

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. LANDASAN TEORI

1. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

a. Definisi

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) merupakan metode yang digunakan untuk menghitung perkiraan risiko yang disebabkan oleh pajanan agen baik kimia maupun fisik pada kelompok berisiko dengan mempertimbangkan karakteristik risiko. Menurut Louvar & Louvar (1998), analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) didefinisikan sebagai kerangka ilmiah untuk memecahkan permasalahan lingkungan dan kesehatan.

ARKL merupakan sebuah proses yang dimaksudkan untuk menghitung atau memperkirakan risiko pada kesehatan manusia, termasuk diantaranya identifikasi terhadap keberadaan faktor ketidakpastian, penelusuran pada pajanan tertentu, memperhitungkan karakteristik yang melekat pada agen yang menjadi perhatian dan karakteristik dari sasaran yang spesifik (Dirjen PP dan PL, 2012).

ARKL merupakan perkembangan spesifik dari *Health Impact Assessment* (HIA). Di Indonesia ARKL merupakan bagian dari Analisis Dampak Kesehatan Lingkungan (ADKL). ADKL sendiri dibedakan menjadi ADKL untuk pencemaran pada umumnya (bukan bagian dari studi Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)) dan

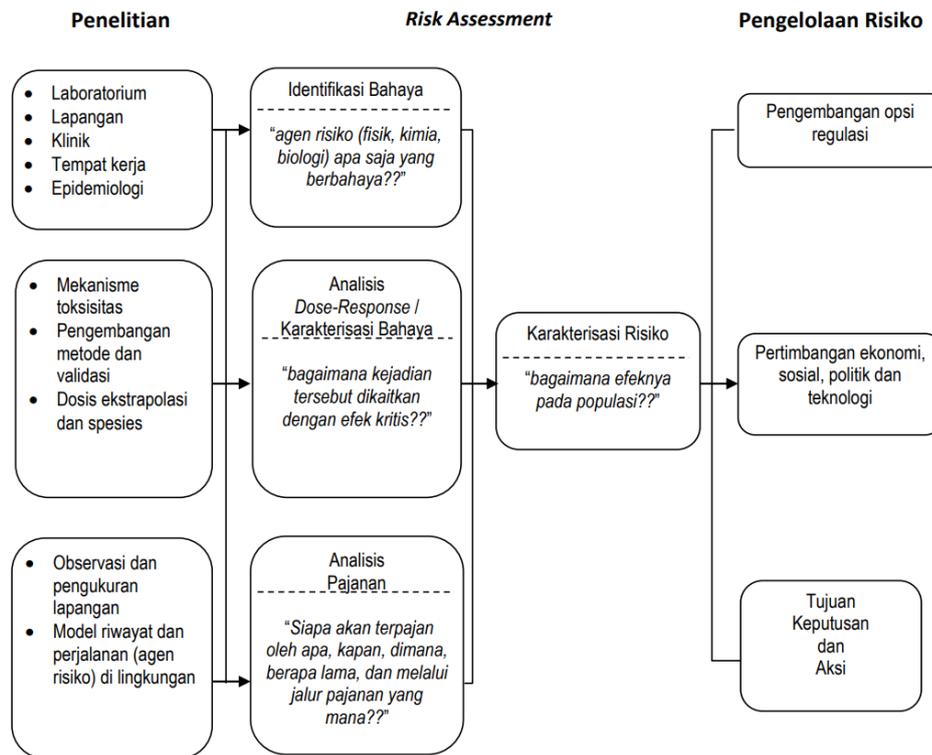
ADKL bagian AMDAL, yang dimaksudkan untuk kajian aspek kesehatan masyarakat dalam konteks rencana usaha atau kegiatan baru. ADKL termuat dalam Keputusan Menteri Kesehatan RI No. 876/Menkes/SK/VIII/2001 tentang Pedoman Teknis Analisis Dampak Lingkungan (ADKL) (Dirjen PP dan PL, 2012).

ARKL merupakan sebuah tujuan untuk memastikan supaya analisis risiko dari bahan kimia dan pengelolaannya dapat berjalan dengan baik untuk meningkatkan perlindungan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Tujuan ini telah menjadi kesepakatan dari berbagai negara dalam kerangka pembangunan yang berkelanjutan.

b. Paradigma Analisis Risiko

Menurut (Kuhn, 1962), paradigma merupakan suatu landasan berpikir maupun konsep dasar yang digunakan sebagai model ataupun pola yang dimaksud oleh para ilmuwan dalam usahanya dengan mengadakan studi-studi keilmuan yang dilakukannya. Paradigma Analisis risiko ini, mengacu pada *Risk Assesment and Management Handbook* tahun 1996, analisis risiko terbagi menjadi dua istilah yaitu *risk analysis* dan *risk assessment*. *Risk analysis* meliputi 3 komponen yaitu penelitian, asesmen risiko (*risk assessment*) atau ARKL dan pengelolaan risiko.

Paradigma analisis risiko dapat diilustrasikan pada gambar berikut :



Gambar 2.1 Paradigma Analisis Risiko

Sumber : Dirjen PP & PL Kemenkes

Pada prosesnya, analisis risiko dapat dijelaskan sebagai berikut :

1) Penelitian

Penelitian bertujuan untuk membangun hipotesis, mengukur, mengamati dan merumuskan efek dari suatu bahaya maupun agen risiko di lingkungan terhadap manusia, baik yang dilakukan secara laboratorium maupun penelitian lapangan dengan tujuan untuk mengetahui efek, respon dan nilai referensi yang aman bagi tubuh agen yang memiliki risiko.

