

DISERTASI

**ANALISIS EKSPRESI mRNA GEN TLR2 DAN mRNA GEN TLR4
SERTA KADAR PROTEIN TLR2 DAN TLR4 PADA TB ANAK
YANG TELAH DIVAKSINASI BCG**

**ANALISIS OF mRNA GENE TLR2 AND TLR4 EXRESSION AND
SERUM PROTEIN LEVEL OF TLR2 AND TLR4 IN BCG
VACCINATED CHILDREN WITH TB**



**Rahmini Shabariah
C013171019**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KEDOKTERAN
FAKULTAS KEDOKTERAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

PANITIA PENILAI UJIAN DISERTASI

Promotor : Prof. dr. Mochammad Hatta, PhD, Sp.MK(K)
Kopromotor : Dr. dr. Irfan Idris, M Kes
Kopromotor : dr. Arief Santoso, Ph.D, Sp.P(K), PAPSR
Penguji Eksternal : Prof. Dr. dr. Ni Made Mertaniasih, MS, Sp.MK(K)

Penilai : Prof. Dr. dr. Andi Asadul Islam, Sp.BS-FISC
Prof. dr. Rosdiana Natzir, PhD, Sp.Biok
Dr.dr. Ilhamjaya Patellongi, M. Kes
Dr. dr. Warsinggih, Sp.B-KBD(K)
Dr.dr. Bob Wahyudin, Sp.A(K)

DISERTASI

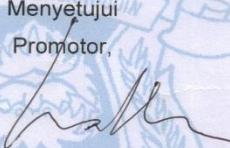
**ANALISIS EKSPRESI mRNA GEN TLR2 DAN TLR4 SERTA KADAR
PROTEIN TLR2 DAN TLR4 PADA TB ANAK YANG TELAH DIVAKSINASI**

Disusun dan diajukan oleh

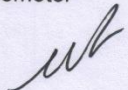
Rahmini Shabariah
C013171019

*Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Studi Doktor Ilmu Kedokteran
Fakultas Kedokteran, Universitas Hasanuddin
pada tanggal, 17 September 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan*


Menyetujui
Promotor,


Prof. dr. Mochammad Hatta, Ph.D, Sp.MK(K)
Nip. 19570416 198503 1 001

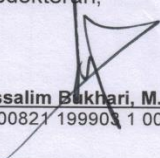
Co. Promotor


Dr. dr. Irfan Idris, M.Kes
Nip. 19671103 199802 1 001


Co. Promotor


dr. Arif Santoso, Ph.D, Sp.P(K), PAPS
Nip. 19770715 200604 1 012

Ketua Program Studi S3
Ilmu Kedokteran,


dr. Agussalim Bukhari, M. Med, Ph.D, Sp.GK (K)
Nip. 19700821 199903 1 001

Dekan Fakultas Kedokteran
Universitas Hasanuddin,


Prof. dr. Budu, Ph.D, Sp.M(K), M.Med.Ed
Nip. 19661213 199503 1 009

ABSTRAK

RAHMINI SHABARIAH. *Perbandingan Kadar TLR2 dan TLR4 Serum pada Anak dengan TB Paru dan TB Ekstraparu setelah Vaksinasi Bacillus Calmette-Guerin (BCG)* (dibimbing oleh Mochammad Hatta, Irfan Idris, dan Arif Santoso).

Penelitian ini bertujuan membandingkan kadar TLR2 dan TLR4 serum pada pasien TB paru dan ekstraparu (TBEP) yang telah divaksinasi BCG. Jaringan yang terbentuk setelah vaksinasi Bacillus Calmette-Guerin (BCG) memengaruhi efektivitas perlindungan terhadap infeksi *Mycobacterium tuberculosis*. Vaksinasi BCG dapat mencegah anak menderita tuberkulosis (MTB). Vaksinasi BCG dapat mencegah anak menderita anak tubekulosis (TB), terutama yang parah seperti TB miliar dan TB meningitis. Respon imunitas innate melalui Toll-like receptors (TLR) 2 dan TLR4 adalah reseptor pengenalan mikroba di membran superfisial MTB.

Metode Penelitian digunakan adalah metode potong lintang yang melibatkan anak-anak di bawah usia 18 tahun yang sakit TP tetapi telah divaksinasi dengan BCG, baik rawat jalan maupun rawat inap di Bhakti Medicare dan Rumah Sakit Islam Jakarta, antara November 2018 dan Desember 2019, melalui *consecutive sampling*. Kadar TLR2 dan TLR4 serum diperiksa dengan ELISA dan dibandingkan dengan kelompok anak dengan TB Paru (TBP) dan TB Ekstrapulmoner (TBEP); lokasi infeksi selain paru-paru dengan mempertimbangkan adanya bekas luka BCG. Uji statistik menggunakan program SPSS meliputi uji t independent, uji ANOVA, uji normalitas dengan Kolmogorov-Smimov.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar TLR2 dan TLR4 serum lebih tinggi pada subjek TBEP dibandingkan dengan TBP tetapi tidak berbeda secara signifikan (TLR2 $p = 0,758$ dan TLR4 $p = 0,646$, masing-masing). Pasien TBEP dengan bekas luka BCG memiliki tingkat serum TLR2 dan TLR4 yang lebih tinggi secara bermakna dibandingkan dengan pasien TBEP tanpa bekas BCG ($p = 0,001$ dan $p = 0,004$, masing-masing) Pasien TBP dengan bekas luka BCG memiliki kadar TLR2 dan TLR4 serum yang lebih tinggi dibandingkan dengan pasien BP tanpa bekas BCG dengan perbedaan bermakna ($p = 0,000$ dan $p = 0,000$). Vaksinasi BCG dan infeksi MTB menstimulasi respons imun bawaan yang lebih besar pada mereka yang tidak memiliki bekas BCG.

Kata kunci: TLR2, TLR4, TB ekstrapulmonal, TB paru, BCG scar



ABSTRACT

RAHMINI SHABARIAH. *The Comparison Between TLR2 and TLR4 Serum Levels in Children with Pulmonary Tuberculosis and Pulmonary Extrapulmonary Tuberculosis Post Bacillus Calmette-Guérin (BCG) Vaccination* (supervised by Mochammad Hatta, Irfan Idris, and Arif Santoso)

The aim of this study is to compare the serum levels of TLR2 and TLR4 in patients with pulmonary tuberculosis and pulmonary extrapulmonary TB who have been vaccinated with BCG. The formation of a scar after Bacillus Calmette-Guérin (BCG) vaccination affects the effectiveness of protection against Mycobacterium tuberculosis (MTB) infection. vaccination can prevent children developing tuberculosis (TB), especially severe forms such as Miliary TB and meningitis TB. Innate immunity responses through Toll-like receptors (TLR)2 and TLR4 are microbial recognition receptors in superficial membrane of MTB.

This research was a case-control study included children less than 18 years of age who developed TB but they had been vaccinated with BCG both outpatients and inpatients at Bhakti Medicare and Jakarta Islamic Hospital from November 2018 to December 2019. The samples were selected consecutively. Serum TLR2 and TLR4 levels were examined with ELISA and compared in groups of children with pulmonary (TBP) and extrapulmonary TB (TBEP); locations of infection other than the lungs) by considering the presence of BCG scars. Statistical tests used SPSS program and included independent t test, ANOVA test, normality test with Kolmogorov-Smirnov.

The results shows that TLR 2 and TLR4 serum levels are higher in TBEP subjects than in TBP but they did not differ significantly (TLR2 $p = 0.758$ and TLR4 $p = 0.646$ respectively). TBEP patients with BCG scars significantly has a higher serum TLR2 and TLR4 levels than TBEP patients without BCG scars ($p = 0.001$ and $p = 0.004$ respectively). TBP patients with BCG scars has a higher TLR2 and TLR4 serum levels than TBP patients without BCG scars in which the difference is significant ($p = 0.000$ and $p = 0.000$ respectively). BCG vaccination and MTB infection stimulate an innate immune response that is greater in TbEP than in TBP, and the innate immune response through TLR2 and TLR4 is greater in the people with BCG scars than in the ones without BCG scars.

Keywords: TLR2, TLR4, extrapulmonary TB, pulmonary TB, BCG scar





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS HASANUDDIN
FAKULTAS KEDOKTERAN

PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KEDOKTERAN

Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10 Makassar 90245 Telp. (0411)586010, (0411)586297
EMAIL : s3kedokteranunhas@gmail.com

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Rahmini Shabariah
NIM : C013182001
Program Studi : Doktor Ilmu Kedokteran
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

ANALISIS EKSPRESI mRNA GEN TLR2 DAN mRNA GEN TLR4 SERTA KADAR PROTEIN TLR2 DAN TLR4 PADA TB ANAK YANG TELAH DIVAKSINASI BCG

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain, bahwa Disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 Oktober 2021

Yang menyatakan,



Rahmini Shabariah

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : **Rahmini Shabariah**

Nomor Pokok : **C013171019**

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini Benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 2021

Yang menyatakan

Rahmini Shabar

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR SINGKATAN	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	8
1.3. Tujuan Penelitian	8
1.3.1. Tujuan Umum	8
1.3.2. Tujuan Khusus	8
1.4. Pertanyaan penelitian.....	8
1.5. Manfaat Penelitian	9
1.6. Ruang Lingkup Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1. Epidemiologi	11
2.2. <i>Mycobacterium tuberculosis</i>	12
2.3. Patogenesis	14
2.3.1. Tuberkulosis Primer	14
2.3.2. Tuberkulosis Postprimer	17
2.4. Gejala Klinis	17
2.5. Komplikasi Penyakit	18
2.6. Keparahan Penyakit	19
2.7. Kontak TB	27
2.8. Status Gizi	30
2.9. Penegakan Diagnosis.....	40
2.9.1. Uji Tuberkulin	40
2.9.2. Radiologis.....	42
2.9.3. Mikrobiologis.....	43
2.9.4. IGRA (<i>Interferon-Gamma Release Assays</i>).....	44

2.9.5.	Sistem Skoring	46
2.10.	Tatalaksana Tuberkulosis Anak	48
2.10.	Vaksin Bacille Calmette-Guérin (BCG)	49
2.10.1.	Efektifitas Vaksin BCG	53
2.10.2.	Scar BCG	54
2.11.	Respons Imunitas Alamiyah terhadap Vaksinasi BCG	56
2.11.1.	Makrofag	56
2.11.2.	Sel Dendritik (DC)	58
2.11.3.	Neutrofil	60
2.12.	Respon Imun Adaptif	61
2.12.1.	T Limfosit	61
2.12.2.	Sel CD4 + dan CD8 +	62
2.13.	Toll Like Receptor (TLR)	64
2.13.1.	Spesifik Ligan TLR	68
2.13.2.	Kaskade Sinyal TLR	70
2.13.3.	Jenis-Jenis TLR	74
2.13.4.	TLR Signal Regulator/Koreseptor	83
2.13.5.	Toll Like Reseptor Signal Molecule	87
2.13.6.	Aktivasi Keseimbangan Jalur MYD88- dan TRIF	89
2.13.7.	Pengaturan Negatif Transkripsi Sinyal TLR	90
2.13.8.	Pengaturan Seluler oleh Nuclear Factor-KB	91
BAB III	KERANGKA TEORI	95
BAB IV	KERANGKA KONSEP	96
1.1.	Kerangka Konsep	96
1.2.	Hipotesis	96
BAB V	METODE PENELITIAN	97
5.1.	Desain Penelitian	97
5.2.	Populasi Target dan Populasi Terjangkau	97
5.3.	Tempat dan Waktu Penelitian	97
5.4.	Sampel Penelitian	97
5.4.1.	Tehnik Sampel	98
5.4.2.	Besar Sampel	98
5.5.	Kriteria Sampel	99
5.5.1.	Kriteria Inklusi	99

5.5.2.	Kriteria Eksklusi.....	99
5.6.	Tehnik Pengumpulan Data.....	100
5.7.	Persiapan Alat dan Bahan/Reagen	101
5.8.	Metoda Pemeriksaan	103
5.8.1.	Ekstraksi asam nukleat dengan metode Boom.....	103
5.8.2.	Ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 dengan metode RT PCR	105
5.8.3.	Pemeriksaan kadar Protein serum, TLR2 dan TLR4 dengan metode (ELISA).....	109
5.9.	Analisa Data	114
5.10.	Etika Penelitian	114
5.11.	Alur Penelitian	116
5.12.	Definisi Operasional.....	116
BAB VI HASIL PENELITIAN		121
BAB VII PEMBAHASAN		132
7.1.	Karakteristik berdasarkan usia.....	136
7.2.	Biomarker Berdasarkan Jenis Kelamin.....	140
7.3.	Biomarker Berdasarkan Status Gizi	147
7.5.	Biomarker Berdasarkan Scar	155
7.6.	Perbedaan nilai biomarker berdasarkan derajat klinis.....	159
7.7.	Perbedaan nilai biomarker berdasarkan Diagnosis TB	161
7.8.	Hasil Uji Korelasi antar biomarker	164
7.9.	Keterbatasan Penelitian.....	165
BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN		166
1.1.	Kesimpulan	166
1.2.	Saran.....	166
DAFTAR PUSTAKA.....		167

DAFTAR SINGKATAN

APC	: <i>Antigen Presenting Cell</i>
ADA	: <i>Adenosin deaminase</i>
ATR	: <i>All trans retinol</i>
BCG	: <i>Bacille Calmette-Guérin</i>
CNR	: <i>Case Notification Rate</i>
CCR	: <i>CC Chemokin Reseptor</i>
CCL	: <i>CC Chemokin Ligand</i>
CD	: <i>Cluster of differentiation</i>
CI	: <i>Confident Interval</i>
CLR	: <i>C-type lectin receptors</i>
CMI	: <i>Celluler mediated immunity (imunitas selulse spesifik)</i>
CR	: <i>Complement Receptor</i>
DAMPs	: <i>Damaged associated molecular patterns</i>
DC	: <i>Dendritic Cell</i>
DC-SIGN	: <i>Specific intercellular adhesion molecule- grabbing nonintegrin</i>
DLN	: <i>Draining Lmph Node</i>
DNA	: <i>Deoxybonucleic acid</i>
EDTA	: <i>Ethylen Diamine Tetra Acetat</i>
EM	: <i>Enviromental microbacterium</i>
EpCAM	: <i>Epithelial Cell Adhesion Molecule</i>
FG	: <i>Functional Genomics</i>
FNAB	: <i>Fine Nedle Aspiration Biopsy</i>
HIV	: <i>Human Immunodeficiency Virus</i>
IC	: <i>Immune Complexes</i>
IFN	: <i>Interferon</i>
IKK-1	: <i>Inducible Ikb-kinase</i>
IGRA	: <i>Interferon Gamma Release A</i>
IMT	: <i>Indeks mass tubuh</i>
IL	: <i>Interleukin</i>
IGRA	: <i>Interferon gamma release assays</i>
IRAK	: <i>Interleukin 1 Receptors associated kinase</i>
IRF	: <i>Interferon Regulatory Factor</i>
KPS	: <i>Karnofsky Performance Score</i>
LM	: <i>Lipomannan</i>
LRR	: <i>Leucyn Rich Receptor</i>
LTA	: <i>Lipoteichoic acid</i>
MAPKs.	: <i>Mitogen activated protein kinase</i>
MDGs	: <i>Millenium Development Goals</i>
ManLam	: <i>Mannosa lipoarabinomannam</i>
MHC	: <i>Major Histocompatibility Complex</i>
MINCLE	: <i>Macrophage Inducible C-Type Lectin</i>
MTB	: <i>Mycobacterium Tuberculosis</i>
MTP	: <i>Microsomal triglyceride transfer protein</i>

MUAC	: <i>Mid upper arm circumference</i>
MMR	: <i>Mortality risk ratio</i>
MPI	: <i>Mannosyl-phosphatidyl-myo-inositol</i>
My88	: <i>Myeloid differentiation primary response gene 88</i>
NF	: <i>Nuclear Factor</i>
NK	: <i>Natural Killer</i>
NOD	: <i>Nucleotide binding and oligomerization domain</i>
NLR	: <i>NOD like Receptors</i>
OR	: <i>Odds Ratio</i>
PAMPs	: <i>Pathogen-associated molecular patterns</i>
PILAM	: <i>phosphor myo inositol caps</i>
PPD	: <i>Purified Protein Derivative</i>
PHA.	: <i>Phytohaemagglutinin</i>
PRRs	: <i>Pattern recognition receptors</i>
PCR	: <i>Polymerase Chain Reaction</i>
PIM	: <i>Phosphatidil myositinotoksin</i>
RLRs	: <i>RIG I like receptors</i>
RT PCR	: <i>Real Time Polymerasi Chain Reaction</i>
RNA	: <i>Ribonucleic acid</i>
ROC	: <i>Receifing operating characteristic</i>
TBK	: <i>TANK-binding kinase 1</i>
TB	: <i>Tuberkulosis</i>
TBP	: <i>Tuberkulosis paru</i>
TBEP	: <i>Tuberkulosis ekstraparu</i>
TCM	: <i>Tes cepat molekuler</i>
TDM	: <i>trehalosa 6,6"-dimycolate</i>
Th	: <i>T helper</i>
TIR	: <i>Trained Immunity and Tolerance</i>
TNF	: <i>Tumor necrosis factor</i>
TLR	: <i>Toll Like Reseptor</i>
TST	: <i>Tuberculin Skin Test</i>
UPEC	: <i>Uropathogenic Escherichia colli</i>
VDR	: <i>Vitamin D receptors</i>
WHO	: <i>World Health Organization</i>

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur dinding sel Mycobacterium tuberculosis	14
Gambar 2.2 Tiga kondisi setelah terpapar MTB.....	16
Gambar 2.3 Patogenesis Tuberkulosis	26
Gambar 2.4 Faktor yang berhubungan dengan reaktivasi infeksi <i>MTB</i> ..	33
Gambar 2.5 Peranan genetika dalam kerentanan TB.....	35
Gambar 2.6 Dasar Tuberkulin Test dan IGRA.	45
Gambar 2.7 Peran TLR pada Imunitas bawaan.....	62
Gambar 2.8 Respon sel imun adaptif terhadap vaksinasi BCG	64
Gambar 2.9 Struktur protein Toll-like receptor (TLR)	65
Gambar 2.10 Struktur molekul TLR	67
Gambar 2.11 Toll-like receptor (TLR) pola ekspresi leukosit dan PAMPs	68
Gambar 2.12 Pensinyalan TLR permukaan sel dalam cDC, makrofag, dan MEF transmembran	72
Gambar 2.13 Pensinyalan TLR intraseluler dan perpindahan pDC	74
Gambar 2.14 Pensinyalan TLR2.....	78
Gambar 2.15 Presentation of ligand (LPS) to TLR4 through the coordinated actions of serum LBP, membrane bound CD14 and MD2....	84
Gambar 2.16 Mengaktifkan jalur faktor nuklir B (NF- κ B).....	93
Gambar 3.1 Kerangka Teori	95
Gambar 4.1 Kerangka Konsep.....	96
Gambar 5.1 Grafik amplifikasi real time PCR	109
Gambar 5.2 Prinsip ELISA Sandwich	110
Gambar 5.3 Alur Penelitian	116
Gambar 7.1 Risiko Penyakit Paru dan Penyakit Menular	139
Gambar 7.2 Perbedaan respon imunitas pada laki-laki dan perempuan	143
Gambar 7.3 Perbedaan respon imunitas bawaan dan adaptif berdasarkan perbedaan jenis kelamin	147

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tuberkulosis Skore	20
Tabel 2.2 Skala Penampilan menurut Karnovsky	21
Tabel 2.3 Mikronutrien yang penting untuk kekebalan melawan MTB	38
Tabel 2.4 Penentuan status gizi menurut kriteria Waterlow, WHO 2006, dan CDC 2000	39
Tabel 2.5 Sistem Skoring Diagnosis Tuberkulosis	47
Tabel 2.6 Obat Antituberculosis yang biasa dipakai dan dosisnya	48
Tabel 2.7 Macam-macam Strain Vaksin BCG dan Negara Pembuat.....	50
Tabel 2.8 PRRs, Lokalisasi dan Ligandnya	70
Tabel 2.9 Berbagai Ligan, Asal Ligan, TLR2 dan TLR4, Pengantar Ligannya	83
Tabel 5.1 Primers for real-time RT-PCR	105
Tabel 6.1 Karakteristik Subjek Penelitian.....	121
Table 6.2 Nilai Biomarker yang Diperiksa	122
Tabel 6.3 Karakteristik Subjek berdasarkan Scar BCG	123
Tabel 6.4 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Jenis Kelamin	123
Tabel 6.5 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Kelompok Usia	124
Tabel 6.6 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Status Gizi	125
Tabel 6.7 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Riwayat Kontak TB	125
Tabel 6.8 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Temuan Scar BCG	126
Tabel 6.9 Faktor yang berhubungan dengan Derajat Klinis	127
Tabel 6.10 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Derajat Klinis	128
Tabel 6.11 Karakteristik Subjek Berdasarkan Diagnosis TB	129
Tabel 6.12 Perbedaan Nilai Biomarker berdasarkan Diagnosis TB	130
Tabel 6.13 Hasil Uji Korelasi antara Biomarker.....	131

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tuberkulosis (TB) merupakan suatu penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) dan dapat menyerang berbagai organ terutama paru-paru. Hingga saat ini, Tuberkulosis tercatat sebagai salah satu masalah kesehatan dunia, diperkirakan pada tahun 2019 terdapat 10 juta yang mulai menurun pada tahun terakhir. Kematian akibat TB diperkirakan 1,2 juta, dan didapatkan kematian sebesar 208.000 pada penderita TB dengan HIV positif. Delapan negara dengan jumlah penderita TB terbanyak dan menyumbang 2/3 dari total kasus TB dunia India 26% Indonesia 8,5% China 8,4% Philipina 6,0% Pakistan 5,7% Nigeria 4,4%, Bangladesh 3,6% dan South Africa 3,6%. Penderita laki-laki berusia diatas 15 tahun menyumbang 56% dan wanita 32% dengan 12% pada anak dibawah 15 tahun (WHO, 2020).

Case Notification Rate adalah jumlah semua kasus tuberkulosis yang diobati dan dilaporkan di antara 100.000 penduduk yang ada di suatu wilayah tertentu. Angka notifikasi semua kasus tuberkulosis per 100.000 penduduk dari tahun 2009-2019 secara nasional memperlihatkan peningkatan CNR. CNR semua kasus tuberkulosis menurut provinsi tahun 2019 bervariasi, kasus paling tinggi berada di DKI Jakarta 393 kasus dan paling rendah di Bali 97 kasus, sedangkan untuk provinsi Jawa Barat sebanyak 249 kasus per 100.000 penduduk (Kemenkes RI, 2020).

Mayoritas anak tertular TB dari pasien TB dewasa, sehingga dalam penanggulangan TB anak, penting untuk mengerti gambaran epidemiologi TB pada dewasa. Infeksi TB pada anak dan pasien TB anak terjadi akibat kontak dengan orang dewasa sakit TB aktif. Sulitnya konfirmasi diagnosis TB pada anak mengakibatkan penanganan TB anak terabaikan (Kartasmita, 2009).

Vaksin *Bacille Calmette-Guérin* (BCG) telah ada selama 80 tahun, merupakan salah satu vaksin yang paling banyak digunakan saat ini, cakupan imunisasinya sebesar > 80% pada bayi baru lahir dan bayi di negara-negara yang merupakan bagian dari program imunisasi nasional. Vaksin BCG memiliki efek perlindungan terhadap penyakit TB dengan gejala berat seperti TB Milier dan meningitis TB, namun hal ini tidak dapat mencegah infeksi primer maupun mencegah reaktivasi infeksi paru laten, dengan sumber utama penyebaran *Bacillary* di masyarakat. Dengan vaksinasi BCG maka transmisi *Mycobacterium Tuberculosis* dibatasi (WHO, 2020).

Penelitian metanalisis melaporkan efektivitas proteksi vaksin BCG terhadap tuberkulosis paru utamanya terhadap tuberkulosis milier dan tuberkulosis meningeal bervariasi antara 0-80%. Efektivitas ini bergantung dari ada sensitisasi awal oleh mikobakterium lingkungan dan jarak lokasi dari lintang khatulistiwa (Mangtani et al., 2014).

Penelitian retrospektif dari 3 strain vaksin didapatkan efektif proteksi vaksin >70% terhadap meningitis TB namun berbeda presentasi

efektifitasnya untuk tuberkulosis lainnya (Favorov et al., 2012). Irma tahun 2011 dan Rosandali 2016 mendapatkan kasus TB paru lebih sedikit terjadi pada anak dengan scar BCG , dibandingkan pada anak yang tidak memiliki scar BCG (Kusuma, 2011; Rosandali et al., 2016).

Sebuah literatur review melaporkan jaringan parut yang terbentuk paska vaksinasi berkisar antara 52% hingga 93%, timbulnya jaringan parut BCG juga tergantung strain BCG, rute injeksi intradermal, ukuran wheal injeksi, dan vaksin serta zat gizi mikro yang diberikan bersama, rasio tingkat kematian menurun pada yang divaksinasi, efek bekas luka BCG tidak terkait dengan prevalensi bekas luka pada dua tahun pertama dan pada anak yang divaksinasi BCG pada periode neonatal (Benn et al., 2020)

BCG memiliki efek menguntungkan nonspesifik pada kelangsungan hidup anak, yaitu pada anak dengan berat badan lahir rendah (BBLR) yang divaksin BCG saat lahir (BCG dini) pada usia 3 hari dibandingkan yang divaksin hingga usia setelah 4 minggu (BCG ditunda). Kematian neonatus berkurang sebesar 17% secara signifikan, kematian terutama disebabkan oleh kasus sepsis neonatorum, infeksi saluran pernapasan, dan demam (Aaby et al., 2011). Vaksin BCG menurunkan angka kematian anak usia 28 hari hingga 3 tahun , yang terpapar maupun yang tidak terpapar penderita TB dewasa , selain keuntungan terhindar dari infeksi non spesifik lainnya (P. Roy et al., 2019; Thysen et al., 2020).

