printing*. Kombinasi *3D printing* untuk pembuatan *master mold* dan *micromolding* untuk replikasi massal teridentifikasi sebagai pendekatan paling prospektif. Teknologi *microneedle* menunjukkan potensi besar dalam aplikasi vaksin, terapi obat, dan kosmetik, meskipun masih menghadapi tantangan pada aspek regulasi dan skalabilitas produksi. **Simpulan:** *Microneedle*, khususnya jenis *dissolving*, memiliki prospek menjanjikan sebagai platform penghantaran obat yang efektif, aman, dan inovatif di masa depan.

**Kata kunci:** *microneedle*, jenis *microneedle*, fabrikasi *microneedle*, penghantaran obat transdermal

### ABSTRACT

**Introduction:** *Microneedle* is an innovative technology in transdermal drug delivery systems that has experienced rapid development over the past two decades. Various types and fabrication methods have been developed, yet integrated comparative studies remain limited. **Objective:** This article aims to review research trends, types, fabrication methods, and applications of microneedles in pharmaceutical and cosmetic fields within a comparative analytical framework. **Methods:** A systematic literature study was conducted by searching the PubMed, Scopus, and Google Scholar databases using the keywords “*microneedle*”, “*microneedle types*”, “*microneedle fabrication*”, and “*transdermal drug delivery*”. Inclusion criteria comprised research and review articles in English published between 2000 and 2025 and relevant to the topic. Exclusion criteria included articles not fully available, duplicates, and studies not focused on microneedle development. Approximately 65 articles were obtained and analyzed comprehensively. **Results:** Dissolving microneedles represent the most dominant type in current research trends, with significant advancements in micromolding and 3D printing-based fabrication methods. The combination of 3D printing for master mold fabrication and micromolding for mass replication was identified as the most prospective approach. Microneedle technology demonstrates great potential in vaccine applications, drug therapy, and cosmetics, although it still faces challenges in regulatory and production scalability aspects. **Conclusion:** Microneedles, particularly dissolving microneedles, hold promising prospects as an effective, safe, and innovative drug delivery platform in the future.

**Keywords:** *microneedle, microneedle types, microneedle fabrication, transdermal drug delivery*

## PENDAHULUAN

Pengantaran obat melalui rute transdermal merupakan metode transpor zat aktif secara bertahap dari permukaan kulit menuju sirkulasi sistemik. Metode ini mampu mengatasi berbagai keterbatasan pemberian oral, seperti metabolisme lintas pertama di hati dan degradasi di saluran pencernaan. Namun demikian, tidak semua zat aktif dapat dihantarkan secara efektif melalui kulit. Secara umum, molekul yang sesuai untuk pengantaran transdermal memiliki massa molekul rendah (kurang dari 400–500 Da), lipofilisitas seimbang ( $\log P$  1–3), serta titik leleh yang relatif rendah. Molekul dengan  $\log P < 1$  cenderung terlalu hidrofilik sehingga sulit menembus stratum corneum, sedangkan molekul dengan  $\log P > 3$  bersifat sangat hidrofobik dan berpotensi terperangkap dalam matriks lipid kulit (Bakhrushina *et al.*, 2025).

Selain sifat fisikokimia zat aktif, keberhasilan penetrasi juga dipengaruhi oleh kompleksitas struktur kulit, termasuk organisasi lipid, sifat mekanis, serta faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Oleh karena itu, pengantaran molekul hidrofilik, senyawa bermuatan, peptida, protein, dan asam nukleat melalui kulit masih menjadi tantangan signifikan (Gattu *et al.*, 2026).

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah penggunaan *microneedle*. *Microneedle* merupakan sistem pengantaran obat transdermal yang terdiri atas susunan jarum mikro dengan panjang 50–1500  $\mu\text{m}$  dan diameter 1–300  $\mu\text{m}$ . Struktur ini dirancang untuk menembus *stratum corneum* tanpa mencapai ujung saraf, sehingga bersifat minimal invasif dan tidak menimbulkan nyeri. Mekanisme kerjanya adalah membentuk saluran mikro pada kulit yang memungkinkan difusi berbagai molekul, termasuk obat, protein, dan vaksin, menuju lapisan epidermis atau dermis bagian atas, sehingga meningkatkan absorpsi sistemik (Kim *et al.*, 2012).

Berdasarkan karakteristik dan mekanisme kerjanya, *microneedle* diklasifikasikan menjadi lima jenis utama, yaitu *solid*, *hollow*, *coated*, *hydrogel-forming*, dan *dissolving microneedle*. Masing-masing jenis memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri, baik dari segi mekanisme pengantaran maupun metode fabrikasi. Oleh

karena itu, pemilihan jenis dan teknik pembuatan *microneedle* menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas sistem pengantaran obat (Sartawi *et al.*, 2022).

Meskipun berbagai artikel tinjauan telah membahas perkembangan teknologi *microneedle*, seperti yang dilaporkan oleh Tucak *et al.* (2020) dan Sartawi *et al.* (2022), sebagian besar studi tersebut mengkaji aspek klasifikasi atau metode fabrikasi secara terpisah. Hingga saat ini, belum banyak kajian yang secara sistematis membandingkan jenis *microneedle* dan metode fabrikasinya dalam suatu kerangka analisis komparatif terpadu, khususnya dengan mempertimbangkan literatur terbaru pada rentang 2022–2025. Ketiadaan analisis terintegrasi ini menyebabkan terbatasnya panduan komprehensif dalam menentukan kombinasi optimal antara jenis *microneedle* dan metode fabrikasi untuk aplikasi tertentu.

Berdasarkan hal tersebut, kebaruan (*novelty*) tinjauan ini terletak pada pendekatan analisis komparatif yang mengintegrasikan klasifikasi jenis *microneedle* dengan berbagai metode fabrikasi dalam satu matriks evaluasi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi hubungan antara karakteristik struktural *microneedle*, teknik pembuatannya, serta implikasinya terhadap kinerja pengantaran obat, dengan mengacu pada bukti ilmiah terkini. Secara spesifik, tinjauan ini bertujuan untuk: (1) membandingkan karakteristik lima jenis *microneedle*; (2) membandingkan berbagai metode fabrikasi utama yang digunakan dalam pengembangan *microneedle*; (3) menganalisis kompatibilitas antara jenis *microneedle* dan metode fabrikasi dalam suatu kerangka matriks komparatif; serta (4) mengidentifikasi kombinasi jenis dan metode fabrikasi yang paling prospektif berdasarkan literatur terbaru.

## METODE

### Alur Seleksi Literatur (PRISMA)

Proses seleksi artikel dalam tinjauan ini dilakukan secara sistematis mengikuti protokol *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), yang secara visual disajikan pada Gambar 8.

