

**DAYA TAHAN MEMORI SEL T DAN SEL B SPESIFIK ANTIGEN PASCA-VAKSINASI mRNA:
TINJAUAN EFEKTIVITAS JANGKA PANJANG VAKSIN BERBASIS MEMORI IMUN**

Yunita Sari^{1*}, Desi Oktariana²

Program Studi Magister Ilmu Biomedik, Fakultas Kedokteran, Universitas Sriwijaya,
Palembang, Indonesia

*Corresponding Author: yunitasari2226@gmail.com

Abstrak

Vaksin berbasis mRNA telah menunjukkan efektivitas yang tinggi dalam mencegah infeksi berat dan kematian akibat penyakit menular, khususnya COVID-19. Namun, kadar antibodi netralisasi sirkulasi cenderung menurun dalam beberapa bulan setelah vaksinasi, sehingga efektivitas jangka panjang vaksin perlu ditinjau tidak hanya dari respon humoral sirkulasi, tetapi juga dari pembentukan dan persistensi memori imun. Article review ini bertujuan meninjau daya tahan memori sel T dan sel B spesifik antigen pasca-vaksinasi mRNA serta implikasinya terhadap efektivitas jangka panjang vaksin. Untuk mengkaji lebih dalam terkait hal ini, sebuah tinjauan literatur yang komprehensif dilakukan dengan mencari publikasi pada tahun 2021 dan setelahnya di database ilmiah seperti PubMed, Scopus, Cochrane Library, Web of Science dan Google Scholar. Fokusnya adalah pada artikel yang membahas terkait respon imun manusia pasca-vaksinasi mRNA dengan follow-up minimal 3-6 bulan. Pembahasan mencakup mekanisme pembentukan memori imun, dinamika memori sel B dan sel T CD4⁺/CD8⁺, peran germinal center dan maturasi afinitas, pengaruh booster, serta faktor host dan patogen yang memengaruhi durabilitas respon. Bukti ilmiah menunjukkan bahwa meskipun antibodi menurun, memori sel B dan sel T spesifik antigen dapat bertahan dalam jangka waktu yang lebih panjang dan mendukung respon anamnestic saat terpapar ulang. Oleh karena itu, memori seluler dan humoral spesifik antigen merupakan komponen penting dalam menilai efektivitas jangka panjang vaksin mRNA untuk merumuskan strategi pemberian dosis booster secara tepat.

Kata kunci : vaksin mRNA, memori sel B, memori sel T, imunitas jangka panjang, efektivitas vaksin.

Article History

Received: Oktober 2026

Reviewed: Oktober 2026

Published: Oktober 2026

Plagiarism Checker No 950

Prefix DOI : Prefix DOI :

10.8734/Nutricia.v1i2.365

Copyright : Author

Publish by : Medic Nutricia



This work is licensed under
a [Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. PENDAHULUAN

Vaksin merupakan salah satu intervensi kesehatan masyarakat paling efektif dalam mencegah morbiditas dan mortalitas akibat penyakit menular. Perkembangan teknologi vaksin mRNA memungkinkan penyampaian informasi genetik yang mengode antigen tertentu ke dalam sel host, sehingga antigen diproduksi secara endogen dan dikenali oleh sistem imun. Mekanisme ini menginduksi respon imun humoral maupun seluler, termasuk produksi antibodi netralisasi, aktivasi sel T helper, sel T sitotoksik, serta pembentukan sel memori (Zhang et al., 2022).

Pada vaksin mRNA COVID-19, respon antibodi netralisasi umumnya meningkat tajam setelah pemberian dosis awal dan *booster*. Namun, sejumlah studi menunjukkan bahwa titer

antibodi dapat mengalami penurunan seiring waktu. Penurunan antibodi ini sering ditafsirkan sebagai berkurangnya perlindungan, padahal sistem imun memiliki mekanisme memori yang memungkinkan respon yang lebih cepat dan lebih kuat ketika individu terpapar kembali oleh patogen yang sama atau serupa (Goel et al., 2021).

Memori imun merupakan hasil dari proses diferensiasi limfosit naif menjadi sel efektor dan sel memori setelah aktivasi antigen. Sel B memori berperan dalam menghasilkan antibodi dengan afinitas yang lebih tinggi pada paparan ulang, sedangkan sel T memori, baik CD4⁺ maupun CD8⁺, berperan dalam koordinasi respon imun dan eliminasi sel yang terinfeksi (Goel et al., 2021). Oleh karena itu, evaluasi efektivitas jangka panjang vaksin mRNA perlu memperhatikan persistensi, fungsi, dan kualitas memori sel T dan sel B spesifik antigen (Mudd et al., 2023).