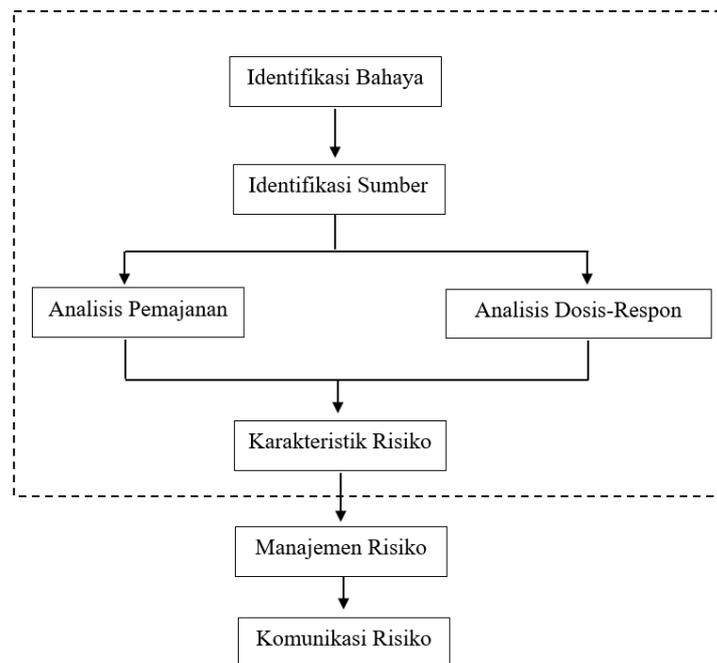
2) Asesmen risiko (*risk assessment*) ARKL

Asesmen risiko bertujuan untuk mengidentifikasi bahaya apa saja yang membahayakan, memahami hubungan antara dosis agen risiko dengan tubuh, mengukur besar paparan agen risiko, dan menetapkan tingkat risiko dan efeknya pada suatu populasi.

3) Pengelolaan risiko

Pengelolaan risiko dilakukan jika asesmen risiko yang ditetapkan tidak aman efeknya pada populasi. Pengelolaan risiko dapat dilakukan dengan pengembangan opsi regulasi, pemberian rekomendasi teknis sosial ekonomi politis dan melakukan tindak lanjut.

Secara operasional, pelaksanaan ARKL diharapkan tidak hanya terbatas kepada analisis atau penilaian risiko suatu agen risiko atau parameter tertentu di lingkungan terhadap kesehatan masyarakat, namun juga dapat menyusun skenario pengelolaannya atau manajemen risiko. Tetapi menurut teori analisis Risiko Louvar dan Luovar 1998 bahwa manajemen risiko bukan termasuk ke dalam analisis risiko, namun manajemen risiko merupakan langkah tindak lanjut dari hasil analisis risiko yang telah diperoleh. Hal tersebut dapat diilustrasikan pada gambar berikut:



Gambar 2.2 Analisis Risiko (Louvar dan Luovar 1998)

Sumber : 123dok.com

c. Jenis dan Penggunaan ARKL

Berdasarkan Buku Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) terdapat dua jenis ARKL yang dapat digunakan yakni, kajian ARKL di atas meja (*desktop studi*) dan kajian lapangan (*field study*) tergantung sumber data yang digunakan. Kajian ARKL di atas meja tidak menggunakan data-data lapangan, tetapi menggunakan nilai-nilai baku (nilai-nilai yang sudah ada sebelumnya), rekomendasi dan/atau asumsi. Sementara kajian lapangan dilakukan dengan cara mengukur langsung kualitas lingkungan, paparan (frekuensi, durasi) dan data antropometri (berat badan). Perbedaan penggunaan jenis ARKL tersebut dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Perbandingan antara ARKL *desktop* dan *field*

Variabel	Desktop	Field
Sumber data yang digunakan	Data sekunder dan asumsi/nilai baku	Data primer dan asumsi (jika dibutuhkan)
Waktu pelaksanaan	Seketika saat dibutuhkan Durasi lebih singkat	Perlu perencanaan dan pengorganisasian Durasi lebih lama
Besarnya biaya yang dibutuhkan	Sangat sedikit atau tidak ada	Biaya besar (seperti melakukan suatu penelitian / kajian lapangan)

ARKL sebagai suatu alat atau pendekatan dapat diaplikasikan untuk berbagai keperluan. Penggunaan ARKL pada berbagai kebutuhan dapat dilihat pada tabel berikut :

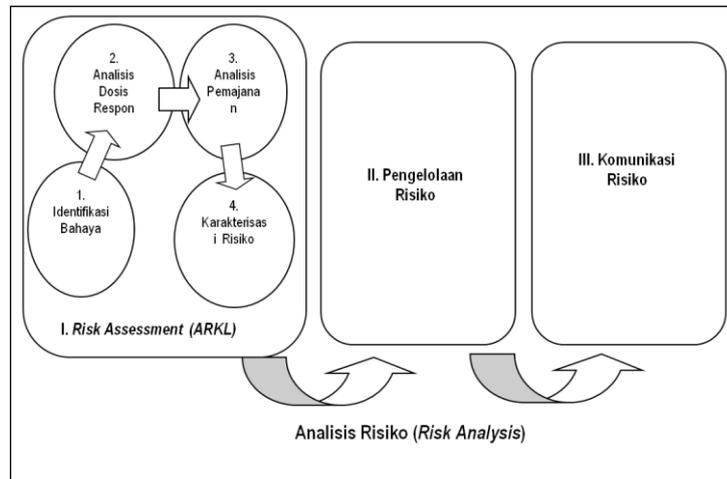
Tabel 2.2 Penggunaan dari masing-masing jenis ARKL