IDENTIFIKASI		
PubMed (n = 104)	Scopus (n= 107)	Google Scholar (n=124)
Total records identifikasi (n = 335)		
↓		
Records after duplicates removed (n = 239)	Duplicates removed (n = 125)	
↓		
SKRINING		
Records screened (n = 239)	Records excluded based on tittle/abstract (n = 148)	
↓		
Full-text article (n = 182)	Full-text articles excluded (n = 178)	
	No data discussion (n = 65)	
	No fabrication n method microneedle (n = 93)	
	Other condistion (n = 20)	
↓		
Additional records from : Citation tracking (n = 12)		
INKLUSI		
Studies included in systematic review (n = 38)		
Studies included in meta-analysis (n = 27)		

Gambar 1. Diagram Alir PRISMA

Tahapan seleksi dibagi menjadi tiga fase utama:

- a. Tahap Identifikasi: Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data ilmiah bereputasi, yaitu PubMed, Scopus, dan Google Scholar. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci spesifik, yaitu “microneedle”, “microneedle types”, “microneedle fabrication”, dan “transdermal drug delivery” dengan bantuan operator Boolean (and/or) untuk mengoptimalkan relevansi hasil.
- b. Tahap Skrining dan Kelayakan: Artikel yang teridentifikasi kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Kriteria inklusi meliputi artikel yang terpublikasi internasional, dipublikasikan pada rentang tahun 2000–2025, memiliki relevansi langsung dengan klasifikasi jenis atau metode fabrikasi microneedle, serta tersedia dalam format teks lengkap (*full text*). Sementara itu, kriteria eksklusi diterapkan untuk mengeliminasi artikel yang hanya tersedia dalam bentuk abstrak, publikasi duplikat antar-basis data, serta studi yang tidak berfokus pada aspek pengembangan atau aplikasi sistem microneedle.
- c. Tahap Inklusi: Berdasarkan proses seleksi yang ketat terhadap kualitas dan relevansi

konten, diperoleh sebanyak 65 artikel yang dinyatakan layak. Artikel-artikel tersebut kemudian dianalisis secara komprehensif dan kualitatif untuk menyusun perbandingan naratif serta matriks komparatif dalam studi ini.

Tinjauan ini disusun melalui pendekatan studi literatur sistematis. Penelusuran sumber dilakukan pada tiga basis data ilmiah, yaitu PubMed, Scopus, dan Google Scholar, menggunakan kombinasi kata kunci “microneedle”, “microneedle types”, “microneedle fabrication”, dan “transdermal drug delivery”. Operator Boolean AND/OR digunakan untuk memperluas atau mempersempit hasil pencarian sesuai kebutuhan analisis.

Kriteria inklusi yang ditetapkan meliputi: (1) artikel penelitian asli atau tinjauan yang dipublikasikan pada rentang tahun 2000–2025; (2) berbahasa Inggris; (3) relevan dengan topik klasifikasi jenis dan/atau metode fabrikasi microneedle; serta (4) tersedia teks lengkapnya. Kriteria eksklusi meliputi artikel yang hanya tersedia abstrak, publikasi duplikat, serta studi yang tidak berfokus pada pengembangan atau aplikasi microneedle. Berdasarkan proses seleksi, diperoleh 65 artikel yang dianalisis secara kualitatif. Hasil analisis kemudian dirangkum

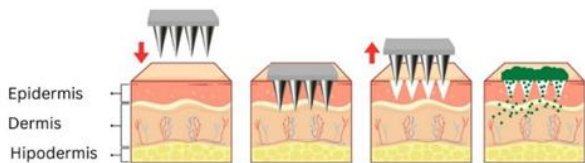
dalam bentuk perbandingan naratif dan tabel komparatif untuk memfasilitasi sintesis lintas studi.

## HASIL

### Klasifikasi Jenis-Jenis Microneedle

#### a. Solid Microneedle

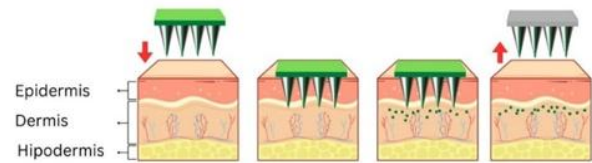
*Solid microneedle* merupakan jenis *microneedle* padat tanpa kandungan obat yang berfungsi utama sebagai pembentuk mikrokanal pada stratum corneum. Mekanisme penghantarannya menggunakan pendekatan *poke-and-patch*, yaitu obat diaplikasikan setelah pembentukan pori sehingga berdifusi secara pasif menuju lapisan dermis (Henry *et al.* 1998). Keunggulan *solid microneedle* berupa kesederhanaan desain, fleksibilitas formulasi obat eksternal, dan peningkatan permeabilitas kulit. Namun, jenis ini memiliki keterbatasan berupa kontrol dosis yang kurang presisi dan ketergantungan pada difusi pasif, sehingga efisiensi penghantaran dapat lebih rendah. Meskipun dapat dikombinasikan dengan pelapisan obat untuk penghantaran cepat, kapasitas muatan obat tetap relatif terbatas (Brogden *et al.*, 2013). Ilustrasi bentuk *solid microneedle* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi bentuk *solid microneedle*

#### b. Hollow Microneedle

*Hollow microneedle* merupakan *microneedle* berongga dengan lumen internal untuk penghantaran obat cair secara langsung ke lapisan kulit melalui mekanisme *poke-and-flow*. Saat jarum menembus *stratum corneum* dan membentuk jalur mikro, obat cair dialirkan melalui lumen menuju jaringan epidermis atau dermis, sehingga penghantaran dapat berlangsung bertahap dan terkontrol. *Hollow microneedle* memiliki keunggulan dalam kontrol dosis yang presisi dan kapasitas muatan obat yang lebih besar karena obat tidak bergantung pada difusi atau pelarutan (Sartawi *et al.*, 2022; Tucak *et al.*, 2020). Namun, jenis ini memiliki keterbatasan berupa fabrikasi yang kompleks, biaya tinggi, serta potensi penyumbatan lumen, sehingga penggunaannya lebih difokuskan pada aplikasi klinis seperti penghantaran vaksin, insulin, dan biomolekul berukuran besar (Amarnani dan Shende, 2022). Ilustrasi bentuk *hollow microneedle* ditunjukkan pada Gambar 2.

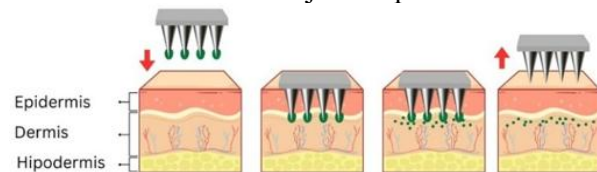


Gambar 2. Ilustrasi bentuk *hollow microneedle*

#### c. Coated Microneedle

*Coated microneedle* merupakan salah satu desain *microneedle patch* yang bekerja dengan prinsip *coat-and-poke*, yaitu agen terapeutik dilapisi pada permukaan jarum dan dilepaskan ke dalam kulit saat jarum diaplikasikan. Material yang umum digunakan sebagai basis struktural meliputi logam seperti *stainless steel*, nikel, titanium, tungsten, dan paladium, serta silikon dan polikarbonat, yang dipilih karena memiliki kekuatan mekanis tinggi. Teknik pelapisan obat pada permukaan jarum meliputi *gas jet drying*, *dip coating*, *spray coating*, dan *layer-by-layer coating*, umumnya didahului dengan tahap pembentukan struktur jarum melalui lithography (Zafar *et al.*, 2025).

Berbagai studi telah membuktikan efektivitas *coated microneedle* dalam penghantaran obat dan vaksin secara transdermal. Namun, *coated microneedle* berbasis logam memiliki keterbatasan berupa potensi bersifat *biohazard*, risiko reaksi alergi, tidak bersifat *biodegradable*, serta kapasitas pemuatan obat yang relatif terbatas dibandingkan desain *dissolving microneedle* (Zafar *et al.*, 2025). Ilustrasi bentuk *coated microneedle* ditunjukkan pada Gambar 3.



