

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Pembangunan Berkelanjutan**

Sampai dengan tahun 1980-an di Negara-negara berkembang dan tahun 1970-an di Negara-negara maju strategi pembangunan dilakukan dengan orientasi pada pertumbuhan ekonomi (*economic growth*). Secara historis, konsep pembangunan berkelanjutan (*SD / Sustainable Development*) muncul dalam konteks masalah lingkungan yang dituangkan di dalam Piagam Dunia untuk Lingkungan. Kekhawatiran ini dibahas dalam *Our Common Future* dan selanjutnya diuraikan dalam 40 Bab Agenda 21 dari KTT Bumi pada tahun 1992 (Hák, Janoušková, & Moldan, 2016, p. 565-573). Hal itu dapat dilihat sebagai upaya sukses untuk merekonsiliasi dua paradigma yang tampaknya kontras: pertumbuhan ekonomi yang langgeng dan perlindungan lingkungan dan sumber daya alam yang efisien yang secara paksa terpapar sesuai publikasi *The Limits to Growth* (Turner, 2008, pp. 397-411).

Ada berbagai definisi dari Pembangunan Berkelanjutan. Tapi semua definisi berfokus pada bagaimana agar perekonomian dapat tetap berlanjut dalam jangka panjang, terutama untuk memberi kesempatan pada generasi yang akan datang memperoleh kehidupan yang lebih baik. *World Commission on Environment and Development* (WECD), sejak tahun 1987 memberikan deskripsi dari Pembangunan Berkelanjutan adalah pembangunan yang memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi yang akan datang untuk memenuhi kebutuhan mereka (Julisar, 2012). Dalam (Hadi, 2001) menyatakan bahwa konsep pembangunan berkelanjutan menurut Dr. Emil Salim yaitu konsep pembangunan yang menempatkan pembangunan dalam prespektif jangka panjang (*a longer term prespective*), di mana konsep tersebut menuntut adanya solidaritas antar generasi.

Pembangunan berkelanjutan ditujukan untuk mengurangi kemiskinan dan juga mengeliminasi kerusakan sumber daya alam dan lingkungan. Sehingga pembangunan berkelanjutan secara implisit mengandung arti memaksimalkan keuntungan pembangunan dengan tetap menjaga kualitas sumber daya alam yang merupakan bagian dari ekosistem. Selain hal tersebut dijelaskan bahwa Emil Salim tahun 1999 mengemukakan langkah strategis konsep pembangunan berkelanjutan untuk Negara berkembang termasuk Indonesia, yaitu salah satunya menerapkan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (Amdal). Pelaksanaan analisa dampak dengan tujuan setiap

rencana usaha dan/ atau kegiatan tidak hanya layak secara ekonomis dan teknologis tetapi juga layak secara lingkungan. (Hadi, 2001, pp. 3-4). Amdal merupakan resep strategis (*strategic ingredient*) untuk mewujudkan pembangunan berkelanjutan.

## **2.2. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (Amdal)**

Konsep Amdal atau *Environmental Impact Assessment* (EIA) yang resmi berkembang pada tahun 1969 yaitu ditandai dengan dikeluarkannya *National Environmental Policy Act* (NEPA) oleh legislatif Amerika Serikat dan telah diterima secara internasional serta ditetapkan implementasinya sebagai dasar pengelolaan lingkungan. Pada tahun 1996, EIA sudah tersebar di lebih dari 100 negara, dan pada tahun 2012, beberapa bentuk Konvensi yang dianut di 191 dari 193 negara di dunia. Dalam perkembangannya Amdal yang merupakan proses yang secara khusus ditujukan untuk mengeksplorasi *futures* (opsi-opsi masa depan) untuk mencapai berkelanjutan (Duinker & Greig, 2006), terus menerus diteliti. Dari studi tentang EIA pada implementasi pengelolaan masih menimbulkan perdebatan dalam pendapat tentang pencapaian tujuan dimana efektifitas EIA dilihat dari proses implementasi dengan melihat tujuan EIA secara substantif dan sebagai sarana pengambilan keputusan dalam arti luas (Jones, 2016, p.187-204).

Penilaian dampak lingkungan (EIA) menurut (Cashmore, 2004; Glasson & Therivel, 2013) merupakan proses dimana dilakukan proses perkiraan kerusakan, dievaluasi, dan jika diperlukan dikurangi, sebelum keputusan dan komitmen utama ditetapkan. Penilaian dampak lingkungan dinyatakan sebagai evaluasi pada dampak yang muncul terhadap proyek yang secara signifikan memberikan dampak penting pada lingkungan, dengan melalui proses sistem sistematis untuk bahan pertimbangan di dalam penetapan kelayakan. Proses penilaian dampak lingkungan mensyaratkan interaksi, pengumuman, pelaporan yang menggambarkan dampak-dampak secara signifikan dengan detail. Dalam proses evaluasi memerlukan perundingan dan partisipasi masyarakat. (Jay et al., 2007, pp. 287-300). Pengenalan penilaian dampak lingkungan, pada zamannya, merupakan cara revolusioner untuk memastikan pertimbangan faktor lingkungan dalam pengambilan keputusan. Pada perkembangan setelah sekitar 50 tahun kemudian, Amdal (*impact assessment*) telah berkembang menjadi berbasis substantif luas dalam pengambilan keputusan proyek dan kebijakan, dan telah menunjukkan fleksibilitas dan ketahanan, prosesnya diadaptasi dan diterapkan dalam berbagai konteks dan pengaturan di seluruh dunia. Perkembangan lainnya adalah terjadi penguatan dengan fokus ke penilaian lingkungan strategis (KLHS), penilaian

keberlanjutan, penilaian dampak ekonomi, penilaian dampak sosial, penilaian dampak kesehatan, dan penilaian dampak kumulatif.

Efektivitas Amdal banyak diteliti, Sadler (1996) dalam bidang penilaian lingkungan, efektivitas di definisikan sebagai ukuran keberhasilan untuk mencapai fungsi sebagaimana dimaksud dan memenuhi tujuan yang dirancang dalam Amdal, berdasarkan tiga kategori efektivitas penilaian lingkungan yaitu prosedural, substantif dan transaktif. Efektivitas prosedural berarti bahwa penilaian sesuai dengan standar dan prinsip yang dapat diterima, efektivitas substantif menunjukkan pencapaian tujuan yang diharapkan dan efektivitas transaktif dicapai di mana hasil diperoleh dengan biaya paling sedikit dalam kerangka waktu minimum. Efektivitas normatif pada rangkaian kategori yang dikembangkan oleh Baker and McLelland, 2003. Tujuan lain disebutkan dalam NEPA bagian 101 (a) bahwa Amdal mendasari perihal memulihkan dan menjaga kualitas lingkungan (Jay et al., 2007, pp. 287-300). Yang mempengaruhi efektivitas Amdal adalah dinamika yang kompleks dari politik dan kekuasaan (Cashmore et al., 2010). Penelitian lain menyebutkan bahwa salah satu penyebab kurangnya efektivitas dalam pemantauan yaitu kurangnya personel di lembaga-lembaga pemerintahan, kurangnya kapasitas pelaksanaan, kurangnya sumber daya keuangan, dispersi tanggung jawab di berbagai lembaga, memaksa banyak tugas dan memperlambat proses juga merupakan faktor signifikan. (Coze & Nava, 2009). Di Negara berkembang Amdal tidak efisien karena masih di anggap formalitas, dan dan tidak dilaksanakan dengan baik pada tahanan implementasi, peninjauan, penilaian masalah, proses pengambilan keputusan dan evaluasi monitoring. Pada siklus proyek tidak terintegrasi dalam proses penilaian dan pada saat pengambilan keputusan temuan dalam proses Amdal tidak dipertimbangkan, tetapi lebih fokus pada pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan populasi dan pemenuhan energy yang semakin meningkat (Abdul-sattar, 2007)

Tabel 2.1. Kategori Efektifitas dan Deskripsi

<b>Kategori</b>	<b>Definisi</b>
Efektifitas Procedural	Apakah proses EA (penilaian lingkungan) sesuai dengan ketentuan dan prinsip yang ditetapkan? (Sadler, 1996)
Efektifitas Substantif	“Apakah proses EA mencapai tujuan yang ditetapkan, misal mendukung dengan baik pengambilan keputusan yang tepat dan

Kategori	Definisi
Efektifitas Transaktif	menghasilkan perlindungan lingkungan? (Sadler, 1996) “Apakah proses EA yang memberikan hasil-hasil setidaknya dengan biaya dan dalam waktu minimum memungkinkan, apakah efektif dan efisien?” (Sadler, 1996)
Efektifitas Normatif	“Pemeriksaan tujuan termasuk mencari tahu apa tujuan normatif yang direalisasikan” (Baker & McLelland, 2003)

Melalui Amdal, kelayakan sebuah rencana usaha dan atau/ kegiatan dapat ditetapkan. Namun implementasi Amdal di seluruh dunia kondisinya sama yaitu masih banyak mendapat kritikan dan mengalami kendala karena dianggap menghambat pembangunan, terlalu mahal, prosedural, dan politis. Di sisi yang berbeda Amdal dihambat oleh masyarakat penentang proyek karena tidak Amdal tidak dipercaya dapat mewujudkan perlindungan kepentingan lingkungan dan sosial. Amdal di Indonesia yang berliku sejak tahun 1986 belum andal sebagai alat untuk ikut mewujudkan *sustainable development* karena masih memiliki banyak kelemahan yaitu (1) tidak mampu meng”address” isu-isu lingkungan dan sosial strategis pada tempat yang diwajibkan pelaksanaan Amdal; (2) diperlakukan sebagai formalitas untuk mendapatkan ijin lingkungan karena pengawasan dan penegakan hukum lemah ; (3) RKL-RPL tidak dilaksanakan dengan baik (Hadi, 2009, pp. 1–21). Pada tahun 2020 pemerintah Indonesia dengan rencana kebijakan *omnibus law* lingkungan hidup, diperkirakan dengan pendekatan ijin sebagai instrument ekonomi salah satunya menghilangkan Amdal. Padahal sebagai salah satu alat pembangunan berkelanjutan Amdal dalam melakukan *assessment* harus melalui pelingkupan, analisis dampak beserta rona lingkungannya, evaluasi dampak dan rekomendasi RKL RPL (Hadi, 2020).