Tinjauan literatur ini disusun untuk mengetahui daya tahan memori sel T dan sel B spesifik antigen yang diinduksi oleh vaksin mRNA setelah vaksinasi, dan mekanisme kontribusinya terhadap efektivitas vaksin jangka panjang. Tinjauan literatur ini diharapkan memberikan kerangka konseptual bagi penelitian biomedik mengenai durabilitas imunitas pasca-vaksinasi dan pemilihan parameter imunologis yang relevan dalam evaluasi vaksin.

2. TUJUAN PENULISAN

Tujuan umum tinjauan literatur ini adalah meninjau daya tahan memori sel T dan sel B spesifik antigen pasca-vaksinasi mRNA sebagai determinan efektivitas jangka panjang vaksin.

Tujuan khusus:

- Menjelaskan mekanisme pembentukan memori sel B dan sel T setelah vaksinasi mRNA.
- Meninjau dinamika dan durabilitas memori sel B, sel T CD4⁺, dan sel T CD8⁺ spesifik antigen.
- Menganalisis hubungan antara persistensi memori imun dengan penurunan antibodi netralisasi dan proteksi klinis jangka panjang.
- Mengidentifikasi faktor host, vaksin, dan patogen yang memengaruhi daya tahan memori imun.
- Menelaah implikasi temuan tersebut terhadap strategi *booster* dan evaluasi efektivitas vaksin.

3. METODE PENULISAN

Tinjauan literatur ini disusun melalui penelusuran literatur pada database PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan meliputi “mRNA vaccine”, “memory B cells”, “memory T cells”, “long-term immunity”, “vaccine effectiveness”, “durability”, “germinal center”, dan “SARS-CoV-2”.

Artikel yang diprioritaskan adalah artikel penelitian original, *systematic review*, *narrative review*, dan meta-analisis yang membahas respons imun manusia pasca-vaksinasi mRNA dengan *follow-up* minimal tiga hingga enam bulan. Artikel yang hanya berbasis *in vitro*, laporan kasus tunggal, atau artikel opini tanpa dukungan data primer dikeluarkan dari analisis utama.

Parameter utama yang dievaluasi meliputi frekuensi dan fungsi memori sel B, sel T CD4⁺, dan sel T CD8⁺, titer antibodi netralisasi, maturasi afinitas antibodi, respon anamnestik, serta *outcome* klinis seperti infeksi, hospitalisasi, dan kematian.

4. HASIL

Berdasarkan hasil tinjauan literatur terhadap jurnal-jurnal terkait, telah terbentuk gambaran daya tahan memori sel T dan sel B spesifik antigen yang diinduksi oleh vaksin mRNA setelah vaksinasi, dan mekanisme kontribusinya terhadap efektivitas vaksin jangka panjang.