Jenis Kegiatan/ Kebutuhan	Desktop	Field
Analisis suatu kasus kesehatan lingkungan : (<i>Emergency Responses</i>).	✓	-
Analisis suatu kasus kesehatan lingkungan : (<i>Reformation Responses</i>).	-	✓
Penyusunan AMDAL suatu kegiatan dan atau usaha : kajian ANDAL dan penyusunan RKL – RPL.	✓	-
Pengkajian, penyusunan, dan penetapan baku mutu.	-	✓
Pengkajian, penyusunan dan penetapan kebijakan kesehatan lingkungan yang baru.	-	✓

d. Langkah-langkah ARKL

Dalam pedoman ARKL, Analisis risiko terbagi menjadi tiga yaitu : *Risk Assessment* (ARKL), pengelolaan risiko dan komunikasi risiko. Lebih lanjut, dalam pedoman tersebut ARKL terbagi menjadi empat

langkah yaitu : identifikasi bahaya (*hazard identification*), analisis dosis-respon (*dose-response assesment*), analisis pemajanan (*exposure assesment*) dan karakterisasi risiko (*risk characterization*). Langkah-langkah tersebut dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 2.3 Langkah-langkah ARKL (Kemenkes)

Sumber : Dirjen PP & PL Kemenkes

1) Identifikasi bahaya

Identifikasi bahaya (*hazard identification*) merupakan tahapan awal ARKL yang bertujuan untuk mengenali agen risiko yang memiliki potensi menjadi penyebab gangguan kesehatan jika tubuh terpajan. Tahap ini merupakan suatu proses yang menentukan bahan kimia yang berpotensi memiliki pengaruh terhadap manusia baik berupa karsinogenik maupun non-karsinogenik.

Data identifikasi bahaya *risk agent* dari berbagai sumber pencemaran dapat dirangkum pada suatu tabel, sebagai

pelengkap dalam identifikasi bahaya dapat pula ditambahkan gejala-gejala gangguan kesehatan yang erat kaitannya dengan agen risiko yang akan dianalisis.

2) Analisis dosis respon

Analisis dosis respon (*dose-response assesment*) merupakan tahapan lanjutan dari identifikasi bahaya. Analisis dosis-respon digunakan untuk memperkirakan efek samping dari agen risiko yang terjadi pada suatu populasi yang terpajan. Pada dasarnya analisis dosis respon digunakan untuk menentukan nilai toksisitas *risk agent* untuk setiap bentuk spesi kimianya. Toksisitas dinyatakan dalam nilai *reference dosis* (RfD), dan/atau *reference concentration* (RfC), dan/atau *cancer slope factor* (CSF) dari agen risiko yang menjadi fokus ARKL. RfD berasal dari pajanan oral atau tertelan (ingesi, untuk makanan dan minuman) dan RfC berasal dari pajanan udara (inhalasi) digunakan untuk efek-efek non-karsinogenik sementara CSF digunakan untuk efek-efek karsinogenik (US EPA 1997).

Analisis dosis-respon merupakan bagian yang paling penting dalam ARKL karena ARKL dapat digunakan jika sudah terdapat *risk agent* yang sudah terdapat dosis-respon (US EPA 1997). Dosis-respon menggambarkan peluang seseorang untuk mengalami sakit setelah kontak dengan kuman udara

(mikroba) (Dewi, 2022). Analisis dosis respon cukup merujuk pada literatur *Integrated Risk Information System (IRIS)* yang tersedia pada www.epa.gov/iris.

3) Analisis pemajanan

Analisis pemajanan atau *eksposure assesment* merupakan langkah lanjutan dari analisis dosis respon, analisis ini dilakukan untuk menghitung atau mengukur *intake*/asupan dari agen risiko. Untuk menghitung intake digunakan persamaan atau rumus yang berbeda. Data yang digunakan dapat berupa data primer (hasil pengukuran konsentrasi sendiri), data sekunder (hasil pengukuran dari pihak terpercaya seperti Dinas Kesehatan, Dinas Lingkungan Hidup, LSM dll) dan asumsi yang berdasarkan pada pertimbangan yang logis atau menggunakan nilai baku.

Pada tahap ini juga dibutuhkan data terkait antropometri dari populasi terpajan untuk menetapkan *intake*. Karakteristik antropometri yang diukur diantaranya adalah berat badan, pajanan harian, frekuensi pajanan tahunan dan durasi pajanan. Rumus perhitungan yang digunakan untuk *intake* pada jalur pemajanan inhalasi non-karsinogenik adalah sebagai berikut :

$$I = \frac{C \times R \times t_e \times f_e \times D_t}{W_b \times t_{avg}}$$

I = Asupan (*intake*) inhalasi (mg/kg/hari)

C = Konsentrasi agen risiko (zat toksik/polutan di udara)
 mg/m³)

R = Laju inhalasi (m³/jam)

t_e = Lama pajanan (jam/hari)

f_e = frekuensi pajanan (hari/tahun)

Dt = durasi pajanan (tahun)

Wb = berat badan (kg)

T_{avg} = periode waktu rata-rata untuk efek non-karsinogenik
 (10.950 hari)

4) Karakterisasi risiko

Karakterisasi risiko (*risk characterization*) merupakan langkah akhir dalam melakukan ARKL, dimana pada tahapan ini ditetapkannya tingkat risiko, dengan kata lain tahapan ini menentukan apakah agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis pada ARKL berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat atau tidak. Karakterisasi dinyatakan dalam *Risk Quotient* (RQ) untuk efek-efek non-karsinogenik.