Pendapat lain menyebutkan bahwa kelemahan Amdal adalah belum secara fokus melakukan kajian dengan menggunakan literatur ekologi dengan maksimal, dimana saat ini tersedia sangat banyak teori untuk memodelkan prediksi dampak pembangunan tertentu pada komponen ekosistem terukur (*valued ecosystem component*). Permodelan merupakan analisis dengan pendekatan non skenario yang melibatkan hubungan matematis untuk meniru atau menjelaskan system dengan rangkaian algoritma yang

konsisten secara internal untuk meramalkan dampak, namun hasil permodelan terdapat kendala adanya kondisi *uncertainty*. Diusulkan dalam kajian dampak dengan pendekatan scenario yaitu tidak melakukan pembuatan prediksi tetapi lebih pada pendiskripsian gambaran masa depan dan memperluas prespektif melalui manajemen resiko agar AMDAL efektif (Duinker & Greig, 2006).

Perkembangan Amdal Indonesia yang diteliti Purnama (2003, pp. 415–439) pada periode tahun 1999-2002 didapatkan kondisi adanya perbaikan untuk membuat implementasi Amdal lebih mudah dan lebih efektif. Hal baru dalam perbaikan termasuk pengenalan keterlibatan publik dalam implementasi dalam proses Amdal. Pemangku kegiatan mengikuti penetapan dan penyebaran pedoman Amdal untuk melaksanakan prosedur keterlibatan publik. Prosedur ini dimasukkan ke dalam proposal proyek yang disusun pemangku kegiatan untuk dilaksanakan. Pada tahap awal terlihat kendala tetapi diyakini bahwa mereka tidak akan menghilangkan tambahan nilai implementasi keterlibatan publik dalam tanggung jawab pemangku kegiatan. Penelitian lain oleh Kurniawan et al (2019, pp. 1–7) melalui kajian yang mendalam dengan mengevaluasi kerangka kebijakan dan menyelidiki studi kasus untuk memahami sistem Amdal yang telah dipraktekkan selama 36 tahun terakhir di Indonesia yaitu sejak tahun 1982 didapatkan bahwa perkembangannya dipengaruhi faktor politik dan birokrasi. Secara umum dari Amdal di Indonesia oleh pemangku kepentingan cenderung dianggap hanya formalitas sebagai pemenuhan administrasi dan lemah dalam implementasi. Sebagai rekomendasi Indonesia harus meningkatkannya efektivitas prosedur Amdal dalam hal masalah utama seperti partisipasi publik, ilmiah database, dan kualitas pelaporan.

Untuk penelitian pelaksanaan Amdal secara sektoral di Indonesia dikaji di Kabupaten Kudus provinsi Jawa Tengah yaitu terhadap kegiatan industri yang berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan meliputi PT Djarum Primary, PT Pura Nusa Persada, PT Enggal Subur Kertas, PT Pura Power Plant Terminal cargo, terminal bus, jalan tembus dan ruko. Pada penelitian didapatkan hasil rendahnya keterlibatan dan kepedulian masyarakat dalam pengelolaan dan pemantauan lingkungan dan perlunya sosialisasi, keterlibatan dan keterbukaan informasi kepada masyarakat (Tias, 2009). Penelitian oleh Wahid, dkk. (2016) tentang implementasi Amdal dilakukan dengan mengkaji efektifitas Rencana Pengelolaan Lingkungan dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RKL-RPL) kegiatan pertambangan batubara PT. Adaro Indonesia yang berlokasi di Kabupaten Tabalong, di Kalimantan Selatan. Penelitian evaluasi implementasi Amdal tersebut dilaksanakan dengan menggunakan *mix method*

sesuai Cresswell, 2010 yaitu pendekatan kualitatif – kuantitatif dengan model *concurrent methods*. Aspek yang diteliti meliputi: (1). ketaatan pelaksanaan RKL-RPL, (2). kelembagaan pengawasan dan (3). penanganan pengaduan masyarakat. Lokasi wilayah penelitian sesuai dengan dokumen Amdal dan dengan waktu kajian pada tahap operasional. Data Sekunder diperoleh dari studi literasi dari pelaporan pengelolaan lingkungan kurun waktu 5 (lima) tahun. Untuk data primer secara kualitatif dilakukan dengan cara observasi, wawancara dan telaah pustaka. Wawancara terhadap pemerintah, PT. Adaro Indonesia selaku pemrakarsa dan masyarakat Kabupaten Tabalong di desa sekitar penambangan serta LSM Lingkungan. Hasil penelitian untuk pelaksanaan RKL-RPL pertambangan di perusahaan PT. Adaro Indonesia secara yuridis formal sudah dikatakan efektif karena: (1). proses komunikasi dan koordinasi yang intensif baik internal maupun eksternal, (2). sumberdaya yang mencakup staf memadai secara kuantitas dan kualitas, ada wewenang yang jelas dan fasilitas yang cukup memadai dalam pelaksanaan pengelolaan lingkungan hidup, (3). dukungan para pelaksana sesuai regulasi dan kebijakan pengelolaan lingkungan yang jelas dan tegas dari pemerintah dan dari PT. Adaro Indonesia berupa dukungan pendanaan dan anggaran pengelolaan lingkungan hidup serta ada mekanisme insentif dan disinsentif yang jelas dan tegas bagi pelaksana kebijakan pengelolaan lingkungan hidup, (4). struktur birokrasi kelembagaan yang memadai berupa adanya struktur organisasi dengan kewenangan yang jelas disertai *standard operating procedure* (SOP) di setiap pelaksanaan operasional kegiatan pertambangan PT. Adaro Indonesia. (Wahid et al., 2016, pp. 13–26). Implementasi dinilai efektif tetapi hanya pada pendekatan formal saja yaitu penataan terhadap regulasi.

Pengelolaan lingkungan selama tahap pelaksanaan proyek merupakan hal penting dalam peningkatan efektivitas Amdal. Pada konferensi tahunan yang diselenggarakan *International Association for Impact Assessment* (IAIA) tahun 2019 menyebutkan belum efektifnya masalah implementasi Amdal dialami secara global. Di Afrika Selatan terdapat kelemahan yang paling signifikan dari pelaksanaan Amdal dan *Integrated Environmental Management* (IEM) yaitu: alokasi tanggung jawab yang tidak jelas atas pelaksanaan pengelolaan lingkungan dan penggunaan metode yang tidak memadai dalam melaksanakan tanggung jawab pengelolaan. (Nadeem et al., 2013, pp. 310–317).

Amdal dilakukan terhadap semua aspek lingkungan yaitu geo, fisik, kimia, sosial, ekonomi, budaya dan kesehatan masyarakat. Implementasi Amdal secara global pada kondisi kedalaman studi minim memberikan rekomendasi pengelolaan dengan aspek sosial, dimana tidak pernah direkomendasikan tentang peran masyarakat dalam pengelolaan dan pemantauan lingkungan karena tidak dipandang sebagai aset dalam pengelolaan (Hadi, 2001). Pendapat lain oleh Winkler et al. (2013, pp. 298–305) disebutkan bahwa pada aspek kesehatan, resiko kesehatan di awal tidak teridentifikasi secara cukup sehingga menimbulkan kerugian berupa biaya yang tidak perlu untuk proyek dan dalam beberapa kasus dapat mengancam pencapaian proyek itu sendiri. Dengan demikian kesempatan untuk proyek agar berkontribusi secara positif dalam kesehatan dan kesejahteraan masyarakat sekitar dapat luput dari perhatian atau kurang mendapatkan perhatian jika masalah kesehatan tidak sepenuhnya dipertimbangkan sebagai bagian dari *due diligence* dan perencanaan. Dalam regulasi, Amdal memberikan kerangka hukum yang kuat untuk penilaian dampak kesehatan, tetapi dalam penerapannya hanya sebagai formalitas dalam rangka pengambilan keputusan (Pfeiffer et al., 2017, pp. 39–53).

### **2.3. Evaluasi Kinerja Lingkungan**

Standar Internasional di bidang manajemen dan berkembang pada bidang lingkungan yaitu ISO 14000 tentang *Environmental Management System* (EMS) yang berkembang pada tahun 1996. Selanjutnya organisasi Standar Internasional mengadopsi standar internasional baru untuk EMS - ISO 14001 dengan tujuan tidak hanya untuk meningkatkan harapan praktik lingkungan di seluruh dunia, tetapi juga untuk memfasilitasi perdagangan dan mengurangi hambatan perdagangan.. Lebih khusus lagi, ISO 14001 mencakup area umum berikut: EMS, audit, evaluasi kinerja, pelabelan, penilaian siklus hidup, dan standar produk. Dalam manajemen lingkungan evaluasi kinerja lingkungan bersama audit lingkungan merupakan bagian dari sistem manajemen lingkungan (Melnik et al., 2003, pp. 329–351).