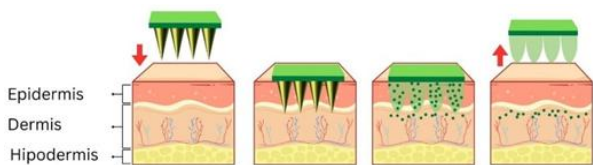
Gambar 3. Ilustrasi bentuk *coated microneedle*

#### d. Hydrogel-Forming Microneedle

*Hydrogel-forming microneedle* merupakan teknologi inovatif untuk penghantaran obat dermal secara non-invasif. Jenis ini terbuat dari polimer hidrofilik yang dapat menyerap cairan interstisial kulit, mengembang membentuk *hydrogel matrix*, dan mengantarkan obat langsung ke lapisan dermis tanpa merusak jaringan di bawahnya maupun menyentuh saraf dan pembuluh darah, sehingga meminimalkan rasa sakit dibandingkan jarum hipodermik konvensional. Teknologi ini mampu mengantarkan berbagai jenis obat termasuk makromolekul, insulin, vaksin, hingga agen kemoterapi, dengan profil pelepasan yang terkontrol dan berkelanjutan, sehingga

meningkatkan kepatuhan pasien (Mohite *et al.*, 2024).

Material pembuatannya mencakup polimer alami seperti kitosan, asam hialuronat, dan natrium alginat, maupun polimer sintesis seperti polivinil alkohol, yang difabrikasi melalui metode *casting*, *micromolding*, *electrospinning*, hingga *3D printing*. Selain berfungsi sebagai sistem penghantaran obat, *hydrogel-forming microneedle* juga dapat digunakan untuk pemantauan cairan interstisial secara *real-time* sebagai alternatif pemeriksaan darah. Meski menjanjikan untuk berbagai kondisi kulit seperti jerawat, dermatitis, ekzema, dan penyembuhan luka, pengembangannya masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan kekuatan mekanis, skalabilitas produksi, stabilitas penyimpanan, biaya, serta proses regulasi yang kompleks (Mohite *et al.*, 2024). Ilustrasi bentuk *hydrogel-forming microneedle* ditunjukkan pada Gambar 4.

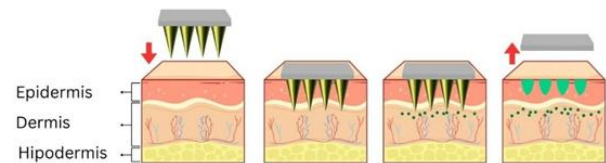


Gambar 4. Ilustrasi bentuk *hydrogel microneedle*

e. *Dissolving Microneedle*

*Dissolving microneedle* adalah jenis jarum mikro *biodegradable* yang dirancang untuk menembus *stratum corneum* dan menghantarkan zat aktif secara intradermal tanpa menimbulkan nyeri. Material penyusunnya berupa polimer biokompatibel seperti asam hialuronat, karboksimetil selulosa, polivinilpirolidon, dan polivinil alkohol yang akan terlarut sempurna pasca-penetrasi melalui mekanisme *poke-and-release*, sehingga obat yang terenkapsulasi dapat terlepas langsung ke jaringan kulit tanpa meninggalkan residu jarum (Sartawi *et al.*, 2022).

Dibandingkan jenis *microneedle* lainnya, *dissolving microneedle* unggul dalam hal keamanan, kemudahan penggunaan, dan efisiensi penghantaran. Tidak diperlukannya pencabutan jarum setelah aplikasi secara signifikan meminimalkan risiko cedera sekaligus meningkatkan kepatuhan pengguna. Teknologi ini juga mampu meningkatkan absorpsi obat yang memiliki penetrasi transdermal rendah secara konvensional. Meskipun *dissolving microneedle* telah mendorong inovasi industri dengan menghadirkan beragam produk yang lebih terjangkau dan mudah diakses, sejumlah tantangan masih perlu diatasi, seperti transisi dari model hewan ke manusia akibat perbedaan ukuran dan kapasitas dosis, serta sulitnya mencapai farmakokinetik yang konsisten untuk keberhasilan uji klinis. Namun demikian, *dissolving microneedle* tetap menjanjikan dengan penelitian yang terus berkembang ke arah administrasi vaksin dan pengelolaan penyakit kronis (Wu *et al.*, 2024). Ilustrasi bentuk *dissolving microneedle* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi bentuk *dissolving microneedle*

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa setiap jenis *microneedle* memiliki karakteristik yang berbeda berdasarkan mekanisme kerja, material penyusun, kapasitas penghantaran obat, keunggulan, keterbatasan, hingga tren pengembangannya. Perbedaan karakteristik tersebut memengaruhi efektivitas dan aplikasi masing-masing jenis *microneedle* dalam sistem penghantaran obat transdermal. Perbandingan komprehensif kelima jenis *microneedle* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1  
Perbandingan Komprehensif Lima Jenis *Microneedle*

Parameter	Solid MN	Hollow MN	Coated MN	Hydrogel MN	Dissolving MN
Mekanisme Kerja	Poke-and-patch: membentuk mikrokanal, obat diaplikasikan setelah jarum dilepas	Poke-and-flow: obat cair mengalir melalui rongga internal jarum	Coat-and-poke: lapisan obat larut saat kontak cairan interstisial	Swelling: menyerap cairan interstisial, mengembang, menciptakan jalur difusi obat	Poke-and-release: jarum terlarut sempurna dalam kulit, melepaskan obat terenkapsulasi
Material Utama	Silikon, logam (stainless steel, titanium), polimer keras	Silikon, logam, keramik, kaca, polimer	Jarum dasar: logam/silikon; pelapis: polimer	Polimer hidrofilik crosslinked: PMVE/MA-PEG, CMC, derivat selulosa	Polimer biodegradable: HA, CMC, PVP, PVA, PLGA

Parameter	Solid MN	Hollow MN	Coated MN	Hydrogel MN	Dissolving MN
			larut air + zat aktif		
Kapasitas Muatan Obat	Tidak memuat obat (obat dari reservoir eksternal)	Tinggi mengalirkan larutan/suspensi obat dalam volume besar	Rendah terbatas pada ketebalan lapisan pelapis	Sedang – bergantung pada volume swelling dan reservoir patch	Sedang – obat terenkapsulasi dalam matriks jarum
Onset Kerja	Lambat (tergantung difusi pasif melalui mikrokanal)	Cepat (injeksi langsung ke intradermal)	Sangat cepat (detik–menit)	Lambat–sedang (tergantung swelling) laju	Sedang (menit–jam, tergantung laju disolusi polimer)
Keunggulan Utama	Sederhana, kuat, mudah dibuat, biaya rendah	Dosis terkontrol, kapasitas tinggi, aliran kontinu	Onset cepat, satu langkah aplikasi	Dual fungsi: delivery + diagnostik; biokompatibel	Aman (tidak ada limbah jarum), efisien, mudah digunakan, ramah lingkungan
Limitasi	Obat harus diaplikasikan terpisah; risiko mikrokanal menutup cepat	Teknis kompleks; risiko penyumbatan lumen; rapuh	Kapasitas obat rendah; uniformitas pelapisan sulit dikontrol	Laju absorpsi lambat; sulit mempertahankan level terapeutik	Kekuatan mekanik terbatas; stabilitas obat dalam matriks polimer
Aplikasi Utama	Pretreatment sebelum patch transdermal; vaksinasi	Insulin, vaksin, protein/peptida, pilokarpin	Vaksin, obat dosis rendah, biomolekul	Drug delivery + biosensor/diagnostik (monitoring glukosa, biomarker)	Vaksin, terapi kanker, penyakit kulit, kosmetik, protein/peptida
Limbah Medis	Ya – jarum tetap utuh setelah digunakan	Ya – jarum tetap utuh	Minimal – lapisan larut, jarum tetap ada	Minimal – jarum mengembang dan dapat dilepas	Tidak – jarum terlarut sempurna, tidak meninggalkan residu
Tren Riset 2015–2025	Melambat; sudah matang	Fluktuatif; kendala teknis	Peningkatan sedang; terbatas kapasitas	Meningkat perlahan; potensi diagnostik	Lonjakan tajam; fokus riset utama saat ini