Penghitungan RQ dilakukan dengan cara melakukan pembagian antara asupan inhalasi (I) dengan *reference concentration* (RfC) menggunakan rumus persamaan dari (ATSDR, 2005) :

$$RQ = \frac{I}{RfC}$$

RQ = Tingkat risiko pajanan non-karsinogenik

I = Asupan (*intake*) (mg/kg/hari)

RfC = Konsentrasi referensi (mg/m³)

Risiko kesehatan dinyatakan ada dan perlu dikendalikan jika $RQ > 1$. Jika $RQ \leq 1$, risiko tidak perlu dikendalikan tetapi perlu dipertahankan agar nilai numerik RQ tidak melebihi 1.

e. Langkah Lanjutan ARKL

1) Manajemen risiko

Manajemen risiko merupakan langkah lanjutan dari ARKL apabila nilai karakterisasi risiko menunjukkan tingkat yang tidak aman, yakni jika nilai $RQ > 1$. Dalam melakukan manajemen risiko terdiri dari strategi manajemen risiko dengan cara pengelolaan risiko, strategi pengelolaan risiko meliputi penentuan ambang batas aman yang terdiri dari konsentrasi agen risiko (C), jumlah konsumsi (R), waktu pajanan (t_E), frekuensi pajanan (f_E) dan durasi pajanan (D_t). Manajemen risiko dapat dijabarkan dan dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

a) Penentuan konsentrasi aman (C)

Dalam penentuan konsentrasi aman semua variabel dan nilai yang digunakan sama dengan variabel dan nilai pada perhitungan *intake*. Untuk menghitung konsentrasi aman inhalasi non-karsinogenik adalah sebagai berikut :

$$C_{nk (aman)} = \frac{RfC \times Wb \times t_{avg}}{R \times t_E \times f_E \times D_t}$$

b) Penentuan jumlah konsumsi aman (R)

Laju asupan yang dapat dikelola hanya pada pajanan yang melalui makanan dan air minum (ingesti). Sementara untuk pajanan melalui udara (inhalasi) hampir tidak mungkin dilakukan pembatasan laju inhalasi.

c) Penentuan waktu pajanan (t_E)

Waktu pajanan aman dapat dikelola jika pemajanan terjadi pada orang yang berada pada lingkungan kerja atau lingkungan pendidikan yang tidak permanen. Pengelolaan waktu dapat dilakukan dengan mengurangi jam terpapar setiap harinya. Penerapannya hanya dilakukan untuk pemajanan inhalasi, sedangkan untuk pemajanan ingesti cukup dilakukan dengan pembatasan jumlah konsumsi. Untuk menghitung waktu pajanan aman non-karsinogenik menggunakan rumus berikut :

$$t_{nk(aman)} = \frac{RfC \times Wb \times t_{avg}}{C \times R \times f_E \times D_t}$$

d) Penentuan frekuensi pajanan aman (f_E)

Frekuensi pajanan aman hampir sama dengan waktu pajanan aman, oleh karena itu yang dapat dihitung menggunakan rumus adalah pajanan yang melalui inhalasi. Untuk menghitung frekuensi pajanan aman non-karsinogenik menggunakan rumus berikut :

$$f_{nk(aman)} = \frac{RfC \times Wb \times t_{avg}}{C \times R \times t_E \times D_t}$$

e) Penentuan durasi pajanan aman (D_t)

Durasi pajanan aman hampir sama dengan waktu pajanan aman dan frekuensi pajanan aman, oleh karena itu yang dapat dihitung menggunakan rumus adalah pajanan yang melalui inhalasi. Untuk menghitung durasi pajanan aman non-karsinogenik menggunakan rumus berikut :

$$D_{nk(aman)} = \frac{RfC \times Wb \times t_{avg}}{C \times R \times t_E \times f_E}$$

2) Komunikasi risiko

Komunikasi risiko dilakukan untuk menyampaikan informasi risiko pada masyarakat (populasi yang berisiko), pemerintah dan pihak yang berkepentingan. Komunikasi risiko juga merupakan tindak lanjut dari ARKL dan merupakan tanggung jawab dari pihak yang menyebabkan terjadinya risiko (pemrakarsa).

Dalam komunikasi risiko harus menggunakan bahasa yang umum dan mudah dipahami serta menjelaskan semua informasi yang dibutuhkan tanpa ada yang dirahasiakan. Komunikasi risiko dapat dilakukan menggunakan metode ceramah ataupun diskusi interaktif, menggunakan media komunikasi seperti media massa, televisi dan radio ataupun penyajian dalam format pemetaan menggunakan *geographical information system* (GIS).

2. Nitrogen Dioksida (NO₂)

a. Pengertian dan Karakteristik

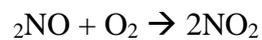
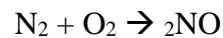
Nitrogen merupakan kandungan udara terbanyak di atmosfer yakni sebesar 78%. Nitrogen memiliki beberapa bentuk oksida, yaitu : *Nitrus Oxide* (NO) merupakan sebagai gas normal yang berada di udara, dengan kadar sekitar 940 mg/m³ (500 ppb) dan Nitrogen Pentoksida (N₂H₅) sebagai gas yang secara alamiah ada di udara dan terlibat pada siklus nitrat serta penting dalam pertumbuhan organik. Aktivitas manusia yang menghasilkan Nitrogen Oksida (NO) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) diantaranya adalah penggunaan bahan bakar minyak. Gas NO di atmosfer bereaksi dengan Oksigen menghasilkan gas NO₂.

Kadar NO₂ di udara dinyatakan dalam satuan *part per million* (ppm), *part per billion* (ppb) atau µg/m³ (1 ppb = 1,88 µg/m³). Kadar NO₂ yang rendah jika terhirup oleh manusia dapat merangsang timbulnya gejala sesak napas. Paparan NO₂ tidak boleh lebih dari 400 µg/m³ selama 24 jam.