Sejak tahun 1997 standar ini setiap lima tahun sekali dimutakhirkan oleh ISO. *Participating member* (memiliki hak suara dalam pemungutan suara) ISO adalah negara-negara yang telah memiliki Badan Standardisasi Nasional. Indonesia sudah lama menjadi anggota ISO. Salah satu standar kinerja pengelolaan (atau manajemen) lingkungan, yang dikenal sebagai *Environmental Performance Evaluation* (EPE) ISO 14031: 2013 yang bersifat *voluntary*. Pemerintah melalui Badan Standardisasi Nasional Indonesia mengadopsi menjadi Standar Manajemen Lingkungan – Evaluasi Kinerja

Lingkungan – Panduan. Dari standar ini memungkinkan organisasi mengukur, mengevaluasi dan melakukan komunikasi kinerja mereka dengan menggunakan indikator kinerja utama, berdasarkan informasi yang dapat diandalkan dan dapat diverifikasi serta organisasi menerapkan koreksi dan teknik terhadap manajemen lingkungan lainnya secara koheren, transparan dan biaya yang efektif. EPE adalah suatu proses manajemen yang menggunakan indikator utama untuk membandingkan kinerja lingkungan suatu organisasi pada masa lalu dan saat ini untuk tujuan (*objective*) dan sasaran (*target*) organisasi. Dari informasi hasil evaluasi kinerja lingkungan dapat membantu organisasi untuk melaksanakan (a). identifikasi aspek lingkungan dan menentukan aspek yang ditetapkan penting; (b). menentukan tujuan dan sasaran untuk memperbaiki kinerja lingkungan dan menilai kinerja terhadap tujuan dan saran yang ditetapkan; (c). identifikasi peluang untuk pengelolaan aspek lingkungan organisasi; (d). identifikasi kecenderungan kinerja lingkungan organisasi; (e). Meninjau dan memperbaiki kinerja organisasi untuk efisien dan efektif; (f) identifikasi peluang strategis; (g). evaluasi penaatan; (h). melaporkan dan mengkomunikasikan kinerja lingkungan pada internal dan eksternal. Standar EPE dilakukan dengan pendekatan model manajemen yaitu *Plan-Do-Check-Act* (PDCA). Dalam melakukan evaluasi kinerja lingkungan ditetapkan antara lain Management performance indicator (MPI) yaitu indikator yang merupakan informasi kegiatan manajemen organisasi yang dapat mempengaruhi kinerja lingkungan; *Environmental Condition Indicators* (ECI) yaitu adalah indikator kinerja lingkungan yang menyediakan informasi tentang kondisi lingkungan lokal, regional, nasional atau global dan *Environmental Performance Indicators* (EPI) yang merupakan indikator yang menyediakan informasi mengenai kinerja lingkungan organisasi. Dan untuk mengukur, mengevaluasi dan melakukan komunikasi kinerja lingkungan digunakan indikator kinerja utama atau *key performance indicator* atau disingkat KPI. Berdasarkan SNI 19-14001-2015, 3..20 istilah dan definisi KPI adalah indikator kinerja yang dianggap penting oleh suatu organisasi dan memberikan keunggulan dan perhatian terhadap aspek tertentu (Badan Standardisasi Nasional, 2016).

Beberapa penelitian tentang evaluasi kinerja lingkungan banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan metode ilmiah. Penelitian pada perusahaan di Uni Eropa (Baltic, Mediterranean, Central, Atlantic) pada skala kecil, menengah dan besar pada sektor manufaktur, industri dan jasa. Perusahaan terpilih merupakan organisasi yang menerapkan program *Eco-management and Audit Scheme* (EMAS) dengan menggunakan evaluasi implementasi Sistem Manajemen Lingkungan (SML). Tujuan



penelitian untuk mengevaluasi kinerja Peraturan EMAS terhadap efek kinerja perusahaan baik dari aspek lingkungan dan sudut pandang kompetitif. Dengan Analisis ekonometrik menunjukkan dampak positif pada kinerja lingkungan dan efek variable kompetitif lainnya seperti kinerja pasar, produktivitas sumber daya dan aset tidak didukung (Iraldo et al., 2009, pp. 1444-1452). Penelitian lain yaitu dengan melakukan evaluasi kinerja perusahaan dengan melakukan kajian terhadap kegiatan pemasok barang industri *white goods* di Turki. Dengan menggunakan metode *fuzzy ANP* dan *Fuzzy PROMETHEE* yang berdasarkan penetapan *decision making team* pada setiap tahap evaluasi. Disimpulkan bahwa kinerja lingkungan perusahaan tidak hanya terpengaruh upaya yang dilakukan dalam lingkungan perusahaan tetapi juga dipengaruhi oleh kinerja dan citra lingkungan pemasok (Tuzkaya et al., 2009, pp. 477–490). Penelitian terhadap kinerja lingkungan dengan memilih system manajemen kesehatan pada beberapa perusahaan di Beijing dengan menggunakan Fuzzy Cognitive Maps (FCM) yaitu metodologi yang didorong oleh pengetahuan kausal untuk memodelkan sistem keputusan yang kompleks, yang berasal dari kombinasi logika fuzzy dan jaringan neural. Teknik fuzzy ini menggabungkan akumulasi pengalaman dan pengetahuan dengan mempekerjakan para ahli yang menyadari operasi sistem dan perilaku dalam situasi yang berbeda, dan kemudian memberikan pola tersembunyi dari masalah tersebut. Hasil penelitian merekomendasikan (1) kesehatan, keselamatan, elemen lingkungan serta sub-kinerja sistem ditentukan dan terstruktur dan kemudian melalui penggunaan FCM dan menunjukkan hubungan sebab dan akibat mereka dan kemudian membangun indikator kepemimpinan untuk kinerja sistem, dan (2) dalam model distribusi bobot semua pengetahuan yang tersedia digunakan untuk memperkaya FCM yang berfungsi sebagai model pengambilan keputusan berbasis pengetahuan, dengan demikian dapat menangani pendapat para ahli dengan lebih baik (Kang et al., 2016, pp. 92–100). Pada kegiatan pembangkit listrik dilakukan penelitian pada kinerja PLTU di Iran pada periode restrukturisasi di industri listrik periode 8 tahun (2003-2010) dengan menghitung efisiensi, eco-efisiensi dan perubahan teknologi. Hasil evaluasi dari restrukturisasi memiliki efek yang berbeda pada pembangkit listrik individu dan pertumbuhan keseluruhan pembangkit listrik untuk efisiensi lingkungan disebabkan oleh kemajuan teknologi murni. Korelasi antara efisiensi dan eco-efisiensi memberikan pengaruh positif pada kinerja pembangkit listrik (Arabi et al., 2014, pp. 132-145). Penelitian yang sejenis dengan menghitung eco-efisiensi dengan menggunakan *big data* hasil : Terdapat empat masalah yang mungkin terjadi dalam evaluasi kinerja dalam konteks *big data* yaitu: (1) sejumlah besar informasi yang kompleks, (2) informasi

dinamis yang tidak terstruktur, (3) kurangnya akurasi dan stabilitas data, dan (4) penggunaan input berulang. Sebagai rekomendasi penelitian adalah perlu pengembangan model prediksi pada penelitian masa depan (Song et al., 2017, pp. 976-984).

#### **2.4. Partikel Debu**

Partikulat material yang bersumber dari alami dan antropogenik memberikan pengaruh negatif terhadap iklim dan kesehatan (Huang et al., 2014, pp. 1–10; Kim et al., 2015, pp. 136–143). The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) membuat klasifikasi ukuran debu yaitu partikel halus yaitu partikel terkecil dengan diameter 2.5 mikrometer atau kurang dan hanya dapat dideteksi hanya dengan mikroskop elektron. Aerodinamis diameter partikel merupakan salah satu faktor yang menggambarkan kemampuan transportasinya di atmosfer dan juga kemampuan inhalasi manusia (Esworthy, 2013, pp. 12–43). Klasifikasi partikel juga dilakukan berdasarkan potensi mereka untuk menyebabkan masalah kesehatan. Partikel kecil yang menjadi perhatian termasuk partikel kasar yang dapat dihirup dengan diameter 2,5 hingga 10  $\mu\text{m}$  dan partikel halus dengan diameter lebih kecil dari 2,5  $\mu\text{m}$ . Karena hubungan efek-sumber dari PM masih belum jelas, tidak mudah untuk mendefinisikan efek-efek tersebut dari sumber-sumber individual seperti pengangkutan polusi jangka panjang. Banyak penelitian mengkaitkan peran potensial dari PM dan polutan, sehingga diperlukan pengetahuan terperinci tentang dampak kesehatan manusia (Pun et al., 2014). Partikel halus sumber utamanya tersebut antara lain kendaraan bermotor, pembangkit listrik, perumahan, pembakaran kayu, kebakaran hutan, pembakaran pertanian, beberapa proses industri, dan proses pembakaran lainnya (Srimuruganandam & Nagendra, 2012, pp. 8–19). Sumber partikel kasar termasuk operasi penghancuran atau penggilingan batu dan debu yang diaduk oleh kendaraan yang melakukan perjalanan di jalan, resusupensi tanah, pembakaran biomasa (Crilley et al., 2017). Materi partikulat (PM) adalah indikator utama polusi udara yang dibawa ke udara oleh berbagai aktivitas alami dan manusia, dapat ditangguhkan untuk waktu yang lama dan perjalanan jarak jauh di atmosfer, itu dapat menyebabkan berbagai macam penyakit yang mengarah pada pengurangan yang signifikan dalam kehidupan manusia. Partikel halus dari hasil pembakaran mengantung di udara dan pengaruh ukuran sehingga dapat dihirup secara langsung. Transportasi partikel halus 100-1000 km, sedangkan partikel kasar 1-10 km (Srimuruganandam & Shiva Nagendra, 2012).