Penelitian kohort hingga usia 4 tahun terhadap vaksin BCG dan menilai kekebalan seluler T helper1, dengan hasil bahwa BCG terbukti menginduksi

respons tipe Th1 dan Th2 terhadap *Purified Protein Derivative* (PPD) pada usia sekitar 5 bulan setelah vaksinasi, namun sementara respons Th1 dipertahankan, respons Th2 menurun seiring waktu. Dilaporkan bahwa ukuran parut BCG berkorelasi kuat dengan respon Th2 terhadap PPD pada usia 5 bulan. Dilaporkan tidak ada efek dari vaksinasi BCG terhadap produksi IL-10 atau TNF- α awal bagian dari respon imun bawaan, namun ada perubahan dalam respons imun adaptif umum terhadap phytohaemagglutinin (PHA). Pada individu yang belum terpapar *environmental microbacterium* (EM), BCG akan memberikan perlindungan yang signifikan. Dilaporkan juga vaksin dari BCG jika diberikan sebelum infeksi dini tuberkulosis akan memberikan perlindungan yang lebih baik pada penduduk yang dekat dengan ekuator (Djuardi et al., 2010)

Respon imunitas alamiah akan memulai respon bukan hanya terhadap kuman yang masuk namun juga terhadap sel yang rusak, dimulai dengan pengenalan oleh reseptor pola pengenalan kuman (*Patern Recognition Receptors / PRRs*) yang diekspresikan pada sel-sel imun seperti makrofag, neutrofil, sel dendritik, sel Natural Killer (NK) , sel limfosit T, sel limfosit B, sel non imun seperti sel epitel, sel endotel, dan sel fibroblast. Reseptor ini diekspresikan baik di permukaan membrane sel maupun di dalam kompartemen seluler (endosome) (Abbas et al., 2015; Moliva et al., 2017).

Reseptor-pengenalan kuman tidak hanya berikatan dengan ligannya yang membentuk dinding sel kuman yang dikenal dengan PAMPs (*pathogen-associated molecular patterns*) namun juga akan berikatan

dengan ligannya yang ada pada sel yang rusak dikenal dengan DAMPs (*damaged associated molecular patterns*) untuk melindungi tubuh melalui reaksi peradangan agar terjadi eliminasi kuman, perbaikan jaringan tubuh dan pematangan sel dendritik melalui ikatan reseptor yang dikenal dengan *Toll Like Receptors* (TLR) untuk selanjutnya memulai respon imunadaptif (Abbas et al., 2015; C. H. Liu et al., 2017; Moliva et al., 2017).

Reseptor seperti Toll-like (TLR) yang terikat membran memicu respons imun bawaan setelah pengenalan berbagai macam senyawa turunan patogen. Reseptor berbagi kerangka struktural umum dalam domain pengikatan ligan ekstraseluler mereka, semua domain ini mengadopsi struktur berbentuk tapal kuda yang dibangun dari motif berulang yang kaya leusin dikenal dengan *leusin-rich repeat* (LRR). Biasanya, pada pengikatan ligan, dua domain ekstraseluler membentuk dimer berbentuk "m" yang mengapit molekul ligan yang membawa domain transmembran dan sitoplasma dalam jarak dekat dan memicu kaskade pensinyalan hilir (Abbas et al., 2015; Kawasaki & Kawai, 2014).

TLR adalah reseptor membran integral tipe I, masing-masing dengan domain pengenalan ligan terminal-N, heliks transmembran tunggal, dan domain sinyal sitoplasma terminal-C. (Botos, 2011) Domain pensinyalan TLR dikenal sebagai domain Toll IL-1 Receptor (TIR) yang bertanggung jawab terhadap transduksi sinyal, berikatan dengan berbagai molekul adaptor salah satunya myeloid differentiation primary response gene (My-88) dan mengaktifasi *nuclear factor- κ B* (NF- κ B), *interferon regulatory*

factors (IRFs) dan *mitogen-activated protein kinase* (MAPKs) untuk menginduksi gen sitokin proinflamasi untuk selanjutnya mengaktifkan faktor transkripsi yang merangsang ekspresi gen yang menyandi sitokin, kemokin, enzim serta protein lain yang terlibat dalam fungsi antimikrobal dari fagosit yang teraktivasi dan sel lainnya (Kawasaki & Kawai, 2014; Moliva et al., 2017).

TLR yang terikat dengan ligannya akan menjadi aktif dan akan merekrut protein adaptor yaitu protein yang memediasi interaksi selanjutnya secara berurutan dengan protein-protein berikutnya dalam sitosol dari sel imun dan bertujuan untuk menyebarkan antigen-induced jalur transduksi sinyal. Protein adaptor kemudian bertanggung jawab untuk aktivasi selanjutnya secara berurutan dari protein-protein berikutnya, termasuk protein kinase seperti *interleukin-1 receptor-associated kinase* (IRAK) 1 dan IRAK4, *TANK-binding kinase 1* (TBK1) and *inducible I κ B-kinase* (IKK- β) yang selanjutnya memperkuat sinyal dan mengarah upregulasi atau downregulasi gen yang mengatur respon inflamasi dan lainnya seperti transkripsi (C. H. Liu et al., 2017)

Reseptor Toll Like (TLR) adalah salah satu dari berbagai reseptor pengenal kuman, yang terlibat dalam pengenalan kuman tuberculosis. Dari 10 TLR yang ditemukan pada manusia TLR2 dan TLR4 yang banyak terlibat dalam pengenalan MTB. TLR-2 akan mengenal ligannya yaitu beberapa glikolipid dan peptidoglikan yang membentuk dinding sel bakteri dan parasite: TLR-4 spesifik untuk LPS bakteri (endotoksin): sedangkan TLR-

3, TLR -7 dan TLR -8 spesifik untuk komponen asam nukleat virus (*single stranded* dan *double stranded* RNA), TLR-5 spesifik untuk protein *flagellar* bakteri yang disebut *unmethylated* CpG DNA, yang lebih banyak pada genom bakteri daripada DNA mamalia (Abbas et al., 2015; Moliva et al., 2017).

Jika ligan adalah bakteri, maka patogen difagositosis dan dicerna, antigennya dipresentasikan ke sel limfosit T (CD4+). Jika ligannya adalah virus, sel yang terinfeksi dapat mematikan sintesis proteinnya kemudian terjadi kematian sel terprogram (apoptosis). Sel imun yang telah mendeteksi virus juga melepaskan faktor antivirus seperti interferon (Kawasaki & Kawai, 2014; C. H. Liu et al., 2017). TLR2 dan TLR4 banyak terlibat dalam pengenalan terhadap mikobakterium tuberkulosis, selain TLR8 dan TLR9. TLR2 sangat penting untuk menginisiasi respon imunitas bawaan dengan mensekresi sitokin dan kemokin khususnya tumor nekrosis faktor- α (TNF- α), interleukin 1 (IL-1 β IL- 18 IL12 , nitrit oxide dan IFN γ). TLR2 efektif untuk menginduksi pembentukangranuloma untuk mengontrol infeksi kronik tuberkulosis. Sedangkan TLR4 penting untuk mengaktifasi fusi fagosome lysosome dengan meningkatkan respon Th1. Ligasi TLR2 dan TLR4 dalam makrofag meningkatkan produksi ROS (reaction oxygen specific) mitokondria sebagai bakterisidal dengan merekrut mitokondria ke fagosom (Kawasaki & Kawai, 2014; C. H. Liu et al., 2017).

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 sebagai bagian respon imun bawaan pada TB anak yang telah divaksin BCG?

1.3. Tujuan Penelitian

1.3.1. Tujuan Umum

Mengetahui hubungan respon imun bawaan dengan scar BCG dan derajat klinis pada TB anak yang telah divaksin BCG

1.3.2. Tujuan Khusus

1. Mengetahui adanya perbedaan ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak dengan Scar BCG dan tanpa scar BCG
2. Mengetahui adanya perbedaan ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak dengan derajat klinis berat dan tidak berat
3. Menentukan adanya korelasi ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak yang telah divaksin BCG

1.4. Pertanyaan penelitian

1. Apakah ada perbedaan ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak dengan Scar BCG dengan tanpa scar BCG

2. Apakah ada perbedaan ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak dengan derajat klinis berat dan tidak berat
3. Apakah ada korelasi ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 serta kadar protein TLR2 dan TLR4 pada TB anak yang telah divaksin BCG

1.5. Manfaat Penelitian

1.5.1. Aspek Pengembangan Ilmu

Memahami peran dan mengidentifikasi biomarker yang terlibat dalam respon imunitas bawaan pada TB anak yang telah divaksin BCG

1.5.2. Manfaat Praktis

Membantu klinisi pada tahap awal dalam menentukan derajat keparahan dengan menggunakan parameter kadar TLR2 dan TLR4 pada TB anak yang telah divaksin BCG

1.6. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian dilakukan dari pasien di Rumah Sakit Bhakti Medicare Sukabumi, Rumah Sakit Islam Jakarta Cempaka Putih Jakarta Pusat, dan Rumah Sakit Islam Jakarta Sukapura Jakarta Utara dilakukan oleh dokter spesialis anak melalui anamnesis, pemeriksaan fisik, diagnosis, pemeriksaan penunjang dan pengambilan sample darah. Untuk pemeriksaan ekspresi mRNA gen TLR2 dan mRNA gen TLR4 , kadar protein TLR2 dan TLR4 yang dilaksanakan di Laboratorium Biologi Molekuler dan Imunologi Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin,

Makassar. Penelitian direncanakan dimulai Maret 2019 hingga besar sampel tercukupi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Epidemiologi

Tuberkulosis (TB) adalah penyakit menular yang masih menjadi masalah global, penyebab salah satu dari 10 kematian teratas di dunia dan penyebab utama kematian dari agen infeksi tunggal (peringkat di atas HIV/AIDS). Secara global, diperkirakan 10,0 juta (kisaran, 8,9-11,0 juta) orang jatuh sakit dengan TB pada tahun 2019, jumlah yang menurun sangat lambat dalam beberapa tahun terakhir (WHO, Global Tuberculosis Report, 2020) Wilayah Asia Tenggara (South East of Asia) adalah rumah bagi 26% populasi dunia dengan beban kejadian TB sebesar 44%. Pada tahun 2019, diperkirakan 4,3 juta orang jatuh sakit TB dan diperkirakan 632.000 meninggal karena penyakit tersebut yang merupakan lebih dari setengah kematian TB global. Enam dari 30 negara dengan beban TB tinggi (dan TB-MDR) berada di Kawasan SEA: Bangladesh, Republik Rakyat Demokratik Korea, India, Indonesia, Myanmar, dan Thailand (WHO, 2020).

Distribusi global TB anak mencerminkan orang dewasa, salah satu faktor penularan pada anak adalah penderita TB latent, oleh sebab itu WHO mengupayakan meningkatkan skrining untuk menemukan penderita TB latent agar mendapat pengobatan preventif. Kematian akibat TB tertinggi terjadi di usia sangat muda (usia 0–4 tahun) dibandingkan dengan kelompok usia lainnya.(Thomas, 2017).

Pada tahun 2020 dilaporkan kasus tuberkulosis anak 32.930 per

344992 (9.5%) anak dari jumlah estimasi ditemukan kasus tuberkulosis dan pada tahun 2019 dilaporkan sebanyak 70.341 kasus, dengan jumlah kasus tuberkulosis pada balita 27/10.000 anak dan 2/10.000 pada anak usia 5-14 tahun. Kasus terbanyak adalah tuberkulosis di paru 89% dan tuberkulosis ekstraparu sebanyak 11% (Kemenkes RI, 2021).

Peningkatan jumlah kasus TB di berbagai tempat pada saat ini, diduga disebabkan oleh berbagai hal, yaitu (1) diagnosis tidak tepat, (2) pengobatan tidak adekuat, (3) program penanggulangan tidak dilaksanakan dengan tepat, (4) infeksi endemik HIV, (5) migrasi penduduk, (6) mengobati sendiri (*self treatment*), (7) meningkatnya kemiskinan, dan (8) pelayanan kesehatan yang kurang memadai (Kartasasmita, 2009).

Dalam perspektif epidemiologi yang melihat kejadian penyakit sebagai hasil interaksi antar tiga komponen pejamu (*host*), penyebab (*agent*), dan lingkungan (*environment*). Pada sisi pejamu, kerentanan terhadap infeksi *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) sangat dipengaruhi oleh daya tahan tubuh seseorang pada saat itu. Pengidap HIV AIDS atau orang dengan status gizi yang buruk lebih mudah untuk terinfeksi dan terjangkit TBC (Kemenkes RI, 2018).

2.2. *Mycobacterium tuberculosis*

Mycobacterium tuberculosis (MTB) berbentuk batang lurus atau sedikit melengkung, tidak berspora dan tidak berkapsul. Bakteri ini berukuran lebar 0,3-0,6 mm dan panjang 1-4 mm. Dinding *Mycobacterium tuberculosis* sangat kompleks, terdiri dari lapisan lemak cukup tinggi (60%).

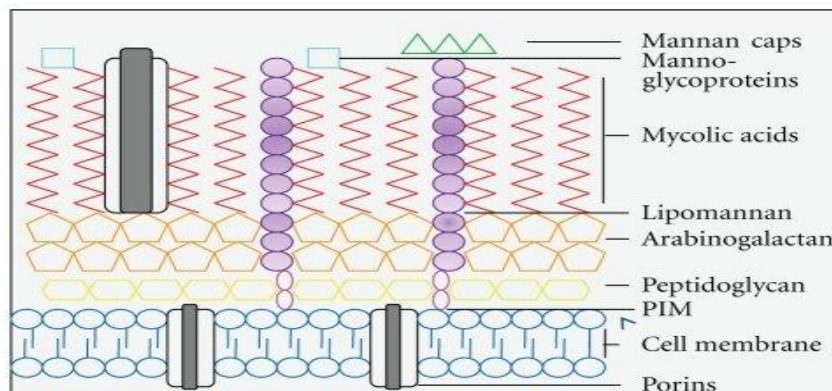
Penyusun utama dinding sel *M. tuberculosis* ialah asam mikolat merupakan asam lemak berantai panjang yang dihubungkan dengan arabinogalaktan oleh ikatan glikolipid dan peptidoglikan oleh jembatan fosfodiester. Unsur lain yang terdapat pada dinding sel bakteri adalah polisakarida (Perhimpunan Dokter Paru Indonesia, 2016).

MTB adalah patogen intraseluler yang tumbuh lambat yang dapat bertahan hidup di dalam makrofag inang, bakteri tahan asam karena dinding selnya terutama terdiri dari asam mikolat hidrofobik. Asam mikolat hidrofobik merupakan komponen spesifik dari dinding sel mikobakteri dan membentuk 50% dari berat keringnya, karena lapisan tebal asam mikolat ini, masuknya nutrisi terganggu, yang menyebabkan pertumbuhan lambat mikobakteri, tetapi juga meningkatkan resistensi seluler terhadap degradasi melalui enzim lisosom (Kleinnijenhuis et al., 2011; Perhimpunan Dokter Paru Indonesia, 2016).

Asam mikolat adalah lapisan tebal pada sebagian besar di dinding luar sel, sedangkan lapisan dalam sel sebagian besar terdiri dari arabinogalactan, phosphatidyl-myo-inositol mannosides (PIMs), dan peptidoglikan. Komponen dinding sel lain yang mengandung mannose termasuk mannose-capped lipoarabinomannan (Man-LAM), lipomannan (LM), dan manno-glikoprotein, mannan dan arabinomannan terdapat di permukaan dan membentuk kapsul luar bakteri ini. Man-LAM, LM, dan PIM semuanya berbagi domain mannosyl-phosphatidyl-myo-inositol (MPI) yang mungkin mengikat struktur ke dalam membran plasma (Kleinnijenhuis et al.,

2011). Man-LAM, salah satu mannan paling banyak di permukaan sel, merupakan faktor virulensi penting dari MTB. Man-LAM adalah lipoglikan heterogen dengan struktur tripartit karakteristik dari inti karbohidrat, jangkar MPI, dan berbagai motif mannose-capping.

Motif mannose-capped ini adalah karakteristik untuk semua mikobakteri patogen. Strain ini memiliki LM yang tidak tertutup atau memiliki phospho-myo-inositol caps (PILAM), yang diketahui menunjukkan efek imunostimulasi yang lebih kuat. PIM dapat dibagi menjadi dua kelompok tergantung pada kandungan mannose, yang menentukan efek imunogeniknya (Kleinnijenhuis et al., 2011).



Gambar 2.1 Struktur dinding sel *Mycobacterium tuberculosis*

Keterangan: Gambar ini menunjukkan representasi skema dari komponen utama dinding sel dan distribusinya. Lapisan dalam tersusun dari peptidoglikan yang terikat secara kovalen dengan lapisan arabinogalaktan. Membran luar mengandung asam mikolat, glikolipid seperti (manose-capped) lipomannan, dan mannoglikoprotei (Kleinnijenhuis et al., 2011).

2.3. Patogenesis

2.3.1. Tuberkulosis Primer

Timbulnya infeksi MTB pada anak-anak hampir selalu terjadi akibat

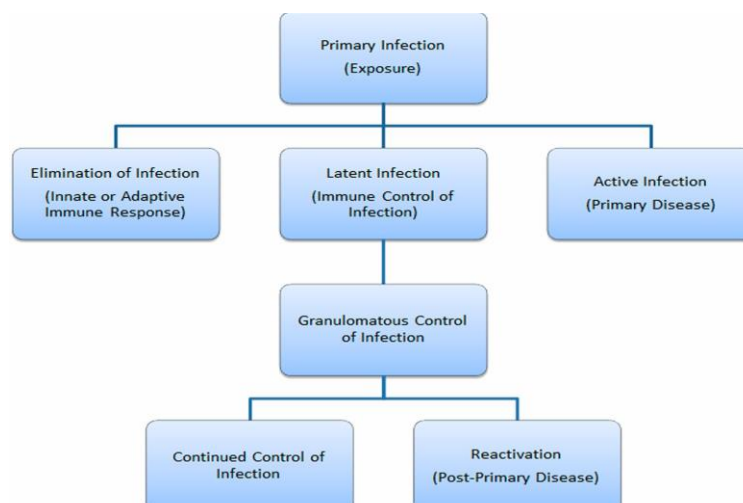
tertular dari orang dewasa, karena anak kecil umumnya memiliki penyakit paucybasiler dan nonkavitas, dan tidak mempunyai kemampuan untuk batuk efektif untuk mengeluarkan dahaknya. MTB akan terikat pada makrofag alveolar dan difagositosis ke dalam vakuola yang rapat. Fagosom intraseluler akan menyatu dengan lisosom membentuk fagolisosom, reaktif nitrogen dan oksigen untuk membatasi dan membunuh MTB (American Thoracic Society & CDC, 2000; Holmberg et al., 2019).

Kuman tuberkulosis yang masuk melalui saluran napas akan bersarang di jaringan paru sehingga akan terbentuk suatu sarang pneumoni, yang disebut sarang primer atau afek primer, selanjutnya terjadi peradangan saluran getah bening menuju hilus (limfangitis lokal). Peradangan tersebut diikuti oleh pembesaran kelenjar getah bening di hilus (limfadenitis regional). Afek primer bersama-sama dengan limfangitis regional dikenal sebagai kompleks primer. Berkembangnya infeksi primer pada bayi utamanya dalam 2 tahun pertama diperkirakan < 1 tahun 30-40%, 1-2 tahun 10-20%, termasuk 10%-20% menjadi penyakit diseminata. Kompleks primer ini akan mengalami salah satu kondisi sebagai berikut (Holmberg et al., 2019; Rahajoe et al., 2018).

1. Sembuh dengan tidak meninggalkan cacat sama sekali (*restitution ad integrum*)
2. Sembuh dengan meninggalkan sedikit bekas (antara lain sarang Ghon, garis fibrotik, sarang perkapuran di hilus)
3. Menyebar sistemik melalui :

- a. Menyebar dengan cara perkontinuitatum, yaitu kuman menyebar ke daerah atau jaringan sekitarnya.
- b. Penyebaran secara bronkogen, baik di paru bersangkutan maupun ke paru sebelahnya atau tertelan
- c. Penyebaran secara hematogen dan limfogen. Penyebaran ini berkaitan dengan daya tahan tubuh, jumlah dan virulensi kuman. Penyebaran ini juga dapat menimbulkan tuberkulosis pada alat tubuh lainnya, misalnya tulang, ginjal, anak ginjal, genitalia dan sebagainya. (American Thoracic Society & CDCP, 2000)

Bagi mereka yang berusia 2 hingga 10 tahun risiko perkembangan penyakit aktif turun menjadi kurang dari 5%. Puncak kedua perkembangan penyakit terjadi pada masa remaja, dimana risiko penyakit akan meningkat 10%-20% (Holmberg et al., 2019; WHO, 2016).



Gambar 2.2 Tiga kondisi setelah terpapar MTB

2.3.2. Tuberkulosis Postprimer

Tuberkulosis postprimer akan muncul bertahun-tahun setelah tuberkulosis primer, biasanya terjadi pada usia 15-40 tahun. Tuberkulosis postprimer dimulai dengan sarang dini, yang umumnya terletak di segmen apikal lobus superior maupun lobus inferior (Holmberg et al., 2019; Rahajoe et al., 2018):

1. Diresopsi kembali dan sembuh tanpa meninggalkan cacat
2. Sarang tersebut akan meluas dan segera terjadi proses penyembuhan dengan penyebukan jaringan fibrosis kemudian pengapuran dan akan sembuh dalam bentuk perkapuran.
3. Sarang pneumoni meluas, membentuk jaringan keju (jaringan kaseosa). Kavitas akan muncul jika jaringan keju keluar saat batuk. Kaviti awalnya berdinding tipis, kemudian dindingnya akan menjadi tebal (kaviti sklerotik). Kaviti tersebut akan menjadi:
 - a. Meluas kembali dan menimbulkan sarang pneumoni baru.
 - b. memadat dan membungkus diri (enkapsulasi), dan disebut tuberkuloma dapat mengapur dan menyembuh atau aktif kembali.
 - c. Bersih dan menyembuh yang disebut *open healed cavity*, i yang menyembuh dengan membungkus diri dan akhirnya mengecil sehingga kelihatan seperti bintang (*stellate shaped*)

2.4. Gejala Klinis

Seorang anak harus dicurigai menderita tuberkulosis jika (Rahajoe NN, 2013) (American Thoracic Society, 1999)

1. Mempunyai riwayat kontak erat dengan TB dewasa BTA positif
2. Terdapat reaksi kemerahan cepat setelah penyuntikan BCG
3. Terdapat gejala umum TBC : berat badan turun tanpa sebab yang jelas nafsu makan tidak ada (anorexia) dengan gagal tumbuh , demam lama >2 minggu dan atau berulang tanpa sebab yang jelas, batuk lama > 3 minggu dan sebab lain telah disingkirkan dan pembesaran kelenjar limfe superfisialis.
4. Gejala TB paru batuk dengan atau tanpa dahak, hemoptysis, sesak, nyeri dada, dengan gambaran kelainan pada paru
5. Gejala TB ekstraparu seperti gejala spesifik tergantung pada bagian tubuh mana yang terserang misalnya:
 - a. TBC usus diare berulang, nyeri perut dll
 - b. TBC Kulit/skrofuloderma
 - c. TBC tulang dan sendi: tulang punggung (spondilitis): gibbus, tulang panggul (koksitis)
 - d. TBC Otak dan Saraf : Meningitis dengan gejala iritabel kaku kuduk muntah-muntah dan kesadaran menurun
 - e. TBC mata : Konjungtivitis fliktenulari, Tuberkel koroid (hanya terlihat dengan funduskopi)

2.5. Komplikasi Penyakit

Tuberkulosis adalah penyakit sistemik yang dapat menimbulkan gejala pada semua organ. Komplikasi dini dengan mekanisme sebagai berikut (Kemenkes RI, 2016; Rahajoe et al., 2018):

1. **Efusi pleura, pleuritis, empyema:** akibat kerusakan pleura atau fokus masuk melalui kelenjar limfe, kemudian cairan melalui sel mesotelial masuk kedalam rongga pleura dan juga dapat masuk ke pembuluh limfe sekitar pleura.
2. **Obstruksi jalan nafas:** Komplikasi lanjut peradangan pada sel-sel otot jalan nafas yang kronis itu menyebabkan paralisis silia sehingga terjadi statis mukus dan adanya infeksi kuman. Erosi epitel, fibrosis, metaplasia sel skamosa serta penebalan lapisan mukosa sehingga terjadi obstruksi jalan nafas yang *irreversible (stenosis)*.