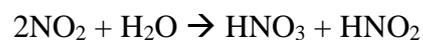
b. Pembentukan

Nitrogen Dioksida yang diperoleh dari proses pembakaran merupakan berbentuk Oksida Nitrat (NO). pembentukan NO dan NO₂ meliputi reaksi antara Nitrogen dan Oksigen di udara lalu membentuk NO, kemudian reaksi berikutnya antara NO dengan Oksigen yang

lebih banyak dapat membentuk NO₂. Persamaan reaksinya sebagai berikut :



NO₂ lebih berat daripada udara dan dapat larut dalam air, NO₂ dapat kembali menjadi NO atau teroksidasi lebih lanjut yang dapat membentuk HNO₂ dan HNO₃ dengan reaksi berikut :



Selanjutnya apabila NO₂ bereaksi dengan senyawa organik dapat menghasilkan *Peroksiasetil Nitrat* (PAN) atau Hidrokarbon (HC) melalui bantuan cahaya matahari kemudian dapat menghasilkan asap.



c. Toksikologi

NO₂ berwarna merah kecokelatan dan memiliki bau khas. Mayoritas penelitian toksikologi NO₂ dilakukan pada industri. Pada binatang percobaan yang mengalami pajanan gas NO₂ mengalami kekurangan dalam mekanisme pertahanan paru-paru dan fungsi imun. Umumnya pajanan NO₂ pada waktu yang pendek dan kadar yang rendah tidak dapat menyebabkan kelainan pada binatang percobaan (Mukono, 2019). NO₂ memiliki toksisitas yang lebih kuat 4 kali

dibandingkan dengan NO. Organ tubuh yang memiliki kepekaan tinggi yaitu paru-paru (Constantya, 2017).

d. Sumber Pencemaran

Kadar NO_x di udara daerah perkotaan yang berpenduduk padat akan lebih tinggi dibandingkan dengan pedesaan. Hal tersebut disebabkan karena berbagai macam kegiatan yang menopang kehidupan manusia yang menambah kadar NO_x di udara, seperti transportasi, generator pembangkit listrik, pembuangan sampah dll.

1) Sumber antropogenik (kegiatan manusia)

a) Sumber Tidak Bergerak

Nitrogen Dioksida dihasilkan dari sumber yang tidak bergerak, proses pembakaran dari batubara dan gas LPG masih mendominasi sumber pencemaran dari NO_2 . Sumber ini menyumbang pencemaran sebanyak 48,5%.

b) Sumber Bergerak

Transportasi kendaraan bermotor dapat menyumbang pencemaran NO_2 , pencemar ini merupakan salah satu pencemar yang besar dari emisi gas buang kendaraan bermotor selain CO. Sumber ini menyumbang pencemaran sebanyak 39,3%.

e. Efek Bagi Kesehatan Manusia

Umumnya efek kesehatan akibat keracunan gas NO_2 adalah iritasi. NO_2 dapat menimbulkan iritasi mata, hidung, tenggorokan dan saluran napas. Meskipun kadar NO_2 rendah, tetapi dapat memberikan

gangguan kesehatan diantaranya gangguan fungsi alat pernapasan dan penurunan fungsi serta dapat memicu asma. NO_2 yang mengontaminasi paru-paru dapat menyebabkan pembengkakan, sehingga penderita yang terpapar akan sulit bernapas yang dapat mengakibatkan kematian (Constantya, 2017).

Akibat pajanan NO_2 dapat menimbulkan batuk, iritasi mata (mata merah, rasa pedih pada mata), pusing dan sesak napas. Apabila NO_2 bereaksi dengan uap air yang membentuk senyawa HNO_3 maka senyawa tersebut sangat merusak tubuh manusia. NO_2 yang berhasil masuk ke dalam saluran pernapasan akan merusak lapisan mukosa pada saluran pernapasan sehingga menjadi iritasi (Suyono, 2014).

Tabel 2.3 Pengaruh NO_2 terhadap kesehatan (dalam ukuran kadar ppm)

No	Kadar (ppm)	Pengaruh
1	1-3	Mengiritasi saluran pernapasan
2	5	Mengakibatkan kesulitan bernapas
3	50-100	Menyebabkan inflamasi jaringan paru-paru
4	150 – 200	Menyebabkan Bronchiolities fibrosa obliterans
5	500	Menyebabkan kematian

Semakin tinggi kadar NO_2 , maka risiko yang akan ditimbulkan menjadi semakin berbahaya bagi kesehatan manusia. Pada kadar yang rendah hanya dapat mengiritasi organ tubuh yang berlendir terutama saluran pernapasan dan pada kadar yang sangat tinggi dapat menyebabkan kematian karena efek toksik dari NO_2 .

f. Baku Mutu

Tabel 2.4 Baku Mutu NO₂

Bahan Pencemar	Waktu rata-rata	Amerika USEPA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Negara-negara Eropa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	WHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Indonesia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam	-	200	400	200

Tabel diatas menunjukkan standar baku mutu yang ditetapkan di beberapa negara dan organisasi kesehatan dunia, baku mutu di Indonesia mengacu pada PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Metode analisis menggunakan saltzman dan peralatan menggunakan spektrofotometer.

g. Cara Pengukuran

Pengukuran NO₂ menggunakan metode *Griess Saltzman*, dengan menggunakan alat spektrofotometer. Pengukuran ini mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 7119-2-2017. Prinsip kerja pada pengukuran ini adalah menjerap gas NO₂ di udara ke dalam larutan *Griess Saltzman* sehingga dapat membentuk senyawa *azo dye* berwarna merah muda. Konsentrasi larutan yang ditentukan oleh spektrofotometer dengan panjang gelombang 550 nm.