Tolok ukur untuk kualitas udara ambien adalah berdasarkan SK Gubernur Jawa Tengah No 8 Tahun 2001 tentang Baku Mutu Udara Ambien di Provinsi Jawa Tengah. Secara lengkap tersaji pada tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Baku Mutu Udara Ambien di Provinsi Jawa Tengah

NO	PARAMETER	WAKTU PENGUKURAN	BAKU MUTU	METODE ANALISIS	PERALATAN
1	SO <sub>2</sub>	1 Jam 24 Jam 1 Tahun	632 µg/Nm <sup>3</sup> 365 µg/Nm <sup>3</sup> 60 µg/Nm <sup>3</sup>	Pararosanilin	Spektrofotometer
2	CO	1 Jam 24 Jam 1 Tahun	15.000 µg/Nm <sup>3</sup> 10.000 µg/Nm <sup>3</sup>	NDR	NDR Analyser
3	NO <sub>2</sub>	1 Jam 24 Jam 1 Tahun	316 µg/Nm <sup>3</sup> 150 µg/Nm <sup>3</sup> 100 µg/Nm <sup>3</sup>	Saltzman	Spektrofotometer
4	O <sub>2</sub>	1 Jam 1 Tahun	200 µg/Nm <sup>3</sup>	Chemiluminescent	Spektrofotometer
5	HC (Hidro Carbon)	3 Jam	160 µg/Nm <sup>3</sup>	Flame Ionization	Gas Chromatografi
6	PM <sub>10</sub> PM <sub>2.5</sub>	24 Jam 24 Jam 1 Tahun	150 µg/Nm <sup>3</sup> 65 µg/Nm <sup>3</sup> 15 µg/Nm <sup>3</sup>	Gravimetric	Hi-Vol
7	TSP	24 Jam 1 Tahun	230 µg/Nm <sup>3</sup> 90 µg/Nm <sup>3</sup>	Gravimetric	Hi-Vol
8	Pb (Timah Hitam)	24 Jam 1 Tahun	2 µg/Nm <sup>3</sup> 1 µg/Nm <sup>3</sup>	Gravimetric Ekstraktif Pengabutan	Hi-Vol AAS
9	Dust Fall (debu Jatuh)	30 Hari	10 Ton/km <sup>2</sup> /bl (pemukiman) 20 Ton/km <sup>2</sup> /bl (industri)	Gravimetric	Cannister
10	Total Fluorides (as F)	24 Jam 90 Hari	3 µg/Nm <sup>3</sup> 0,5 µg/Nm <sup>3</sup>	Specific Ion Electrode	Impinger atau Continuous Analyser
11	Flour Indeks	30 Hari	40 µg/100cm <sup>2</sup> dari kertas limed filter	Colourimetric	Limited Filter Paper
12	Khlorine dan Klhorine Dioksida	24 Jam	150 µg/Nm <sup>3</sup> 10000 µg/Nm <sup>3</sup>	Specific Ion Electrode	Impinger atau Continuous Analyser
13	Sulphat Indeks	30 Hari 24 Jam	1mg SO <sub>2</sub> /100cm <sup>2</sup> dari Lead Peroksida	Colourimetric	Lead Peroksida Candle

Sumber: SK Gubernur Jawa Tengah No 8 Tahun 2001

## 2.5. Emisi PLTU

Prioritas kebijakan pemerintah Indonesia dalam pengembangan energi meliputi beberapa hal yaitu energi terbarukan yang maksimal dengan memperhatikan tingkat keekonomian, meminimalkan penggunaan minyak bumi, penggunaan gas bumi dan

energy baru secara optimal, serta menjadikan energi batubara sebagai andalan pasokan energy nasional. Kebutuhan energi primer di Indonesia terbesar di Asia Tenggara dengan sumber daya berasal dari batubara dengan nilai 15% dari total kebutuhan global (Priddle, 2016). Sebagai sumber daya bahan bakar fosil untuk pembangkit energi, batubara menawarkan solusi yang menarik untuk mengatasi masalah peningkatan biaya bahan bakar (Othman, et al, 2009). Dengan demikian konsumsi batubara tumbuh dengan laju lebih cepat dari pertumbuhan populasi penduduk (Hasan et al., 2012, pp. 2316–2328). Laju konsumsi tercepat sebesar 4,7% per tahun sejak tahun 2002, sehingga dengan dominasi pembangkit listrik bahan bakar batubara di Indonesia pada tahun 2005 konsumsinya pada nilai 29,4 juta ton dan diproyeksikan akan terjadi peningkatan pada tahun 2020 menjadi 75 juta ton. Permintaan listrik tumbuh setiap tahun dengan nilai 4,6% dibandingkan tahun 2002. Total kapasitas pembangkit terpasang diperkirakan tumbuh hampir empat kali lipat, dari 28 GW pada 2002 menjadi 108 GW pada 2030. Dari total ini, batubara akan menyumbang sekitar 54% untuk penyediaan listrik. (Othman et al., 2009).

Di Indonesia batubara terdiri dari batubara dengan nilai panas mulai dari 4100 hingga 5300 kkal / kg diklasifikasikan sebagai sub-bituminus, dan kandungan panas lebih dari 5300 kkal / kg dianggap sebagai batubara bitumen. Spesifikasi batubara selain nilai kalori, untuk penentuan tipe kualitas batubara ekspor yaitu total moisture, ash content, volatile matter, sulfur content. Di Indonesia pemakaian batubara untuk bahan bakar pembangkit adalah dari jenis sub bituminous (Hasan et al., 2012, pp. 2316–2328).

Uap batu bara juga disebut dengan batu bara termal, digunakan di pembangkit listrik untuk menghasilkan listrik. Batu bara pertama-tama digiling menjadi bubuk yang halus, yang meningkatkan area permukaan dan membuatnya dapat terbakar lebih cepat. Pada sistem pulverized coal combustion (PCC), batu bara yang telah menjadi bubuk tersebut dimasukkan pada ruang pembakaran di boiler yang mana batu bara tersebut dibakar dengan suhu yang tinggi. Gas panas dan energi panas yang dihasilkan mengubah air (pada tabung yang melapisi boiler) menjadi uap. Tekanan uap yang tinggi kemudian melewati turbin yang mempunyai ribuan balin-baling yang menyerupai pisau. Uap yang mendorong pisau tersebut membuat poros turbin berputar dengan kecepatan tinggi. Sebuah generator dipasang pada ujung poros turbin yang terdiri dari gulungan kawat yang dililitkan dengan hati-hati. Listrik dihasilkan saat poros turbin berputar dengan cepat dalam medan magnet yang kuat. Setelah melewati turbin, uap diembunkan dan dikembalikan ke boiler untuk dipanaskan lagi (WCI 2005).

Terdapat beberapa teknik pembakaran batu bara :

- Batu bara bubuk
- Teknologi subkritisal
- Teknologi superkritisal
- Teknologi ultra-superkritisal
- Fluidized bed compustion
- Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)

Teknologi subkritisal biasanya digunakan pada pembangkit listrik untuk pembakaran batu bara yang dihaluskan, dalam boiler untuk meningkatkan uap sehingga ekspansi yang lebih lanjut pada generator turbin uap. Siklus uap subkritisal memiliki sebuah tekanan uap utama yang mana berada di bawah titik kritisal dari air. Kondisi uap digunakan pada unit subkritisal yang baru sebesar = 179 bar/541°C (2600 psia/1100°F).

Teknologi superkritisal merupakan teknologi boiler yang lebih efisien dengan melibatkan peningkatan suhu dan tekanan uap. Pada saat tekanan dan suhu uap meningkat sampai dengan titik yang kritisal, karakteristik dari uap diubah sedemikian rupa sehingga air dan uap tidak dapat lagi dibedakan. Hal tersebut dikenal dengan uap superkritisal dan merupakan sebuah teknologi yang lebih efisien (IL&FS, 2010).

Sebagai kegiatan antropogenik pada sektor energi operasional pembangkit bahan bakar batubara menjadi sumber emisi pencemar udara berupa particulate matter sebesar 85%, lainnya adalah Sulfur Oksida, Nitrogen Oksida, Carbon Monoksida, Volatile Organic Compound, Amonia (Priddle, 2016). Setiap unit pembangkit listrik menghasilkan profil emisi yang berbeda walaupun menggunakan bahan bakar batubara jenis dan tipe yang sama. Faktor pembedanya bisa juga terjadi karena pada proses pengelolaannya, misal pada proses penghilangan emisi gas SO<sub>2</sub> (Watson et al., 2001, pp. 1141–1151). Dari proses pembakaran dari pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara dinyatakan sebagai kegiatan yang merupakan sumber terpenting bagi logam berat di samping kegiatan peleburan, pembakaran dan mesin pembakaran internal pada industri. Dengan demikian emisi dari polusi udara yang berasal dari pembakaran batubara berpotensi beracun sehingga perlu pengendalian untuk membatasi efek kerusakan lingkungan (Nalbandian, 2012, pp. 71–89). Data menunjukkan pentingnya batubara sebagai sumber dari beberapa elemen jejak dalam skala global (Sloss, 2011, pp. 9–67). Dalam menentukan emisi terdapat dua pendekatan yaitu estimasi berdasarkan faktor emisi dan pengukuran langsung berdasarkan pemantauan aktual emisi di sumbernya. Faktor emisi adalah sebuah nilai yang dapat digunakan untuk memperkirakan emisi bahan bakar sumber tertentu. Faktor emisi biasanya didasarkan

pada jumlah data aktual yang relatif kecil dan digunakan apabila pelaksanaan pemantauan dengan melakukan pengukuran secara langsung tidak dapat dilaksanakan (Nalbandian, 2012). Namun ada situasi di mana faktor emisi dianggap lebih unggul daripada pengukuran emisi langsung (Sloss, 2011, pp. 9–67).