2.6. Keparahan Penyakit

Keparahan penyakit TB memiliki definisi beragam, penelitian di Rusia oleh Pantelev 2017 menilai keparahan penyakit dengan skoring yang berisi penilaian oleh klinisi, oleh ahli mikrobiologi dan oleh ahli radiologi dan bentuk TB sesuai pedoman yang ditetapkan. Klinisi menetapkan keparahan berdasarkan ada tidak gejala suhu tubuh, batuk, penurunan berat badan, dan keringat malam (Pantelev et al., 2017). Derajat keparahan penyakit pada pasien dapat diukur dengan menggunakan beberapa metode, antara lain skor Bandim TB. Skor Bandim TB adalah skor yang didasarkan pada enam tanda dan lima gejala yang ditunjukkan oleh pasien. Tingkat keparahan penyakit TB sebelumnya telah terbukti berkorelasi dengan jumlah bakteri yang diperoleh dari kultur positif dan respons pasien terhadap pengobatan (Rudolf, 2014).

Skor TB terdiri dari lima gejala (batuk, hemoptisis, dispnea, nyeri dada, dan keringat malam) dan enam tanda (konjungtiva inferior pucat, nadi 90/menit, temuan positif pada auskultasi paru, suhu 37,8⁰C, indeks massa tubuh [IMT]<18/<16,dan lingkar lengan atas [MUAC] <220 mm/< 200 mm. Setiap variabel dinilai satu poin, namun IMT dan MUAC dinilai satu poin jika <16/<200 mm; skor maksimum 13 yang terbagi 3 kelas keparahan adalah severity classification (SC) SC ITBscore 0-5; kategori ringan, SCII, TBscore 6-7, dan SCIII, TBscore > 8 dengan kategori sedang dan berat (Dewi et al., 2020; Rudolf, 2014).

Tabel 2.1 Tuberkulosis Skore

Tuberculosis score		A
Date:		Sex: F or M
Date of diagnosis:		Age:
Name:		
How was the diagnosis set:		
Sputum smear positive (SSP):		yes or no
Rtg thorax:		
Comments: (still SSP, treatment ect.)		
Parameters	Points assigned	Points
Self-reported		
Cough	1	
Haemoptysis	1	
Dyspnoea	1	
Chest pain	1	
Night sweating	1	
Objective		
Anaemic conjunctivae	1	
Tachycardia pulse > 90	1	
Positive finding at lung auscultation	1	
Axillary temperature > 37,0°	1	
BMI* < 18	1	
BMI < 16	1	
MUAC* < 220mm	1	
MUAC < 200 mm	1	
Total score		
* BMI = Body Mass Index, MUAC = Middle Upper Arm Circumference		

Penilaian keparahan yang sering digunakan lainnya adalah Karnofsky Performance Score (KPS), merupakan alat penilaian subjektif berdasarkan gangguan fungsional, yang terdiri dari skala 0 sampai 100% sesuai dengan kemampuan untuk melakukan aktivitas sehari-hari, untuk bekerja, kebutuhan akan bantuan, dan adanya gejala yang berhubungan dengan penyakit. Ini dapat digunakan untuk membandingkan efektivitas terapi yang berbeda dan untuk menilai prognosis pada masing-masing pasien. Semakin rendah skor Karnofsky, semakin buruk kelangsungan hidup untuk sebagian besar penyakit serius (Rudolf, 2014).

Tabel 2.2 Skala Penampilan menurut Karnovsky

Deskripsi	Skala (%)
Normal tidak ada keluhan	100
Dapat mengerjakan aktivitas normal, mempunyai keluhan minor atau tanda dari suatu penyakit	90
Dapat melakukan aktivitas normal dengan effort	80
Dapat melakukan/melayani dirinya sendiri, tidak dapat melakukan aktivitas normal atau kerja aktif	70
Ambulatory membutuhkan bantuan untuk melakukan atau melayani dirinya sendiri pada beberapa keadaan	60
Lebih sering membutuhkan bantuan dan perlu perawatan	50
Membutuhkan bantuan khusus dan disable	40
Severely disable, perlu perawatan RS tetapi tidak mengancam kematian	30
Sakit berat, perlu perawatan RS , memerlukan bantuan terapi aktif	20
Terancam kematian	10
Mati	0

Klasifikasi penyakit TB lainnya berdasarkan lokasi penyakit, yaitu tuberkulosis paru (TBP) dan tuberkulosis ekstraparu (TBEP), kebanyakan keparahan penyakit adalah TBEP. Tuberkulosis ekstrapulmoner (TBEP)

didefinisikan menurut kriteria klasifikasi WHO sebagai infeksi oleh MTB yang mempengaruhi jaringan dan organ di luar parenkim paru. Ini mewakili antara 20 dan 25% dari semua kasus TB (WHO, 2020).

Tuberkulosis ekstraparu (TBEP) hasil dari penyebaran hematogen dan limfatik basil MTB. Sebagai hasil dari penyebaran dan akibat pengembangan mekanisme imunitas yang diperantarai sel spesifik, di antaranya pembentukan anti-TNF alfa, IL12 dan interferon gamma, kekebalan protektif terhadap bakteri dikembangkan, dengan hasil pembentukan granuloma berkapsul yang mengandung basil hidup. Meskipun hal ini dapat terjadi kapan saja setelah infeksi primer, paling sering terjadi bertahun-tahun atau dekade kemudian, karena perubahan mekanisme respons imun yang bertanggung jawab seperti usia yang ekstrem (anak-anak atau orang tua), kondisi medis bersamaan atau perawatan yang memerlukan perubahan sel- kekebalan yang dimediasi. Perubahan kekebalan mekanisme yang terlibat dalam pembentukan granuloma menjadi predisposisi reaktivasi TB laten dan perkembangan infeksi TB aktif. (Rudolf, 2014)

Penentuan Tuberkulosis ekstrapulmoner (TBEP) biasanya terkendala dengan masalah diagnostik daripada tuberkulosis paru. Sebagian hal ini berkaitan dengan gejala yang kurang umum dan kurang dikenal oleh sebagian besar dokter. Selain itu, TBEP melibatkan tempat yang relatif tidak dapat diakses dan, karena sifat tempat yang terlibat, lebih sedikit basil dapat menyebabkan kerusakan yang jauh lebih besar. Kombinasi sejumlah kecil

basil dan situs yang tidak dapat diakses menyebabkan konfirmasi bakteriologis diagnosis menjadi lebih sulit, dan prosedur invasif sering diperlukan untuk menegakkan diagnosis (American Thoracic Society & CDCP, 2000; Kaba et al., 2019).

Faktor risiko yang berhubungan dengan TBEP terutama usia, jenis kelamin perempuan, infeksi HIV bersamaan dan komorbiditas seperti penyakit ginjal kronis, diabetes mellitus atau immunosupresi. Rerata usia pasien TBEP lebih tinggi dibandingkan dengan TB paru. Di antara pasien TBEP dengan kelainan di pleura atau meningeal adalah berusia lebih muda daripada mereka dengan kelainan di saluran limfatik, osteoartikuler, genitourinary dan gastrointestinal (American Thoracic Society & CDCP, 2000; Ramírez-Lapausa et al., 2015).

Gejala dan tanda dapat relatif kabur dan kadang-kadang terjadi pada rontgen dada normal dan pasien BTA-negatif, sehingga menghambat pertimbangan penyakit pada pendekatan awal. Namun demikian tuberkulosis paru selalu perlu disingkirkan dengan cara rontgen dada dan kultur sputum. Uji kulit tuberkulin (PPD) atau deteksi gamma interferon perlu dilakukan untuk menyingkirkan infeksi TB. Standar emas nya adalah kultur mikrobiologi, namun dibutuhkan waktu 2-6 minggu untuk siap dalam media kultur (American Thoracic Society & CDCP, 2000; Ramírez-Lapausa et al., 2015).

Metode tes cepat molekuler memungkinkan diagnosis cepat melalui sampel langsung dan dapat mendeteksi mutasi gen yang bertanggung

jawab atas resistensi antimikroba. Pada TBEP seperti TB pleura, meningeal, kemih, peritoneum dan perikardial, sensitivitas TCM akan berkisar antara 50% dan 70% dengan spesifisitas tinggi antara 90% dan 95%. Dilaporkan sensitivitas sekitar 80% dan spesifisitas 90% pada TB tulang dan kelenjar getah bening. Pedoman saat ini merekomendasikan teknik TCM ini sebagai metode koadjuvant untuk diagnosis TBEP. Hasil perlu ditafsirkan bersama-sama dengan hasil teknik lain dan tingkat kecurigaan klinis (Kaba et al., 2019; Ramírez-Lapausa et al., 2015).

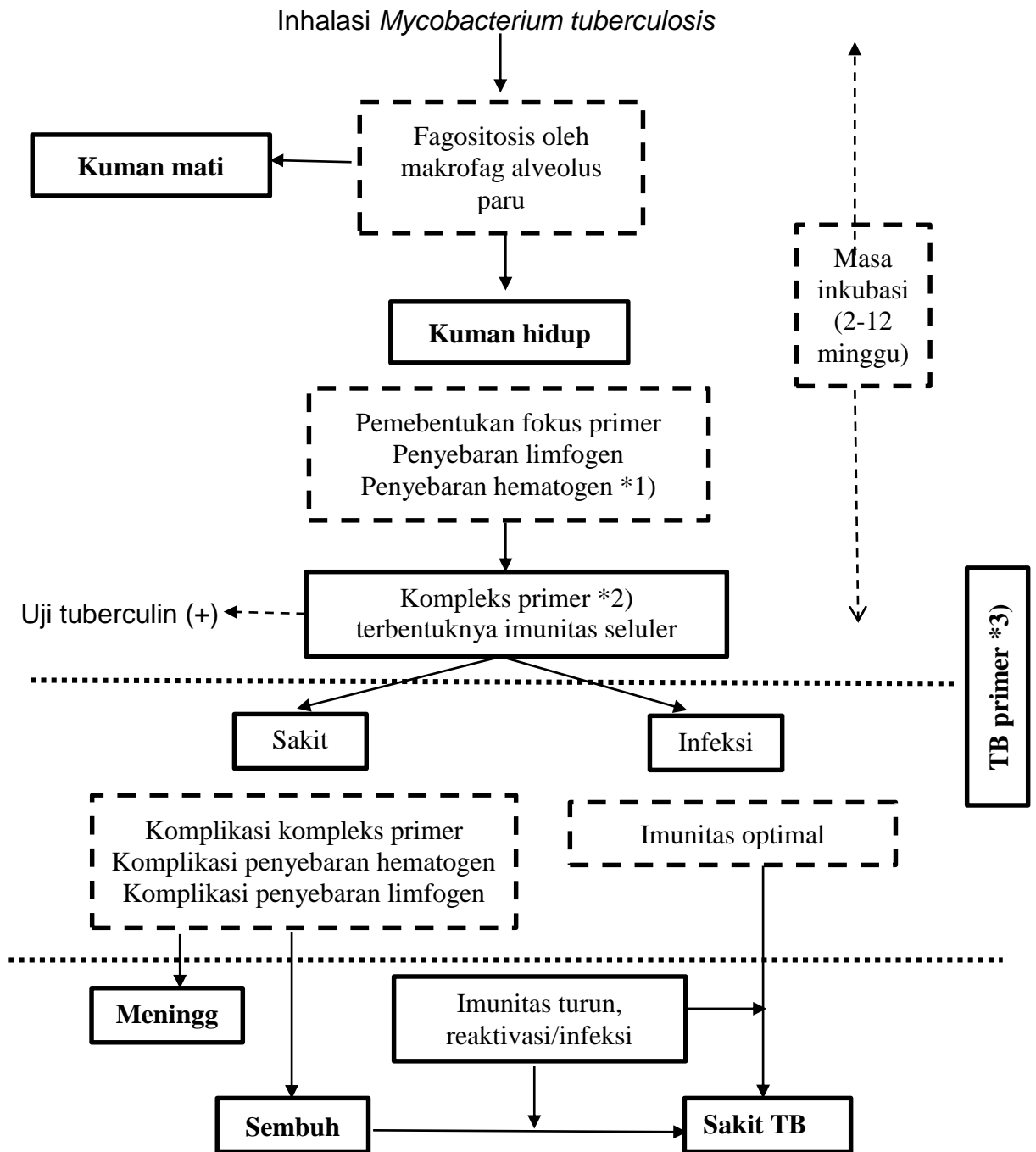
Penentuan enzim adenosin deaminase (ADA) memberikan informasi yang berguna pada TB ekstrapulmoner. Ini diproduksi oleh monosit dan makrofag yang terlibat dalam respon inflamasi membran serosa, dimana sensitivitas tinggi (75-80%) namun spesifisitasnya sangat bervariasi dan tergantung pada kejadian karena menurut usia dan patologi sebelumnya kita dapat memiliki hasil positif palsu (American Thoracic Society & CDCP, 2000; Ramírez-Lapausa et al., 2015).

Diagnosis pasti EPTB memerlukan sampel dari cairan dan/atau jaringan melalui fine needle aspiration biopsy (FNAB), untuk pemeriksaan apusan, kultur dan PCR, bahkan memerlukan biopsi terbuka pada jaringan yang terkena jika FNAB negatif. Studi histopatologi dari biopsi menunjukkan granuloma nekrotikans khas yang mengandung makrofag, limfosit dan sel raksasa Langhans. Nekrosis kaseosa kadang-kadang dapat ditemukan di bagian tengah granuloma. Kehadirannya memiliki spesifisitas tinggi dan

dapat membenarkan keputusan untuk memulai terapi antituberkulosis (American Thoracic Society & CDC, 2000; Ramírez-Lapausa et al., 2015).

Penelitian di Spanyol pada anak-anak <18 tahun yang didiagnosis didapatkan dari 526 kasus TB pediatrik menderita EPTB (17,7%). paling umum TB limfatik (34,5%). Kasus sumber tidak teridentifikasi pada sebagian besar kasus ekstrapulmoner berbeda dengan TB paru (28% vs 63,3%; $P < 0,001$). Indurasi TST lebih kecil pada kasus TBEP (<5 mm 22% vs 5%; $P < 0,001$), tetapi sensitivitas uji pelepasan interferon-gamma serupa (76,9% vs 79,4%). Anak-anak dengan TBEP menunjukkan tingkat konfirmasi bakteriologis yang lebih tinggi (66% vs. 49,4%; $P < 0,01$), dan insiden yang lebih tinggi dari TB yang resistan terhadap berbagai obat (8,2% vs. 1,6%; $P = 0,03$). Komplikasi terjadi pada 40,2% kasus ekstrapulmoner. TBEP dikaitkan dengan asal asing anak, gangguan kekebalan dan resistensi obat (García SB, 2016) Penelitian lain 128 kasus dimasukkan 42 kasus terjadi pada anak berusia < 5 tahun; 41 kasus antara 6-10 tahun dan 45 kasus > 10 tahun. PTB hadir di 75,0% kasus, dan EXPTB hadir di 25% kasus. Tidak ada perbedaan bermakna antara EXPTB dan PTB menurut distribusi kelompok umur ($p=0,201$). Tingkat pasien bebas dari gejala konstitusional secara signifikan lebih tinggi di EXPTB dibandingkan dengan PTB ($p=0,000$). TB masih menjadi masalah kesehatan masyarakat yang utama. EXPTB memiliki onset yang berbahaya dan diam tanpa gejala konstitusional, dan konfirmasi mikrobiologis dan sumbernya oleh orang dewasa tidak sering ditemukan. Selain itu, deteksi

sumber orang dewasa adalah wajib untuk mengendalikan penyakit TB pada anak-anak. (Devrim, 2014)



Gambar 2.3 Patogenesis Tuberkulosis
Sumber: (Kemenkes RI, 2016)

2.7. Kontak TB

Ada empat faktor yang menentukan kemungkinan penularan *M. tuberculosis*: (1) jumlah organisme yang dikeluarkan ke udara, (2) konsentrasi organisme di udara ditentukan oleh volume ruang dan ventilasinya, (3) lamanya waktu orang yang terpapar menghirup udara yang terkontaminasi, dan (4) kemungkinan status kekebalan individu yang terpapar. Kontak erat dalam satu rumah memungkinkan risiko penularan TB (American Thoracic Society & CDCP, 2000).

Dari sisi individu seorang anak dapat tertular tuberkulosis selain ditentukan oleh konsentrasi kuman yang terhirup, lama kuman terhirup, virulensi kuman, umur juga dipengaruhi oleh keadaan gen dari orang tersebut. Tidak semua kuman yang masuk ke dalam tubuh dapat menyebabkan sakit, hal ini tergantung dari kerentanan tubuh sebagai akibat interaksi beberapa faktor di dalam tubuh misalnya status gizi, imunisasi, kepadatan hunian dan gen individu tersebut (American Thoracic Society & CDCP, 2000; Holmberg et al., 2019; Kartasasmita, 2009; Rahajoe et al., 2018).

Laporan WHO faktor risiko utama kejadian tuberkulosis pada anak terjadi pada tingkat rumah tangga seperti kontak dengan sumber penularan serta kondisi malnutrisi yang berat. Anak yang terinfeksi kuman tuberkulosis sebagian besar tertular dari anggota keluarga, pengasuh ataupun tetangga. Seorang penderita tuberkulosis dewasa dapat menularkan pada 10-15 orang. Sekali batuk penderita dapat menghasilkan sekitar 3000 percikan

dahak (*droplet*) dan 90% penularan TB di masyarakat adalah karena sputum smear positif (Gebregers & Alemu, 2015; WHO, 2016).

Sumber penularan tuberkulosis pada anak rata-rata berasal dari batuk orang dewasa dengan sputum BTA positif. Saat orang dewasa batuk maka *droplet* yang dikeluarkan mengandung kuman yang bisa menginfeksi lingkungan sekitar. *Droplet* dengan ukuran yang lebih besar akan jatuh ke tanah, namun yang berukuran lebih kecil akan melayang-layang di udara (Fithriasari & Wahyuni, 2017; Jahiroh & Prihartono, 2017; WHO, 2016).

Anak yang kontak erat dengan penderita TB paru berisiko tinggi terinfeksi TB. Risiko infeksi meningkat dengan adanya kedekatan dan durasi kontak yang lama. Penelitian Asyary 2017 menemukan bahwa rumah sehat, terutama yang kamar tidurnya sehat dan lebih sedikit terpapar penderita TB dewasa, dipengaruhi oleh variabel perancu, melindungi anak dari TB meskipun terpapar TB dewasa di lingkungannya. Waktu hidup bersama yang lebih lama bukan merupakan faktor risiko anak tertular TB bila tinggal bersama pasien TB dewasa di rumah. Namun, risiko ini meningkat dengan seringnya pajanan di antara anak-anak dengan pasien TB dewasa di rumah (Al Asyary, 2017)

Penelitian dilakukan pada anak berusia dibawah 15 tahun yang kontak erat dengan penderita TB paru BTA positif .Dimana ibu atau orang tua sebagai kasus maka tidur sekasur dengan anak adalah faktor risiko infeksi TB pada anak. Tidak ada hubungan bermakna antara kasus dengan faktor jenis kelamin wanita, lama kontak > 9 jam/hari, tidur sekamar pada malam

hari, keintiman aktifitas menyusui, menyuapi, serta makan bersama 3x sehari dengan infeksi TB pada anak yang kontak erat (Bancin, 2014).

Penelitian di Semarang menunjukkan anak yang mempunyai riwayat kontak BTA+ tetapi anak tersebut tidak menderita TB, dikarenakan orang dewasa yang terkena BTA+ menjaga kontak dengan anak seperti tidak tidur sekamar, tidak makan satu piring atau menyuapi anak, dan menggunakan masker saat sakit serta rutin mengkonsumsi OAT sehingga meminimalisir penularan TB (Purnamaningsih et al., 2018).

Secara umum, prevalensi infeksi TB pada kontak anak di bawah usia 15 tahun lebih tinggi (24,4-69,2%) dibandingkan dengan penyakit TB aktif (3,3-5,5%). Penyakit TB lebih banyak ditemukan pada anak berusia kurang dari 5 tahun, sedangkan infeksi TB lebih banyak ditemukan pada anak yang lebih tua. Hasil investigasi kontak rumah tangga di seluruh studi yang memenuhi syarat tidak dapat dibandingkan secara langsung karena heterogenitas, terutama dalam definisi hasil (penyakit TB atau infeksi TB). Infeksi TB dari penelitian yang menggunakan potongan 10 mm hasil TST untuk infeksi TB di antara kasus indeks sputum BTA-positif. Hal ini menunjukkan bahwa infeksi TB lebih sering terjadi pada anak berusia lebih dari 5 tahun. Prevalensi infeksi pada semua anak berkisar antara 24,4% hingga 38,8%, dengan hasil tertimbang 31% (Triasih et al., 2012).

Kontak Rumah Tangga (Household Contacts) berkontribusi terhadap kasus TB pada anak. Contact Investigation (CI) dan Preventive Therapy (PT) menjadi strategi yang berhasil untuk mencegah penularan TB pada

anak yang diberikan tidak hanya oleh Tenaga Kesehatan (Health Care) tetapi juga masyarakat yang peduli dengan pendekatan berbasis masyarakat dalam rangka mendorong anggota keluarga TB terpengaruh (Rahmawati et al., 2020). Kinerja program dalam skrining kontak di Afghanistan tinggi, sebesar 81%, dan hasil TB juga tinggi-hampir 10 kali lebih tinggi daripada angka kejadian TB nasional. Tingkat inisiasi dan penyelesaian IPT (isoniazid preventive therapy) juga tinggi dibandingkan dengan banyak negara lain tetapi perlu perbaikan lebih lanjut, terutama untuk penyelesaian (Sayedi et al., 2020). Sebuah studi cross-sectional prospektif dilakukan pada pengasuh, dari anak dengan TB aktif yang menerima pengobatan. Dari berbagai faktor yang dinilai usia < 2 tahun, pendapatan minimum, rumah penampungan, kontak TB > 18 jam dengan penderita TB, kepadatan rumah, kontak perokok, air minum tanpa direbus dan analisis multivariat mengungkapkan yang bermakna HHC dengan TB (OR = 15.288, 95% CI: 5.378–43.457), HHC dengan merokok (OR = 7.094, 95% CI: 2.128–23.648), dan kontak > 18 jam dengan individu TB (OR = 4.681 , 95% CI: 1,198–18,294) sebagai faktor risiko TB yang signifikan secara statistik di antara HHC. Dengan sistem skrining kontak TB saat ini, hanya 9,3% dari semua HHC yang diskruining masih rendah (Laghari et al., 2019).

2.8. Status Gizi

Beberapa penelitian di Indonesia pada tuberkulosis anak menunjukkan bahwa kejadian tuberkulosis lebih sering ditemukan pada

anak-anak dengan gizi kurang (Husnah, 2017; Nasution et al., 2021; Putra & Amelia, 2013; Siregar et al., 2018). Anak yang mengalami malnutrisi lebih rentan dalam menghadapi infeksi tuberkulosis dibandingkan dengan anak sehat. Kejadian TB paru berhubungan dengan status gizi anak, wilayah tempat tinggal, status pekerjaan ayah (Bourke et al., 2016; Jaganath & Mupere, 2012; Widyastuti et al., 2021).

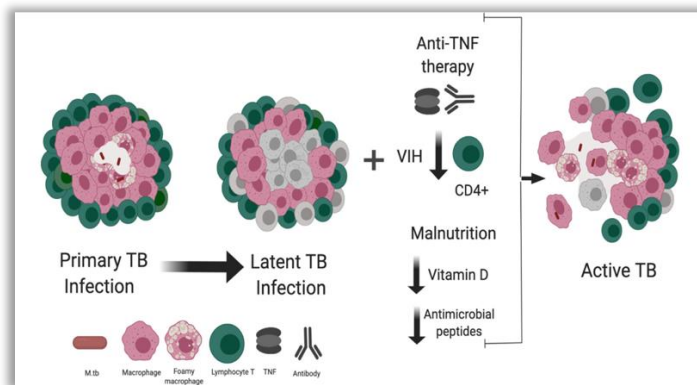
Pada bayi baru lahir penting untuk disadari bahwa imunitas yang diperantarai sel tidak lengkap (fungsi sel penyaji antigen, neutrophil dan TLR serta komplemen darah rendah) sehingga sebagian besar bergantung pada imunitas bawaan dan antibodi ibu. (Jaganath, 2012) Usia balita adalah usia yang berisiko terjadinya masalah gizi, khususnya 1000 tahun pertama kehidupan. Penelitian di Indonesia dan di Kongo ditemukan bahwa angka kejadian TB kebanyakan terjadi pada usia balita, dan masalah gizi kurang dan gizi buruk kebanyakan terjadi pada usia tersebut. (Dieu, 2017) (Apsari PIB, 2016)

Diketahui ada 4 jalur dukungan yang menjadi dasar pemahaman kami tentang interaksi antara tuberkulosis pediatrik dan status gizi, yaitu, (1) polimorfisme gen yang menghubungkan metabolisme vitamin dengan risiko tuberkulosis, (2) studi yang menyelidiki perkembangan kekebalan di antara anak-anak yang kekurangan gizi. (3) hubungan antara malnutrisi dan infeksi saluran pernapasan pada anak-anak, dan (4) hubungan antara status gizi dan tuberkulosis pada hewan model dan anak-anak. Bukti menunjukkan bahwa malnutrisi mempengaruhi ekspresi genetik dan fungsi kekebalan

serta respon inflamasi yang akan memperburuk keadaan gizi karena terjadi katabolisme otot yang disebabkan oleh gejala gastrointestinal yang disebabkan oleh protein fase akut, seperti kadar TNF yang tinggi yang menyebabkan asupan berkurang (Jaganath & Mupere, 2012).

Gejala penyakit menjadi aktif tergantung pada sejumlah faktor seperti infektivitas kasus sumber, kedekatan dan durasi kontak, kerentanan pejamu dan berbagai faktor sosial, perilaku, ekonomi, dan faktor lingkungan seperti kurang gizi, kepadatan penduduk, polusi udara dalam ruangan, merokok, dan kecanduan alkohol (Chandrasekaran et al., 2017; Tellez-Navarrete et al., 2021).