**Metode Fabrikasi Microneedle**

a. MEMS (Micro-Electro Mechanical System)

Teknologi MEMS pada pembuatan microneedle merupakan metode yang mengadopsi teknik mikro-fabrikasi industri semikonduktor untuk menghasilkan struktur jarum mikro dengan presisi tinggi pada substrat silikon atau polimer. Proses ini melibatkan tahapan utama seperti fotolitografi untuk mendefinisikan pola jarum, etching (deep reactive ion etching atau wet etching) untuk membentuk struktur tiga dimensi, serta tahap tambahan seperti deposisi dan bonding untuk menghasilkan fitur khusus seperti lumen pada hollow microneedle. Substansi utama metode ini terletak pada kontrol presisi terhadap dimensi geometris (panjang, diameter, dan ketajaman

ujung), keseragaman distribusi jarum, serta manipulasi sifat material melalui parameter proses (Rad et al., 2021).

Kelebihan utama microneedle berbasis MEMS adalah tingkat presisi, reproduktifitas, dan kekuatan mekanik yang tinggi, yang menjadikannya sangat sesuai untuk fabrikasi solid maupun hollow microneedle. Namun, metode MEMS memiliki keterbatasan berupa penggunaan peralatan khusus serta biaya produksi yang tinggi akibat penggunaan material seperti silikon. Selain itu, sifat mekanik silikon yang relatif rapuh dapat meningkatkan risiko fraktur saat penetrasi. Meskipun demikian, teknologi MEMS tetap menjadi standar dalam pengembangan prototipe microneedle karena kemampuannya menghasilkan

struktur dengan akurasi tinggi, konsistensi geometris, dan performa mekanik yang unggul (Hossain *et al.*, 2024).

#### b. Laser Micromachining

*Laser micromachining* merupakan metode fabrikasi *microneedle* yang menggunakan energi laser berintensitas tinggi untuk mengikis material seperti logam, polimer, dan silikon secara presisi, umumnya dengan menggunakan laser CO<sub>2</sub>. Geometri jarum dapat dikontrol melalui modulasi kecepatan pemindaian laser; panjang jarum 390–1600  $\mu\text{m}$  dapat dicapai dengan mengubah kecepatan pemindaian dari 90 hingga 10 mm/s (Aldawood *et al.*, 2021)

Metode *laser micromachining* merupakan metode hemat biaya untuk pembuatan cetakan *microneedle* dan sangat cocok untuk produksi skala besar dengan biaya per unit yang rendah. Metode ini memungkinkan kontrol presisi terhadap mikrostruktur melalui pengaturan daya, kecepatan, dan pola laser, serta terbukti mampu menembus *stratum corneum* dan mengantarkan obat ke jaringan subkutan. Lebih lanjut, proses ini sangat efektif menghasilkan *microneedle* dengan rasio aspek tinggi dan berbagai panjang secara reproduktif (Aoyagi *et al.*, 2020). Namun, dibandingkan MEMS, *laser micromachining* memiliki keterbatasan pada resolusi mikrostruktur dan ketajaman ujung jarum, serta berpotensi menghasilkan permukaan yang kasar akibat efek termal (Rad *et al.*, 2021).

#### c. 3D Printing

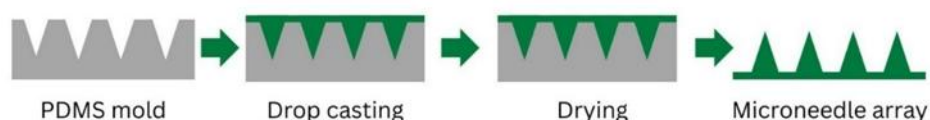
Metode *3D printing* dalam fabrikasi *microneedle* dilakukan dengan membentuk struktur jarum secara bertahap lapis-demi-lapis menggunakan material polimer atau resin melalui teknik seperti SLA, DLP, atau *two-photon polymerization* (2PP). Substansi metode ini terletak pada kontrol desain digital dan parameter pencetakan (*resolusi*, *layer thickness*, dan jenis material) yang menentukan bentuk, ukuran, dan ketajaman *microneedle*. Proses umumnya diawali dengan pembuatan desain *master mold* yang kemudian dicetak menggunakan printer resolusi tinggi (Chaiwarit *et al.*, 2024).

Secara komparatif, *3D printing* unggul dibandingkan MEMS dan *laser micromachining* dalam hal fleksibilitas desain, kemudahan modifikasi, serta efisiensi waktu dan biaya, karena tidak memerlukan *cleanroom* maupun proses tahapan yang kompleks. Selain itu, metode ini mendukung *prototyping* cepat dan personalisasi desain. Meskipun resolusi dan ketajaman jarum masih di bawah MEMS, pendekatan ini menawarkan pengembangan desain yang fleksibel serta produksi awal yang efisien dan mudah diadaptasi (Choo dan Jung, 2022). Penggunaan *master mold* berbasis *3D printing* menjadi inti keunggulan metode ini karena memungkinkan proses fabrikasi yang lebih sederhana, cepat, efisien, dan berbiaya rendah dibanding metode konvensional.

#### d. Micromolding

Metode *micromolding* adalah teknik pembuatan struktur berukuran mikro dengan menggunakan cetakan (*mold*) untuk membentuk bahan menjadi bentuk yang diinginkan. Prinsip dasarnya mirip dengan proses pencetakan konvensional, tetapi dilakukan pada skala mikrometer. Prosesnya dilakukan dengan menuangkan bahan polimer ke dalam cetakan, baik secara langsung maupun secara dua tahap (*two casting*) (Habib *et al.*, 2022).

Keunggulan utama metode *micromolding* adalah kemampuannya menghasilkan struktur mikro dengan bentuk yang presisi, berulang, dan biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan teknik pembuatan *microneedle* lainnya seperti *photolithography*. Metode ini kompatibel dengan berbagai jenis bahan biokompatibel seperti asam hialuronat, polivinilpirolidon, Na CMC, dan PVA, sehingga cocok untuk pembuatan *dissolving microneedle* yang dapat larut di kulit untuk penghantaran obat secara transdermal. Dengan demikian, *micromolding* menjadi metode penting dalam pengembangan teknologi medis modern yang menggabungkan presisi teknik dengan keamanan biologis (Khalid *et al.*, 2023). Ilustrasi proses *micromolding* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Ilustrasi proses *micromolding*

Berdasarkan hasil kajian literatur menunjukkan bahwa setiap metode fabrikasi *microneedle* memiliki karakteristik proses, tingkat presisi, biaya produksi, serta kompatibilitas

material yang berbeda. Perbandingan berbagai metode fabrikasi *microneedle* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2  
Perbandingan Metode Fabrikasi *Microneedle*