Pembangkit listrik batu bara menghasilkan berbagai macam polutan dan dampak lingkungan lainnya yang berasal dari pembakaran batu bara. Perkembangan teknologi selama beberapa dekade terakhir ini telah mengarah pada teknologi batu bara yang lebih bersih yang dapat meningkatkan efisiensi pembangkit listrik batu bara (misalnya, meningkatkan energi yang didapatkan dari setiap ton batu bara) dan untuk secara signifikan mengurangi emisi udaranya (terutama sulfur dioksida, PM, dan nitrogen dioksida) serta mengurangi dampak lingkungan. (Coutinho et al., 2014, pp. 1–143). Selama proses pembakaran batu bara, logam jejak dilepaskan dan didistribusikan dalam abu terbang, abu dasar dan gas buang (Deng et al., 2014).

Di Indonesia batubara terdiri dari batubara dengan nilai panas mulai dari 4100 hingga 5300 kkal / kg diklasifikasikan sebagai sub-bituminus, dan kandungan panas lebih dari 5300 kkal / kg dianggap sebagai batubara bitumen. Spesifikasi batubara selain nilai kalori, untuk penentuan tipe kualitas batubara ekspor yaitu total moisture, ash content, volatile matter, sulfur content. Di Indonesia pemakaian batubara untuk bahan bakar pembangkit adalah dari jenis sub bituminous (Hasan et al., 2012, pp. 2316–2328). Sebagai kegiatan *anthropogenic* pada sektor energi operasional pembangkit bahan bakar batubara menjadi sumber emisi pencemar udara berupa particulate matter sebesar 85%, lainnya adalah Sulfur Oksida, Nitrogen Oksida, Carbon Monoksida, Volatile Organic Compound, Amonia (Priddle, 2016). Setiap unit pembangkit listrik menghasilkan profil emisi yang berbeda walaupun menggunakan bahan bakar batubara jenis dan tipe yang sama. Faktor pembedanya bisa juga terjadi karena pada proses pengelolaannya, misal pada proses penghilangan emisi gas SO<sub>2</sub> (Watson et al., 2001, pp. 1141–1151). Dalam laporan lain disebutkan bahwa faktor emisi merupakan representasi yang menghubungkan kuantitas polutan yang ada di atmosfer dengan aktifitas yang dirilis yang menghasilkan polutan, di mana jumlah logam yang dipancarkan sebanding dengan jumlah batubara yang dibakar (Deng et al., 2014).

Tolok ukur untuk kualitas udara ambien adalah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Secara lengkap tersaji pada tabel 2.3.

**Tabel 2.3.** Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang Dibangun atau Beroperasi Sebelum Peraturan Menteri Ini Berlaku

No	Parameter	Kadar Maksimum		
		Batubara (mg/Nm <sup>3</sup> )	Minyak Solar (mg/Nm <sup>3</sup> )	Gas (mg/Nm <sup>3</sup> )
1	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	550	650	50
2	Nitrogen Oksida (NO <sub>x</sub> )	550	450	320
3	Partikulat (PM)	100	75	30
4	Merkuri (Hg)	0,03	-	-

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019

## 2.6. Karakterisasi Emisi Pembangkit Listrik Batubara

Selama proses pembakaran batu bara, logam jejak dilepaskan dan didistribusikan dalam abu terbang, abu dasar dan gas buang (Deng et al., 2014, pp. 469-475). Penelusuran konsentrasi elemen dari pembakaran batubara dapat memberikan informasi yang berguna tentang kinerja teknologi, dampak lingkungan dan kesehatan, dan asal-usul batubara itu sendiri (Saha et al., 2016). Dari hasil proses pembakaran pada pembangkit listrik di hasilkan abu terbang, abu bawah dan gas buang. Partikel yang dipancarkan bersama gas buang dari hasil pembakaran diklasifikasikan salah satunya berdasarkan aerodinamis diameter yang menggambarkan kemampuan transportasinya di atmosfer (Esworthy, 2013, pp. 12–43). Ukuran adalah faktor penting dalam menentukan dampaknya, yaitu "coarse particle" berdiameter antara 2,5 dan 10 mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) dan "fine particle" lebih kecil dari 2,5  $\mu\text{m}$  (Priddle, 2016). Pada pembangkit listrik bahan bakar batubara, abu terbang sebagian besar berasal dari Debu halus (PM<sub>2.5</sub>) dan PM<sub>10</sub> (Meij & Winkel, 2004, pp. 641–656). Pada penelitian emisi partikel pembangkit listrik bahan bakar batubara di dapatkan hasil yang beragam. Di India ditemukan hasil particulate matter sebesar 25% (Guttikunda & Jawahar, 2014), di China pada pembangkit kapasitas 600 MW dan 300 Mw berturut-turut hasil particulate matter adalah 11.7 – 55 mg/m<sup>3</sup> dan 9,2 – 336,7 mg/m<sup>3</sup> (Li et al., 2012, pp. 37–41). Dari hasil pancaran operasional pembangkit, perbandingan nilai Fine dan Coarse particle bisa berbeda sesuai pengelolaan atau sumber emisi (Huang et al., 2014).

Dalam proses pembakaran sempurna dengan temperatur yang tinggi serta oksidasi dan waktu tunggu yang cukup lama, pada system boiler modern biasanya dalam partikel halus yang di pancarkan tidak mengandung elemen dan karbon organik (Ohlström et al., 2000, pp. 3701–3711). Tetapi kecenderungan pada pembangkit listrik bahan bakar batubara, memberikan dorongan terhadap penurunan kualitas udara karena

pada proses pembakaran menghasilkan logam jejak dari emisi abu terbang, abu bawah dan gas (Deng et al., 2014). Hal penting yang berperan dalam mengontrol emisi udara kegiatan pra pembakaran pada pembangkit listrik adalah kualitas batubara baik yang meliputi kandungan sulfur yang rendah, kadar air rendah, kandungan abu rendah, volatile tinggi dan kalori tinggi (Li et al., 2012, pp. 37–41).

Penelitian pada abu terbang yang berasal dari pembangkit listrik, pelaksanaan pengukuran fine dan coarse particle secara bersama jarang dilakukan. Sebagian besar dilakukan pada udara ambien pada ukuran terpisah. Pada elemen kimia terdapat klasifikasi berdasarkan kehadiran nilai unsur dalam bahan alami yaitu trace elemen dengan nilai fraksi pada konsentrasi  $<0,1\%$ , elemen minor pada konsentrasi 0,1-1% dan elemen utama pada konsentrasi  $> 1\%$  (Zevenhoven & Kilpinen, 2002, C8 (pp. 1-26)). Jumlah elemen jejak dikeluarkan selama pembakaran batubara tergantung pada sifat fisik dan kimia dari elemen itu sendiri; konsentrasi elemen dalam batubara; kondisi pembakaran; jenis perangkat kontrol partikulat yang digunakan, dan efisiensi pengumpulannya sebagai fungsi ukuran partikel. Pembangkit listrik tenaga batubara dari proses pembakaran melepaskan elemen jejak ke lingkungan polutan selain Hg adalah kadmium (Cd), arsenik (As), molibdenum (Mo), vanadium (V) dan berbagai gas asam (Nalbandian, 2012). Hasil penelitian lain menyebutkan logam jejak pada pembakaran batubara meliputi arsenik, berilium, cadmium, kromium, timbal, magnesium, merkuri, selenium, boron, flourin, copper, zink (Zhao et al., 2018, pp. 597–606), di tambah antimoni, kobalt, mangan, nikel, (Coutinho et al., 2014, pp. 1–143), molybdenum, nikel (Clarke, 1992; Vejehati et al., 2010), molybdenum, chromium (Koistinen, 2002a), besi (Saikia et al., 2018, pp. 1–13). Penelitian karakterisasi logam jejak pada fly ash pembakaran batu bara terdiri dari Cd, Pb, Mn (Deng et al., 2014), As Pb, Cr (Wang et al., 2017, pp. 527–534). Pembakaran batubara pada pembangkit listrik menghasilkan abu terbang yang merupakan pembawa unsur jejak paling penting, sehingga menjadi metode pengendali unsur jejak pembangkit listrik bahan bakar batubara (Wang et al., 2017, pp. 527–534).

Hasil karakterisasi emisi dari Sembilan HTE yaitu Hg, Zn, Sb,Pb, Cd, As, Cr, Mn dan Ba dilakukan pada pembangkit listrik tenaga batubara berkapasitas 320 MW yang dilengkapi alat pengendali udara yaitu SCR, ESP dan WFGD (Zhao et al., 2018, pp. 597–606). Keberadaan unsur logam berat biasanya hanya merupakan sebuah pembagian yang kecil dari masa partikel keseluruhan yaitu total serendah 1% (Handler et al., 2008). Unsur dalam abu terbang lebih tinggi dibandingkan pada abu bawah, dan ada unsur toksik yang dikeluarkan. Unsur abu terbang dipengaruhi oleh jenis batubara,



kondisi pembakaran, efisiensi fungsi alat pembersihannya serta asal abu terbang (Sadasivan & Negi, 1991). Dari ruang pembakaran dengan pengaruh turbulensi, alat control emisi serta profil suhu, unsur jejak bergerak dengan cara berbeda yaitu sebagai residu kasar pada abu bawah dan abu terbang, selanjutnya sebagai abu halus dan menjadi abu submicron dari hasil kondensasi pada gas buang. Dengan demikian partikel halus berperan penting pada emisi unsur jejak (Vejahati et al., 2010).