Fagositosis dan kaskade komplemen adalah dua mekanisme utama yang terlibat untuk eliminasi organisme patogen dari tubuh. Sistem komplemen dengan sendirinya dapat menghancurkan mikroorganisme atau reseptor komplemen yang ada pada permukaan fagosit dapat memediasi penangkapan patogen. Pada malnutrisi, kedua fungsi terganggu-faktor pelengkap opsonik C3 serta kemampuan fagositosis untuk menelan dan membunuh patogen juga sangat berkurang. Fungsi berbagai jenis sel penyaji antigen seperti limfosit B, makrofag, sel dendritik (DC), dan sel Kupffer menurun pada malnutrisi (Chandrasekaran et al., 2017). Respon imunitas yang baik akan mempertahankan granuloma sekuat mungkin agar tidak rusak hingga menyebabkan TB latent berubah menjadi TB aktif (Gambar. 2.4)



Gambar 2.4 Faktor yang berhubungan dengan reaktivasi infeksi *M. Tuberculosis*

(A) Pada infeksi *M.tb* primer, respon imun yang efisien diaktifkan, granuloma dibentuk untuk pengendalian infeksi, dan keadaan TB laten sebagai akibatnya dihasilkan. (B) Adanya faktor-faktor, seperti terapi anti-TNF, infeksi HIV, dan malnutrisi, mempengaruhi respon imun yang membatasi pertumbuhan bakteri. (C) Perubahan respon imun mengganggu granuloma dan mendukung penyebaran basil *M.tb*. Gambar dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak BioRender.

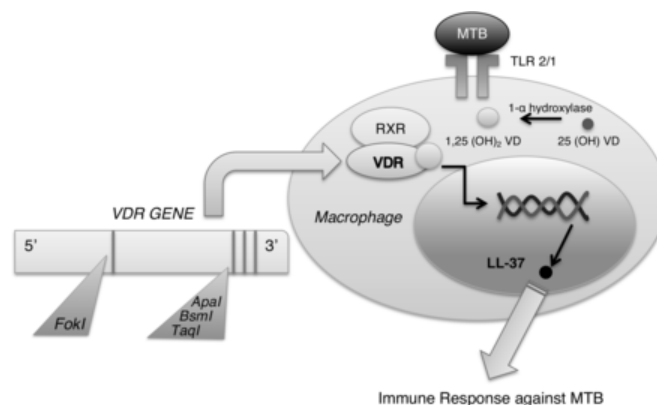
Berbagai sel efektor imun mengekspresikan reseptor vitamin D, dan vitamin D3 mendorong diferensiasi monosit menjadi makrofag dan meningkatkan kapasitas sel-sel ini untuk memfagositosis mikobakteri. Pada sistem imun bawaan, aktivasi Toll-like receptor (TLR) 2/1 oleh presentasi antigen MTB menyebabkan ekspresi VDR dan 1- α vitamin D hidroksilase. Bentuk aktifnya 1,25 (OH) $_2$ vitamin D, yang berikatan dengan VDR. Mereka kemudian membentuk heterodimer dengan reseptor retinoid X (RXR), menciptakan kompleks yang mentranslokasi ke nukleus untuk mengatur transkripsi gen (Gambar 2.5). Protein kunci yang terbentuk adalah LL-37,

anggota keluarga cathelicidin, yang diketahui memiliki efek antimikroba terhadap MTB dengan merekrut sel imun lain ke tempat infeksi.

Fungsi lain vitamin D dan VDR adalah mengatur presentasi dan pemrosesan antigen, fagositosis, dan produksi interleukin (IL)-1 dan tumor necrosis factor (TNF- α) yang penting untuk respon imun (Jaganath & Mupere, 2012). Vitamin D3 berdampak pada imunitas adaptif dengan membatasi respon pro-inflamasi Th1 dan Th17 dan mempromosikan produksi sitokin anti-inflamasi seperti IL-10, IL-4 dan transforming growth factor- β . Vitamin D3 juga membatasi proliferasi dan diferensiasi sel B untuk mengurangi sekresi imunoglobulin. Untuk membatasi respons adaptif pro-inflamasi yang dapat memperburuk kerusakan jaringan di lokasi penyakit (Gwela et al., 2019). Reseptor vitamin D (VDR) adalah reseptor nuklir larut yang ditemukan di banyak sel imun dan diyakini berperan dalam pola sekresi sitokin, pematangan sel dendritik, dan fungsi sel T efektor dan pengatur.

Beberapa polimorfisme gen VDR telah ditemukan yang dapat memengaruhi risiko dan hasil tuberkulosis, termasuk BsmI, TaqI, dan ApaI pada ujung 3' VDR, dan FokI pada situs ekson 2. Genotipe TaqI Tt dan ApaI AA dikaitkan dengan peningkatan respons terhadap terapi dan waktu yang lebih cepat untuk konversi sputum pada pasien tuberkulosis genotipe FokI ff paling signifikan pada populasi Asia, sedangkan tidak ada efek pada orang Afrika atau Amerika Selatan (Jaganath & Mupere, 2012; Tellez-Navarrete et al., 2021).

Vitamin A dalam bentuk All trans retinol (ATR) diesterifikasi dan disimpan di hati, dan retinol dan -karoten dioksidasi menjadi semua-trans-retina di jaringan oleh aksi alkohol dehidrogenase. Kemudian, retinal dioksidasi menjadi all-trans-retinoic acid (RA) oleh retinal dehydrogenases, yang merupakan metabolit aktif vitamin A. Vitamin A meningkatkan fungsi kekebalan tubuh, meningkatkan sekresi IL-2, dan akibatnya, proliferasi sel T, dan tergantung pada kondisi lingkungan mikro, dan dapat meningkatkan atau menekan proliferasi limfosit B . Selain itu, rangsangan inflamasi, seperti TNF, telah terbukti mendorong RA untuk meningkatkan pematangan sel dendritik dan kapasitas presentasi antigen, dibutuhkan monosit atau makrofag yang terinfeksi untuk memediasi mekanisme antimikroba melalui jalur yang bergantung pada NPC2, dan dalam kondisi ini, kolesterol seluler menurun dan meningkatkan aktivitas antimikroba (Tellez-Navarrete et al., 2021).



Gambar 2.5 Peranan genetika dalam kerentanan TB

Peran genetika dalam kerentanan tuberkulosis. Reseptor vitamin D (VDR) memiliki peran integral dalam respon imun tuberkulosis melalui

pengikatannya dengan vitamin D untuk menginduksi fungsi antimikroba melalui LL-37. Beberapa polimorfisme pada gen VDR juga telah terlibat dalam kerentanan tuberkulosis. Singkatan: MTB, Mycobacterium tuberculosis; RXR, reseptor retinoid X; TLR, Reseptor seperti pulsa; VD, vitamin D.

Pada studi hewan menunjukkan bahwa hiperkolesterolemia meningkatkan kerentanan terhadap infeksi MTB, karena menginduksi respons proliferasi yang lemah dan aktivasi respons adaptif yang tertunda. Kemampuan yang lebih tinggi untuk menghasilkan oksida nitrat untuk menghindari kelangsungan hidup intraseluler M.tb ditunjukkan dalam studi in vitro menggunakan makrofag manusia (garis sel U937) yang distimulasi dengan RA sebelum infeksi MTB. Dalam model in vivo, penggunaan RA sebagai agen terapeutik disarankan; Tikus yang terinfeksi MTB yang menerima RA menunjukkan lebih sedikit keparahan histopatologi TB dan penurunan jumlah unit pembentuk koloni, dan makrofag alveolar mereka mensekresi TNF dan IL-1 β tingkat tinggi.

Selain vitamin D, vitamin A maka Zinc juga memainkan peran penting dalam struktur dan fungsi protein; sekitar 10% protein mengikat seng, termasuk sitokin, faktor transkripsi, dan enzim. Pada model hewan, defisiensi seng telah terbukti menyebabkan atrofi timus dan limfopenia dengan peningkatan risiko infeksi, menurunkan aktivitas fagositosis makrofag, serta kemampuannya untuk mendaur ulang nutrisi dan bertahan melawan patogen intraseluler, bahwa akumulasi seng dalam fagosom

diperlukan untuk memperpendek masa hidup patogen fagositik. Protein pengangkut seng (Zrt) bertanggung jawab atas biodistribusi seng. Ada beberapa kelompok protein ini, dan protein seperti Zrt-/Irt (ZIP) adalah salah satunya. Selama infeksi in vitro dengan MTB pola ekspresi berbagai ZIP diamati berubah, misalnya, tingkat ekspresi ZIP10 dan ZIP8 menurun dan meningkat (Tellez-Navarrete et al., 2021).

ASI mengandung berbagai faktor imun penting termasuk lisozim, defensin, laktoferin, CD14 terlarut, sitokin, komplemen, dan lipid antivirus. Trigliserida susu, ketika dicerna sebagian dari lipase, menjadi monogliserida dan asam lemak bebas, yang dapat menjadi racun bagi banyak patogen. ASI juga merupakan sumber glycans yang besar, yang berfungsi sebagai substrat untuk fermentasi dan kolonisasi bakteri komensal, dan menghambat pengikatan patogen ke permukaan mukosa. Sebuah studi prospektif di Brazil menunjukkan bahwa neonatus dengan bronkiolitis virus akut dan lama menyusui eksklusif yang lebih pendek memiliki hasil klinis yang lebih buruk, termasuk peningkatan penggunaan oksigen dan tinggal di rumah sakit lebih lama (Jaganath & Mupere, 2012).

Leptin menyebabkan sekresi beberapa sitokin, dan model hewan menunjukkan bahwa peningkatan leptin selama kelaparan mencegah atrofi jaringan limfoid. Sebuah studi ex vivo T-limfosit dari anak-anak kurang gizi di Meksiko menemukan bahwa inkubasi dengan leptin menyebabkan penurunan produksi IL-4 dan IL-10 dan peningkatan IL-2 dan interferon ($\text{IFN-}\gamma$), menunjukkan pergeseran ke Respon Th1 (Rodríguez et al., 2007).

Tabel 2.3 Mikronutrien yang penting untuk kekebalan melawan MTB

Summary of Micronutrients Important for Immunity Against Tuberculosis		
Name	Function	Supplementation for Childhood Tuberculosis
Vitamin D	Macrophage function, proper phagocytosis, lysosomal fusion	Radiological improvement, but no difference in serum levels or weight change [47]
Vitamin A	Regulates innate immunity, T and B lymphocyte function, and maintains mucosal epithelium	No improvement in weight or respiratory symptoms [46]
Vitamin E	Antioxidant properties that may reduce oxidative stress on T lymphocytes	When included in a multivitamin for children, did not improve weight gain [48]
Zinc	Widespread effect on immunity, and deficiency can lead to lymphopenia, poor lymphocyte functioning, thymic atrophy, impaired cell mediated immunity and shift to the Th2 response. Also, essential for metallo-enzyme formation and creation of free radicals	Improves tuberculin response, though no studies on treatment outcomes [44]
Selenium	Cell and humoral immunity, utilized in creation of metallo-enzymes	No known studies in children
Iron	Innate immunity such as neutrophil and natural killer function, T-cell maturation, and deficiency can result in shift toward Th2 response	No known studies in children

Malnutrisi diketahui memiliki efek langsung pada sel T, malnutrisi yang parah memicu atrofi timus serta organ limfoid perifer, yang pada gilirannya mengurangi jumlah sel (leukopenia), menurunkan rasio CD4/CD8, meningkatkan jumlah sel T negatif ganda CD4 dan CD8, dan meningkatkan jumlah sel T imatur di darah tepi. Penurunan besar dalam ekspresi CD25 dan CD27 (molekul yang diperlukan untuk aktivasi dan proliferasi sel T) juga ditunjukkan. Respon imun mukosa usus juga dipengaruhi oleh malnutrisi. Ini menghasilkan mikrovili hipotrofik yang rata, penurunan sekresi IgA, dan jumlah limfosit di patch Peyer. Anak-anak yang kekurangan gizi telah menunjukkan penurunan produksi sitokin tipe 1 (IL-2 dan IFN- γ), yang merupakan mediator utama imunitas. Albumin (<2,7 g/dl) telah terbukti kuat dan independen terkait dengan kematian di rumah sakit akibat TB (aOR 3,38, 95% CI 1,51-7,59; P = 0,001) (Chandrasekaran et al., 2017).

Beberapa faktor risiko dilaporkan berhubungan dengan insidens kasus TB yaitu (1) status gizi balita pendek dan sangat pendek mempunyai risiko masing-masing 3,5 kali dan 9 kali sakit TB dibandingkan yang normal.

(OR = 3.54; P = 0,004 and and OR = 9.06; P = 0.001) (2) Status imunisasi balita yang tidak diimunisasi dibandingkan yang diimunisasi BCG mempunyai risiko 4 kali sakit TB. (3) riwayat kontak TB. Balita yang mempunyai kontak TB dibandingkan tidak mempunyai kontak serumah dengan pasien TB berisiko hampir 12 kali sakit TB (OR = 11.96; P = 0.000). (4) usia balita, jika ditinjau dari usia balita, balita usia < 24 bulan dibandingkan balita usia > 24 bulan mempunyai risiko 2,8 kali sakit TB OR = 2.84; P = 0.011) (Jahiroh & Prihartono, 2017). Kejadian TB anak juga ditemukan berhubungan dengan sputum BTA penderita TB paru dewasa, lama kontak, dan status gizi anak (Fithriasari & Wahyuni, 2017).

Penentuan status gizi berdasarkan BB/TB yang kemudian diplot dengan menggunakan cut off Z score WHO 2006 untuk usia 0-5 tahun dan persentase berat badan ideal sesuai kriteria Waterlow untuk anak di atas 5 tahun, atau kurva CDC NCHS 2000.

Tabel 2.4 Penentuan status gizi menurut kriteria Waterlow, WHO 2006, dan CDC 2000

Status gizi	BB/TB (% median)	BB/TB WHO 2006	IMT CDC 2000
Obesitas	>120	> +3	> P95
<i>Overweight</i>	>110	> +2 hingga +3 SD	P85 – p95
Normal	> 90	+2 SD hingga -2 SD	
Gizi kurang	70-90	< -2 SD hingga -3 SD	
Gizi buruk	< 70	< - 3 SD	

2.9. Penegakan Diagnosis

2.9.1. Uji Tuberkulin

Tuberkulin adalah komponen protein kuman TB yang mempunyai sifat antigenik yang kuat. Jika disuntikan secara intrakutan kepada seseorang yang telah terinfeksi TB (telah ada kompleks primer dalam tubuhnya dan telah terbentuk imunitas selular TB) maka akan terjadi reaksi berupa indurasi di lokasi suntikan. Indurasi ini terjadi karena vasodilatasi lokal, edema, endapan fibrin dan terakumulasinya sel-sel inflamasi di daerah suntikan. Ukuran indurasi dan bentuk reaksi tuberkulin tidak dapat menentukan angka aktivitas dan beratnya proses penyakit (Rahajoe et al., 2018; Seddon et al., 2016).

Secara umum, hasil uji tuberkulin dengan diameter indurasi >10 mm dinyatakan positif tanpa menghiraukan penyebabnya. Hasil positif ini sebagian besar disebabkan oleh infeksi TB alamiah, tetapi masih mungkin disebabkan oleh imunisasi *Bacille Calmett Guerin* atau infeksi *M. atipik*. Anak jika ukuran indurasi >15 mm, hasil tuberkulin hasil positif ini sangat mungkin karena infeksi alamiah (Nayak & Acharjya, 2012; Rahajoe et al., 2018).

Hasil pembacaan Uji Tuberkulin adalah sebagai berikut (Kemenkes RI, 2016; Rahajoe et al., 2018):

- a. Indurasi 0-5 mm (diameternya): *Mantoux* negatif = golongan *no sensitivity*. Di sini peran antibodi humoral paling menonjol.

- b. Indurasi 6-9 mm: Hasil meragukan = golongan *normal sensitivity*. Di sini peran antibodi humoral masih menonjol.
- c. Indurasi 10-15 mm: Mantoux positif = golongan *low grade sensitivity*. Di sini peran kedua antibodi seimbang.
- d. Indurasi > 15 mm: Mantoux positif kuat = golongan *hypersensitivity*. Di sini peran antibodi seluler paling menonjol.

Jika membaca pada anak berusia lebih dari 5 tahun, faktor BCG dapat diabaikan. apabila diameter indurasi 0-4 mm, dinyatakan uji tuberkulin negatif. Bila mendapatkan hasil yang meragukan, uji tuberkulin dapat diulang. Untuk menghindari efek *booster* tuberkulin, ulangan dilakukan 2 minggu kemudian dan penyuntikan dilakukan di lokasi yang lain, minimal berjarak 2 cm (Kemenkes RI, 2016).

Uji Tuberkulin positif dapat dijumpai pada tiga keadaan sebagai berikut:

- Infeksi TB alamiah, Infeksi TB laten, Infeksi TB dan sakit TB, TB yang telah sembuh, Imunisasi BCG (infeksi TB buatan), Infeksi mikobakterium atipik

Uji Tuberkulin negatif

- Tidak ada infeksi TB, dalam masa inkubasi TB, Anergik

Reaksi Cepat BCG

Bila dalam penyuntikan BCG terjadi reaksi cepat (dalam 3-7 hari) berupa kemerahan dan indurasi > 5 mm, maka anak tersebut dicurigai telah terinfeksi *Mycobacterium tuberculosis*.

2.9.2. Radiologis

Gambaran foto toraks pada TB tidak khas, kelainan-kelainan pada TB dapat dijumpai pada penyakit lain. Sebaliknya, foto toraks dengan gambaran normal (tidak terdeteksi secara radiologis) tidak dapat menyingkirkan diagnosis TB jika klinis dan pemeriksaan penunjang lain mendukung. Dengan demikian, pemeriksaan foto toraks saja tidak dapat digunakan untuk mendiagnosis TB, kecuali gambaran milier (WHO, 2016). Secara umum gambaran radiologis yang sugestif TB adalah sebagai berikut: Pembesaran kelenjar hilus atau paratrakeal dengan atau tanpa infiltrate, Konsolidasi segmental/lobar, Milier, Kalsifikasi dengan infiltrate, dan lain-lain.

Foto toraks tidak cukup hanya dibuat secara antero-posterior (AP), tetapi harus disertai dengan foto lateral, mengingat bahwa pembesaran KGB di daerah hilus biasanya lebih jelas pada foto lateral. Pada keadaan foto toraks tidak jelas, bila perlu dilakukan pemeriksaan pencitraan lain seperti CT Scan toraks. Gambaran abnormalitas parenkim, konsolidasi ditemukan pada 70% kasus, utamanya paru kanan. Anak-anak usia 0-3 tahun memiliki prevalensi limfadenopati hilus yang lebih tinggi. dan prevalensi kelainan parenkim yang lebih rendah dibandingkan anak yang lebih tua. (García-Basteiro et al., 2015).

2.9.3. Mikrobiologis

a. Sputum BTA

Diagnosis kerja TB biasanya dibuat berdasarkan gambaran klinis, uji tuberkulin dan gambaran radiologis paru diagnosis pasti ditegakkan bila ditemukan kuman TB pada pemeriksaan mikrobiologis. Pemeriksaan mikrobiologis yang dilakukan terdiri dari dua yaitu pemeriksaan mikrobiologis apusan langsung untuk menemukan BTA dan pemeriksaa biakan kuman MTB. Pemeriksaan ini sulit dilakukan pada anak karena sulitnya mendapatkan spesimen berupa sputum. Sebagai gantinya, dilakukan pemeriksaan bilas lambung 3 hari berturut-turut, minimal 2 hari (Aaby et al., 2011; Kemenkes RI, 2016; Rahajoe et al., 2018).

Hasil pemeriksaan mikroskopis langsung pada anak sebagian besar negatif, sedangkan hasil biakan MTB memerlukan waktu yang lama yaitu 1-3 minggu atau 6-8 minggu. Contoh sediaan Bactec, (Kemenkes RI, 2016).

b. Gen Expert

GeneXpert MTB/RIF merupakan pemeriksaan molekuler secara otomatis untuk mendeteksi *MTB* dan sekaligus mendeteksi resistensi *M. tuberculosis* terhadap rifampisin. Pemeriksaan ini menggunakan metode *heminested real-time polymerase chain reaction* (PCR) assay untuk mendeteksi mutasi pada regio *hot spot rpoB*, kemudian diperiksa dengan *beacon molecular* sebagai *probe*.^{1,11-13} Pengujian dilakukan pada platform *GeneXpert* MTB/RIF, mengintegrasikan sampel yang akan diolah dalam *cartridge* plastic sekali pakai. *Cartridge* ini berisi semua reagen yang

diperlukan untuk dapat melisiskan bakteri, ekstraksi asam nukleat, amplifikasi, dan deteksi gen yang sudah diamplifikasi. Hasil pemeriksaan dapat diperoleh dalam waktu 2 jam. Pemeriksaan ini bersifat otomatis dan tidak perlu tenaga ahli khusus (Kemenkes RI, 2016).

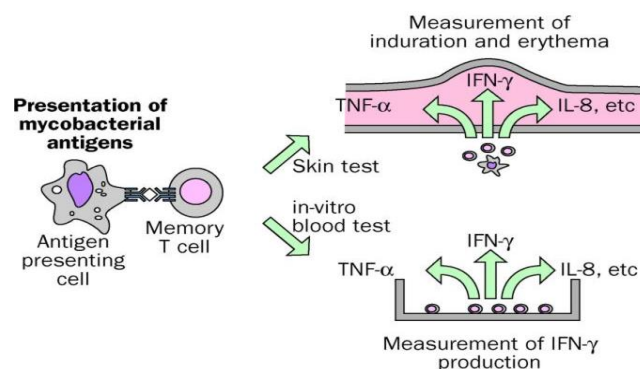
Kurniawan melakukan penelitian menilai kinerja tes sputum GeneXpert MTB / RIF untuk mendiagnosis tuberkulosis paru (TB) di antara pasien dahak basil asam-cepat (BTA) hasil smear negatif di Thailand, negara dengan prevalensi tinggi tuberkulosis paru-paru. Nilai sensitivitas 83,33%, spesifisitas 95,46%, nilai prediksi positif 93,75%, nilai prediksi negatif 87,5%, akurasi 90% dan nilai uji kappa 0,796. Akurasi pemeriksaan dengan metode RT-PCR GeneXpert yaitu 90% dengan tingkat kesesuaian atau konsistensi pemeriksaan antara metode RT-PCR GeneXpert dengan kultur Lowenstein Jensen (uji kappa) mendekati sempurna (excellent agreement) yaitu 0,796 (Kurniawan et al., 2016).

2.9.4. IGRA (*Interferon-Gamma Release Assays*)

Interferon-gamma release assays (IGRAs) diperkenalkan untuk diagnosis tuberkulosis laten. IGRA adalah tes berbasis darah yang pada dasarnya mengukur keberadaan sel T reaktif M. tuberculosis spesifik yang disensitisasi oleh infeksi sebelumnya dengan MTB. Dua IGRA komersial tersedia, QuantiFERON-TB Gold In-Tube assay (QFT-GIT) (Cellestis Ltd., Australia) dan T-SPOT-TB (Oxford Immunotec, UK). Dibandingkan dengan TST, IGRA tidak dipengaruhi oleh vaksinasi Bacille Calmette-Guérin (BCG) sebelumnya dan kecil kemungkinannya dipengaruhi oleh paparan

sebelumnya terhadap sebagian besar mikobakteri nontuberkulosis (NTM) karena antigen target yang dipilih untuk merangsang respons imun seluler (ECDC, 2011). Meskipun IGRA dan TST tidak dapat memprediksi perkembangan penyakit dengan baik, IGRA tidak kalah prediktif daripada TST dan mempunyai spesifisitas tinggi dan nilai prediktif negatif. Penelitian ini menunjukkan penggunaan IGRA baik untuk anak-anak yang tidak lahir di Amerika Serikat (Ahmed et al., 2020).

IGRA mengukur keberadaan respon imun adaptif terhadap antigen *Mycobacterium Tuberculosis* secara tidak langsung namun belum banyak bukti untuk menentukan apakah itu respon imun tersebut sesuai dengan infeksi yang sebenarnya. IGRA telah dikembangkan untuk identifikasi respon imun seseorang spesifik untuk *Mycobacterium Tuberculosis*, sehingga dianggap sebagai berkorelasi dengan infeksi TB, dan disarankan untuk digunakan pada spesimen darah.



Gambar 2.6 Dasar Tuberkulin Test dan IGRA. Sumber: (Ravn, 2016)

Tuberculin Skin Test (TST) maupun *IGRA (interferon-gamma release assays)* memiliki mekanisme yang sama, yaitu stimulasi pelepasan sitokin oleh sel T setelah pemberian antigen tertentu. Sel T dari individu yang pernah tersensitisasi oleh antigen TB akan mensekresi sitokin (IFN- γ) apabila dipaparkan kembali dengan antigen TB. Pada TST reaksi Immunologi terjadi *in vivo*, sedangkan pada IGRA reaksi immunologi terjadi *in vitro*. Selain itu perbedaan antara TST dan IGRA juga terletak pada antigen yang digunakan serta parameter yang diukur. Pada TST, digunakan PPD untuk menstimulasi sel T sedangkan pada IGRA digunakan antigen spesifik TB, seperti ESAT6, CFP10, TB7.7. dari segi parameter yang diukur pada TST diukur besarnya diameter indurasi kulit. Sedangkan pada IGRA diukur kadar IFN γ yang disekresi oleh sel T (Gambar 2.6) (Ravn, 2016; Rutherford et al., 2012)

2.9.5. Sistem Skoring

Sistem ini dikembangkan diuji coba melalui tiga tahap penelitian oleh para ahli yang berasal dari IDAI, Kemenkes dan didukung oleh WHO dan disepakati sebagai salah satu cara untuk mempermudah penegakan diagnosis TB pada anak terutama di fasilitas kesehatan dasar. Sistem skoring ini membantu tenaga kesehatan agar tidak terlewat dalam mengumpulkan data klinis maupun pemeriksaan penunjang sederhana sehingga diharapkan dapat mengurangi terjadinya underdiagnosis maupun overdiagnosis TB (Kemenkes RI, 2016).