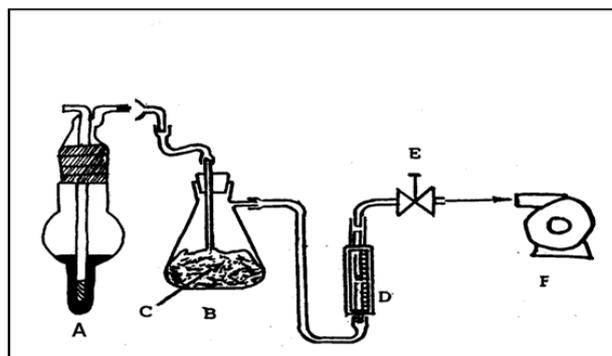
1) Bahan yang diperlukan pada pengukuran NO₂ adalah :

- a) Hablur asam sulfanilat ($\text{H}_2\text{NC}_6\text{SO}_3\text{H}$);
- b) Larutan asam asetat glasial (CH_3COOH pekat);
- c) Aquades;
- d) Natrium nitrit (NaNO_2);

- e) Larutan Induk N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida (NEDA, $C_{12}H_{16}Cl_2N_2$);
- f) Aseton (C_3H_6O);
- g) Larutan penjerap Griess Saltzman;
- h) Larutan induk nitrit (NO_2) 2.000 $\mu g/mL$.

2) Peralatan Pengukuran NO_2 diantaranya :

- a) Peralatan Pengambilan contoh uji NO_2 seperti pada gambar berikut



Gambar 2.4 Pengambilan Contoh Uji

- b) Labu ukur 25 mL, 100 mL dan 1.000 mL;
- c) Pipet mikro;
- d) Gelas ukur 100 mL;
- e) Gelas piala 100 mL, 500 mL dan 1.000 mL;
- f) Spektrofotometer;
- g) Neraca analitik dengan ketelitian 0,1 mg;
- h) Oven;
- i) Botol berwarna gelap;
- j) Barometer;

k) Desikator; dan

l) Kaca arloji.

3) Langkah Pengukuran

a) Susun peralatan seperti pada gambar 2.1

b) Masukkan larutan penjerap *Griess-Saltzman* sebanyak 10 mL ke dalam botol penjerap, atur botol penjerap agar tidak terhindar dari matahari langsung:

c) Hidupkan pompa penghisap udara dan atur kecepatan alir 0,4 L/menit setelah stabil catat laju alir awal (F1) dan pantau sekurang-kurangnya 15 menit;

d) Lakukan pengambilan contoh uji selama 1 jam dan catat temperatur dan tekanan udara;

e) Matikan pompa penghisap setelah 1 jam;

f) Lakukan analisis di lapangan segera setelah pengambilan contoh uji (maksimal 1 jam setelah pengambilan contoh uji).

4) Pembuatan Kurva Kalibrasi

a) Optimalkan alat spektrofotometer sesuai dengan petunjuk penggunaan alat;

b) Buat deret larutan kerja dalam labu takar 25 mL dengan 1 blanko dan minimal 3 kadar yang berbeda;

c) Tambahkan larutan penjerap sampai tanda tera dan kocok dengan baik dan biarkan selama 15 menit:

- d) Ukur serapan masing-masing larutan standar dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm;
- e) Buat kurva kalibrasi antara serapan dengan jumlah NO₂ (μg).

5) Penghitungan Contoh Uji

Jumlah NO₂ (μg) tiap 1 mL larutan standar yang digunakan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$NO_2 = \frac{a}{100} \times \frac{46}{49} \times \frac{1}{f} \times \frac{10}{1000} \times 10^6$$

Keterangan :

NO₂ = jumlah NO₂ dalam larutan standar NaNO₂ (μg/mL)

a = berat NaNO₂ yang ditimbang (g)

46 = berat molekul NO₂

69 = berat molekul NaNO₂;

f = faktor yang menunjukkan jumlah mol NaNO₂ yang menghasilkan warna yang setara dengan 1 mol NO₂ (nilai f = 0,82);

10/100 = faktor pengenceran dari larutan induk NaNO₂

10⁶ = konversi dari gram ke μg

1. Sulfur Dioksida (SO₂)

a. Karakteristik

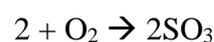
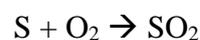
Sulfur Dioksida (SO₂) merupakan gas yang beracun, tidak berwarna dan berbau tajam pada konsentrasi lebih dari 0.5 ppm. SO₂ dapat terdeteksi oleh penciuman pada kadar 0,3 – 1 ppm (Wardhana, 2004). SO₂ mayoritas berasal dari kegiatan manusia akibat

pembakaran bahan bakar fosil, batu bara, dan minyak. Sebagian kecil juga berasal dari kegiatan alam berupa aktivitas vulkanik gunung berapi, emisi biogenik H₂S dan evaporasi air laut. SO₂ mudah sekali larut dalam air, jika bereaksi dengan air dapat membentuk senyawa H₂SO₄. SO₂ menjadi salah satu penyebab iritasi pada sistem pernapasan (Mukono, 2019).

Kadar SO₂ dinyatakan dalam satuan µg/m³ atau ppm (1 ppm sama dengan 2.660 µg/m³ pada suhu 20°C). Kadar maksimum SO₂ yang diperbolehkan adalah sebesar 900 µg/m³ (Mukono, 2019).

b. Pembentukan SO₂

SO₂ merupakan produk dari pembakaran bahan bakar fosil (minyak dan batubara). Emisi Sulfur dari sumber gas mayoritas dari SO₂, sementara Sulfur trioksida terdapat dalam jumlah yang lebih sedikit (Maharani, 2017). Pembentukan SO₂ juga dipengaruhi akibat adanya reaksi dengan Oksigen di udara, persamaan reaksinya adalah sebagai berikut (Prabowo, 2018).



Lebih lanjut, Sulfur Dioksida dapat menjadi senyawa lain, senyawa lanjutan akibat reaksi dari SO₂ dengan Oksigen dan uap air adalah pembentukan asam sulfat yang menyebabkan hujan asam di udara, reaksi pembentukannya adalah sebagai berikut :



c. Toksikologi

SO₂ mudah larut dalam air. Pada kadar 26.600 µg/m³ SO₂ sangat rentan dan dapat mengiritasi mata hidung dan tenggorokan. Pada pajanan terus-menerus, SO₂ dengan kadar 53.200 µg/m³ (20 ppm) dapat mengakibatkan bronkitis kronis (Mukono, 2019).

d. Sumber Pencemaran SO₂

Pencemaran SO₂ di udara berasal dari pemakaian batubara di kegiatan industri, transportasi dan lain sebagainya, namun sumber utamanya berasal dari pembakaran stasioner yang memakai bahan bakar batubara dan bahan bakar minyak (Mukono, 2019).