Klasifikasi elemen menurut Nalbandian (2012, pp. 21–89) dapat berdasarkan perilaku dan mobilitas elemen dikelompokkan menjadi tiga kelas yaitu untuk kontrol elemen jejak kelas 1 secara langsung terkait dengan pengendalian emisi total partikel, sedangkan kontrol elemen kelas 2 tergantung pada pengumpulan partikulat halus. Karena variabilitasnya dalam efisiensi perangkat kontrol partikulat, laju emisi unsur-unsur ini dapat sangat bervariasi. Itu volatilitas elemen kelas 3 berarti bahwa kontrol partikulat hanya berdampak terbatas pada emisi elemen-elemen ini. Pembakaran batubara adalah sumber potensial dari beberapa elemen jejak termasuk emisi logam. Tiga kelas elemen sebagai berikut:

Kelas 1: Elemen yang kurang lebih terkonsentrasi di *fly ash* dan *bottom ash*, atau menunjukkan sedikit atau tidak ada pengayaan partikel halus, contohnya termasuk Mn, Be, Co dan Cr.

Kelas 2: Elemen yang diperkaya dalam fly ash relatif terhadap bottom ash, atau menunjukkan peningkatan pengayaan dengan penurunan ukuran partikel, contohnya termasuk As, Cd, Pb dan Sb.

Kelas 3: Elemen yang dipancarkan dalam fase gas

## 2.7. Pengelolaan Emisi PLTU

Pada negara maju dengan teknologinya membutuhkan energi yang rendah sehingga emisi partikel debu juga rendah, berbeda pada negara berkembang kebutuhan energi sangat tinggi karena teknologi yang berlaku masih kategori rendah. Pengelolaan terhadap lingkungan akibat particulate matter dilakukan dengan pendekatan teknologi pengendalian emisi pada pasca pembakaran batubara adalah meliputi Selective Catalytic Reduction (SCR), Selective Non-catalytic Reduction (SNCR), flue gas desulfurization (FGD), electrostatic precipitators (ESP), Filter Kain (baghouses) dan injeksi sorben (Zhang et al., 2017, pp. 647–654). Pemberlakuan Peraturan terkait pembatasan emisi kegiatan pembangkit bahan bakar batubara memberikan dampak sangat signifikan terhadap penurunan hasil SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, dan *particulate matter* di udara. (Yelverton et al., 2018). *Application of air pollution control devices* (APCDs) di

pembangkit listrik dapat secara signifikan mempengaruhi pendistribusian ulang logam jejak dalam produk pembakaran produk sekunder dan karenanya mengubah rute di mana unsur-unsur mencapai lingkungan (Deng et al., 2014).

Batubara yang dibakar akan menghasilkan burning carbon dioxide, sulphur dioxide dan nitrogen oxides. Gas-gas ini dikeluarkan dari boiler. Bottom ash atau abu yang lebih tebal atau berat dijatuhkan ke bawah boiler dan masuk ke silo untuk dibuang. Fly ash atau abu yang sangat ringan terbawa oleh gas panas di dalam boiler. Fly Ash ini ditangkap oleh electrostatic precipitator sebelum gas buang terbang ke udara melalui cerobong asap (Stack). ESP berfungsi sebagai filter udara yang menyaring atau menangkap 99.4% fly ash. *Flue Gas Desulfurization* (FGD) adalah suatu sistem yang didesain untuk mengurangi emisi oksidasi belerang (SO<sub>x</sub>) agar aman bagi lingkungan sehingga mengurangi pencemaran terhadap lingkungan Hidup. Sistem FGD menghilangkan gas buang SO<sub>2</sub> dengan menyemprotkan batu kapur ke dalam aliran gas. Gas buang dari proses pembakaran sebelum dibuang melalui cerobong, dimasukkan ke mesin FGD dan disemprotkan udara hingga teroksidasi menjadi SO<sub>3</sub>. Kemudian didinginkan dengan menggunakan air (H<sub>2</sub>O) agar bereaksi menjadi asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Asam sulfat kemudian direaksikan dengan batu kapur hingga diperoleh hasil pemisahan berupa gipsum. Gas yang kemudian dibuang kini tinggal uap air tanpa ada kandungan oksida sulfur.

Teknologi pengendalian emisi berhasil dengan pengurangan PM<sub>2.5</sub> secara global sebanyak 7,7 – 14,2 % disamping adanya penghentian pembangkit dengan bahan bakar batubara di China dan India (Tong et al., 2018). Dalam ESP terdapat medan listrik yang dilewati oleh gas buangan partikel pada proses pembakaran batubara, yang dapat tertangkap, sedangkan partikel yang ukuran lebih halus akan bergerak ke medan listrik hilir dan akan terpancar ke atmosfer. Dengan demikian ESP efektifitasnya rendah untuk partikel ukuran kurang dari 10µm dan lebih efektif menangkap partikel kasar (Chengfeng et al., 2005). Kebijakan pemerintah dalam kewajiban pemakaian FGD pada pembangkit batubara mampu mengurangi konsentrasi PM<sub>2.5</sub> sebesar 30-40% dengan menghilangkan pembentukan sulfat dan nitrat sekunder (Guttikunda & Jawahar, 2014). Pada pembangkit dengan menggunakan kombinasi ESP dan FGD memiliki efisiensi penghapusan *hazardous trace elemen* yang terpancar pada gas buang sebesar 99% (Zhao et al., 2018, pp. 597–606).

Penelitian untuk partikel yang tertangkap (*filterable particulate matter /FPM*), partikel dari emisi gas yang terkondensasi (*condensable particulate matter /CPM*),  $PM_{10}$  dan  $PM_{2,5}$  pada stak dan inlet FGD hasil cerobong PLTU dengan kapasitas 675 MW dengan alat pengendali ESP dan FGD didapatkan konsentrasi  $PM_{10}$  dan  $PM_{2,5}$  secara berurutan sebesar 88,23 mg/m<sup>3</sup> dan 52,15 mg/m<sup>3</sup> atau sekitar 97% dan 57% dari emisi FPM (P. Lu et al., 2010). Kandungan abu yang ada di pembangkit listrik modern di Belanda pada downstream FGD didapatkan hasil sebagian besar merupakan  $PM_{2,5}$  dengan menghitung RE (Relative Enrichment) elemen kelas II berdasarkan KEMA (Meij & te Winkel, 2007). FGD terbukti mampu menangkap unsur jejak yaitu pada hasil penelitian unsur Hg. Dan pada material padat penyerapan kimia unsur jejak sangat berpengaruh (Nalbandian, 2012).

Pada pembangkit listrik batu bara kapasitas 320 MW di kota Zhangjiakou, Cina dengan *selective catalytic reduction* (SCR) untuk pengontrol emisi NO<sub>x</sub>, ESP untuk mengumpulkan partikel halus dan desulfurasi gas buang basah (WFGD) untuk menangkap SO<sub>2</sub>. Didapatkan hasil jumlah masa *hazard trace element* (HTE) didistribusikan dalam abu dasar dan abu terbang ESP menyumbang proporsi yang besar, dan sejumlah kecil dari keduanya lolos ke atmosfer (<0.05%). Jumlah massa Mn dan Ba dalam abu bawah lebih tinggi daripada HTE lainnya. Partikel HTE adalah bentuk utama dalam gas cair sebelum ESP. ESP + WFGD memiliki efisiensi penghapusan tinggi untuk HTE dalam gas buang (99.96-99.99%), dimana ESP memberikan kontribusi yang besar. Selama pembakaran batu bara, Mn dan Ba didapati sangat banyak pada abu bawah dan fly ash secara merata, sementara As, Cd, Sb, Zn, Pb dan Cr cenderung banyak di fly ash. Konsentrasi HTE dalam gas yang dipancarkan ke atmosfer relatif rendah ( $3.5 \times 3 - 4.30 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) dengan faktor emisi  $0.001 - 1.343 \text{ g} / 10^{12} \text{ J}$  (Zhao et al., 2018, pp. 597–606).

## 2.8. Model Sebaran Debu

Dispersi adalah proses perpindahan, difusi, reaksi kimia dan pengangkutan polutan yang telah diemisikan ke udara oleh atmosfer. Model dispersi yang digunakan dalam penelitian antara lain adalah CALPUFF, AERMOD (Tartakovsky et al., 2016), CAMx (Guttikunda & Jawahar, 2014, pp. 449–460).

Prediksi kualitas udara pada variasi spasial terhadap konsentrasi polutan dari berbagai faktor sumber adalah masalah yang kompleks. Selama ini dengan menggunakan model penyebaran polutan udara prinsip Gaussian seperti AERMOD