Peneliti & Tahun	Judul Artikel	Metodologi penelitian	Sampel / subjek	Pengukuran / pendekatan	Hasil utama terkait memori sel T dan B
Goel et al. (2021)	mRNA vaccines induce durable immune memory to SARS-CoV-2 and variants of concern	Studi observasional longitudinal pada manusia, pengukuran respon humoral dan seluler berulang pascavaksinasi hingga 6 bulan.	61 penerima vaksin mRNA: 45 belum pernah terinfeksi dan 16 pulih dari COVID-19	Sampel darah serial; analisis antibodi anti-Spike/RBD dan netralisasi, sel B memori spesifik antigen dan pengikatan RBD varian, serta sel T CD4 ⁺ /CD8 ⁺ spesifik Spike menggunakan uji imunologi berbasis sel dan peptida.	Antibodi menurun dari puncak tetapi umumnya tetap di atas baseline sampai 6 bulan. Sel B memori spesifik Spike/RBD tetap bertahan dan frekuensinya meningkat antara bulan ke-3 dan ke-6. Sel T memori CD4 ⁺ /CD8 ⁺ menurun dari puncak pascadosis kedua, lalu respon CD4 ⁺ relatif stabil pada bulan 3-6. Respon Tfh awal berkorelasi dengan antibodi pada bulan ke-6. Memori tetap ada meskipun antibodi turun.
Terreri et al. (2022)	Persistent B cell memory after SARS-CoV-2 vaccination is functional during breakthrough infections	Studi observasional longitudinal pada tenaga kesehatan, menilai dinamika antibodi dan sel B memori hingga 9 bulan	Kelompok utama terdiri atas 34 individu tanpa riwayat PCR positif setelah dua dosis vaksinasi. Kelompok tambahan mencakup tenaga kesehatan dengan infeksi terobosan untuk analisis serum/saliva.	Pengukuran IgG anti-Spike trimerik dan antibodi anti-RBD, sel B memori spesifik SARS-CoV-2, serta respons humoral pada infeksi terobosan dan sampel saliva.	Antibodi spesifik menurun secara fisiologis, sedangkan sel B memori bertahan dan meningkat hingga 9 bulan. Pada infeksi terobosan, respon memori berkontribusi pada peningkatan antibodi spesifik dalam serum dan saliva. Vaksin parenteral saja tidak menghasilkan imunitas mukosa yang setara dengan infeksi mukosa.
Arunachalam et al. (2023)	Durability of immune responses to mRNA booster	Studi longitudinal terhadap respon antibodi	55 orang dewasa sehat setelah booster	Titer antibodi pengikat dan netralisasi, estimasi waktu paruh antibodi,	Booster ketiga meningkatkan waktu paruh antibodi netralisasi menjadi sekitar 76 hari dibanding

	vaccination against COVID-19	setelah booster, subset menjalani pemeriksaan sel B dan T memori.	ketiga, sel B/T memori diukur pada subset 28 orang. Subkelompok 13 relawan menerima booster keempat.	sel B memori dan sel T spesifik antigen; netralisasi diuji terhadap strain ancestral dan subvarian Omicron.	sekitar 56-66 hari setelah dua dosis awal, dosis keempat meningkatkan menjadi sekitar 88 hari. Sel B dan T memori spesifik antigen terdeteksi setidaknya 6 bulan meskipun antibodi terhadap varian baru dapat menjadi tidak terdeteksi.
Davis-Porada et al. (2025)	Durable T cell immunity to COVID-19 vaccines in MS patients on B cell depletion therapy	Studi kohort komparatif multisenter; respon imun pascavaksinasi diamati dalam rentang 1-70 minggu.	Pasien multiple sclerosis yang menerima terapi deplesi sel B dibandingkan pasien MS dengan terapi non-depleksi sel B	Pengukuran antibodi anti-Spike/RBD dan respons sel T CD4 ⁺ /CD8 ⁺ reaktif Spike pada beberapa waktu pascavaksinasi, data klinis COVID-19 ikut dibandingkan.	Kelompok terapi deplesi sel B memiliki antibodi yang lebih rendah, tetapi frekuensi sel T memori CD4 ⁺ dan CD8 ⁺ reaktif Spike lebih tinggi dibanding kelompok non-depleksi. Memori T bertahan hingga 14 bulan pada kedua kelompok.
Wang et al. (2023)	T cell immune memory after covid-19 and vaccination	Review spesialis/naratif yang mengintegrasikan studi respons sel T setelah infeksi, vaksinasi, dan imunitas hibrida	Mengulas berbagai studi manusia dan beberapa konteks eksperimen, termasuk rejimen vaksin berbeda, varian, serta populasi dengan kerentanan klinis.	Sintesis bukti tentang CD4 ⁺ /CD8 ⁺ memori, epitop, varian reaktivitas silang, respon sistemik dan <i>tissue-resident memory</i>	Memori T spesifik SARS-CoV-2 relatif tahan terhadap perubahan varian karena mengenali banyak epitop. Berbagai rejimen vaksin menghasilkan memori T, memori ini diperkirakan berperan penting dalam mencegah penyakit berat meskipun tidak selalu mencegah infeksi. Bukti mengenai memori T residen mukosa setelah vaksin mRNA masih belum pasti.
Crotty (2026)	Immunological memory to vaccines	Review komprehensif tentang memori imun vaksin dengan fokus data manusia; mengintegrasikan B memori, CD4 ⁺ , CD8 ⁺ , antibodi, sel	Sintesis studi vaksin dari berbagai patogen, dengan banyak pembahasan menggunakan data COVID-19	Sintesis literatur mengenai persistensi, fungsi, lokasi jaringan, sel B memori, sel T memori, plasma cell/antibodi, serta konsep imunitas berlapis.	Menekankan bahwa memori imun tidak dapat dinilai hanya dari titer antibodi: sel B memori, sel T CD4 ⁺ /CD8 ⁺ , antibodi persisten, dan sel memori residen jaringan berkontribusi secara berbeda. Memori dapat bersifat sirkulasi atau residen. Imunitas hibrida