Parameter	MEMS	Laser Micromachining	3D Printing	Micromolding
Prinsip Dasar	Mikrofabrikasi semikonduktor: fotolitografi + etching pada substrat silikon	Ablasi material menggunakan energi laser berintensitas tinggi	Pembentukan lapis-demi-lapis resin/polimer (SLA, DLP, 2PP)	Pencetakan polimer ke dalam cetakan (master mold) dengan penuangan/sentrifugasi
Resolusi & Presisi	Sangat tinggi (nanoskopis); akurasi bentuk dan jarak antar jarum unggul	Cukup tinggi; terbatas oleh thermal damage	Tinggi (tergantung tipe printer: 85–95%); DLP/2PP memberikan resolusi terbaik	Tinggi — bergantung pada kualitas master mold; reproduisibilitas baik
Material Kompatibel	Silikon, logam, polimer keras	Logam, silikon, polimer	Resin fotopolimer, polimer biokompatibel	HA, PVP, PVA, CMC, HPMC, PLGA, dan polimer biodegradable lainnya
Jenis MN yang Dibuat	Solid MN, Hollow MN	Solid MN, Hollow MN	Master mold untuk Dissolving MN; prototipe Solid MN	Dissolving MN, Hydrogel MN
Biaya Produksi	Sangat tinggi (cleanroom, peralatan khusus)	Sedang–tinggi (peralatan laser)	Sedang (printer SLA/DLP relatif terjangkau)	Rendah (setelah mold tersedia, produksi massal murah)
Skalabilitas	Rendah – sulit untuk produksi massal	Sedang – per-unit processing	Sedang – cocok untuk pembuatan master mold	Tinggi – sangat cocok untuk produksi massal
Fasilitas Khusus	Cleanroom wajib	Tidak perlu cleanroom	Tidak perlu cleanroom	Tidak perlu cleanroom
Waktu Fabrikasi	Lama (multi-step, memerlukan etching dan deposisi)	Relatif cepat	Sedang (tergantung kompleksitas desain)	Cepat setelah mold tersedia (pengeringan 24 jam)
Fleksibilitas Desain	Rendah — perubahan desain memerlukan masker baru	Tinggi — desain mudah diubah tanpa masker	Sangat tinggi — desain digital, mudah dimodifikasi	Sedang — tergantung master mold yang tersedia
Kelemahan Utama	Biaya tinggi; silikon rapuh dan berpotensi patah saat penetrasi	Kualitas permukaan kasar (thermal damage); resolusi ujung jarum rendah	Resolusi cetak rendah pada printer murah; permukaan step-effect	Bergantung pada kualitas master mold; sulit membuat hollow MN
Referensi Kunci	Rad dkk. (2021); Hossain dkk. (2024)	Aldawood dkk. (2021); Aoyagi dkk. (2020); Rad dkk. (2021)	Chaiwarit dkk. (2024); Fitaihi dkk. (2024); Choo dan Jin (2022)	Khalid dkk. (2023); Khalid dkk. (2025); Habib dkk. (2022)

**Matriks Kompatibilitas Jenis × Metode Fabrikasi**

Berdasarkan hasil kajian literatur, kompatibilitas antara jenis *microneedle* dan metode fabrikasi menunjukkan adanya perbedaan dalam pemilihan teknik pembuatan yang

disesuaikan dengan karakteristik masing-masing *microneedle*. Hubungan tersebut dirangkum pada Tabel 3 untuk menggambarkan kesesuaian metode fabrikasi terhadap jenis *microneedle* yang digunakan.

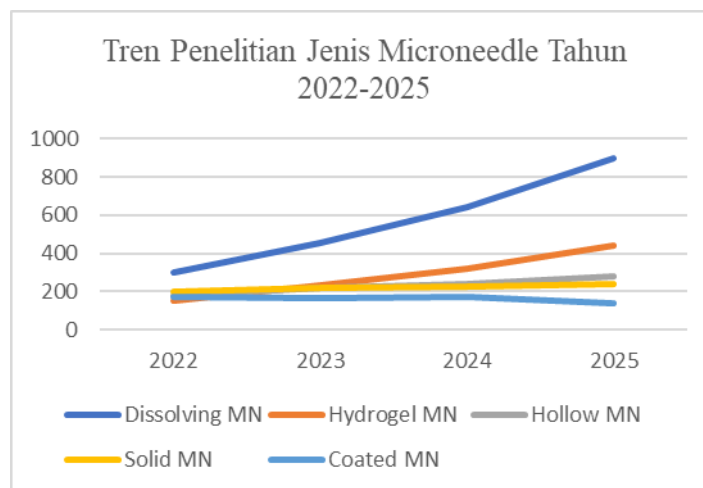
Tabel 3  
Matriks Kompatibilitas Jenis *Microneedle* × Metode Fabrikasi

Jenis MN \ Metode	MEMS	Laser Micromachining	3D Printing	Micromolding
Solid MN	Utama – presisi tinggi, cocok untuk prototipe riset	Alternatif – cepat, fleksibel untuk desain awal	Terbatas – untuk master mold saja	Tidak umum
Hollow MN	Utama – satu-satunya metode yang mampu membuat lumen internal presisi	Alternatif – dapat membuat lubang dengan laser drilling	Terbatas – sulit membuat struktur hollow yang presisi	Tidak kompatibel
Coated MN	Fabrikasi jarum (pelapisan dilakukan terpisah: dip-coating, spray-coating)	Fabrikasi jarum (pelapisan terpisah)	Terbatas	Tidak umum
Hydrogel MN	Tidak kompatibel	Tidak kompatibel	Untuk master mold	Utama – polimer hidrofilik dituang ke mold, crosslinking setelah penetrasi
Dissolving MN	Tidak kompatibel	Tidak kompatibel	Untuk master mold – desain digital fleksibel	Utama – polimer biodegradable dituang ke mold PDMS

**Tren Penelitian dan Aplikasi Klinis Terkini**

Berdasarkan data publikasi pada Gambar 7, Penelitian *microneedle* mengalami perkembangan

pesat pada periode 2022–2025, dengan pergeseran signifikan dari jenis konvensional menuju sistem yang lebih inovatif dan aplikatif.



Gambar 7. Diagram Tren Penelitian Jenis Microneedle Tahun 2022-2025

**PEMBAHASAN**

**Analisis Karakteristik Jenis *Microneedle***

Secara umum, kelima jenis *microneedle* memiliki karakteristik dan keunggulan yang berbeda dalam sistem penghantaran obat transdermal. *Solid microneedle* unggul dalam kesederhanaan desain dan kemudahan fabrikasi, namun efektivitasnya terbatas karena bergantung pada difusi pasif setelah pembentukan *mikrokanal*.

*Coated microneedle* menawarkan penghantaran obat yang lebih cepat dan presisi dosis yang lebih baik, tetapi kapasitas muatan obatnya relatif kecil dan sangat bergantung pada optimasi proses pelapisan. *Hollow microneedle* menunjukkan keunggulan dalam kontrol dosis yang sangat presisi dan kemampuan menghantarkan obat dalam jumlah besar secara konsisten, meskipun memerlukan sistem fabrikasi yang kompleks, biaya

tinggi, serta berisiko mengalami penyumbatan lumen.

*Hydrogel microneedle* memiliki keunikan dalam kemampuannya menyerap cairan interstisial dan membentuk jaringan gel yang memungkinkan pelepasan obat secara terkendali dalam jangka waktu lama, sehingga unggul untuk sistem penghantaran berkelanjutan (*controlled release*). Namun, jenis ini memiliki keterbatasan dalam kecepatan *onset* dan kompleksitas formulasi. Jika dibandingkan secara langsung, masing-masing jenis *microneedle* cenderung unggul pada satu aspek tertentu, namun tidak mampu mengoptimalkan seluruh parameter penting secara bersamaan, seperti efisiensi penghantaran, keamanan, kemudahan penggunaan, dan fleksibilitas fabrikasi.