1) Sumber Antropogenik (kegiatan manusia)

a) Sumber Tidak Bergerak

Sulfur dioksida dihasilkan dari sumber yang tidak bergerak, mayoritas sumbernya adalah cerobong asap atau tangki penyimpanan yang memancarkan emisi gas buang, selain itu terdapat sumber lain yaitu pembakaran bahan bakar rumah tangga. Sumber ini menyumbang pencemaran sebesar 72,5%.

b) Sumber bergerak

Transportasi kendaraan bermotor dapat menyumbang pencemaran SO₂, namun kadar yang dihasilkan jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan sumber tidak bergerak. Sumber ini menyumbang pencemaran sebesar 2,4%.

e. Efek terhadap kesehatan

Pajanan SO₂ di dalam dan luar ruangan dapat menyebabkan penyakit saluran pernapasan. Kelarutan SO₂ yang tinggi akan mengakibatkan iritasi yang parah pada saluran pernapasan dan mata. Efek pajanan SO₂ timbul dari pajanan industri, pajanan SO₂ dari industri dapat menyebabkan penurunan fungsi paru-paru. Selain itu efek asap batu bara dari industri dapat mengakibatkan efek mutagenik pada makhluk hidup (Mukono, 2019). SO₂ dapat merusak fungsi paru-paru dalam kadar 25 mg/m³ di lingkungan hanya dalam waktu 10 menit (Machdar, 2018).

Penyakit yang timbul diakibatkan karena SO₂ adalah ISPA, SO₂ akan mempengaruhi keutuhan lapisan mukosa, penambahan sekresi mukus dan mengganggu pergerakan silia, hal ini memicu mudahnya mikrobiologi dalam menginfeksi saluran pernapasan (Sundari, 2019).

Tabel 2.5 Pengaruh SO₂ terhadap kesehatan (dalam ukuran kadar ppm)

No	Kadar (ppm)	Pengaruh
1	3 – 5	Jumlah terkecil yang mampu terdeteksi dari baunya
2	8 – 12	Jumlah terkecil yang dapat menyebabkan iritasi tenggorokan
3	20	Jumlah terkecil yang dapat menyebabkan iritasi mata Jumlah terkecil yang dapat menyebabkan batuk dan maksimum yang diperbolehkan untuk kontak dengan waktu yang lama
4	50 – 100	Maksimum yang diperbolehkan untuk kontak dengan waktu yang singkat (30 menit)
5	400 – 500	Berbahaya meskipun kontak dengan waktu yang singkat

Semakin tinggi kadar SO₂, maka risiko yang akan ditimbulkan menjadi semakin berbahaya bagi kesehatan manusia. Pada kadar yang

rendah hanya dapat terdeteksi baunya oleh indera penciuman dan pada kadar yang sangat tinggi berbahaya bagi kesehatan meskipun hanya kontak dalam waktu yang singkat dengan SO₂.

f. Baku mutu

Tabel 2.6 Baku Mutu SO₂

Bahan Pencemar	Waktu rata-rata	Amerika USEPA (µg/m ³)	Negara-negara Eropa (µg/m ³)	WHO (µg/m ³)	Indonesia (µg/m ³)
Sulfur Dioksida (SO ₂)	1 jam	-	-	350	150

Sumber : (Machdar, 2018 dan KLHK, 2021).

Tabel diatas menunjukkan standar baku mutu yang di tetapkan di beberapa negara dan organisasi kesehatan dunia, baku mutu di Indonesia mengacu pada lampiran PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Metode analisis menggunakan pararosanilin dan peralatan menggunakan spektrofotometer.

g. Cara pengukuran SO₂

Pengukuran SO₂ menggunakan metode pararosanilin dengan menggunakan alat spektrofotometer. Pengukuran ini mengacu pada standar Nasional Indonesia (SNI) 7119-7:2017. Prinsip kerja pada pengukuran ini adalah menjerap SO₂ di udara ke dalam larutan penjerap tetrakloromerkurat membentuk senyawa kompleks diklorosulfonatomerkurat. Penambahan larutan pararosanilin dan formaldehida maka membentuk senyawa pararosanilin metil sulfonat

yang berwarna ungu. Konsentrasi larutan diukur pada panjang gelombang 550 nm.

- 1) Bahan yang digunakan untuk pengukuran SO_2 adalah
 - a) Larutan penjerap tetrakloromercurat (TCM) 0,04 M ;
 - b) Larutan induk natrium metabisulfit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$);
 - c) Larutan standar natrium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$);
 - d) Larutan induk iod (I_2) 0,1 N;
 - e) Larutan iod (I_2) 0,01 N;
 - f) Larutan indikator kanji;
 - g) Larutan asam klorida (HCl) (1+10);
 - h) Larutan induk tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1 N;
 - i) Larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N;
 - j) Larutan asam klorida (HCl) 1 M;
 - k) Larutan asam sulfamat ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) 0,6%;
 - l) Larutan asam fosfat (H_3PO_4) 3 M;
 - m) Larutan induk pararosanilin hidroklorida ($\text{C}_{18}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{HCl}$) 0,2%;
 - n) Larutan kerja pararosanilin;
 - o) Larutan formaldehida (HCHO) 0,2%;
 - p) Larutan penyangga asetat 1 M (pH = 4,74).
- 2) Peralatan Pengukuran
 - a) Peralatan pengambilan contoh uji SO_2 sesuai gambar 2.2;
 - b) Labu ukur 25 mL, 50 mL, 100 mL, 250 mL, 500 mL dan 1.000 mL;