Tabel 2.5 Sistem Skoring Diagnosis Tuberkulosis

Parameter	0	1	2	3
Kontak TB	Tidak Jelas	-	Laporan Keluarga (BTA negatif atau tidak jelas)	BTA (+)
Uji Tuberkulin	Negatif	-	-	Positif ($\geq 10\text{mm}/\geq 5\text{mm}$ pada keadaan immunosupresi)
Berat Badan / Keadaan Gizi	-	BB/TB < 90% atau BB/U < 80%	Klinis Gizi Buruk atau BB/TB < 70% atau BB/U < 60%	-
Demam yang Tidak Diketahui Penyebabnya	-	≥ 2 minggu	-	-
Batuk Kronik	-	≥ 3 Minggu	-	-
Pembesaran Kelenjar Limfe Kolli, Aksila, Inguinal	-	≥ 1 cm, jumlah > 1, tidak nyeri	-	-
Pembengkakan Tulang/Sendi Panggul, Lutut, Falang	-	Ada Pembengkakan	-	-
Foto Toraks	Normal/Kelainan Tidak Jelas	Gambaran Sugestif TB*	-	-

Catatan:

Diagnosis tuberkulosis pada anak bergantung pada penilaian menyeluruh dengan nilai ≥ 6 , dan pasien diberikan terapi Obat Anti tuberkulosis. Meskipun kebanyakan anak dengan tuberkulosis memiliki keterlibatan paru

tanpa kavitas paru namun sering dengan keterlibatan kelenjar getah bening *intrathoracic*. Akibatnya, dibandingkan dengan orang dewasa, dahak paparan dari anak-anak lebih cenderung negatif.

2.10. Tatalaksana Tuberkulosis Anak

Penatalaksanaan penyakit TB hendaknya secara komprehensif, selain penatalaksanaan farmakoterapi dilaksanakan juga terapi non farmakologi. Obat TB utama (first line) saat ini adalah rifampisin (R), Isoniazid (H), Pirazinamid (Z), Etambutol (E) dan Streptomisin (S). Rifampisin dan isoniazid merupakan obat pilihan utama dan ditambah dengan pirazinamid, etambutol, dan streptomisin (Kemenkes RI, 2016; Rahajoe et al., 2018).

Tabel 2.6 Obat Antituberculosis yang biasa dipakai dan dosisnya

Nama Obat	Dosis harian (mg/kgBB perhari)	Dosis maksimal (mg/kgBB perhari)	Efek Samping
Isoniazid	5 – 15*	300	Hepatitis, neuritis perifer, hipersensitivitas
Rifampisin**	10 – 20	600	Gastrointestinal, reaksi kulit, hepatitis, trombositopenia, peningkatan enzim hati, cairan tubuh berwarna oranye kemerahan
Pirazinamid	15 – 30	2000	Toksisitas hati, artralgia, gastrointestinal
Etambutol	15 – 20	1250	Neuritis optic, ketajaman mata berkurang, buta warna merah-hijau, penyempitan lapang pandang hipersensitivitas, gastrointestinal
Streptomisin	15 – 40	1000	Ototoksik, nefrotoksik

Panduan obat TB Pengobatan TB dibagi menjadi dua fase, yaitu fase intensif (2 bulan pertama) dan sisanya sebagai fase lanjutan. Prinsip dasar pengobatan TB adalah minimal tiga macam obat pada fase intensif (2 bulan pertama) dan dilanjutkan dengan dua macam obat pada fase lanjutan (4 bulan atau lebih). Untuk kasus TB tertentu yaitu meningitis TB, TB milier, efusi pleura TB, perikarditis TB TB endobronkial, dan peritonitis TB, diberikan kortikosteroid (prednison) dengan dosis 1-2 mg/KgBB/hari, dibagi dalam 3 dosis, maksimal 60 mg dalam 1 hari. Lama pemberian kortikosteroid adalah 2-4 minggu dengan dosis penuh, dilanjutkan tapering off selama 1-2 minggu. Panduan OAT ini sebagai berikut: (Rahajoe et al., 2018)

2.10. Vaksin Bacille Calmette-Guérin (BCG)

Vaksin Bacille Calmette-Guérin adalah vaksin digunakan pertama pada manusia tahun 1921 di Prancis. Setelah vaksin didistribusikan ke berbagai laboratorium di seluruh dunia di mana subkultur BCG yang diulang lebih lanjut menyebabkan munculnya strain vaksin yang berbeda secara fenotipik, strain yang berbeda telah berevolusi disimpan di setiap negara sebagai lot benih untuk produksi vaksin masa depan. Beberapa strain vaksin BCG yang ada di dunia yaitu BCG Brazil, BCG Bulgaria, BCG Denmark, BCG Connaught, BCG Japan, BCG Pasteur, BCG Russia. BCG yang digunakan di Indonesia adalah buatan pabrik PT Bio Farma, asal strain BCG yang diturunkan dari Pasteur 1173, dibawah ini daftar negara dengan strain BCG vaksin yang digunakan (Ritz & Curtis, 2009; Trunz et al., 2006).

Vaksin BCG yang dilarutkan tidak mengandung bahan pengawet, semua vial multi-dosis yang dibuka harus dibuang di akhir sesi imunisasi, atau dalam waktu 6 jam, mana saja yang lebih dulu. Dosis standar vaksin BCG adalah 0,05 mL vaksin yang dilarutkan untuk bayi berusia kurang dari 1 tahun, dan 0,1 mL untuk mereka yang berusia satu tahun ke atas. Vaksin BCG harus diberikan melalui injeksi intradermal. Pemberian intradermal yang benar dapat diverifikasi dengan pembentukan scar.

Tabel 2.7 Macam-macam Strain Vaksin BCG dan Negara Pembuat (Ritz & Curtis, 2009).

Country	Manufacturer	Original BCG strain from which local strain derived
China	Chengdu biomanufacture Shanghai biomanufacture	D2PD302*
Guyana	No information available	No information available
India	BCG vaccine laboratory Guindy	BCG Madras
Indonesia	PT. Bio Farma	Pasteur 1173
Iran	Razi Institute	No information available
Poland	Lubelska Wytownia Surowici Szczepionek, Lublin	BCG Brazil
Republic of Korea	Korean Institute of Tuberculosis	BCG Pasteur 1173P2 [†]
Romania	Romanian National Institute for Research and Development in Microbiology and Immunology "Ion Cantacuzino"	Pasteur (192) obtained in 1925
Serbia	Torlak Institute	Pasteur 1173P2
Thailand	Queen Saovabha Memorial Institute, Thai Red Cross	BCG Japan
Uzbekistan	Uzbiopharma	No information available
Vietnam	IVAC Institute Pasteur HCM City	No information available

* Personal communication from Dr Liang Xiaofeng, Director National Immunisation Program China (no further information about the BCG vaccine strain available).

[†] Personal communication from Hyejon Lee, Chief of The International Cooperation Department, Korean Institute of Tuberculosis.

Vaksin BCG harus disuntikkan di area kulit yang bersih dan sehat. Vaksin sebaiknya diberikan pada aspek lateral lengan atas. Tidak ada data yang dipublikasikan tentang kemanjuran/efektivitas dan keamanan terkait lokasi suntikan lainnya. Status vaksinasi BCG di antara kasus TB harus dicatat, sebaiknya dengan informasi tentang produk/batch yang digunakan (Kemenkes RI, 2016; WHO, 2018).

Sejak publikasi genom *M. tuberculosis*, studi genomik komparatif telah mendokumentasikan bahwa strain vaksin BCG telah berevolusi dan berbeda satu sama lain dan dari BCG asli yang pertama kali digunakan pada tahun 1921. Karena perbedaan genetik ini mempengaruhi protein antigenik, perubahan ini dapat diterjemahkan ke dalam perbedaan kemanjuran dan efek pada tes kulit tuberkulin (TST). Ritz dan Curtis melihat variasi strain BCG global menunjukkan keragaman strain yang digunakan oleh negara yang berbeda dan bahkan dalam negara yang sama. Mereka menemukan bahwa 44% (83/188) negara melaporkan menggunakan lebih dari satu jenis strain BCG selama selang waktu hanya 5 tahun. Dokumentasikan praktik vaksinasi BCG untuk tujuan klinis dan penelitian (Ritz & Curtis, 2009). Lebih dari 14 formulasi vaksin BCG berlisensi berbeda yang terdiri dari turunan turunan berbeda dari *M. bovis* yang dilemahkan digunakan secara global dengan UNICEF sebagai pemasok terbesar. (Angelido A, 2020)

Vaksin dapat memiliki efek di luar target dan imunogenisitas vaksin dapat bervariasi secara substansial dengan faktor demografis seperti usia dan jenis kelamin. Vaksin BCG diproduksi di bawah kondisi yang berbeda di seluruh dunia menghasilkan formulasi yang berbeda. Studi epidemiologis telah mengaitkan imunisasi awal kehidupan dengan formulasi BCG tertentu dengan penurunan yang tidak terduga (~50%) pada semua penyebab kematian, terutama pada laki-laki dengan berat badan lahir rendah, jauh melebihi yang disebabkan oleh pencegahan TB. Kematian dikaitkan

dengan sepsis dan infeksi pernapasan yang menunjukkan bahwa BCG menginduksi perlindungan "heterolog" terhadap patogen yang tidak terkait. Mekanisme yang diusulkan untuk perlindungan heterolog termasuk pergeseran imunometabolik yang diinduksi vaksin, pemrograman ulang epigenetik populasi sel bawaan, dan modulasi progenitor sel induk hematopoietik yang menghasilkan respons yang berubah terhadap rangsangan berikutnya, sebuah fenomena yang disebut "kekebalan terlatih." Selain perbedaan genetik, formulasi BCG berlisensi sangat berbeda dalam kandungan kunci mikobakteri yang layak untuk aktivasi kekebalan bawaan, yang berpotensi berkontribusi pada perbedaan dalam kemampuan formulasi beragam ini untuk menginduksi perlindungan spesifik TB dan heterolog (Angelidou et al., 2020).

Penelitian double blind RCT pemberian booster vaksin BCG prime-MVA85A yang menginduksi Ag85 spesifik jauh lebih tinggi ekspresi sel T CD4 tidak dapat memberikan perlindungan tambahan (A. Roy et al., 2014).

BCG menghindari pematangan fagosom, autophagy, dan mengurangi ekspresi MHC-II dari antigen-presenting cells (APCs) yang mempengaruhi aktivasi sel-T. Suatu penelitian vaksin BCG baru dengan menambahkan Ag85B, BCG85C5 diberikan pada tikus yang tidak memiliki My88 dan TLR2, namun dengan penambahan tersebut menginduksi autophagy yang bergantung pada LC3 dalam makrofag yang meningkatkan presentasi antigen. Konsisten dengan efek in vitro, BCG85C5 secara nyata

memperluas sel T efektor dan memori pusat pada tikus C57Bl / 6 yang melindungi mereka dari infeksi aerosol primer dengan Mtb (Khan et al., 2019).

2.10.1. Efektifitas Vaksin BCG

Vaksin BCG telah menjadi subyek berbagai uji coba kemanjuran dan studi epidemiologi yang dilakukan selama beberapa dekade. Uji coba ini menunjukkan bahwa BCG memiliki efikasi protektif 60-80% terhadap bentuk TB yang parah pada anak-anak, terutama meningitis dan khasiatnya terhadap penyakit paru bervariasi secara geografis (Rodrigues et al., 2011). Vaksin BCG kurang melindungi terhadap penyakit bila diberikan pada individu yang sudah terpapar mikobakteri lingkungan, sesuai lokasi geografisnya. Efek perlindungan vaksinasi BCG terhadap penyakit berasal dari tindakannya dalam mencegah perolehan infeksi atau terbatas pada pencegahan perkembangan dari infeksi ke penyakit klinis (Storgaard et al., 2015; Trunz et al., 2006; WHO, 2016).

Penelitian metanalisis oleh A Roy dkk dengan subyek anak yang divaksinasi dan tidak divaksinasi berusia di bawah 16 tahun dan terpapar pasien Tuberkulosis dengan menggunakan interferon γ sebagai indikator infeksi. Didapatkan 27 % anak yang divaksinasi terlindungi dari infeksi TB , anak yang terinfeksi TB 58% (23%-77%) terhindar dari sakit TB dan 71% (42%-85%) anak yang divaksin terlindungi dari sakit TB dibandingkan dengan anak-anak yang tidak divaksinasi (Kemenkes RI, 2014; A. Roy et

al., 2014). Penelitian RCT di UK melaporkan bahwa setelah divaksin maka lama melindungi dari infeksi TB hingga 10 tahun, dengan efektivitas sekitar 50% di Indian Amerika Utara, di Brazil dapat terlindungi 15 hingga 20 tahun setelah vaksin BCG saat baru lahir, dengan efektivitas 48%, utamanya di daerah yang jauh dari khatulistiwa (Rodrigues et al., 2011).

2.10.2. Scar BCG

Vaksinasi BCG sering menyebabkan pembentukan bisul kecil dalam 2-6 minggu, yang akan membesar dan dapat terjadi ulkus yang akan tertutup krusta selama 2-4 bulan, kemudian menyembuh tanpa harus diobati dan menimbulkan jaringan parut berdiameter 4-8 mm yang biasa disebut scar BCG (Benn et al., 2020; Schaltz-Buchholzer et al., 2020). Pembentukan bekas luka di lokasi inokulasi diambil sebagai penanda imunogenisitas terhadap imunisasi BCG. Reaksi klasik digambarkan sebagai papula 2-3 minggu setelah imunisasi BCG, yang berkembang menjadi vesikel dan kemudian menjadi pustule. Pustula kemudian menjadi ulkus dan mengarah ke pembentukan scar, ukuran 5-7 mm dalam 6-12 minggu. Pada beberapa anak reaksi abortif bisa terjadi dimana papula / pustule lenyap tanpa pembentukan bekas luka (Kemenkes RI, 2014; WHO, 2020).

Beberapa studi kohort prospektif yang dilakukan pada bayi dengan berat > 2 kg dan berat normal yang divaksin sebagian besar pada usia 7 hari, kemudian berturut-turut diukur ukuran scar yang terbentuk pada usia 2, 6, and 12 bulan didapatkan terbentuk pada 91,4%-97% bayi, pada usia

8 minggu namun kebanyakan pada usia 12 minggu pasca vaksinasi dan gagal terbentuk bekas luka sebesar 2-8,6%. Vaksin yang digunakan adalah BCG -Denmark, Russia, Japan, dan campuran. Terdapat hubungan antara pembentukan bekas luka dengan kelangsungan hidup (Benn et al., 2020; Dhanawade et al., 2015; Schaltz-Buchholzer et al., 2020).

Terdapat korelasi yang signifikan antara ukuran bekas luka dan derajat positif tuberkulin (ukuran) TST. Ukuran bekas luka yang terbentuk antara 3 mm – 7 mm, kebanyakan 32-47% berukuran kecil, dan 25-35% ukuran besar 4.5 mm. Mortaliti risk ratio (MRR) (Dhanawade et al., 2015; Schaltz-Buchholzer et al., 2020).

Memiliki reaksi BCG dini pada usia 2 bulan berhubungan dengan penurunan substansial angka kematian 2-12 bulan. Semakin besar reaksi, semakin jelas efek menguntungkan pada kelangsungan hidup. Hubungan ini konsisten pada lima RCT dan tiga strain BCG dan perlindungan terutama terhadap kematian yang disebabkan oleh penyakit menular. Faktor penentu utama untuk membentuk reaksi BCG berhubungan dengan kualitas vaksinasi BCG dan strain BCG yang digunakan; BCG-Denmark dan BCG-Jepang dikaitkan dengan laju reaksi yang lebih tinggi dan ukuran reaksi yang lebih besar daripada BCG-Rusia. Pada usia 4 minggu, respons sitokin spesifik dan heterolog lebih menonjol pada bayi yang memiliki scar BCG, dan terlebih lagi pada mereka dengan scar yang besar (Schaltz-Buchholzer et al., 2020).

Penelitian telah menunjukkan bukti minimal atau tidak ada manfaat tambahan dari vaksinasi BCG berulang terhadap TB atau kusta. Oleh karena itu, vaksinasi ulang tidak dianjurkan bahkan jika reaksi TST atau hasil IGRA negatif. Tidak adanya bekas luka BCG setelah vaksinasi tidak menunjukkan kurangnya perlindungan dan bukan merupakan indikasi untuk vaksinasi ulang (WHO, 2016).

2.11. Respons Imunitas Alamiah terhadap Vaksinasi BCG

2.11.1. Makrofag

Setelah inokulasi intradermal *Bacille Calmette-Guérin* (BCG), makrofag epidermal berinteraksi dengan BCG melalui beberapa reseptor *Pattern Recognition Receptors* (PRRs), termasuk reseptor komplemen 3 (CR3) dan RIG-I-like receptors (RLRs), Nod-like receptors (NLRs), C-type lectin receptors (CLRs), reseptor *Toll Like Receptors* (TLR) 2 dan 4 . Reseptor lain juga diekspresikan pada makrofag. Bagian lipid perifer dinding sel antara BCG dan *M. Tuberculosis* sangat mirip, diperkirakan kemampuannya untuk menginfeksi makrofag jaringan akan serupa. Namun, kontak pertama BCG terjadi dengan makrofag epidermal, sedangkan kontak *M. Tuberculosis* terjadi dengan makrofag alveolar (Kawasaki & Kawai, 2014; Moliva et al., 2017).

Proses yang terjadi adalah perbedaan mekanisme pengenalan Ag, pengambilan Ag, *Ag processing*, dan Ag antara dua jenis makrofag jaringan tetap tidak jelas. Efek opsonisasi serum selama vaksinasi BCG sering diabaikan, padahal proses ini dianggap penting dalam memulai respon

kekebalan terhadap vaksin BCG. Makrofag yang terinfeksi oleh faktor H opsonized BCG akan mensekresi sitokin pro-inflamasi sehingga meningkat, yang berpotensi menimbulkan respons akut (IL-6/TNF tinggi). Dengan demikian, faktorisasi opsonisasi BCG dapat merugikan sasaran utama vaksinasi BCG (untuk menghasilkan respon memori sel T yang kuat). Ini mungkin karena BCG yang opsonized terbunuh terlalu cepat, mengurangi jumlah waktu Ag untuk presentasi, dan dengan demikian berdampak negatif pada proliferasi sel T menuju ke lokasi infeksi (Moliva et al., 2017).

Stimulasi makrofag BCG *melalui* TLR2 atau TLR4 mendorong perbedaan respons pro-inflamasi, proliferasi sel T, dan sekresi IFN *secara in vitro* dan mengakibatkan perbedaan jumlah bakteri di paru-paru *in vivo*. Stimulasi Ag pada TLR2 yang berkepanjangan akan merendahkan ekspresi kompleks histokompatibilitas mayor (MHC) kelas II dan mempengaruhi pemrosesan silang MHC I -Ag, sehingga mengurangi presentasi Ag ke sel T. Seberapa jauh penekanan MHC I dan II melalui TLR2 yang akan berdampak negatif terhadap respon imun protektif yang dihasilkan oleh vaksinasi BCG dan atau terhadap infeksi *M. Tuberculosis* masih belum jelas (C. H. Liu et al., 2017; Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

Perbedaan dalam respon intraselular dan pengolahan Ag juga bisa menjelaskan kegagalan BCG untuk memberikan kekebalan jangka panjang. Faktanya, BCG, dan juga *M. Tuberculosis*, dapat menghambat pematangan fagosom dengan melibatkan reseptor spesifik, yaitu MR dan meskipun presentasi MHC Ag dan aktivasi sistem kekebalan adaptif tidak

terpengaruh, mungkin kurang optimal. Kekebalan yang disebabkan oleh vaksin BCG menghasilkan respons terhadap *M. Tuberculosis* pada fase awal infeksi yang secara langsung mempengaruhi fungsi makrofag. Interaksi reseptor antara makrofag dan bakteri sangat penting dalam memulai respons, dimana interaksi dengan reseptor makrofag yang berbeda dapat memodulasi jalur trafiking dan pemrosesan dan penyajian Ag secara berbeda (Moliva et al., 2017).

2.11.2. Sel Dendritik (DC)

Sel dendritik diklasifikasikan sebagai salah satu APC yang paling kompeten dan secara klasik digambarkan sebagai modulator cross talk antara kekebalan bawaan dan adaptif. Perbedaan fenotip dan fungsional ada antara DC dan makrofag, DC bermigrasi dari jaringan melalui sistem limfatik dan memasuki kelenjar getah bening, di mana mereka mempresentasikan Ag ke sel T naif yang menginduksi respons sel T efektor saat DC bermigrasi, mereka menjadi matang dengan mengatur molekul-molekul costimulatory MHC II dan CD80, CD86, CD40, CD40, CD86, CDG, CD40, dan CD54, yang semuanya terlibat dalam aktivasi sel kekebalan adaptif. Beberapa reseptor fagositik pada DC mengenali BCG, termasuk CR3 (CD11b / CD18), CR4 (CD11c / CD18). Dari semua reseptor ini, DC-SIGN mungkin salah satu yang paling penting karena netralisasi DC-SIGN dengan antibodi (*Ab*) menghambat interaksi BCG dengan DC sebesar 80%. Reseptor TLR2 dan TLR4 juga terlibat dalam aktivasi DC dan pematangan

oleh interaksinya dengan komponen dinding sel BCG (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

Stimulasi DC manusia dengan BCG dapat meningkatkan ekspresi permukaan MHC-II, CD40, CD44, CD54, CD80, dan CD86, semua penanda yang terlibat dalam aktivasi DC, pematangan, migrasi, dan presentasi Ag ke sel T. DC yang terinfeksi BCG juga mensekresikan TNF, IL-1 β , IL-6, IL-4, dan IL-10, namun tidak IL-12. Jumlah IL-4 disekresikan cukup besar yang menunjukkan peralihan kekebalan dari respons Th1 terhadap respons Th2, yang berpotensi mempengaruhi khasiat BCG. Namun, IFN γ terbukti berkorelasi buruk dengan perlindungan terhadap infeksi mikobakteri dan penyakit *MTB* (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

Beberapa kelompok telah meneliti pematangan DC untuk memperbaiki kekebalan BCG, dengan penelitian berpusat pada pemodelan TNF dan IL-10 yang mendominasi lapangan. TNF netralisasi menghambat inokulasi DC pasca-BCG yang menunjukkan peran penting TNF dalam kekebalan yang dihasilkan oleh BCG. Akibatnya, konsentrasi TNF yang cukup diperlukan untuk keaktifan presentasi Aging yang optimal. DC yang terinfeksi BCG juga mensekresikan IL-10 dalam jumlah banyak, tapi bukan IL-12. IL-12, bagaimanapun, sangat dinyatakan dalam IL-10 - / - tikus setelah inokulasi dengan BCG yang menunjukkan adanya keseimbangan penting antara IL-10 dan IL-12, yang dapat mengaktifkan/mempercepat pematangan DC dan melayani sebagai terapi pembawa terarah potensial. Sel utama respon innate/ bawaan adalah monosit, makrofag, neutrophil,

dan sel dendritic. Berbagai tipe reseptor yang ditunjukkan TLR, Toll-like receptors; RIG-I-like receptors (RLRs), Nod-like receptors (NLRs), C-type lectin receptors (CLRs), MR, mannose receptor; FcγR, Fcγ receptor; CR3, complement receptor (Kawasaki & Kawai, 2014; Moliva et al., 2017).

2.11.3. Neutrofil

Neutrofil manusia berikulasi terdiri dari kira-kira 60% sel darah, memiliki waktu paruh pendek 6-10 jam, dan merupakan salah satu sel pertama yang merespons molekul asing. Neutrofil mengeluarkan sejumlah besar kemokin dan sitokin, priming fagosit berumur panjang. Bagaimana perubahan fenotipe neutrofil saat kontak dengan BCG dapat mempengaruhi pembangkitan kekebalan pelindung terhadap MTB masih belum jelas (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

Neutrofil mampu mengarahkan BCG hidup melalui sistem limfatik menjadi DLN dan memasuki sekitar sel DC dan T, komunikasi silang antara neutrophil dan DC yang terinfeksi BCG di lokasi ini memberikan sinyal pematangan ke DC yang belum menghasilkan dan juga membantu DC dalam presentasi BCG Ag ke sel CD4⁺ dan CD8⁺ T.

Selain itu, BCG yang lebih lama tetap berada di dalam neutrofil meningkatkan probabilitas bakteri akan dibunuh oleh mekanisme intraseluler neutrofil, yang mungkin meningkatkan jalur yang terlibat dalam aktivasi kekebalan melalui presentasi Ag (Moliva et al., 2017).