*Dissolving microneedle* muncul sebagai sistem yang paling seimbang dan komprehensif. Sistem ini mengintegrasikan obat langsung ke dalam matriks jarum berbahan polimer biokompatibel yang akan larut di dalam kulit, sehingga tidak memerlukan tahap tambahan seperti coating maupun sistem aliran seperti pada *hollow microneedle*. Dibandingkan *solid* dan *coated microneedle*, *dissolving microneedle* memberikan efisiensi penghantaran yang lebih tinggi dan distribusi dosis yang lebih homogen. Dibandingkan *hollow* dan *hydrogel microneedle*, *dissolving microneedle* menawarkan kemudahan fabrikasi yang relatif lebih sederhana serta tidak memerlukan perangkat tambahan, sehingga lebih praktis untuk aplikasi luas. Karakteristik ini menjadikan *dissolving microneedle* sebagai kandidat unggul untuk berbagai aplikasi, mulai dari penghantaran vaksin dan biomolekul hingga produk terapeutik dan kosmetik di masa depan.

### Perbandingan Metode Fabrikasi Microneedle

Secara umum, metode fabrikasi *microneedle* berbasis *3D printing* dan *micromolding* menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan metode konvensional seperti MEMS dan *laser micromachining*, terutama dalam aspek efisiensi biaya, fleksibilitas desain, dan skalabilitas produksi. Metode MEMS, meskipun unggul dalam presisi, memiliki keterbatasan utama berupa biaya tinggi dan kebutuhan fasilitas *cleanroom*. Hossain *et al.* (2024) melaporkan bahwa proses MEMS melibatkan *multi-step fabrication* dengan biaya tinggi serta waktu produksi yang panjang. Sementara itu, laser *micromachining* memiliki keterbatasan pada kualitas permukaan dan ketajaman jarum akibat efek termal, yang dapat menurunkan efisiensi penetrasi (Rad *et al.*, 2021).

Sebaliknya, *3D printing* menawarkan keunggulan dalam prototyping cepat dan fleksibilitas desain. Penelitian Chaiwarit *et al.*, (2024) menunjukkan bahwa penggunaan *3D printing* untuk pembuatan *master mold* memungkinkan reduksi waktu fabrikasi yang signifikan dibanding metode konvensional, serta biaya yang lebih rendah karena tidak memerlukan *cleanroom*. Keunggulan utama *3D printing* terletak pada kemampuannya menghasilkan desain kompleks dan personalisasi tanpa peningkatan biaya yang signifikan (Fitaihi *et al.*, 2024).

Di sisi lain, *micromolding* merupakan metode yang paling unggul dalam reproduktibilitas dan skalabilitas produksi massal. Studi oleh Khalid *et al.* (2025) menunjukkan bahwa *micromolding* mampu menghasilkan *microneedle* dengan tingkat keberhasilan fabrikasi yang tinggi serta distribusi dimensi yang konsisten. Penelitian Li *et al.* (2024) juga menegaskan bahwa *micromolding* sangat kompatibel dengan berbagai material polimer *biodegradable*, sehingga ideal untuk *dissolving microneedle*. Keunggulan lain adalah biaya produksi per unit yang rendah setelah *master mold* dibuat, sehingga sangat cocok untuk produksi skala industri. Jika dibandingkan secara langsung, *3D printing* dan *micromolding* memiliki hubungan komplementer yang kuat: *3D printing* unggul dalam tahap desain dan pembuatan *master mold* secara cepat dan murah, sedangkan *micromolding* unggul dalam replikasi massal dengan kualitas tinggi dan konsisten (Fitaihi *et al.* 2024). Kombinasi keduanya menghasilkan sistem fabrikasi yang jauh lebih efisien dibanding MEMS (mahal dan kompleks) maupun *laser micromachining* (kurang presisi dan kualitas permukaan rendah).

### Analisis Matriks Kompatibilitas Jenis × Metode Fabrikasi

*Dissolving microneedle* memiliki tingkat kompatibilitas tertinggi dengan metode *micromolding* dan *3D printing* dibandingkan jenis lain seperti *solid*, *coated*, maupun *hollow microneedle*. Hal ini disebabkan sifat *dissolving microneedle* yang berbasis polimer larut, sehingga sangat sesuai dengan teknik fabrikasi berbasis cetakan (*molding*) dan desain digital. Sebaliknya, metode seperti MEMS dan laser *micromachining* lebih terbatas pada material keras (silikon atau logam), sehingga kurang ideal untuk sistem berbasis polimer *biodegradable* (Alkhiro dan Ghareeb, 2020).

Secara spesifik, *micromolding* merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk

*dissolving microneedle* karena mampu menghasilkan struktur dengan keseragaman dan reproduktibilitas yang konsisten, yang sangat penting untuk memastikan dosis obat yang akurat dan penetrasi kulit yang seragam. Studi oleh Li *et al.* (2024) menunjukkan bahwa *micromolding* menghasilkan *microneedle* dengan distribusi dimensi yang homogen dan efisiensi penghantaran yang tinggi. Selain itu, Alkhiro dan Ghareeb (2020) menegaskan bahwa metode ini sangat kompatibel dengan berbagai polimer *biodegradable* seperti PVP dan PVA, yang umum digunakan dalam *dissolving microneedle*. Hal ini menjadikan kombinasi *dissolving microneedle* + *micromolding* sebagai standar utama dalam produksi skala besar. Di sisi lain, *3D printing* memperkuat aspek inovasi dalam pengembangan *dissolving microneedle* terutama pada tahap desain dan pembuatan *master mold* (Chaiwarit *et al.*, 2024).

Studi Fitaihi *et al.* (2024) menunjukkan bahwa teknologi SLA *3D printing* memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam pembuatan *microneedle*, namun presisi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri jarum. *3D printing* sangat optimal digunakan untuk pembuatan *master mold* karena mampu menghasilkan struktur dengan akurasi tinggi, fleksibel, dan cepat, terutama untuk desain yang sesuai dengan kemampuan resolusi printer. Meskipun terdapat keterbatasan pada detail sudut tajam, pendekatan ini tetap lebih unggul dibanding metode konvensional dalam tahap desain dan *prototyping*. Dalam konteks fabrikasi lanjutan, penggunaan *master mold* hasil *3D printing* yang dikombinasikan dengan *micromolding* terbukti menjadi pendekatan paling optimal, khususnya untuk *dissolving microneedle* (DMN). Hal ini karena *micromolding* mampu mereplikasi struktur *microneedle* secara seragam, presisi, dan kompatibel dengan material polimer *biodegradable* (Choo dan Jin, 2022).

Dari matriks pada Tabel 3 terlihat bahwa pemilihan metode fabrikasi tidak dapat dilepaskan dari jenis *microneedle* yang dituju. MEMS dan *laser micromachining* tetap menjadi pilihan utama untuk *solid* dan *hollow microneedle* karena tuntutan presisi dan material keras, sedangkan *micromolding* menjadi tulang punggung produksi *hydrogel* dan *dissolving microneedle* yang berbasis polimer. *3D printing* berperan sebagai jembatan antara fleksibilitas desain dan produksi massal melalui pembuatan *master mold*, terutama untuk pengembangan *dissolving microneedle* yang saat ini menjadi fokus riset.

### **Arah Pengembangan Teknologi Microneedle**

Berdasarkan tren publikasi ilmiah, *dissolving microneedle* muncul sebagai jenis yang paling mendominasi arah penelitian saat ini. Dominasi ini terlihat dari peningkatan proporsi publikasi yang konsisten setiap tahun dibandingkan jenis lainnya. Keunggulan *dissolving microneedle* terletak pada penggunaan material *biodegradable* yang dapat larut di dalam kulit, sehingga meningkatkan keamanan dengan menghilangkan limbah tajam dan efisiensinya dalam penghantaran obat secara langsung ke lapisan dermis (Prausnitz, 2004).