		residen jaringan, dan imunitas hibrida.			dapat memperluas kualitas respon.
Matsumura, Takano & Takahashi (2023)	Immune responses related to the immunogenicity and reactogenicity of COVID-19 mRNA vaccines	Review mekanistik tentang imunogenisitas dan reaktogenisitas vaksin mRNA COVID-19	Merangkum studi manusia dan model eksperimental tentang respon antibodi bawaan, sel T dan sel B germinal center/memori.	Sintesis studi mengenai aktivasi imun bawaan oleh mRNA/LNP, presentasi antigen, korelat respons antibodi dan seluler, serta faktor yang terkait efek samping sistemik.	Vaksin mRNA menginduksi antibodi, sel T sitotoksik dan memori imun melalui aktivasi imun bawaan dan presentasi antigen. Respons germinal center dan sel B memori penting untuk durabilitas antibodi, tetapi mekanisme yang menentukan imunogenisitas dan reaktogenisitas belum sepenuhnya dipahami.

5. PEMBAHASAN

Mekanisme Pembentukan Memori Imun Pasca-Vaksinasi mRNA

Vaksin mRNA memasukkan molekul mRNA yang mengode antigen target ke dalam sel host, umumnya sel presentasi antigen dan sel di lokus injeksi. Setelah translasi, antigen diproses dan dipresentasikan melalui molekul MHC kelas I dan kelas II. Presentasi melalui MHC kelas I mengaktivasi sel T CD8⁺, sedangkan presentasi melalui MHC kelas II mengaktivasi sel T CD4⁺ (Mudd et al., 2023).

Sel T helper CD4⁺ berperan sentral dalam pembentukan imunitas jangka panjang. Sel T *follicular helper* (Tfh) berkolokasi dengan sel B di germinal center limfa node dan memberikan sinyal kostimulasi melalui CD40L, IL-21, serta sitokin lain. Interaksi ini mendorong proliferasi sel B, hipermutasi somatik, seleksi klonal, *class-switch recombination*, dan maturasi afinitas antibody (Crotty, 2026). Hasil dari proses germinal center adalah dua populasi utama, yaitu sel plasma jangka pendek yang memproduksi antibodi dan sel B memori yang bertahan lebih lama. Sel B memori tidak selalu memproduksi antibodi dalam kadar tinggi, tetapi memiliki kemampuan berdiferensiasi cepat menjadi sel plasma ketika terjadi paparan antigen ulang (Turner et al., 2021).

Sel T memori terbentuk setelah kontraksi fase efektor. Sebagian sel T efektor mengalami apoptosis, tetapi sebagian lain berdiferensiasi menjadi sel T memori sentral, sel T memori efektor, dan sel T memori residu jaringan. Sel T memori sentral beredar di sirkulasi dan organ limfoid, sedangkan sel T memori efektor beredar di jaringan perifer. Sel T memori residu jaringan menetap pada lokasi anatomis tertentu, termasuk paru dan mukosa, sehingga dapat memberikan respons cepat terhadap patogen yang masuk melalui jalur respirasi (Wang et al., 2023).

Daya Tahan Memori Sel B

Memori sel B merupakan komponen penting imunitas jangka panjang pasca-vaksinasi mRNA. Setelah vaksinasi, sel B naif yang mengenali antigen mengalami aktivasi dan memasuki germinal center. Di dalam germinal center, sel B mengalami hipermutasi somatik pada daerah variabel gen immunoglobulin, diikuti seleksi terhadap klon yang memiliki afinitas tinggi terhadap antigen (Cho et al., 2021)

Pada vaksin mRNA SARS-CoV-2, respons sel B memori spesifik protein *spike* terdeteksi hingga berbulan-bulan setelah pemberian dosis awal. Beberapa studi melaporkan bahwa respons germinal center dapat bertahan setidaknya enam bulan setelah vaksinasi BNT162b2. Sel B memori juga menunjukkan evolusi klonal, termasuk peningkatan afinitas dan potensi pengenalan terhadap varian yang muncul. Meskipun titer antibodi netralisasi menurun, keberadaan sel B memori memungkinkan terjadinya respons anamnestic. Saat individu terpapar ulang oleh antigen, sel B memori dapat berdiferensiasi menjadi sel plasma dalam waktu relatif singkat, menghasilkan antibodi baru, dan meningkatkan kembali kadar antibodi protektif. Dengan demikian, sel B memori berfungsi sebagai cadangan imunologis yang menjaga kapasitas respon humoral jangka Panjang (Kotaki et al., 2022).