Dengan demikian, neutrofil dapat berperilaku sebagai pedang bermata dua; di satu sisi, mereka tampaknya memfasilitasi presentasi Ag

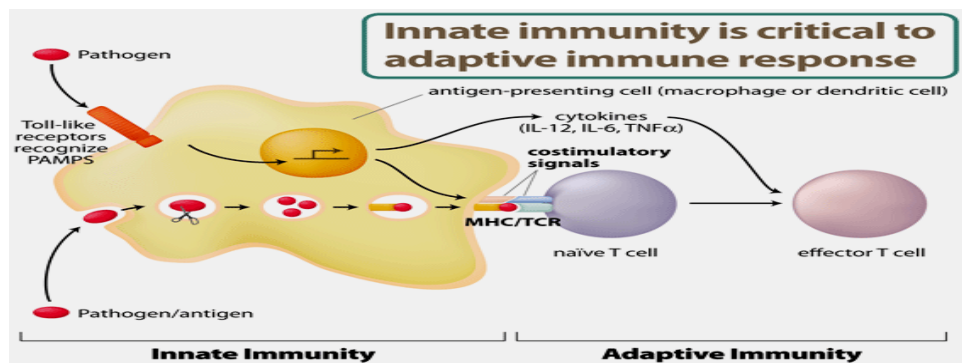
dengan membolak basil hidup ke sekitar DC, namun di sisi lain, mereka mungkin bertanggung jawab untuk mencegah pengembangan imunitas jangka panjang. Keseimbangan antara kelangsungan hidup intraselular BCG dan / atau pencernaan, pengolahan, dan penyajian oleh neutrofil dapat mempengaruhi pematangan DC, respons imun adaptif berikutnya (membatasi ekspansi kloner limfosit efektor Ag spesifik), dan pembentukan negara jangka panjang dari kekebalan (Mayer-Barber & Barber, 2015).

Sebaliknya, neutrofil juga dapat mengarahkan aktivasi sel T ke kelenjar getah bening, dan dengan demikian berpartisipasi dalam respons imun adaptif. Studi terbaru tentang BCG menunjukkan bahwa neutrofil mengatur peradangan melalui sekresi IL-10, yang mengganggu kontrol pertumbuhan MTB selama infeksi kronis. Neutrofil memasuki jaringan lebih cepat dibandingkan sel inang lainnya, mereka bisa menjadi mediator penting dalam pembersihan atau persistensi mikobakteri. Secara keseluruhan, neutrofil dapat memiliki berbagai efek dalam konteks vaksinasi BCG. Di satu sisi, mereka dapat membantu memfasilitasi respons imun adaptif dengan membantu penyajian Ag dan menularkan bakteri hidup ke sekitar APC profesional, namun di sisi lain, kehadiran dan kecenderungan mereka untuk menginduksi respons inflamasi yang kuat dapat merusak jaringan di mana mereka berada (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

2.12. Respon Imun Adaptif

2.12.1. T Limfosit

Respon sel T muncul secara paralel melalui keterlibatan reseptor T dengan Ag asing yang dipresentasikan oleh sel *Ag-presenting*. Dengan sedikit pengecualian, semua vaksin merangsang proliferasi sel CD4⁺ helper T (T_h) dan CD8⁺ sel T sitotoksik (T_c). Dalam konteks kekebalan BCG, sel T pembantu terutama berdiferensiasi menjadi dua kelas sel efektor yang berbeda selama respon imun terhadap vaksinasi: Sel Th1 yang diidentifikasi oleh produksi sel IFN γ , dan Th17 yang diidentifikasi oleh produksi IL-17A, meskipun IL-4 menghasilkan sel T_h 2 juga dapat dihasilkan. Subset sel lainnya seperti sel T regulatory cell (T_{reg}) dan CD1-restricted T juga muncul setelah vaksinasi BCG, walaupun pada tingkat yang lebih rendah. BCG juga menginduksi sel T sitotoksik, yang fungsinya berfungsi untuk melindungi sel yang terinfeksi melalui gangguan osmotik (Mayer-Barber & Barber, 2015).



Gambar 2.7 Peran TLR pada Imunitas bawaan

Keterangan: Pada imunitas alami, patogen dikenali TLR, menimbulkan signaling dalam sel dan mempengaruhi ekspresi sitokin. Patogen juga dapat diekspresikan makrofag dalam MHC dan menimbulkan imunitas adaptif.

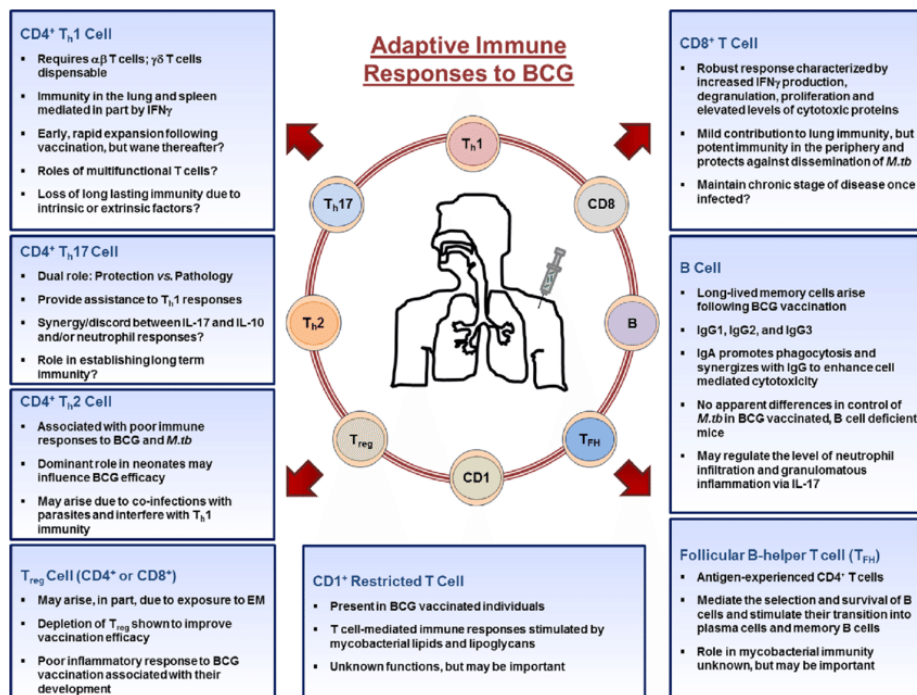
2.12.2. Sel CD4⁺ dan CD8⁺

Penelitian pada tikus yang menunjukkan reseptor sel T α / β yang ditunjukkan oleh sel CD4⁺ dan CD8⁺ T dan, MHC I dan II diperlukan untuk mengendalikan infeksi mikobakteri, yang menyoroti respons sel T yang dominan terhadap BCG. Kekebalan sel T mediator protektif dihasilkan oleh BCG. Pengalihan sel CD4⁺ atau CD8⁺ T dari tikus yang divaksinasi BCG ke dalam tikus model *in vivo* yang kekurangan sel B dan T, menunjukkan bahwa sel CD4⁺ T diperlukan untuk mengurangi beban bakteri di paru-paru dan limpa, sedangkan sel CD8⁺ T mengendalikan beban bakteri hanya di limpa. Hasil ini melibatkan sel CD4⁺ T sebagai sel efektor utama yang dihasilkan oleh BCG di paru-paru, dan juga menunjukkan pentingnya sel CD8⁺ T dalam mencegah diseminasi, yang berpotensi menjadikannya sel efektor utama yang bertanggung jawab untuk mencegah TB milier dan meningitis TB (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

Data ini menunjukkan bahwa BCG dapat merangsang sel CD4⁺ dan CD8⁺ T yang protektif dan juga menyarankan agar sel CD4⁺ tidak seefisien sel CD8⁺ sel T ketika harus membersihkan infeksi mikobakteri spesifik jaringan, atau patogen itu sendiri karena MTB memiliki banyak faktor virulensi yang tidak ada pada BCG yang dapat digunakan untuk menghambat CD4⁺, namun bukan tanggapan sel T CD8⁺ (Moliva et al., 2017).

Salah satu mekanisme lain adalah kemampuan sel CD8⁺ T untuk menginduksi apoptosis sel *melalui* jalur FasL-Fas, dimana sel CD8⁺ T melumasi sel target yang mengekspresikan Fas. Dengan menginduksi

apoptosis sel yang terinfeksi, sel kekebalan bawaan sehat lainnya dapat melakukan fagositosis pada tubuh apoptosis yang dihasilkan dan selanjutnya merangsang sel dari sistem kekebalan adaptif. Kemampuan CD8+ T untuk menginduksi jalur FasL-Fas di dalam limpa atau hati, sedangkan apoptosis sel di paru sangat terbatas untuk mencegah kerusakan jaringan yang berlebihan dapat menyebabkan kegagalan paru (Mayer-Barber & Barber, 2015; Moliva et al., 2017).

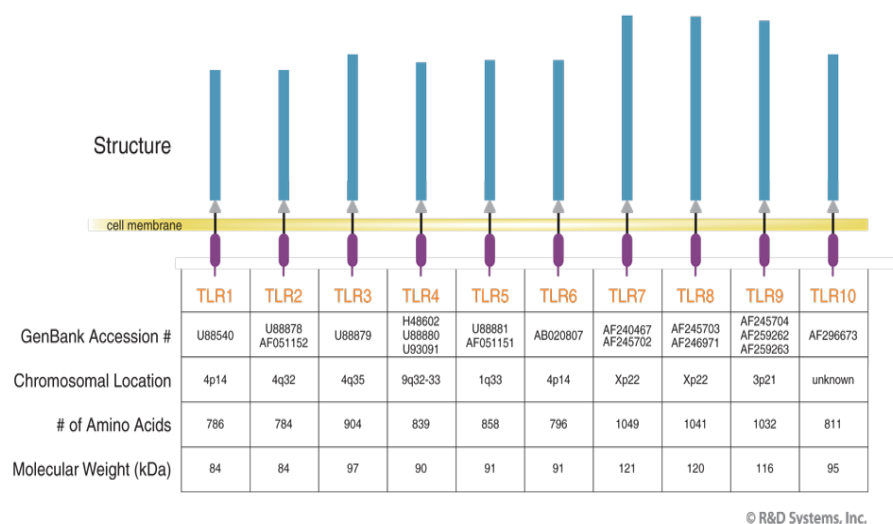


Gambar 2.8 Respon sel imun adaptif terhadap vaksinasi BCG

2.13. Toll Like Receptor (TLR)

Mamalia memiliki beberapa kelas PRR yang berbeda ada 10 TLR, 23 Node Like Receptors (NLR) , dan 3 RLR telah diidentifikasi pada manusia hingga saat ini, dengan hanya sebagian dari anggota keluarga

NLR (NOD1, NOD2, NALP1, NALP3, IPAF) dan rig like receptors (RLR) RLR (RIG-1, MDA5). Reseptor lain seperti AIM2 (ALR), reseptor lektin tipe-C (CLR), dan sensor DNA intraseluler seperti cGAS. TLR adalah yang pertama diidentifikasi, terdiri dari 10 anggota (TLR1–TLR10) pada manusia dan 12 (TLR1–TLR9, TLR11–TLR13) pada tikus. TLR sebagian besar diklasifikasikan menjadi dua subfamili berdasarkan lokalisasinya, TLR permukaan sel dan TLR intraseluler. TLR permukaan sel termasuk TLR1, TLR2, TLR4, TLR5, TLR6, dan TLR10, sedangkan TLR intraseluler terlokalisasi di endosom dan termasuk TLR3, TLR7, TLR8, TLR9, TLR11, TLR12, dan TLR13 diekspresikan dalam membran sel. kompartemen endolisosomal dan mengenali asam nukleat asing (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016; R&D Systems, 2021).



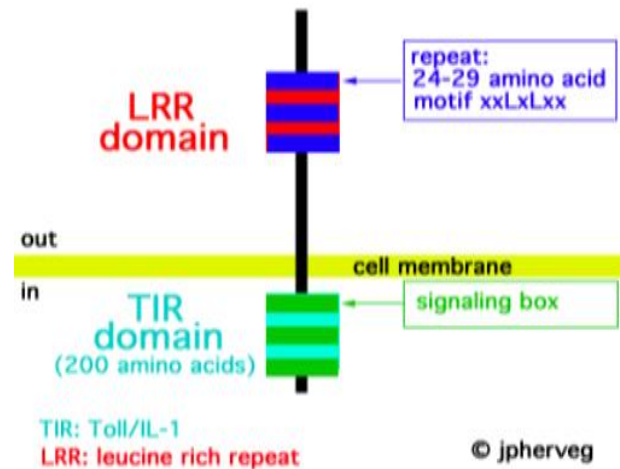
Gambar 2.9 Struktur protein Toll-like reseptor (TLR)

Keretangan: Semua TLR adalah protein transmembran Tipe I yang memiliki sejumlah variabel N-terminal leucine rich repeats (LRRs) diikuti oleh domain kaya sistein, domain transmembran (TM), dan domain reseptor Toll/IL-1 (TIR) intraseluler. Variasi jumlah asam amino dan berat molekul dari TLR

yang berbeda paling signifikan disumbangkan oleh perbedaan jumlah LRR. Nomor Akses Bank Gen dan lokasi kromosom untuk masing-masing TLR juga diberikan (R&D Systems, 2021).

Semua TLR disintesis di RE, lalu lintas ke Golgi, dan direkrut ke permukaan sel atau ke kompartemen intraseluler seperti endosom. Lokalisasi intraseluler TLR dianggap penting untuk pengenalan ligan serta untuk mencegah TLR bersentuhan dengan asam nukleat sendiri, yang dapat menyebabkan autoimunitas. Struktur TLR dan variasi jumlah asam amino menentukan jenisnya. (Gambar 2.5)

TLR melokalisasi ke permukaan sel atau ke kompartemen intraseluler seperti ER, endosom, lisosom, atau endolisosom, dan mereka mengenali PAMP yang berbeda atau tumpang tindih seperti lipid, lipoprotein, protein, dan asam nukleat. Setiap TLR terdiri dari ektodomain dengan Leusin rich repeat (LRR) yang memediasi pengenalan PAMP, domain transmembran, dan domain reseptor Toll/IL-1 sitoplasma (TIR) yang memulai pensinyalan hilir. Ektodomain menampilkan struktur seperti tapal kuda, dan TLR berinteraksi dengan PAMP atau DAMP masing-masing sebagai homo atau heterodimer bersama dengan ko-reseptor atau molekul aksesori (Gambar 2.6) (Akira et al., 2000; R&D Systems, 2021).



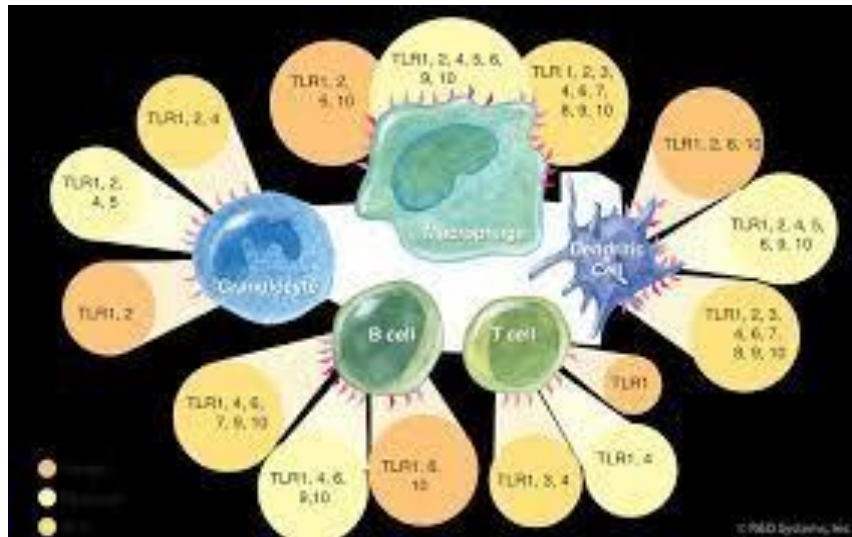
Gambar 2.10 Struktur molekul TLR

Keterangan: Struktur molekul TLR terdiri dari region ekstraseluler (LRR) yang kaya leucine terdiri 24-29 asam amino dan region intraseluler yang disebut TIR terdiri 200 asam amino (Akira et al., 2000).

Molekul yang mengandung PAMP akan bertindak sebagai ligan untuk memicu jalur pensinyalan intraseluler yang bergantung pada PRR yang pada akhirnya menginduksi ekspresi sitokin pro-inflamasi dan antivirus.

Sekresi sitokin ini di tempat infeksi mendorong perekrutan neutrofil dan sel pembunuh alami (NK), yang menghilangkan mikroba patogen dan sel yang terinfeksi. Reseptor seperti tol (TLR) adalah keluarga reseptor pengenalan pola transmembran tipe I (PRR) yang diekspresikan oleh sejumlah tipe sel imun dan non-imun yang berbeda termasuk monosit, makrofag, sel dendritik, neutrofil, sel B, sel T dan sel non imun seperti keratinosit, fibroblas, sel endotel, dan sel epitel. (Gambar 2.6) TLR mengenali pola molekuler terkait patogen (patogen-associated molecular pattern/PAMPs) yang dilestarikan dalam bakteri, jamur, protozoa, atau protein virus, asam nukleat, lipid, atau karbohidrat dan memulai respons

imun bawaan dan adaptif (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; R&D Systems, 2021).



Gambar 2.11 Toll-like receptor (TLR) pola ekspresi leukosit dan kekhususan PAMP

Keterangan: Setiap TLR diekspresikan pada subset leukosit yang berbeda dan masing-masing TLR mendeteksi subset patogen yang berbeda Mini Review Toll Like Receptors (R&D Systems, 2021).

2.13.1. Spesifik Ligan TLR

TLR permukaan sel terutama mengenali komponen membran mikroba seperti lipid, lipoprotein, dan protein. (Tabel 2.1) TLR3 mengenali RNA untai ganda virus (dsRNA), dan RNA diri yang berasal dari sel yang rusak. TLR4 mengenali lipopolisakarida bakteri (LPS). TLR5 dan flagellin, TLR2 bersama dengan TLR1 atau TLR6 mengenali berbagai macam PAMP termasuk lipoprotein, peptidoglikan, asam lipotechoic, zymosan, mannan, dan tGPI-musin. TLR5 mengenali flagelin bakteri. TLR7 sebagian besar diekspresikan dalam plasmacytoid DCs (pDCs) dan mengenali RNA rantai tunggal (ss) dari virus. Ia juga mengenali RNA dari bakteri streptokokus B

di DC konvensional (cDC). TLR8 manusia merespons RNA virus dan bakteri. TLR9 dan asam nukleat tertentu. TLR13 mengenali bakteri 23S rRNA dan komponen yang tidak diketahui dari virus stomatitis vesikular. TLR9 mengenali DNA bakteri dan virus yang kaya akan motif CpG-DNA yang tidak termetilasi; ia juga mengenali hemozoin, produk sampingan kristal yang tidak larut yang dihasilkan oleh *Plasmodium falciparum* selama proses detoksifikasi setelah hemoglobin inang dicerna. TLR10 adalah pseudogen pada tikus karena penyisipan kodon stop, tetapi TLR10 manusia bekerja sama dengan TLR2 untuk mengenali ligan dari listeria, TLR10 juga dapat merasakan infeksi virus influenza A. TLR11 terlokalisasi dalam endolisosom dan mengenali flagelin, atau komponen protein yang tidak diketahui dari uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC) serta molekul mirip profilin yang diturunkan dari *Toxoplasma gondii*. TLR12 sebagian besar diekspresikan dalam sel myeloid dan sangat mirip dengan TLR11 dan mengenali profilin dari *T. gondii*. TLR12 berfungsi baik sebagai homodimer atau heterodimer dengan TLR11. Protein transmembran multi-pass UNC93B1 mengontrol perdagangan TLR intraseluler dari ER ke endosom. mengatur aktivasi TLR7 yang berlebihan dengan menggunakan TLR9 untuk melawan TLR7. Dengan demikian, mengoptimalkan keseimbangan antara TLR7 dan TLR9 adalah mekanisme potensial untuk mengatur autoimunitas (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

Tabel 2.8 PRRs, Lokalisasi dan Ligandnya (Yumoto et al., 2018)

PRRs	Localization	Ligand	Origin of the ligand	
TLR	TLR1	Plasma membrane	Triacyl lipoprotein	Bacteria
	TLR2	Plasma membrane	Lipoprotein HMGB1	Bacteria, viruses, parasites, self (DAMPs)
	TLR3	Endolysosome	dsRNA, PolyI:C	Virus
	TLR4	Plasma membrane	LPS, Lipid A HMGB1	Bacteria, viruses, self (DAMPs)
	TLR5	Plasma membrane	Flagellin	Bacteria
	TLR6	Plasma membrane	Diacyl lipoprotein	Bacteria, viruses
	TLR7/8	Endolysosome	ssRNA, imiquimod, imidazoquinoline, loxoribine, R-848	Bacteria, viruses, self (DAMPs)
	TLR9	Endolysosome	CpG-DNA	Bacteria, virus, protozoa, self (DAMPs)
	TLR10	Endolysosome	Unknown	Unknown
	TLR11	Plasma membrane	Profilin-like molecule	Protozoa
	NLR	NOD1	Cytoplasm	iE-DAP
NOD2		Cytoplasm	MDP	Bacteria
NLRC3				
NLRC4		Cytoplasm	Flagellin	
NLRC5		Cytoplasm		
CLR	Dectin-1	Plasma membrane	β -Glucan	Fungi
	Dectin-2	Plasma membrane	α -Mannan	Fungi
	MINCLE	Plasma membrane	TDM, SAP130	Fungi, self (DAMPs)
RLR	RIG-I	Cytoplasm	Short dsRNA, 5' triphosphate dsRNA	RNA, Viruses, DNA virus
	MDA5	Cytoplasm	Long dsRNA	RNA viruses
	LGP2	Cytoplasm	Unknown	RNA viruses
NLRP	NLRP1-14 NLRP3	Cytoplasm	Silica, asbestos, ATP, uric acid, beta-amyloid, cholesterol crystal	

2.13.2. Kaskade Sinyal TLR

Setelah pengenalan PAMP dan DAMP, TLR di permukaan sel atau di intraseluler akan merekrut protein adaptor yang mengandung domain TIR untuk memulai jalur transduksi sinyal yang berujung pada ekspresi sitokin, kemokin, pro-inflamasi yang bergantung pada NF-kappa B dan AP-1, dan ekspresi interferon tipe I dan tipe III yang bergantung pada IRF3-/IRF7 pada akhirnya melindungi inang dari infeksi mikroba. Aktifasi TLR yang terikat ligannya diatur oleh molekul regulator TLR (MD2 dan CD14) dilanjutkan

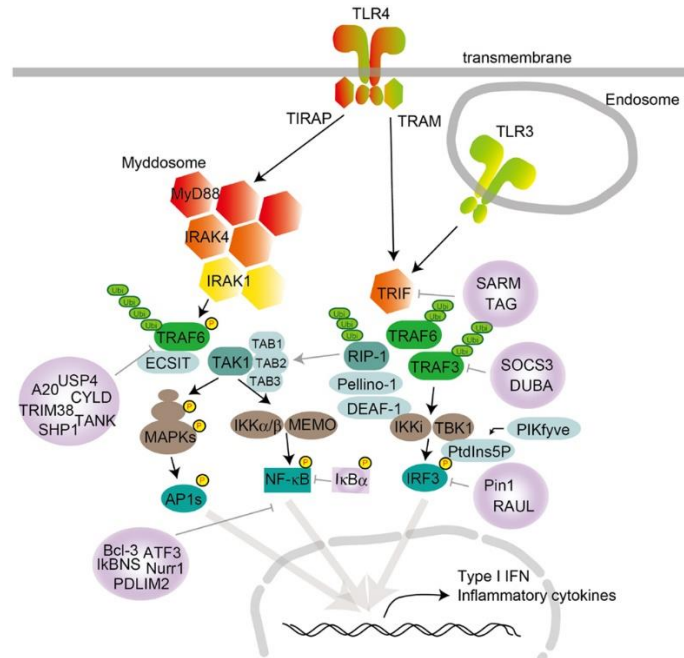
dengan molekul sinyal TLR, sebagai molekul adaptor hingga terjadi kaskade pensinyalan dan berlanjut transkripsi sinyal.