*Dissolving microneedle* juga menawarkan fleksibilitas dalam formulasi obat dan kemudahan penggunaan, yang menjadikannya menarik untuk berbagai aplikasi seperti vaksinasi, terapi dermatologis, dan *drug delivery* sistemik. Sementara itu, *hydrogel-forming microneedle* menunjukkan tren peningkatan namun masih berada di bawah dominasi *dissolving microneedle*, terutama karena keunggulannya dalam pelepasan obat secara terkontrol dan potensi monitoring biomarker. Sebaliknya, jenis konvensional seperti *solid* dan *coated microneedle* menunjukkan tren stagnan atau menurun secara proporsional akibat keterbatasan dalam kapasitas penghantaran obat dan efisiensi penggunaan (Sartawi dkk., 2022). *Hollow microneedle* tetap memiliki peran dalam aplikasi spesifik seperti penghantaran cairan secara presisi, meskipun pengembangannya relatif terbatas oleh kompleksitas desain dan biaya fabrikasi.

Teknologi microneedle telah mengalami perkembangan signifikan dari tahap penelitian dasar hingga uji klinis dan komersialisasi awal. Dalam konteks uji klinis, *microneedle* telah banyak dievaluasi terutama untuk aplikasi vaksin dan penghantaran obat. Beberapa studi klinis menunjukkan bahwa *microneedle patch* untuk vaksin influenza mampu menghasilkan respons imun yang sebanding dengan injeksi konvensional, dengan tingkat penerimaan pasien yang lebih tinggi karena sifatnya minimal invasif dan tidak menimbulkan nyeri signifikan (Shea dan Prausnitz, 2021). *Microneedle* juga telah diuji dalam penghantaran obat seperti lornoxicam untuk anti-nyeri (Alkhiro dan Ghareeb, 2020), insulin untuk terapi diabetes (Zhang *et al.*, 2021), serta rifampisin untuk tuberkulosis (Kurnia *et al.*, 2023) meskipun sebagian besar masih berada pada tahap uji klinis awal. Aplikasi lain seperti terapi kanker dan imunoterapi berbasis *microneedle* masih berada pada tahap praklinis hingga awal uji klinis, namun menunjukkan potensi menjanjikan dalam

meningkatkan efektivitas terapi dan mengurangi efek samping sistemik.

Dalam pengembangan bisnis, jenis *microneedle* yang tersedia di pasar saat ini didominasi oleh aplikasi dermatologi dan kosmetik. *Solid microneedle*, seperti *dermaroller*, merupakan bentuk paling awal yang digunakan untuk meningkatkan permeabilitas kulit dan banyak digunakan dalam perawatan kulit. Namun, perkembangan terbaru menunjukkan bahwa *dissolving microneedle* menjadi jenis yang paling berkembang dan mulai banyak tersedia di pasar, terutama dalam bentuk patch untuk jerawat dan *anti-aging*. *Dissolving microneedle* umumnya dibuat dari polimer *biodegradable* seperti asam hialuronat, PVP, atau PVA yang dapat larut di dalam kulit dan melepaskan bahan aktif secara langsung. Selain itu, terdapat *coated* dan *hollow microneedle*, namun penggunaannya di pasar masih terbatas dan lebih banyak ditemukan dalam konteks penelitian atau aplikasi medis khusus (Li *et al.*, 2024; Sartawi *et al.*, 2022).

#### **Tantangan, Peluang, dan Perspektif Indonesia**

Proses fabrikasi *microneedle*, khususnya untuk jenis *dissolving*, memerlukan kontrol presisi terhadap komposisi material, bentuk, dan kekuatan mekanik, sehingga menjadi kendala dalam produksi massal yang konsisten. *Dissolving microneedle* menghadapi keterbatasan utama seperti kapasitas drug loading yang rendah, konsistensi dosis yang buruk, serta tantangan dalam menghasilkan konsentrasi terapeutik yang efektif. Selain itu, kurangnya langkah-langkah kontrol kualitas yang terstandarisasi, kompleksitas proses manufaktur, serta tingginya biaya yang terkait dengan produksi steril/aseptik semakin menghambat translasi klinis teknologi ini (Rad *et al.*, 2021).

Dari sisi regulasi, *microneedle* dikategorikan sebagai kombinasi antara perangkat medis dan sistem penghantaran obat, sehingga memerlukan jalur evaluasi yang kompleks dan ketat. Ilmu regulasi untuk bentuk sediaan yang sedang berkembang ini masih belum matang dan panduan regulasi yang eksplisit masih terbatas, sehingga diperlukan upaya kolaboratif untuk menggabungkan *microneedle* dan zat aktif yang dirancang untuk diaplikasikan pada kulit (Dul *et al.*, 2025). Kondisi ini berdampak pada lambatnya proses persetujuan produk, khususnya untuk aplikasi vaksin dan terapi sistemik yang membutuhkan bukti keamanan dan efikasi komprehensif, sekaligus diperparah oleh tantangan fabrikasi seperti tingginya biaya manufaktur,

keterbatasan kompatibilitas material dengan sel manusia, serta sulitnya pemberian dosis besar secara efisien melalui *microneedle* (Olowe *et al.*, 2022). Di sisi lain, teknologi *microneedle* menawarkan peluang besar melalui vaksinasi, di mana *dissolving microneedle* patch memiliki sejumlah keunggulan potensial, meliputi peningkatan imunogenisitas, efek penghematan dosis, biaya manufaktur yang rendah, eliminasi benda tajam, kemudahan penggunaan yang mengurangi kebutuhan tenaga kesehatan, serta penerimaan yang lebih baik dibandingkan injeksi jarum konvensional (Shea dan Prausnitz, 2021; Zafar *et al.*, 2025).

Dalam konteks Indonesia, terdapat potensi besar dalam pengembangan teknologi *microneedle*, khususnya melalui pemanfaatan bahan alam lokal sebagai material penyusun maupun zat aktif. Keanekaragaman hayati yang tinggi menyediakan sumber biopolimer alami seperti kitosan, alginat, dan gelatin yang berpotensi digunakan sebagai bahan dasar pembuatan *dissolving microneedle* (Habib *et al.*, 2022). Material ini bersifat *biodegradable* dan biokompatibel, relatif mudah diperoleh dan ekonomis, sehingga mendukung pengembangan produk yang berkelanjutan dan berbasis sumber daya lokal.

Selain sebagai material struktur, bahan alam Indonesia juga berpotensi dimanfaatkan sebagai zat aktif dalam sistem penghantaran *microneedle*. Berbagai ekstrak tanaman seperti pegagan (*Centella asiatica*), mangostin, dan kunyit (*Curcuma longa*) telah diteliti memiliki aktivitas farmakologis seperti antiinflamasi, antioksidan, dan penyembuhan luka. Integrasi bahan aktif alami tersebut ke dalam sistem *dissolving microneedle* dapat membuka peluang pengembangan produk terapi dermatologi maupun kosmetik yang inovatif dan bernilai tambah tinggi. Namun demikian, pengembangan *microneedle* berbasis bahan alam di Indonesia menghadapi tantangan, termasuk standarisasi kualitas bahan baku, variasi komposisi alami, serta keterbatasan infrastruktur penelitian dan manufaktur. Aspek regulasi dan uji klinis juga masih menjadi hambatan dalam mendorong produk berbasis *microneedle* menuju komersialisasi. Meskipun demikian, dengan dukungan riset berkelanjutan, kolaborasi antara akademisi dan industri, serta kebijakan yang mendukung hilirisasi inovasi, prospek pengembangan *microneedle* berbasis bahan alam Indonesia tetap menjanjikan.