yang dipopulerkan Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US EPA) dapat digunakan untuk mengatasi masalah tersebut (Kesarkar et al., 2007, pp. 1976–1988). AERMOD telah menunjukkan kegunaannya sebagai model yang cocok untuk melakukan pemodelan dispersi dari sumber titik dan garis (Gibson et al., 2013). Penelitian menggunakan AERMOD digunakan untuk memprediksi dispersi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari pembangkit listrik (Ding, 2012). Penelitian lain model dispersi radionuklida dari CFPP dengan radius 20 km dari pembangkit dengan bahan bakar batubara (Dinis et al., 2014). AERMOD merupakan model penyebaran polutan dengan pendekatan Gaussian yang dikembangkan oleh AERMIC (*American Meteorological Society* {AMS}/United States Environmental Protection Agency {EPA} Regulatory Model Improvement Committee). AERMOD merupakan sistem pemodelan dispersi atmosferik yang terdiri dari tiga modul yang terintegrasi yaitu model dispersi untuk kondisi tunak, pra pengolah data meteorologi dan pra pengolah data permukaan bumi. AERMOD menggunakan pendekatan Gaussian dan bi-Gaussian dalam model dispersinya, yang menghasilkan konsentrasi polutan di udara ambien dalam periode harian, bulanan maupun tahunan. AERMOD dapat digunakan untuk area perkotaan dan pedesaan, permukaan bumi yang rata atau berelevasi, emisi yang dihasilkan dari permukaan atau dari ketinggian, dan emisi yang dikeluarkan oleh banyak sumber (termasuk sumber titik, area atau volume). AERMOD mengestimasi profil meteorologi melalui beberapa persamaan dan interpolasi pengukuran yang berdekatan. Untuk memperhitungkan konsentrasi, AERMOD mempertimbangkan berbagai parameter seperti efek vertikal angin, suhu, dan turbulensi. (Cimorelli et al., 2005, pp. 682–693). AERMOD adalah model *steady-state plume* dengan peningkatan signifikan dibandingkan model regulasi yang lainnya. Aplikasi model untuk medan datar dan kompleks, kondisi perkotaan dan pedesaan, dan pelepasan yang ditinggikan dan permukaan dengan dan tanpa efek bangun bangunan (Perry et al., 2004). AERMOD diperkenalkan oleh EPA AS, tahun 2004 model plume yang stabil. Sistem pemodelan terdiri dari satu program utama (AERMOD) dan dua pra-prosesor (AERMET dan AERMAP). Tujuan utama dari AERMET adalah untuk menghitung parameter lapisan batas untuk digunakan oleh AERMOD. AERMAP adalah pra-prosesor medan. Secara umum, AERMOD memodelkan plume sebagai kombinasi dari dua kasus yang terbatas: gumpalan horizontal (tumbukan medan) dan medan yang mengikuti gumpalan. Oleh karena itu, untuk semua situasi, konsentrasi total, pada reseptor, dibatasi oleh konsentrasi prediksi dari keadaan ini. Di dataran datar kedua keadaan sama. Dengan memasukkan konsep membagi ketinggian aliran, di dataran tinggi, konsentrasi total AERMOD dihitung sebagai jumlah tertimbang dari

konsentrasi yang terkait dengan dua kasus terbatas atau keadaan gumpalan (Jeong, 2011). Mengevaluasi kinerja AERMOD menggunakan 17 database studi lapangan, Perry dkk. melaporkan bahwa AERMOD paling berhasil dalam memprediksi distribusi konsentrasi untuk cerobong yang tinggi yang menghasilkan polutan yang ringan ke dalam medan yang kompleks tetapi kurang berhasil dalam memprediksi konsentrasi polutan rendah, terutama dalam kondisi stabil. Perry dkk. hanya menganalisis satu database yang dicirikan oleh emisi yang tidak ringan di dataran datar dari sumber di dekat permukaan tanah (*Prairie Grass database*). Meskipun mereka mengkarakterisasi kinerja AERMOD menggunakan data *Prairie Grass* sebagai “baik” konsentrasi 1 jam tertinggi yang diprediksi oleh AERMOD secara substansial lebih rendah daripada yang diprediksi oleh ISCST3. Mengevaluasi data *Prairie Grass* yang sama, Irwin menyimpulkan bahwa konsentrasi downwind yang diprediksi oleh AERMOD cocok dengan pengamatan downwind dengan baik, kecuali dalam kondisi atmosfer yang paling tidak stabil di mana konsentrasi dimodelkan lebih rendah dari nilai yang diamati (Perry et al., 2004).

Di Malaysia, American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD) telah diterima oleh Departemen Lingkungan Hidup sebagai alat standar untuk memprediksi transportasi polusi di udara untuk tujuan Amdal (Mokhtar et al., 2014). AERMOD telah digunakan untuk memprediksi dispersi sejumlah polutan seperti SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari pembangkit listrik (Ding, 2012, pp. 1149–1154), merkuri dari peleburan perak (Hagan et al., 2011, pp. 7619–7626) dan partikel (Kesarkar et al., 2007, pp. 1976–1988). Keberadaan unsur dalam nilai sangat kecil yaitu kisaran bagian-per-juta (ppm) yang rendah, di contohkan khususnya dalam kasus Hg, dalam kisaran ppb, dengan emisi secara terus menerus dari pembakaran batubara secara signifikan dapat meningkatkan konsentrasi di lingkungan (Tang et al., 2013, pp. 315–322).

## **2.9. Model Reseptor**

Upaya pengelolaan lingkungan udara ambien sulit karena system di atmosfer sangat kompleks, tetapi penting dilaksanakan berdasarkan identifikasi sumber, perkiraan kuantitatif dari tingkat emisi polutan, pemahaman system transport senyawa polutan dan perubahan fisik-kimia selama proses transport (Hueglin et al., 2005). Model reseptor semua berdasarkan pengetahuan komposisi kimia dalam partikel yang di emisikan sumber, sehingga semua dengan pendekatan konversi masa (Hopke & Cohen, 2011). Beberapa model reseptor yang banyak tercantum dalam jurnal yang terpublikasi antara

lain adalah *Chemical Mass Balance* (CMB) dan *Positive Matrix Factorization* (PMF) (Contini et al, 2016, pp. 560–561). Perbedaan kedua model adalah untuk CMB adalah model reseptor yang membutuhkan info kuantitatif dari komposisi kimia dalam partikel yang terpancarkan di udara dengan profil sumber untuk menyelesaikan perhitungan keseimbangan masa. Sebagian besar menggunakan unsur penanda *organic carbon*. Sedangkan untuk PMF membutuhkan data komposisi kimia dalam partikel udara pada reseptor untuk menetapkan profil sumber dan kontribusi sumber (Hopke & Cohen, 2011, pp. 122-125). Kandungan unsur dalam *particulate matter* adalah salah satu data utama dalam model berbasis sumber atau reseptor (Yatkin & Bayram, 2008).

Penelitian menggunakan CMB sebagian besar menggunakan sumber penanda molekuler yaitu *organic carbon* dalam PM<sub>2.5</sub> pada udara lingkungan perkotaan, pinggiran kota dan pedesaan dengan profil sumber kendaraan, pembakaran batubara, pembakaran biomasa, pembakaran gas alam, pembakaran daging dan termasuk juga pembangkit listrik. Hasil kontribusi berbeda dan dipengaruhi musim, yaitu pada semua musim kontribusi tertinggi di seluruh lokasi dari kendaraan (14%-21%) dan pada musim dingin ditambah dari pembakaran batubara pada beberapa lokasi (Zhou et al, 2017, pp. 57–64); penelitian lain hasil kontribusi tertinggi dari pembakaran kayu (37.5%), batubara (44%), diesel (3.3%), debu (2.2%), detritus vegetative (0.7%) dengan berdasarkan OC dalam partikel (Villalobos et al, 2015, pp. 133–142).

Model reseptor *Positive Matrix Factorization* (PMF) telah banyak digunakan untuk mempelajari sumber polusi berdasarkan data komposisi kimia yang terperinci (Hopke, 2016), yang banyak diterapkannya karena keunggulan yang signifikan itu metodologi dapat digunakan tanpa perlu pengetahuan sebelumnya tentang profil sumber. PMF sangat kuat dalam mengekstraksi faktor yang berbeda (yaitu sumber) berdasarkan sumber pelacak khusus yang ada di setiap faktor. Dalam PMF, kumpulan data yang lebih komprehensif lebih disukai untuk menyelesaikan sumber yang berkontribusi pada PM secara lebih akurat. Dalam penelitian ini hasil PMF digabungkan dengan data meteorologi seperti arah angin dan lintasan massa udara karena gabungan data dapat memberikan kepastian dalam penetapan sumber dan memberikan informasi tentang perkiraan lokasi geografis sumber polusi (Saha et al., 2016).

*Positive Matrix Factorization* (PMF) yang merupakan model ideal karena lebih teliti dan sempurna di banding model sebelumnya dengan kemampuan memetakan dengan jelas prosentase sumber (Ridzky et al., 2017). PMF menyediakan pendekatan pemodelan yang fleksibel dan memungkinkan penggunaan informasi yang efektif dalam

data, dan telah berhasil diterapkan untuk pemodelan reseptor di seluruh dunia, digunakan untuk mengidentifikasi kontribusi berbagai sumber emisi (Crilley et al., 2017; Gugamsetty, 2012, pp. 476–491). Model PMF v3.0 membutuhkan dua file input: satu untuk konsentrasi spesies yang diukur, dan satu untuk estimasi ketidakpastian konsentrasi (Gugamsetty, 2012, pp. 476–491). Terdapat penelitian di perkotaan Bandung Indonesia pada musim kemarau dan hujan tahun 2001-2007 menggunakan Model *Positive Matrix Factorization* (PMF) untuk mengidentifikasi sumber emisi partikulat halus dan kasar. Unsur yang dianalisis dalam penelitian ini adalah Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Pb, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, dan NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Hasil faktor sumber musim kemarau, faktor sumber utama untuk partikel halus adalah aerosol sekunder (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, industri elektroplating, emisi kendaraan, dan pembakaran biomassa, sedangkan untuk partikel kasar, faktor sumber yang dominan adalah industri elektroplating, diikuti oleh garam laut tua, debu vulkanik, debu tanah, dan debu kapur. Musim hujan, faktor sumber utama untuk partikel halus adalah emisi kendaraan dan aerosol sekunder. Sumber lain yang terdeteksi adalah pembakaran biomassa, debu kapur, tanah, dan debu vulkanik. Sementara untuk bahan partikulat kasar, faktor sumber utamanya adalah industri kaya sulfat, diikuti oleh debu kapur, debu tanah, emisi industri dan debu konstruksi (Lestari & Mauliadi, 2009, pp. 1760–1770). Penelitian di tiga tempat di Italia menggunakan PMF 3.0 dan 5.0 dan secara khusus dikembangkan untuk membedakan kontribusi pembangkit listrik tenaga batu bara dari kontribusi kerak bumi. Sampel PM<sub>10</sub> harian yang dikumpulkan di Italia tengah di dekat pembangkit listrik tenaga batubara di tiga lokasi antara 2,8 dan 5,8 km dari pembangkit listrik: situs perkotaan, situs latar belakang perkotaan, dan situs pedesaan. Karakterisasi kimia termasuk konsentrasi OC / EC, dengan metode termo-optik, konsentrasi ion (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NOMOR 3<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>), dengan kromatografi ion kinerja tinggi, dan konsentrasi logam (Si, Al, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br), dengan Fluoresensi sinar-X (ED-XRF) dispersif Energi. Hasil kontribusi utama rata-rata dari pembangkit listrik 2% (± 1%) di daerah yang diteliti, dengan perbedaan yang terbatas di antara lokasi (Contini et al., 2016). Penelitian lain yang menunjukkan kelebihan PMF yaitu dengan PM<sub>10</sub> dapat menunjukkan kekhasan local sehingga dapat menetapkan profile sumber yaitu kerak, laut, nitrat, sulfat, lalu lintas, debu yang ditanggihkan, pembakaran biomassa, pelabuhan + industri, dan tenaga listrik berbahan bakar batubara (Cesari et al., 2016). Penelitian unsur jejak dari fraksi halus dan kasar dianalisis dengan resolusi waktu per jam pada latar belakang perkotaan (North Kensington NK) dan pinggiran jalan (Marylabone Road, MR) di pusat kota London, pada musim panas.