Kualitas memori sel B tidak hanya ditentukan oleh jumlah sel, tetapi juga oleh afinitas antibodi, isotipe, dan kemampuan mengenali varian antigen. Pematangan afinitas yang berkelanjutan dapat meningkatkan kekuatan pengikatan antibodi terhadap antigen, sedangkan *breadth respons* menentukan kemampuan antibodi mengenali varian yang mengalami mutasi (Goel et al., 2021).

Daya Tahan Memori Sel T

Memori sel T merupakan komponen imunitas adaptif yang berperan penting dalam proteksi jangka panjang, terutama terhadap infeksi virus. Sel T CD4⁺ memori berfungsi sebagai regulator respons imun melalui pemberian bantuan kepada sel B, aktivasi makrofag, dan koordinasi respons inflamasi yang terkontrol. Sel T *follicular helper* memori berkontribusi dalam reaktivasi respons sel B saat terjadi paparan ulang (Mudd, et al, 2023).

Sel T CD8⁺ memori berperan sebagai sel efektor sitotoksik yang mampu mengenali sel target yang menampilkan antigen melalui MHC kelas I. Sel ini dapat menghasilkan granzyme, perforin, IFN- γ , dan TNF- α untuk mengeliminasi sel yang terinfeksi. Pada konteks vaksin mRNA, respons CD8⁺ spesifik antigen berkontribusi terhadap kontrol replikasi virus dan pengurangan keparahan penyakit (Moss P, 2022).

Berdasarkan dari tinjauan literatur dari Crotty et al (2026), pada vaksin COVID-19 menunjukkan bahwa memori sel T spesifik *spike* dapat bertahan lama meskipun antibodi menurun. Respons sel T juga cenderung lebih tahan terhadap *escape varian* karena sebagian epitop sel T berasal dari region antigen yang lebih konservatif dibandingkan epitop antibodi netralisasi. Hal ini menjelaskan mengapa proteksi terhadap infeksi ulang dapat menurun, tetapi proteksi terhadap penyakit berat relatif lebih terjaga.

Selain sel T memori sirkulasi, sel T memori residu jaringan berperan dalam proteksi lokal. Pada infeksi respirasi, keberadaan sel T memori di jaringan paru memungkinkan respons imun yang lebih cepat sebelum patogen menyebar secara sistemik. Kompartemen jaringan ini menjadi penting dalam evaluasi durabilitas imunitas karena sampel darah perifer saja belum tentu merepresentasikan keseluruhan populasi sel memori (Zhuang et al., 2024).

Dinamika Antibodi, Memori Seluler, dan Efektivitas Jangka Panjang

Efektivitas vaksin jangka panjang merupakan konsep multidimensional yang meliputi perlindungan terhadap infeksi, penyakit simptomatik, penyakit berat, hospitalisasi, dan kematian. Antibodi netralisasi merupakan korelat proteksi yang kuat terhadap infeksi awal, tetapi kadar antibodi sirkulasi cenderung menurun seiring waktu (Goel et al., 2021).

Sebaliknya, memori sel B dan sel T dapat bertahan lebih lama. Ketika terjadi paparan ulang, respons anamnestic dari sel memori dapat mempercepat produksi antibodi dan aktivasi sel efektor. Oleh karena itu, individu yang kehilangan sebagian besar antibodi sirkulasi tetap dapat memiliki proteksi yang bermakna terhadap penyakit berat.

Pola ini menjelaskan mengapa efektivitas vaksin terhadap infeksi cenderung menurun lebih cepat daripada efektivitas terhadap hospitalisasi dan kematian. Pada infeksi yang terjadi

meskipun telah divaksinasi, memori imun dapat membatasi replikasi patogen, mempercepat pemulihan, dan menurunkan risiko progresi menuju penyakit berat (Matsumura, Takano & Takahashi, 2023).