- c) Pipet volumetrik;
 - d) Gelas ukur 100 mL;
 - e) Gelas piala 100 mL, 250 mL, 500 mL dan 1.000 mL;
 - f) Spektrofotometer sinar tampak dilengkapi kuvet;
 - g) Timbangan analitik dengan ketelitian 0,1 mg;
 - h) Buret 50 mL;
 - i) Labu erlenmeyer asah bertutup 250 mL;
 - j) Oven;
 - k) Kaca arloji;
 - l) Termometer;
 - m) Pengaduk; dan
 - n) Botol reagen.
- 3) Pengambilan Contoh Uji
- a) Susun peralatan seperti pada gambar 2.4
 - b) Masukkan larutan penjerap SO₂ sebanyak 10 mL ke dalam botol penjerap, atur botol penjerap agar tidak terhindar dari matahari langsung dengan alumunium foil;
 - c) Hidupkan pompa penghisap udara dan atur kecepatan alir 0,5 L/menit setelah stabil catat laju alir awal (F1) dan pantau sekurang-kurangnya 15 menit;
 - d) Lakukan pengambilan contoh uji selama 1 jam dan catat temperatur dan tekanan udara;
 - e) Matikan pompa penghisap setelah 1 jam

- f) Diamkan selama 20 menit setelah pengambilan contoh uji untuk menghilangkan pengganggu.
- 4) Pembuatan Kurva Kalibrasi
- a) Optimalkan alat spektrofotometer sesuai petunjuk penggunaan alat;
 - b) Buat deret larutan kerja dalam labu takar 25 mL dengan 1 blanko dan minimal 3 kadar yang berbeda;
 - c) Tambahkan larutan penjerap sampai volume;
 - d) Tambahkan 1 mL larutan asam sulfamat 0,6% dan tunggu sampai 10 menit;
 - e) Tambahkan 2 mL larutan formaldehida 0,2% dan mL larutan pararosanilin, diamkan selama 30 menit;
 - f) Tempatkan dengan *aquades* sampai volume 25 mL, lalu homogenkan;
 - g) Ukur serapan masing-masing larutan standar dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm paling lama 30 menit;
 - h) Buat kurva kalibrasi antara serapan dengan jumlah SO₂ (µg).
- 5) Perhitungan Contoh Uji

Konsentrasi SO₂ dalam pengambilan contoh uji selama 1 jam dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$C = \frac{a}{V} \times 1000$$

Keterangan :

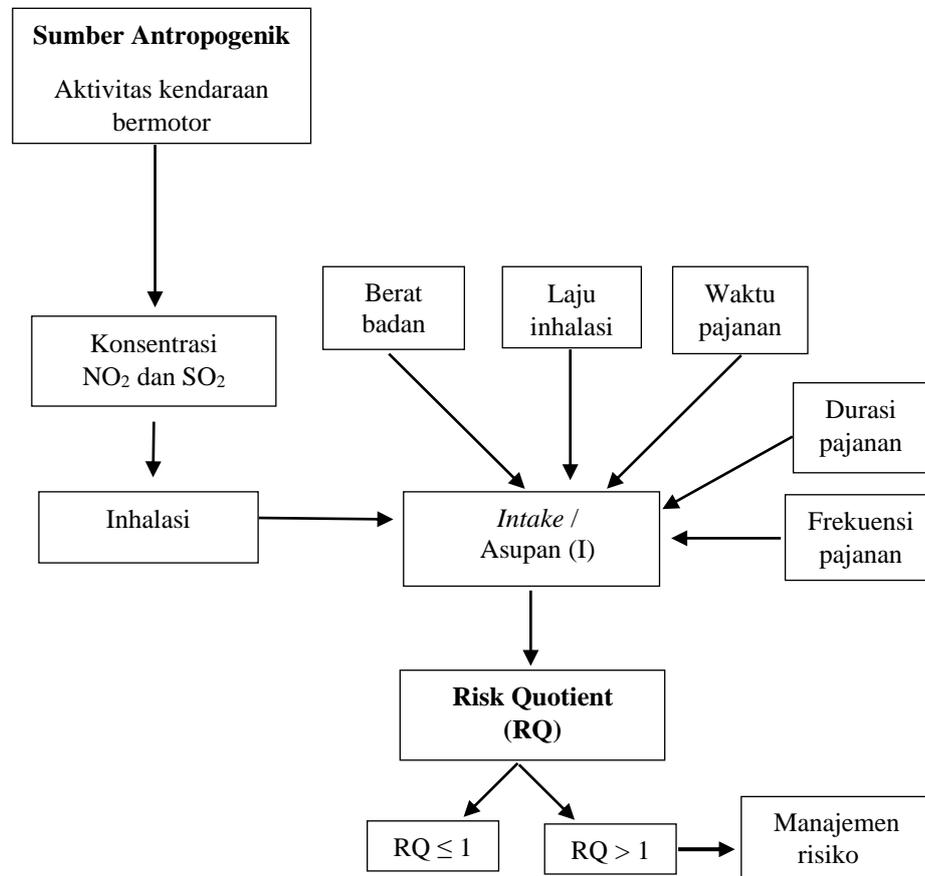
C = konsentrasi SO₂ di udara (μg/Nm³)

a = jumlah SO₂ dari contoh uji dengan melihat kurva kalibrasi (μg)

V = volum udara pada kondisi normal (L)

1000 = konversi liter ke m³

B. Kerangka teori



Gambar 2.5 Kerangka Teori Modifikasi

Dirjen PP & PL (2012), Louvar & Louvar (1997), Mukono (2019).