2.13.2.1. Pensinyalan TLR Permukaan Sel

Jalur pensinyalan di hilir diaktifkan dengan pembentukan kompleks misalnya kompleks TLR4-MD2-LPS yang akan menginisiasi transduksi kaskade sinyal mulai dengan merekrut molekul adaptor intraseluler yang berikatan dengan domain TIR. (Gambar 2.8) Ada 5 molekul adaptor seperti faktor diferensiasi Myeloid 88 (MyD88), protein adaptor inducing interferon (TRIF) terkait TIR, adaptor terkait TRIF molekul (TRAM), domain TIR yang mengandung protein adaptor (TIRAP) atau adaptor seperti MyD88 (MAL), dan Protein yang mengandung motif alfa dan Armadillo (SARM) (Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

MyD88 digunakan oleh semua TLR dan mengaktifkan NF- κ B dan MAPK untuk menginduksi gen sitokin inflamasi. TIRAP adalah adaptor yang merekrut MyD88 ke TLR permukaan seperti TLR2 dan TLR4. Namun, penelitian terbaru menunjukkan bahwa TIRAP juga berpartisipasi dalam pensinyalan melalui TLR endosom seperti TLR9. Domain pengikat lipid TIRAP mengikat PI, P2 pada membran plasma dan PIP pada endosom, yang memediasi pembentukan kompleks pensinyalan TLR4 dan TLR9 fungsional di lokasi masing-masing. Dengan demikian, TIRAP berasosiasi dengan permukaan sel dan TLR endosom dengan mengikat lipid yang berbeda. Secara umum terkait penggunaan adaptor, pensinyalan TLR sebagian besar dibagi menjadi dua jalur: jalur yang bergantung pada

MyD88 dan jalur yang bergantung pada TRIF, baik TLR permukaan sel maupun TLR intrasel (Kawasaki & Kawai, 2014):



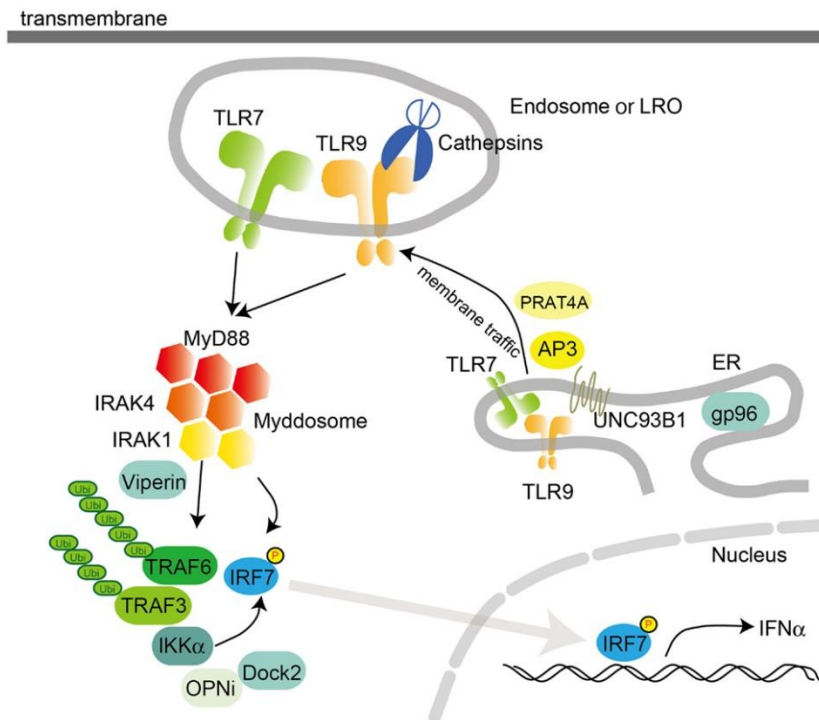
Gambar 2.12 Pensinyalan TLR permukaan sel dalam cDC, makrofag, dan MEF transmembran

Keterangan: TLR4 melokalisasi ke permukaan sel, dan TLR3 melokalisasi di kompartemen endosom. Pembentukan homo atau heterodimer memulai pensinyalan ke dua protein adaptor hilir utama, MyD88 dan TRIF. TIRAP menghantarkan sinyal dari TLR4 ke MyD88, dan TRAM memediasi sinyal dari TLR4 ke TRIF. Keterlibatan TLR menginduksi pembentukan Myddosome, yang didasarkan pada MyD88 dan juga mengandung IRAK1 dan IRAK4. Aktivasi IRAK1 menginduksi aktivasi TRAF6 setelah poliubiquitinasi terkait K63 pada TRAF6 itu sendiri dan TAK1. Aktivasi TAK1 mengarah pada aktivasi kompleks IKK-NF- κ B dan MAPK. Aktivasi MAPK mengarah ke aktivasi faktor transkripsi AP1s. TRAF6 mempromosikan ubiquitinasi ECSIT, menghasilkan peningkatan generasi ROS mitokondria dan seluler. Keterlibatan TLR juga menginduksi aktivasi TRIF setelah perekrutan TRAF6 dan TRAF3. TRAF6 merekrut RIP-1, yang mengaktifkan kompleks TAK1 setelah aktivasi MAPK. Aktivasi RIP-1 mengatur ubiquitinasi oleh Pellino-1. Pellino-1 mengatur aktivasi IRF3 dengan mengikat DEAF-1. TRAF3 merekrut TBK1 dan IKKi untuk fosforilasi IRF3. PtdIns5P dari PIKfyve memfasilitasi pembentukan kompleks antara TBK1 dan IRF3. Beberapa regulator negatif memodulasi pensinyalan TLR, dengan menghambat pembentukan kompleks pensinyalan atau ubiquitinasi. MyD88 ditekan oleh ST2825, NRDP-1, SOCS1, dan Cbl-b; TRIF ditekan oleh SARM dan TAG; TRAF3 ditekan oleh SOCS3 dan DUBA;

dan TRAF6 ditekan oleh A20, USP4, CYLD, TANK, TRIM38, dan SHP. NF- κ B ditekan oleh Bcl-3, I κ BNS, Nurr1, ATF3, dan PDLIM2, sedangkan aktivasi IRF3 diatur secara negatif oleh Pin1 dan RAUL.

2.13.2.2. Pensinyalan TLR Intrasel

Plasmacytoid DC (pDC) adalah subset dari DC dengan kapasitas untuk mensekresi IFN tipe I dalam jumlah besar sebagai respons terhadap infeksi virus (Gambar 2.5) Dalam pDC, TLR7 dan TLR9 masing-masing berfungsi sebagai sensor utama untuk virus RNA dan DNA. Produksi IFN tipe I oleh pDC bergantung pada kompleks yang mengandung MyD88 dan IRF7. Kompleks ini juga berisi TRAF3, TRAF6, IRAK4, IRAK1, IKK α , OPN β , dan Dock2. Di dalam kompleks ini, IRF7 difosforilasi oleh IRAK1 dan/atau IKK α dan ditranslokasikan ke dalam nukleus untuk mengatur ekspresi IFN tipe I. Selain itu, kompleks MyD88-IRAK4-TRAF6 mendorong induksi sitokin inflamasi yang bergantung pada NF- κ B. Sinyal TLR9 melalui kompartemen seluler berbeda yang menginduksi baik MyD88-IRF7-dependent type I IFN atau MyD88-NF- κ B-dependent inflammatory cytokines. AP3 telah terbukti mengikat TLR9 dan mengontrol perpindahan TLR9 ke LRO, dan diperlukan untuk induksi IFN tipe I. Kompartemen intraseluler yang memulai induksi IFN tipe I oleh IC DNA-antibodi diatur oleh jalur autophagy (Kawasaki & Kawai, 2014).



Gambar 2.13 Pensinyalan TLR intraseluler dan perpindahan pDC

Keterangan: Aktivasi TLR7 atau TLR9 di pDC merekrut MyD88 setelah perekrutan IRAK4. Kompleks MyD88 juga berisi TRAF3, TRAF6, IRAK4, IRAK1, IKK α , OPNi, dan Dock2. MyD88 secara langsung atau tidak langsung merekrut IRF7 untuk difosforilasi oleh IKK α dan/atau IRAK1. Lokalisasi TLR7 dan 9 dikendalikan oleh UNC93B1, PRAT4A, dan AP3, perpindahan TLR dari ER ke endosom atau organel terkait lisosom (LRO). Dalam endosom, TLR diubah menjadi bentuk matangnya oleh cathepsin, yang membelah LRR di ektodomain. pDC menggunakan jalur pensinyalan yang berbeda dari yang ada di cDC atau makrofag untuk menginduksi sintesis sejumlah besar IFN tipe I. gp96 bagian dari heat shock protein 90 family berfungsi secara umum

2.13.3. Jenis-Jenis TLR

2.13.3.1. Toll Like Receptor (TLR)1

TLR1 memetakan ke kromosom 4p14 dan urutannya mengkodekan protein asam amino (aa) 786 diduga dengan 18 N-terminal LRR dan berat molekul terhitung 84 kDa. TLR1 paling dekat hubungannya dengan TLR6 dan TLR10 dengan 68% dan 48% keseluruhan identitas urutan aa, masing-masing. (Gambar 2.5) (R&D Systems, 2021)

In vivo, dua transkrip berukuran berbeda untuk TLR1 diamati menunjukkan bahwa mRNA secara alternatif disambung untuk menghasilkan dua bentuk protein yang berbeda. TLR1 mRNA diekspresikan di mana-mana dan ditemukan pada tingkat yang lebih tinggi daripada TLR lainnya. Dari populasi leukosit utama, TLR1 paling banyak diekspresikan oleh monosit, tetapi juga diekspresikan oleh makrofag, sel dendritik (DC), leukosit polimorfonuklear, B, T, dan sel NK (Gambar 2.6). Ex vivo, ekspresi TLR1 monosit dan granulosit diturunkan regulasinya setelah terpapar bakteri Gram-negatif (R&D Systems, 2021).

TLR1 membentuk heterodimer dengan TLR2 (seperti yang lain TLR, lihat di bawah). Sementara signifikansi heterodimerisasi TLR tidak dipahami dengan jelas, diperkirakan bahwa beberapa TLR, seperti TLR1, berfungsi untuk menentukan atau meningkatkan sensitivitas PAMP dari TLR2. Namun, ada bukti bahwa TLR2 mungkin tidak memberi sinyal sebagai homodimer dan bahwa TLR1 dalam hal ini diperlukan untuk fungsionalitas hilir. TLR1 juga mengalami heterodimerisasi dengan TLR4, bukan untuk meningkatkan fungsinya, melainkan untuk menghambat aktivitas TLR4 (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014).

2.13.3.2. Toll Like Receptor (TLR)6

TLR6 memetakan ke kromosom 4p14.12 Urutan TLR6 mengkodekan protein 796 aa yang mengandung 20 motif LRR terminal-N dengan berat molekul terhitung 91 kDa . TLR6 paling dekat hubungannya dengan TLR1,

TLR10, dan TLR2 dengan 68%, 46%, dan 31% keseluruhan identitas urutan aa, masing-masing (Gambar 2.5) (R&D Systems, 2021).

In vivo, transkrip TLR6 diamati di timus, limpa, dan paru-paru. Ekspresi mRNA TLR6 paling tinggi pada sel B dan monosit. (Gambar 2.6) Ex vivo, monosit dan, khususnya, ekspresi TLR6 granulosit diturunkan regulasinya saat terpapar bakteri Gram-negatif (R&D Systems, 2021). TLR6 membentuk heterodimer dengan TLR2. Seperti TLR1, TLR6 diperkirakan menentukan atau meningkatkan sensitivitas PAMP dari TLR2 dan berkontribusi pada kemampuan pensinyalannya melalui heterodimerisasi (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

2.13.3.3. Toll Like Receptor (TLR)2

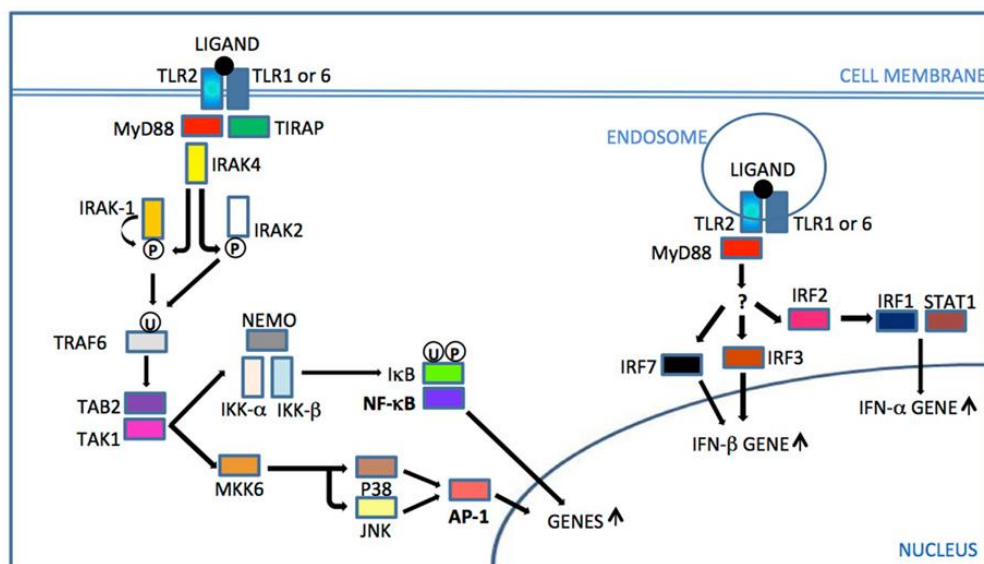
TLR2 memetakan ke kromosom 4q31-32 dan mengkodekan protein 784 aa diduga dengan 19 LLR terminal-N dan berat molekul terhitung 84kDa. TLR2 paling dekat hubungannya dengan TLR6 dengan 31% keseluruhan identitas urutan aa (Gambar 2.5). In vivo, dua transkrip berukuran berbeda untuk TLR2 diamati menunjukkan bahwa mRNA disambung secara alternatif. Ekspresi mRNA TLR2 diamati di jaringan otak, jantung, paru-paru, dan limpa dan tertinggi pada PBL, khususnya yang berasal dari myelomonocytic. Ex vivo, peningkatan ekspresi TLR2 dalam monosit dan granulosit pada paparan bakteri Gram-negatif hanya sangat sedikit. (Gambar 2.6) (R&D Systems, 2021)

TLR2 membentuk heterodimer dengan koreseptornya, yang meningkatkan keragaman molekul yang dikenali oleh reseptor. Kompleks ligan baru baru saja diusulkan untuk aktivasi oleh ligan diasilgliserol, termasuk lipopeptida: CD36 dapat mengikat ligan dan mentransfernya ke molekul aksesori CD14, yang, pada gilirannya, memuat ligan ke heterodimer TLR2/TLR6 (FSL-1, MALP-2, dan LTA) atau pada heterodimer TLR2/TLR1 (lipomannan) Ektodomain CD14 dan CD36 adalah bagian reseptor aktif untuk pengiriman ligan peran molekul ini adalah untuk meningkatkan respons, menurunkan ambang batas konsentrasi diperlukan untuk pengenalan dan pensinyalan reseptor (de Oliviera Nascimento et al., 2012).

TLR2 membentuk heterodimer dengan TLR1, TLR6, dan mungkin TLR10, di mana setiap kompleks sangat sensitif terhadap himpunan bagian dari PAMP terkait TLR2. Kompleks TLR2 mengenali berbagai PAMP, kebanyakan dari bakteri. Ini termasuk lipoarabinomannan (LAM), lipopolisakarida (LPS), asam lipoteichoic (LTA), peptidoglikan (PGN), dan glikolipid, glikoprotein, dan lipoprotein lainnya. Kompleks TLR2 juga mampu mendeteksi virus, termasuk virus campak (MV), human cytomegalovirus (HCMV), dan virus hepatitis C (HCV) dan PAMP jamur, termasuk zymosan. Studi terbaru menunjukkan bahwa, seperti TLR4, kompleks TLR2 memerlukan CD14 untuk mendeteksi PAMP dan/atau pensinyalan (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014).

Selain deteksi pola non-diri, kompleks TLR2 juga mampu mendeteksi pola diri yang berubah, seperti yang ditampilkan oleh sel nekrotik. Lebih lanjut, bukti terbaru menunjukkan bahwa TLR2 direkrut ke fagosom dan mungkin terlibat langsung dalam internalisasi produk mikroba oleh sel (Mukherjee et al., 2016).

TLR2 membentuk heterodimer berbentuk m dengan TLR1 atau TLR6 untuk mengenali lipopeptida tri- atau di-asilasi masing-masing dari patogen (bakteri Gram-negatif, mikoplasma, dll.). Dari tiga rantai lipid ligan triterasilasi (lipopeptida misalnya Pam3CSK4), dua berinteraksi dengan TLR2 dalam heterodimer TLR2-TLR1 sedangkan rantai ketiga menempati bagian yang hidrofobik TLR1. Tidak adanya bagian hidrofobik di TLR6, heterodimer TLR2-TLR6 tidak dapat mengenali lipopeptida triasilasi.



Gambar 2.14 Pensinyalan TLR2 (de Oliveira Nascimento et al., 2012)
Keterangan: Setelah pengenalan ligan dan penataan ulang dimer TLR2 konsekuen, domain TIR dari TIRAP mengikat domain TIR dari TLR2 dan merekrut protein adaptor MyD88. IRAK kemudian direkrut dan IRAK 4 memfosforilasi (P) IRAK1, yang kemudian memulai auto-fosforilasi. IRAK1 terfosforilasi terdisosiasi dari kompleks dan mengaktifkan TRAF6. Karena

IRAK1 terdegradasi dengan cepat, IRAK2 juga mengaktifkan TRAF 6 dalam respons terakhir. Ubiquitinated (U) TRAF6 memicu urutan aktivasi kompleks TAB2 – TAK1 – IKK. Fosforilasi I κ B dan ubiquitinasi oleh kompleks IKK menyebabkan degradasi dan pelepasan translokasi NF- κ B ke nukleus untuk peningkatan regulasi gen. TAK1 juga mengaktifkan MKK6 untuk aktivasi JNK dan p38 berikutnya, yang mengarah ke aktivasi AP-1 yang memicu transkripsi gen sitokin dan molekul aksesori. Kompleks reseptor yang terinternalisasi yang dipicu oleh ligan virus dapat diaktifkan oleh jalur yang tidak diketahui IRF7/3 ke up-regulation gen IFN- β atau IRF2/IRF1/STAT1 untuk up-regulation gen IFN- α MyD88, gen respons primer diferensiasi myeloid 88; TIRAP, protein adaptor TIR; IRAK, kinase terkait reseptor interleukin-1; TRAF, faktor terkait reseptor TNF; TAK, mengubah faktor pertumbuhan beta-activated kinase 1; TAB, protein pengikat TAK1; MKK/JNK/P38, MAP kinase, NEMO/IKKs, kompleks kinase; NF- κ B, faktor nukleus- κ B; I κ B, kompleks kinase; AP, protein penggerak; IRF, faktor pengatur interferon, STAT, transduser sinyal dan aktivator transkripsi 1.

Nemo: nukleus factor kappa b essential modulator IRAK interleukin 1 reseptor associated kinase

Jadi TLR2 terlibat dalam pengenalan suatu berbagai PAMP berasal dari bakteri, jamur, parasit dan juga virus. TLR2, bersama dengan koreseptornya, TLR1 dan TLR6, memerlukan internalisasi untuk memicu aktivasi NF- κ B sebagai respons terhadap asam Lipoteichoic (LTA) dan Pam3CSK4 yang menyediakan mekanisme penerimaan baru tentang bagaimana TLR mengoordinasikan pengenalan ligan dan pemicu berikutnya dari sinyal tertentu. Meskipun ekspresi TLR2 pada permukaan sel, ligan TLR2 bakteri yaitu Pam3CSK4 dan LTA dapat menginduksi pensinyalan yang bergantung pada NF- κ B dari kompartemen endosom yang dilaporkan untuk monosit manusia dan untuk garis sel reporter yang sensitif terhadap NF- κ B (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

2.13.3.4. Toll Like Receptor (TLR)4

TLR4 memetakan ke kromosom 9q32-33. Ini menunjukkan tingkat kemiripan yang tinggi dengan dToll di seluruh urutan aa. Urutan TLR4 mengkodekan protein 839 aa dengan 22 wilayah LRR terminal-N dan berat molekul terhitung 90 kDa (Gambar 1) 9, 10, 18 TLR4 paling dekat hubungannya dengan TLR1 dan TLR6 masing-masing dengan 25% identitas urutan aa keseluruhan (Gambar 2.5). In vivo, TLR4 mRNA diekspresikan sebagai transkrip tunggal, dan ditemukan pada tertinggi di limpa dan Perifer Blood Lecocytes, TLR4 diekspresikan oleh sel B, DC, monosit, makrofag, granulosit, dan sel T. Laporan lain menunjukkan bahwa TLR4 hanya diekspresikan dalam sel myelomonocytic dan tertinggi dalam sel mononuklear Ex vivo, ekspresi TLR4 pada monosit diregulasi setelah terpapar bakteri Gram-negatif (Gambar 2.6) (Kawasaki & Kawai, 2014; R&D Systems, 2021).

TLR4 membentuk homodimer dan membutuhkan asosiasi ekstraseluler dari komponen tambahan, MD-2. Meskipun kompleks TLR2 mampu mengenali LPS, TLR4 umumnya dianggap sebagai reseptor LPS. Namun, homodimer TLR4 terkait MD-2 tidak mengikat LPS secara langsung. LPS pertama-tama harus diikat oleh protein pengikat LPS terlarut LPS binding protein (LBP). LBP kemudian diikat oleh CD14 terlarut atau terkait-GPI (glycosylphosphatidylinositols) (Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

Sementara mekanisme pastinya masih belum jelas, diperkirakan bahwa LBP mentransfer LPS ke CD14 sehingga mengaktifkan TLR4. Kompleks TLR4 juga mengenali beberapa bakteri lain. PAMP termasuk LTA, virus termasuk virus pernapasan syncytial (RSV), virus hepatitis C (HCV), dan virus tumor payudara tikus (MMTV). Kompleks TLR4 juga dapat mengenali ligan endogen, misalnya heat shock protein, fibrinogen, fibronektin, surfaktan protein A (SP-A), dan beta-defensins. TLR4 juga membentuk heterodimer baik dengan TLR5 untuk meningkatkan aktivitasnya, dan dengan TLR1, yang menghambat aktivitasnya (Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

Endotoksin, atau lipopolisakarida (LPS), ditemukan di dinding sel bakteri gram negatif seperti *Escherichia coli*. Pengenalan LPS oleh sistem imun bawaan menghasilkan respon inflamasi yang ditandai dengan produksi sitokin seperti TNF, IL-1, IL-6, dan IL-8; serta aktivasi gen ICAM-1 dan E-Selectin, antara lain. Up-regulation yang bergantung pada LPS dari gen-gen ini disebabkan oleh up-regulasi kinase yang, pada gilirannya, mengatur faktor-faktor transkripsi NF-kappa B dan AP-1 (Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

Ligasi TLR2 dan TLR4 dalam makrofag meningkatkan produksi ROS (reactive oxygen species) mitokondria sebagai bakterisidal dan menarik mitokondria ke fagosom. TRAF6 ditranslokasi ke mitokondria setelah infeksi bakteri, di mana ia berinteraksi dengan ECSIT (evolutionarily conserved signalling intermediate in Toll pathways) TRAF6 mempromosikan

ubiquitinasi ECSIT, menghasilkan peningkatan ROS ditingkat mitokondria dan seluler (Kawasaki & Kawai, 2014). TLR2 dan 4 diekspresikan dalam berbagai sel imun termasuk neutrofil, monosit/MΦs, dan DC.. Namun, aktivasi terkoordinasi respons adaptif dimediasi melalui pengikatan ligan spesifik ke monosit atau DC yang juga dimediasi terutama oleh TLR2 dan 4. TLR ini juga diekspresikan pada sel imun adaptif klasik yaitu. Limfosit B dan Limfosit T (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

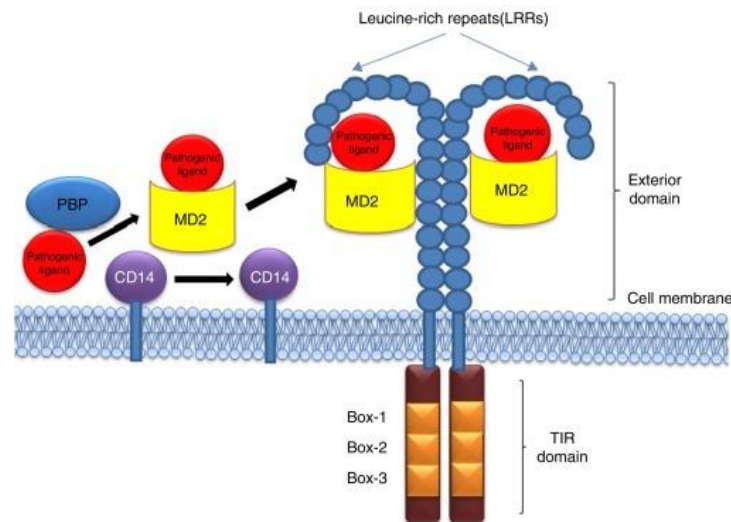
Tabel 2.9 Berbagai Ligan, Asal Ligan, TLR2 dan TLR4, Pengantar Ligannya (de Oliveira Nascimento et al., 2012)