Dengan demikian, evaluasi efektivitas jangka panjang vaksin mRNA sebaiknya tidak hanya menggunakan titer antibodi, tetapi juga mengukur frekuensi memori sel B spesifik antigen, respons sel T CD4⁺ dan CD8⁺, kapasitas respons anamnestic, serta kualitas fungsional sel memori.

Peran *Booster* dalam Penguatan Memori Imun

Pemberian dosis *booster* bertujuan meningkatkan kembali kadar antibodi, memperluas respon terhadap varian, dan memperkuat populasi sel memori. Setelah *booster*, sel B memori yang telah mengalami maturasi afinitas dapat diaktifkan kembali dan berdiferensiasi menjadi sel plasma yang memproduksi antibodi dengan kualitas lebih tinggi. Studi pada vaksin mRNA COVID-19 menunjukkan bahwa *booster* dapat menginduksi memori sel B dan sel T spesifik antigen yang bertahan setidaknya enam bulan. *Booster* juga dapat meningkatkan *cross-reactivity* terhadap varian tertentu, terutama apabila antigen *booster* disesuaikan dengan varian yang beredar (Arunachalam et al., 2023).

Namun, strategi *booster* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara manfaat imunologis, risiko reactogenicity, ketersediaan vaksin, dan karakteristik epidemiologi. Pada populasi dengan risiko tinggi, seperti lansia dan individu imunokompromis, *booster* dapat memiliki nilai tambah yang lebih besar karena respons memori awal mungkin lebih lemah atau lebih cepat menurun.

Faktor yang Memengaruhi Daya Tahan Memori Imun

Wang et al., (2023) dan Davis-Porada et al. (2025) melaporkan daya tahan memori sel T dan sel B pasca-vaksinasi mRNA dipengaruhi oleh interaksi antara faktor host, karakteristik vaksin, dan tekanan evolusi pathogen, antara lain :

- Usia: immunosenescence pada lansia dapat menurunkan kualitas aktivasi limfosit naif, pembentukan germinal center, dan diferensiasi sel memori.
- Status imun: kondisi imunokompromis, penggunaan immunosupresan, kemoterapi, dan terapi depleksi sel B dapat mengubah pembentukan serta persistensi memori imun.
- Riwayat infeksi: infeksi alamiah sebelum atau sesudah vaksinasi dapat menghasilkan *hybrid immunity* yang memperluas respons sel B dan sel T.
- Jumlah dosis dan interval vaksinasi: jumlah dosis serta jarak antar-dosis memengaruhi magnitude, kualitas, dan durabilitas respons imun.
- Karakteristik antigen: stabilitas antigen, jumlah epitop, dan tingkat konservasi epitop memengaruhi pengenalan oleh antibodi dan sel T.
- Varian patogen: mutasi pada *domain* antigen dapat mengurangi pengenalan antibodi, tetapi respons sel T sering lebih terjaga karena epitopnya lebih konservatif.
- Kompartemen anatomis: memori imun yang tersimpan di jaringan target, seperti paru, dapat memberikan proteksi lokal yang tidak sepenuhnya tercermin pada sampel darah perifer.

Keterbatasan Tinjauan

Tinjauan ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, sebagian besar data jangka panjang berasal dari vaksin mRNA COVID-19, sehingga generalisasi ke platform mRNA untuk patogen lain perlu dilakukan secara hati-hati. Kedua, pengukuran memori imun sering dilakukan pada darah perifer, padahal sel memori juga berada di jaringan limfoid dan non-limfoid. Ketiga, variasi desain studi, teknik laboratorium, waktu *follow-up*, dan definisi *outcome* dapat memengaruhi perbandingan antar-studi.

Selain itu, hubungan antara memori seluler dan proteksi klinis bersifat kompleks. Tidak ada satu marker imunologis tunggal yang dapat memprediksi seluruh bentuk proteksi. Antibodi netralisasi lebih relevan untuk mencegah infeksi, sedangkan memori sel B dan sel T lebih berperan dalam kontrol penyakit serta perlindungan dari keparahan saat terjadi infeksi.

Implikasi bagi Riset Biomedik

Temuan ini menekankan pentingnya penelitian longitudinal yang mengevaluasi memori imun secara komprehensif. Penelitian selanjutnya perlu mengukur bukan hanya jumlah sel memori, tetapi juga fungsi efekturnya, termasuk produksi sitokin, kapasitas sitotoksik, kemampuan respons anamnestik, dan afinitas antibodi.