## SIMPULAN

Lima jenis *microneedle - solid, coated, hollow, hydrogel, dan dissolving* memiliki karakteristik dan tingkat perkembangan yang berbeda, dengan *dissolving microneedle* sebagai jenis paling prospektif karena menggabungkan keamanan tinggi (tanpa limbah tajam), efisiensi penghantaran obat, presisi dosis, dan kompatibilitas dengan berbagai bahan aktif. Dari empat metode fabrikasi yang dibandingkan, *micromolding* dan *3D printing* muncul sebagai pendekatan paling efisien dan skalabel, sementara MEMS dan *laser micromachining* tetap diperlukan untuk fabrikasi *solid* dan *hollow microneedle* yang membutuhkan presisi material keras. Berdasarkan matriks kompatibilitas, kombinasi *3D printing* untuk pembuatan *master mold* dan *micromolding* untuk replikasi massal teridentifikasi sebagai pendekatan paling optimal, khususnya untuk pengembangan *dissolving microneedle* sebagai fokus riset utama saat ini. Penelitian ke depan perlu difokuskan pada optimasi material biopolimer, peningkatan stabilitas formulasi, eksplorasi bahan aktif berbasis bahan alam Indonesia, serta penguatan kerangka regulasi untuk mempercepat translasi klinis dan komersialisasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Farmasi, Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia Bandung atas dukungan dalam penyelesaian naskah ini, serta kepada para dosen pembimbing atas arahan dan masukan konstruktif selama proses penyusunan tinjauan ini.

## REFERENSI

- Aldawood, F. K., Desai, S., & Andar, A. (2021). Laser fabrication of polymeric microneedles for transdermal drug delivery. *Proceedings of the 2021 IISE Annual Conference*, 363–368.
- Alkhiro, A. R., & Ghareeb, M. M. (2020). Formulation and evaluation of lornoxicam as dissolving microneedle patch. *Iraqi Journal of Pharmaceutical Sciences*, 29(1), 184–194. <https://doi.org/10.31351/vol29iss1pp184-194>
- Amarnani, R., & Shende, P. (2022). Microneedles in diagnostic, treatment and theranostics: An advancement in minimally invasive delivery system. *Biomedical Microdevices*, 24(1), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10544-021-00604-w>
- Aoyagi, S., Sato, J., & Takahashi, T. (2020). Fabrication of microneedle from stretched

- biodegradable polymer sheet by 3D laser machining. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 32(2), 390–399. <https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0390>
- Bakhrushina, E. O., Shumkova, M. M., Avdonina, Y. V., et al. (2025). Transdermal drug delivery systems: Methods for enhancing skin permeability and their evaluation. *Pharmaceutics*, 17(7), 936. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070936>
- Brogden, N. K., Banks, S. L., Crofford, L. J., & Stinchcomb, A. L. (2013). Diclofenac enables unprecedented week-long microneedle-enhanced delivery of a skin-impermeable medication in humans. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 102(7), 2262–2272.
- Chaiwarit, T., Chanabodeechalermrung, B., & Jantrawut, P. (2024). Fabrication and characterization of dissolving microneedles containing *Oryza sativa* L. extract complex for enhancement of transfollicular delivery. *Polymers*, 16(16), 2377. <https://doi.org/10.3390/polym16162377>
- Choo, S., Jin, S., & Jung, J. (2022). Fabricating high-resolution and high-dimensional microneedle mold through the resolution improvement of stereolithography 3D printing. *Pharmaceutics*, 14(4), 766. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040766>
- Dul, M., Alali, M., & Ameri, M. (2025). White paper: Understanding, informing and defining the regulatory science of microneedle-based dosage forms that are applied to the skin. *Journal of Controlled Release*, 378, 402–415. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.11.056>
- Fitaihi, R., Abukhamees, S., & Chung, S. H. (2024). Optimization of stereolithography 3D printing of microneedle micro-molds for ocular drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, 658, 124195. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124195>
- Gattu, K., Godugu, D., & Jain, H. (2026). Microneedle technologies for drug delivery: Innovations, applications, and commercial challenges. *Micromachines*, 17(1), 102. <https://doi.org/10.3390/mi17010102>
- Habib, R., Azzad, A., & Akhlaq, M. (2022). Thiolated chitosan microneedle patch of levosulpiride from fabrication,

- characterization to bioavailability enhancement approach. *Polymers*, 14(3), 415.  
<https://doi.org/10.3390/polym14030415>
- Hossain, N., & Hossain, A. (2024). Advances of materials science in MEMS applications: A review. *Results in Engineering*, 22, 102115. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102115>
- Henry, S., McAllister, D. V., Allen, M. G., & Prausnitz, M. R. (1998). Microfabricated microneedles: A novel approach to transdermal drug delivery. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 87(8), 922–925. <https://doi.org/10.1021/js980042e>
- Khalid, R., Mahmood, S., Sofian, Z., et al. (2023). Formulation and characterization of thiolated chitosan/polyvinyl acetate based microneedle patch for transdermal delivery of dydrogesterone. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 31(5), 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2023.03.007>
- Kim, Y. C., Park, J. H., & Prausnitz, M. R. (2012). Microneedles for drug and vaccine delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64(14), 1547–1568. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.04.005>
- Kurnia, Q., Panya, A., Dermatis, S., et al. (2023). Liposome-loaded polymeric microneedles for enhanced skin deposition of rifampicin. *International Journal of Pharmaceutics*, 646, 123446. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123446>
- Li, S., Chen, Q., Zhang, Y., et al. (2024). Hyaluronic acid dissolving microneedle patch-assisted acupoint transdermal delivery of triptolide for effective rheumatoid arthritis treatment. *Scientific Reports*, 14(1), 25256. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76341-w>
- Mohite, P., Puri, A., Munde, S., et al. (2024). Hydrogel-forming microneedles in the management of dermal disorders through a non-invasive process: A review. *Gels*, 10(11), 719. <https://doi.org/10.3390/gels10110719>
- Olowe, M., Parupelli, S. K., & Desai, S. (2022). A review of 3D-printing of microneedles. *Pharmaceutics*, 14(12), 2693. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122693>
- Rad, Z. F., Prewett, P. D., & Davies, G. J. (2021). An overview of microneedle applications, materials, and fabrication methods. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 12, 1034–1046. <https://doi.org/10.3762/bjnano.12.77>
- Sartawi, Z., Blackshields, C., & Faisal, W. (2022). Dissolving microneedles: Applications and growing therapeutic potential. *Journal of Controlled Release*, 348, 186–205. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.05.045>
- Wu, C., Yu, Q., Huang, Y., et al. (2024). Microneedles as transdermal drug delivery system for enhancing skin disease treatment. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 14(12), 5161–5180. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2024.08.013>
- Zafar, S., Jafar, S., Muhammad, R., et al. (2025). Advancements in transdermal drug delivery using microneedles: Technological and material perspective. *Discover Pharmaceutical Sciences*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44395-025-00005-5>
- Zhang, Y., Zhang, Y., et al. (2021). A dissolving and glucose-responsive insulin-releasing microneedle patch for type 1 diabetes therapy. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(3), 648–657. <https://doi.org/10.1039/d0tb02133d>