Ligand	Origin	TLRS	Ligand delivery	Reference
Bacterium				
Diacyl lipopeptides (MALP-2/FSL-1)	<i>Mycoplasma</i>	TLR2/TLR6	RP105 (B cells)/ CD14/CD36	Jimenez-Dalmaroni et al. (2009), Blumenthal et al. (2009)
Heat-labile enterotoxins (b subunit)	<i>Escherichia coli, Vibrio cholerae</i>	TLR2/TLR1	CD14/GD1a	Liang et al. (2007b), Connell (2007)
Lipomannan/lipoarabinomannan	<i>Mycobacterium</i>	TLR2/TLR1	CD14/CD36	Jimenez-Dalmaroni et al. (2009), Birch et al. (2010)
Lipoprotein	<i>Mycobacterium</i>	TLR2/?	CD14/CD36/RP105	Jimenez-Dalmaroni et al. (2009)
Lipoteichoic acid (LTA)	Gram-positive bacteria	TLR2/TLR6	CD14/CD36/MBL	Jimenez-Dalmaroni et al. (2009), Ip et al. (2008), Tawaratsumida et al. (2009)
Peptidoglycan (PG)*	<i>Staphylococcus</i>	TLR2/?	CD14	Natsuka et al. (2008), Müller-Anstett et al. (2010)
Porins	<i>Neisseria, Salmonella, Shigella</i>	TLR2/TLR1	Unknown	Massari et al. (2006), Cervantes-Barragan et al. (2009), Biswas et al. (2009)
Triacyl lipopeptides (LPs)	Bacteria	TLR2/TLR1	CD14/vitronectin + integrin β 3	Beutler et al. (2006), Gerold et al. (2008)
Fungus				
Glucuronoxylomannan	<i>Cryptococcus neoformans/gaati</i>	TLR2/TLR1–TLR2/TLR6	CD14/not dectin-1	Fonseca et al. (2010)
Phospholipomannan	<i>Candida albicans</i>	TLR2/TLR6	CD14/dectin-1	Jouault et al. (2003), Netea et al. (2006)
Unknown	<i>Paracoccidioides brasiliensis</i>	TLR2/?	Dectin-1	Bonfim et al. (2009)
Unknown	<i>Penicillium marneffei</i>	TLR2/?	Dectin-1	Nakamura et al. (2008)
Unknown	<i>Aspergillus fumigatus</i>	TLR2/?	Dectin-1	
Yeast phase-specific protein (Yps3p)	<i>Histoplasma capsulatum</i>	TLR2/?	Dectin-1***	Aravalli et al. (2008)
Zymosan**	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	TLR2/TLR6	CD14/dectin-1	Ikeda et al. (2008), Beutler et al. (2006), Gantner et al. (2003)
Protozoan/helminth				
Glycosylphosphatidylinositol (GPI) anchors	<i>Trypanosoma, plasmodium, toxoplasma</i> (protozoans)	TLR2/TLR1**** and TLR4	CD36(likely) CD14	Jimenez-Dalmaroni et al. (2009), Debierre-Grockiego et al. (2007), Gowda (2007)
Lipopeptidophosphoglycan	<i>Entamoeba histolytica</i> (protozoan)	TLR2/TLR6 and TLR4		Wong-Baeza et al. (2010)
lipophosphoglycan	<i>Leishmania</i> (protozoan)	TLR2/?		Kavooosi et al. (2010)
Lysophosphatidylserine	<i>Schistosoma mansoni, Ascaris lumbricoides</i> (helminth)	TLR2/?		van Riet et al. (2009)
Virus				
EBV-encoded dUTPase	Epstein-Barr	TLR2/?	Not CD14	Ariza et al. (2009)
Glycoprotein B	Cytomegalovirus	TLR2/TLR6	CD14	Barbalat et al. (2009), Klouwenberg et al. (2009), Compton et al. (2003)
Hepatitis B capsid****	Hepatitis B	TLR2/?	CD14	Cooper et al. (2005)
hepatitis C core and NS3 protein	Hepatitis C	TLR2/TLR6	Unknown	Chang et al. (2007)
Unknown	Measles	TLR2/TLR6	Unknown	Klouwenberg et al. (2009), Bieback et al. (2002)
Unknown	Herpes simplex (1/2)	TLR2/TLR6	Unknown	Klouwenberg et al. (2009), Sorensen et al. (2008)
Unknown	Vaccinia	TLR2/?	Unknown	Barbalat et al. (2009)
Unknown	Lymphocytic choriomeningitis	TLR2/?	CD14	Zhou et al. (2005)
Unknown	Yellow fever	TLR2/?	Unknown	Querec et al. (2006)
Unknown	Varicella zoster	TLR2/?	CD14	Wang et al. (2005)
Unknown	Respiratory syncytial	TLR2/TLR6	Unknown	Klouwenberg et al. (2009)
<i>Observation: The question marks “?” presented in the table imply that the co TLR, required for TLR2 ligand recognition, is still undefined.</i>				
<i>*Synthetic PGs does not induce TLR2 signaling, and TLR2 activation promoted by the natural ones was attributed to lipopeptide contamination by some authors (Travassos et al., 2004; Zähringer et al., 2008). Nevertheless, PG extracted from mutant Staphylococcus strain lacking lipopeptides still activated TLR2 and NOD2 (Müller-Anstett et al., 2010).</i>				
<i>**Zymosan activation through TLR2 was also attributed to contamination by other authors (Ikeda et al., 2008).</i>				
<i>***Dectin-1 recognizes β-glucans from histoplasma, but these molecules are normally shielded by α-glucans in this pathogen (Rappleye et al., 2007).</i>				
<i>****Intact GPI are recognized mainly by TLR2/TLR1, but exclusion of its sn-2 fatty-acid portion changes the ligand heterodimer to TLR2/TLR6 (Gowda, 2007).</i>				
<i>*****The purity of this preparation is controversial (Vanlandschoot et al., 2005).</i>				

2.13.4. TLR Signal Regulator/Koreseptor

Pathogen associated molecular pattern (PAMPs) akan terikat oleh protein spesifik agar dapat ditransfer ke TLR yang sesuai. Aktivasi TLR4 oleh LPS membutuhkan keterlibatan koreseptor diantaranya Myeloid differentiation (MD)2 dan (Cluster of Differentiation) 14. LPS dikenali dalam serum oleh LPS-binding protein (LBP). Kompleks LPS-LBP selanjutnya

dikenali oleh cluster differentiation -14 (CD14). Yang merupakan pengatur sinyal untuk TLR. Berbagai pengatur sinyal TLR yang terlibat dalam aktivasi TLR yaitu: CD14, CD36/ MD2, MD-1, TRIM38, SR-B3, CD300th,CUL1, CUL1/NEDD8/RBX1 complex, CUL1/RBX1complex dan lain-lain.



Gambar 2.15 Presentation of ligand (LPS) to TLR4 through the coordinated actions of serum LBP, membrane bound CD14 and MD2 (Mukherjee et al., 2016)

2.13.4.1. Cluster of Differentiation (CD) 14

Beberapa molekul transmembrane yang memodulasi jalur pensinyalan TLR dikenal dengan *Cluster of Differentiation* (CD) D14 yaitu protein glikofosfatidil inositol yang diekspresikan pada permukaan sel, terutama monosit, makrofag, dan neutrofil. (rndsistem) Co-reseptor dengan TLR4 dan MD-2 untuk pengenalan LPS, yang menginduksi endositosis yang bergantung pada Syk dan PLC γ 2 yang dimediasi ITAM untuk mempromosikan internalisasi TLR4 ke dalam endosom untuk aktivasi pensinyalan yang bergantung pada TRIF CD14 juga diperlukan untuk induksi sitokin proinflamasi yang bergantung pada TLR7 dan TLR9 .

(rndsistem) CD36, protein dalam scavenger reseptor kelas B, bertindak sebagai ko-reseptor untuk lipoprotein densitas rendah (LDL) teroksidasi dan peptida amiloid- β . Pengenalan ligan menginduksi perakitan heterodimer TLR4/TLR6 melalui Src kinase dan akibatnya inflamasi steril, dengan menginduksi sitokin inflamasi dan ROS dan memicu aktivasi inflamasi NLRP3 (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Mukherjee et al., 2016; R&D Systems, 2021).

Bentuk CD14 ini tidak satu pun akan kompeten untuk pensinyalan sel, protein transmembran permukaan sel berfungsi sebagai ko-reseptor untuk kompleks CD14/LPS-LBP (bersama dengan reseptor seperti Toll TLR 4 dan MD-2) untuk mendeteksi lipopolisakarida bakteri. CD14 terlarut (sCD14), glikoprotein 55-kDa yang ditemukan dalam plasma, telah terbukti bertindak sebagai antar-jemput untuk LPS bakteri dan fosfolipid, mengangkut LPS dan monomer fosfolipid dari agregat LPS atau liposom ke partikel lipoprotein densitas tinggi. sCD14 juga telah terbukti memediasi pengangkutan LPS dan phosphatidylinositol ke dalam sel. Aktivasi LPS dari TLR4 memicu aktivasi inflamasi. CD14 juga berkontribusi pada respons terhadap ligan TLR3, fosfoinositida, serta protein surfaktan SP-A dan SP-D (Mollen et al., 2007; Nagai & Takatsu, 2014; R&D Systems, 2021).

2.13.4.2. Myeloid of Differentiation 2 (MD-2)

TLR membutuhkan antigen limfosit 96 [diferensiasi myeloid 2 (MD-2)] untuk pengenalan LPS oleh bagian ekstraselulernya tanpa MD-2, TLR4 tidak diekspresikan pada permukaan sel. Kompleks TLR4/MD-2 sangat

penting untuk respons LPS, karena tikus dengan defisiensi TLR4 maupun defisiensi MD-2 tidak merespons LPS. Diferensiasi myeloid 2 (MD-2) dan Toll-like receptor 4 (TLR4) adalah sepasang reseptor pengenalan lipopolisakarida dalam respon imun bawaan. Studi terbaru telah menghubungkan TLR4 dalam peradangan dan aterosklerosis. MD2 adalah ko reseptor, molekul ekstraseluler sangat diperlukan untuk pengenalan LPS terhadap TLR4. Aktivasi TLR4 kemudian menyebabkan perekrutan protein adaptor seperti protein respons primer diferensiasi myeloid 88 (MyD88), yang memicu aktivasi beberapa jalur pensinyalan hilir, khususnya faktor nuklir- κ B (NF- κ B) untuk mengatur sejumlah pro- molekul inflamasi. (Choi HG, 2016)

Analisis struktur kristal terbaru mengungkapkan bahwa LPS dapat masuk ke dalam rongga hidrofobik MD-2, dan pengikatan ini mengarah pada homodimerisasi kompleks TLR4/MD-2, yang menghasilkan aktivasi pensinyalan hilir TLR4. MD-2, juga dikenal sebagai ESOP-1, adalah protein yang disekresikan 25 kDa yang diperlukan untuk respons yang dimediasi TLR4 terhadap lipopolisakarida bakteri (LPS). MD-2 berasosiasi dengan TLR4 pada monosit, makrofag, sel dendritik, dan sel B (Gangloff & Gay, 2004). MD-2 juga membentuk homo-oligomer larut disulfida-linked yang dapat berinteraksi dengan TLR4 . Melalui domain yang terpisah dari domain pengikatan TLR4, MD-2 mengekstrak LPS dari kompleks CD14-LPS yang bersirkulasi dan membawa LPS ke dalam kompleks dirner dengan TLR4 (R&D Systems, 2021; Re & Strominger, 2003).

2.13.5. Toll Like Reseptor Signal Molecule

Berbagai macam molekul sinyal/ adaptor TLR yang sangat penting dalam proses transduksi intraseluler, salah satunya adalah IKB alpha, IKB beta, epsilon beta, IRAK 1 IRAK2 IRAK3 , IRAK4, TRAF36 , TRAM dan MY88 dal lain-lain . MyD88 adalah adaptor kanonik untuk jalur pensinyalan inflamasi di hilir dari reseptor seperti Toll (TLR) dan interleukin-1 (IL-1). MyD88 menghubungkan reseptor IL-1 (IL-1R) atau TLR family ke kinase family terkait IL-1R (IRAK) melalui interaksi protein-protein homotipik. Aktivasi kinase keluarga IRAK mengarah ke pembentukan zat fungsional, termasuk aktivasi faktor-kappa B nuklir (NFkB), protein kinase yang diaktifkan mitogen, dan protein penggerak 1, menjadikan MyD88 sebagai simpul pusat jalur inflamasi. Karena lebih banyak detail pensinyalan yang bergantung pada MyD88 (de Oliviera Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014).

MyD88 pertama kali dijelaskan pada tahun 1990 sebagai gen yang diregulasi selama diferensiasi myeloid yang diinduksi IL-6, tetapi homologinya dengan domain sitosol MyD88 terlibat dalam pensinyalan hilir IL-1R dan TLR mamalia , Domain C-terminal intraseluler TIR (Toll IL-1R) memediasi interaksi dengan protein lain yang mengandung domain TIR (reseptor atau adaptor); domain kematian N-terminal (DD) berasosiasi dengan IRAK family melalui interaksi DD homotipik. Konsisten dengan peran ini, ekspresi berlebih dari DD MyD88 menyebabkan aktivasi spontan

NFkB dan c-Jun N-terminal kinase (JNK), sedangkan domain TIR dapat bertindak sebagai negatif dominan. Domain perantara (INT) MyD88 menghubungkan TIR dan DD. Meskipun domain ini tampaknya tidak terlibat dalam interaksi langsung yang dijelaskan di atas, domain ini diperlukan untuk aktivasi IRAK4. Faktanya, MyD88s, varian dari MyD88 yang tidak memiliki domain INT, diinduksi saat aktivasi dan bertindak sebagai bentuk negatif dominan dari MyD88 (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016; R&D Systems, 2021).

MyD88 respon imun bawaan yang berperan sebagai jembatan antara reseptor yang mengandung TIR dan kinase yang mengandung DD. Karakterisasi Myddosome menunjukkan mekanisme molekuler yang jelas untuk transduksi sinyal pada pengelompokan reseptor local yang mengandung domain TIR yang menghasilkan keluaran mengarah ke sitokin pro-inflamasi atau produksi IFN tipe I.

Faktor transkripsi faktor nuklir- κ B (NF- κ B) untuk menginduksi sitokin dan kemokin pro-inflamasi serta up-regulasi molekul co-stimulator pada sel penyaji antigen, seperti makrofag (M Φ s) dan sel dendritik (DC) yang pada gilirannya mensensitisasi aktivasi sel T (de Oliveira Nascimento et al., 2012; Deguine & Barton, 2014; Kawasaki & Kawai, 2014; Mukherjee et al., 2016).

Aktitas TLR juga dikendalikan oleh protein yang ada di ER- PRAT4A, yang mengatur keluarnya TLR1, TLR2, TLR4, TLR7, dan TLR9 dari ER dan perpindahan ke membran plasma dan endosom. Ditemukan gp96, anggota ER-family heat-shock protein 90, berfungsi sebagai pendamping

umum untuk sebagian besar TLR, termasuk permukaan sel TLR1, TLR2, TLR4, dan TLR5 dan TLR7 dan TLR9 intraseluler. Dalam endosom, TLR mengenal asam nukleat yang mengalami pemecahan proteolitik oleh cathepsin B, S, L, H, dan K dan asparaginil endopeptidase untuk mencapai bentuk fungsional yang memediasi pengenalan ligan dan memulai pensinyalan (Kawasaki & Kawai, 2014).

2.13.6. Aktivasi Keseimbangan Jalur MYD88- dan TRIF

TLR4 mengaktifkan jalur yang bergantung pada MyD88 dan bergantung pada TRIF. Aktivasi jalur ini dikendalikan oleh beberapa molekul untuk menginduksi respon yang sesuai. Produksi yang seimbang dari sitokin inflamasi dan IFN tipe I mungkin penting untuk mengendalikan pertumbuhan sel tumor dan penyakit autoimun.

TRAF3 terbukti dimasukkan ke dalam kompleks MyD88 serta kompleks TRIF dalam pensinyalan TLR4. TRAF3 dalam kompleks MyD88 kemudian terdegradasi, yang menyebabkan aktivasi TAK1. TRAF3 mempromosikan aktivasi jalur yang bergantung pada TRIF, dan memiliki peran dalam menghambat jalur yang bergantung pada MyD88. NRDP-1, sebuah ligase ubiquitin E3, mengikat dan mengubiquitinas MyD88 dan TBK1, menginduksi degradasi MyD88 dan meningkatkan aktivasi TBK1, yang melemahkan produksi sitokin inflamasi dan menginduksi produksi IFN tipe I preferensial, masing-masing (Kawasaki & Kawai, 2014; Wang et al., 2009).

Molekul MHC kelas II yang terlokalisasi dalam endosom dalam sel penyaji antigen berinteraksi dengan tirosin kinase melalui molekul kostimulatori CD40 dan mempertahankan bentuk aktivasi. Bentuk yang diaktifkan berinteraksi dengan MyD88 dan TRIF untuk menstimulasi aktivasi jalur yang bergantung pada MyD88 dan bergantung pada TRIF dan dengan demikian meningkatkan produksi sitokin inflamasi dan IFN tipe I, berurutan (X. Liu et al., 2011).

2.13.7. Pengaturan Negatif Transkripsi Sinyal TLR

Sejumlah molekul melalui berbagai mekanisme untuk mencegah atau menghentikan respons imun yang berlebihan yang mengarah pada kondisi merugikan tubuh seperti penyakit autoimunitas dan penyakit inflamasi. Regulator negatif menargetkan setiap molekul kunci dalam pensinyalan TLR (Gambar 2.8). Aktivasi jalur MyD88 independent ditekan oleh ST2825, SOCS1, dan Cbl-b, dan aktivasi jalur yang bergantung pada TRIF ditekan oleh SARM dan TAG. Molekul-molekul ini berasosiasi dengan MyD88 atau TRIF untuk mencegahnya mengikat TLR atau molekul hilir. Aktivasi TRAF3 diatur secara negatif oleh SOCS3 dan DUBA . TRAF6 dihambat oleh A20, USP4, CYLD, TANK, TRIM38, dan SHP. Aktivasi TAK1 dihambat oleh TRIM30 α dan A20 . Selain molekul pensinyalan ini, faktor transkripsi NF- κ B ditekan oleh Bcl-3, I κ BNS, Nurr1, ATF3, dan PDLIM2, sementara aktivasi IRF3 dihambat oleh Pin1 dan RAUL. Stabilitas pengkodean molekul pensinyalan mRNA diatur oleh miRNA seperti miR-146a, miR-199a, miR-155, miR-126, miR-21, miR-29, miR-148/152, dan miR-466l. Selain

stabilitas mRNA untuk molekul pemberi sinyal, stabilitas mRNA untuk sitokin diatur oleh Regnase-1 dan TTP (Kawasaki & Kawai, 2014).

2.13.8. Pengaturan Seluler oleh Nuclear Factor-KB

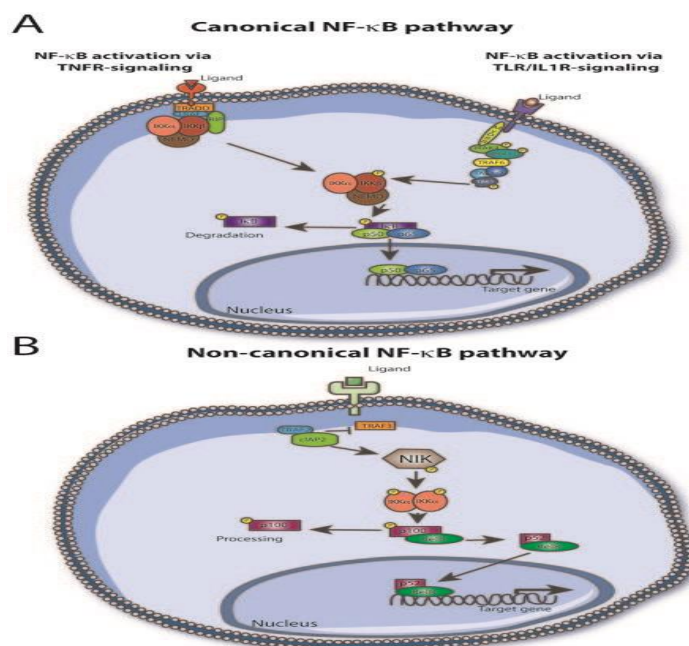
Respon seluler terhadap *M. tuberculosis* dan banyak rangsangan lainnya, adalah difasilitasi oleh Nuclear Factor- κ B (NF- κ B). NF- κ B mengatur berbagai proses seluler dengan mengatur transkripsi gen, yang diperlukan untuk banyak aktivitas seperti pertumbuhan dan perkembangan sel, serta untuk produksi mediator inflamasi dan kekebalan, baik untuk mengendalikan patogen (IL-12, TNF alfa, INF gamma) dan menekan inflamasi (IL-4, IL-10, TGF-beta) (Gambar 2.10) Berbagai macam sinyal dapat memicu aktivasi kompleks NF- κ B, termasuk stress oksidatif, PAMP, hormon, dan sitokin. Dalam sel istirahat, NF- κ B ditemukan menghambat sel istirahat, NF- κ B ditemukan dihambat dengan mengikat I κ B (protein penghambat). Dalam konteks ini, kompleks NF- κ B/I κ B tetap terletak di kompartemen sitosol, dan tidak ada mengikat DNA inti (Amaral & Andrade, 2017; R&D Systems, 2021).

Pada manusia, famili NF- κ B terdiri dari 5 anggota, p65 (RelA), RelB, c-Rel, p50 (prekursor p105), dan p52 (prekursor p100),^{2,3} yang dikodekan oleh RELA, RELB, REL, NFKB1, dan gen NFKB2, masing-masing. Molekul-molekul ini berbagi domain homologi Rel N-terminal (RHD), yang diperlukan untuk pengikatan DNA dan oligomerisasi. Subunit lain dari NF- κ B yang diamati hanya pada p65, c-Rel, dan RelB disebut transkripsi aktivasi domain (TAD) dan diperlukan untuk regulasi positif ekspresi gen. Sebaliknya, p50

dan p52 kekurangan TAD dan untuk alasan ini, mereka tidak dapat mentransduksi sinyal transkripsi asli (Amaral & Andrade, 2017).

Dalam banyak sel, protein NF- κ B ditemukan sebagai struktur homodimerik atau heterodimerik di dalam sitoplasma dan, umumnya, terikat pada protein penghambat bernama I κ Bs. Pada dasarnya, I κ B mengikat ke wilayah RHD NF- κ B, mengganggu kontakannya dengan DNA. Tiga protein khas I κ B, seperti I κ B α (dikodekan oleh NFKBIA), I κ B β (dikodekan oleh NFKBIB), dan I κ B ϵ (dikodekan oleh NFKBIE), atau protein prekursor, seperti p100 (dikodekan oleh NFKB2) dan p105 (dikodekan oleh NFKB1), ditemukan terikat pada NF- κ B dalam tahap tidak aktifnya (Amaral & Andrade, 2017). Faktor nuklir B dapat diaktifkan oleh beberapa jalur di mana ia berubah menjadi kompleks 700 hingga 900 kDa yang mengandung serin-spesifik I κ B kinase (IKK), yang disebut kompleks IKK. Kompleks ini terdiri dari 2 subunit katalitik, IKK α dan IKK β , membentuk homodimer atau heterodimer, yang secara stoikiometri terikat pada subunit pengatur bernama NEMO (NF- κ B essential modifier) atau IKK γ 5 (Gambar 2.12). Baik IKK α dan IKK β menyajikan situs untuk mengikat NEMO bernama NEMO-binding domain (NBD) (Gambar 2.12). Dalam skenario ini, NEMO berinteraksi dengan konformasi dimer IKK dan menstabilkan seluruh struktur. Pengubah esensial faktor nuklir B dikenal sebagai subunit pengatur kompleks IKK dan menampilkan domain penting yang diperlukan untuk mengikat IKK β bernama domain pengikatan kinase. Terdapat 2 jalur

aktivasi NF κ B dikenal jalur canonic dan jalur noncanonic (Amaral & Andrade, 2017).



Gambar 2.16 Mengaktifkan jalur faktor nuklir B (NF- κ B)

Keterangan: Ilustrasi skema (A) kanonik dan (B) jalur NF- κ B nonkanonik. (A) Tumor necrosis factor (TNF)-dependent (di kiri) dan Toll-like receptor (TLR)/interleukin (IL)-1R-dependent (di kanan) jalur pensinyalan NF- κ B diwakili. Setelah dipicu, reseptor faktor nekrosis tumor (TNFR) (kiri) merekrut keluarga faktor terkait TNFR (TRAF) yang mewakili molekul adaptor penting yang diperlukan untuk transduksi sinyal TNF. Sudah berlabuh ke domain kematian terkait TNFR (TRADD), TRAF merekrut kompleks IKK melalui interaksi langsung dengan wilayah ritsleting leusin IKK α atau IKK. TRAF juga berinteraksi dengan reseptor-interacting protein 1 (RIP1) yang dapat secara independen direkrut ke TRADD. Dalam kasus terakhir, RIP bekerja sebagai protein perancah, mengikat langsung ke NEMO, mempromosikan perekrutan kompleks IKK ke TNFR. TLR/IL-1R (di kanan) saat diaktifkan merekrut MyD88 dengan mengikat domain TIR mereka. Setelah terikat ke domain TIR, MyD88 terhubung dengan anggota IRAK, menghasilkan kompleks oligomer besar bernama Myddosome. IRAK4 terfosforilasi menginduksi fosforilasi IRAK1/2, yang pada gilirannya mendorong keterlibatan TRAF6. Saat aktivasi, TRAF6 menginduksi docking dan aktivasi adaptor TAB1, TAB2, dan TAB3, yang mengarah pada perekrutan TAK1. Pada gilirannya, TAK1 mempromosikan autofosforilasi dan kemudian memfosforilasi IKK. Kompleks IKK yang diaktifkan memfosforilasi I κ B, yang menyebabkan degradasinya oleh proteasom.

Pada degradasi I κ B, subunit NF- κ B akan dilepaskan dan kemudian dibiarkan bertranslokasi ke dalam nukleus. (B) Pensinyalan NF- κ B nonkanonik memiliki komponen pensinyalan pusat bernama faktor nuklir B-inducing kinase (NIK) yang bertindak bersama dengan IKK α untuk menginduksi fosforilasi dan pemrosesan p100. Untuk aktivasi NIK, TRAF3, regulasi negatif ekspresi NIK, diturunkan regulasinya oleh cIAP2 dan TRAF2, memfasilitasi akumulasi NIK dalam sitosol dan transfosforilasinya. Saat diaktifkan, NIK memfosforilasi IKK α , yang pada gilirannya mendorong pemrosesan p100, memungkinkan translokasi RelB/52 ke dalam nukleus (Amaral & Andrade, 2017).