Pada konteks Indonesia, studi yang menilai durabilitas memori imun pasca-vaksinasi mRNA perlu mempertimbangkan karakteristik populasi lokal, riwayat infeksi, status gizi, komorbid, paparan lingkungan, dan jadwal vaksinasi nasional. Data tersebut penting untuk mendukung pengambilan keputusan mengenai strategi *booster* dan evaluasi efektivitas vaksin berbasis bukti.

6. KESIMPULAN

Vaksin mRNA mampu menginduksi memori imun humoral dan seluler yang berkontribusi terhadap efektivitas jangka panjang vaksin. Meskipun antibodi netralisasi sirkulasi dapat menurun seiring waktu, memori sel B dan sel T spesifik antigen cenderung bertahan lebih lama dan mendukung respons anamnestik saat terpapar ulang.

Memori sel B menyediakan kapasitas produksi antibodi afinitas tinggi, sedangkan memori sel T CD4⁺ dan CD8⁺ memberikan koordinasi imun serta aktivitas sitotoksik yang penting dalam kontrol infeksi. Oleh karena itu, daya tahan memori sel T dan sel B spesifik antigen merupakan indikator penting dalam menilai efektivitas jangka panjang vaksin mRNA, terutama untuk proteksi terhadap penyakit berat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arunachalam PS, Lai L, Samaha H, et al. Durability of immune responses to mRNA booster vaccination against COVID-19. *J Clin Invest.* 2023;133(10):e167955. doi:10.1172/JCI167955.
2. Crotty S. Immunological memory to vaccines. *Immunity.* 2026;59(4):813-832. doi:10.1016/j.immuni.2026.02.019.
3. Davis-Porada J, Tozlu C, Aiello C, et al. Durable T cell immunity to COVID-19 vaccines in MS patients on B cell depletion therapy. *npj Vaccines.* 2025;10:98. doi:10.1038/s41541-025-01151-8.
4. Goel RR, Painter MM, Apostolidis SA, et al. mRNA vaccines induce durable immune memory to SARS-CoV-2 and variants of concern. *Science.* 2021;374:eabm0829. doi:10.1126/science.abm0829.
5. Hellgren F, Rosdahl A, Cerveira RA, et al. Modulation of innate immune response to mRNA vaccination after SARS-CoV-2 infection or sequential vaccination in humans. *JCI Insight.* 2024;9(9):e175401. doi:10.1172/jci.insight.175401
6. Karam M, Daoud G. mRNA vaccines: Past, present, future. *Asian J Pharm Sci.* 2022;17:491-522. doi:10.1016/j.ajps.2022.05.003.
7. Matsumura T, Takano T, Takahashi Y. Immune responses related to the immunogenicity and reactogenicity of COVID-19 mRNA vaccines. *Int Immunol.* 2023;35(5):213-220. doi:10.1093/intimm/dxac064.
8. Moss P. T cell immunity to COVID-19 vaccines. *Science.* 2022;378(6622):846-847.
9. Mudd PA, Minervina AA, Pogorelyy MV, et al. T cell memory after COVID-19 and vaccination. *BMJ Medicine.* 2023;2(1):e000468.

10. Pardi N, Hogan MJ, Porter FW, Weissman D. mRNA vaccines – a new era in vaccinology. *Nat Rev Drug Discov.* 2018;17(4):261-279. doi:10.1038/nrd.2017.243.
11. Terreri S, Piano Mortari E, Vinci MR, et al. Persistent B cell memory after SARS-CoV-2 vaccination is functional during breakthrough infections. *Cell Host Microbe.* 2022;30:400-408. doi:10.1016/j.chom.2022.01.003.
12. Turner JS, O'Halloran JA, Kim D, et al. SARS-CoV-2 mRNA vaccines induce persistent human germinal centre responses. *Nature.* 2021;596:109-113.
13. Wang L, Nicols A, Turtle L, et al. T cell immune memory after covid-19 and vaccination. *BMJ Med.* 2023;2:e000468. doi:10.1136/bmjmed-2022-000468.
14. Zhang Z, Mateus J, Coelho CH, et al. Humoral and cellular immune memory to four COVID-19 vaccines. *Cell.* 2022;185(14):2434-2451.
15. Zhuang Z, Zhuo J, Yuan Y, et al. Harnessing T-Cells for Enhanced Vaccine Development against Viral Infections. *Vaccines.* 2024;12:478. doi:10.3390/vaccines12050478.