Faktor sumber emisi lalu lintas (Al, S, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe Ni, Cu Zn, As, Rb, dan Zr). *Positive Matrix Factorization* (PMF) digunakan untuk pembagian sumber dari masa partikel pada kedua lokasi penelitian dengan sumber-sumber sumber garam laut, tanah yang ada di udara, emisi lalu lintas, aerosol anorganik sekunder, dan sumber Zn-Pb. Pada fraksi halus, emisi dari lalu lintas (31.9%), sedangkan hal tersebut bergabung dalam sumber “latar belakang perkotaan” pada NK, yang memiliki kontribusi dari asap kayu, emisi kendaraan dan partikel sekunder. Sumber-sumber regional adalah contributor utama fraksi kasar pada kedua lokasi. Faktor-faktor sumber aerosol anorganik sekunder (yang mempunyai pengaruh dari emisi perkapalan dan pembakaran batu bara) bertanggung jawab sebesar 33% dari PM<sub>10</sub> di NK dan hal tersebut merupakan contributor tertinggi dari sumber-sumber regional, termasuk dari daratan Eropa. Sumber buangan uap dan bukan buangan uap berkontribusi cukup besar pada tingkat PM<sub>10</sub> di MR, yang menyoroti kepentingan yang berkelanjutan dari polusi udara yang berkaitan dengan kendaraan di pinggir jalan (Crilley et al., 2017).

Hasil studi dengan model reseptor pada kegiatan pembangkit listrik dapat menyatakan hasil PM<sub>2,5</sub> di suatu titik adalah 36% dengan konsentrasi partikel halusnya sebesar 15,5 µg/Nm<sup>3</sup> (J. H. Lee & Hopke, 2006). Penelitian di Ohio, kontribusi pembangkit mempunyai nilai yang cukup tinggi yaitu 62,6% dengan konsentrasi rata-rata partikel halusnya sebesar 14,1 µg/Nm<sup>3</sup> yang berjarak 3 km dari PLTU berkapasitas 18 MW dan menggunakan jenis batubara bituminous (Kim et al., 2007, pp. 9231–9243). Sebagai pemancar antropogenik utama dari emisi pada udara, pembangkit listrik tenaga batubara menghasilkan unsur-unsur berbahaya (HTE), yang dapat menyebabkan kerusakan besar pada lingkungan dan kesehatan manusia. Model reseptor *Positive Matrix Factorization* (PMF) versi 5.0 digunakan untuk mengukur pembagian sumber pencemar PM *coarse* dan PM *fine*. Mempunyai fungsi sebagai alat analisis faktor multivarian yang dapat menguraikan matriks data sampel menjadi 2 matriks yaitu kontribusi faktor dan profil faktor. Model PMF ini memerlukan 2 input yaitu data konsentrasi setiap elemen dan data konsentrasi *uncertainty* setiap elemen (Sharma, 2013).

Menggabungkan hasil PMF dengan data meteorologi seperti arah angin dan lintasan massa udara dapat memberikan kepercayaan kepada sumber yang diselesaikan dan memberikan informasi tentang perkiraan lokasi geografis sumber polusi (Wang et al., 2018, pp. 1–23). Model PMF adalah alat analisis faktor multivariat yang menguraikan matriks sampel tertentu menjadi dua matriks: kontribusi faktor dan profil



faktor (Gugamsetty, 2012, pp. 476–491). Evaluasi kontribusi pembangkit listrik tenaga listrik berbahan bakar batubara untuk masalah partikel sangat penting untuk pengelolaan lingkungan, untuk evaluasi risiko kesehatan, dan untuk pengaruhnya terhadap iklim (Contini et al., 2016, pp. 131–140).

Dalam upaya pengurangan emisi langkah-langkah yang harus dilaksanakan ditetapkan sebagai aturan pemerintah dengan melakukan kriteria pemantauan dan identifikasi emisi partikulat dari sumber yang diketahui di suatu wilayah. Banyak studi yang melakukan investigasi dengan melakukan karakterisasi terhadap emisi partikulat dari sumber transportasi dan informasinya tersedia secara luas dalam literatur; tetapi data ilmiah yang tersedia untuk sumber pembakaran stasioner masih dengan jumlah yang lebih rendah. Metode kepatuhan untuk pemantauan PM untuk menangani aturan kualitas udara baru masih pada tahap akhir pengembangan atau dalam proses implementasi di beberapa negara (Lee et al., 2013, pp. 60–66).

## **2.10. Analisa Resiko Kesehatan**

Partikel material di udara terdiri dari campuran padat heterogen dan campuran cair tersuspensi yang bervariasi secara terus menerus dan komposisi kimia dalam ruang dan waktu (World Health Organization, 2003). Partikulat material yang dapat ditransport ke atmosfer dengan jangka waktu yang cukup lama dan jarak yang jauh, merupakan indikator kunci dari antropogenik yang sangat signifikan terhadap penurunan kesehatan manusia (Kim et al., 2014, pp. 136–143). Semakin ukuran partikel kecil semakin berpengaruh,  $PM_{2.5}$  memberikan efek lebih buruk dibandingkan  $PM_{10}$  (Biancofiore et al., 2017, pp. 652–659), karena pada ukuran halus sangat mudah menembus saluran pernapasan (Kim et al., 2014, pp. 136–143). Pendapat yang sama perihal pengaruh partikel debu terhadap kesehatan adalah disebutkan pada partikel ukuran yang lebih kecil ( $PM_{2.5}$  dan  $PM_{0.1}$ ) memiliki masa hidup berkisar dari hari ke minggu, sedangkan partikel yang lebih besar ( $PM_{10}$ ) memiliki masa hidup dari jam ke hari (Gugamsetty, 2012, pp. 476–491). Penelitian lain menyelidiki hubungan antara fraksi PM dan mortalitas dan morbiditas pernapasan / kardiovaskular di London, dan hasilnya sebagian besar tergantung pada keterlambatan hari yang diperiksa dan jenis hasil kesehatan. Hasil yang signifikan adalah data masuk rumah sakit pernapasan 1-hari tertinggal, yang sebanding dengan efek yang sesuai dari  $PM_{2.5}$ . Cukup banyak penelitian menunjukkan bahwa polusi partikulat ambien dikaitkan dengan efek kesehatan dan lingkungan tertentu.

Peningkatan jumlah penduduk menyebabkan peningkatan faktor antropogenik yang dapat dipastikan memberikan kontribusi peningkatan polutan partikel yang berasal dari emisi (Huang et al., 2014). Menurut WHO ukuran partikel yang mempengaruhi kesehatan, sehingga mendorong aturan membatasi konsentrasi partikel ambien yang memiliki diameter aerodinamik lebih kecil dari 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) dan lebih kecil dari 10  $\mu\text{m}$  diameter aerodinamik ( $\text{PM}_{10}$ ). Selama ini peraturan adalah membahas total partikulat dari semua ukuran, yang dikenal sebagai TSP, tetapi perubahan menjadi perlu setelah beberapa penelitian mengungkapkan hubungan antara partikel yang sangat halus dan penyakit kardiovaskular dan paru dan prematur, kematian pada orang dengan penyakit jantung atau paru-paru. Pertimbangan untuk penyebabnya adalah partikel sekunder yang terbentuk di atmosfer melalui reaksi berbagai senyawa, seperti sulfur dioksida dan nitrogen oksida yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar fosil, dan berbagai senyawa organik yang mudah menguap hadir di udara sekitarnya. Selain itu, partikel sekunder sebagian besar mengandung partikel halus dan ultra-halus dengan diameter kurang dari 100 nm. Partikel-partikel ini lebih mudah untuk bernapas, dibandingkan dengan partikel yang lebih besar, jauh ke dalam paru-paru menciptakan kondisi potensial kerusakan. Partikel yang sangat halus dan sangat halus mengandung lebih tinggi konsentrasi yang lebih besar dari spesies asam dari senyawa sulfur dan nitrogen dan diketahui berkaitan erat dengan efek kesehatan negatif. Akibatnya, penting untuk mengidentifikasi karakteristik konsentrasi dan ukuran partikel yang dilepaskan dari semua sumber yang berkontribusi (Lee et al., 2013, pp. 60–66).

Pengaruh partikulat material tidak mudah dipastikan dimana hasil penelitian epidemiologis dengan hasil beragam (López et al., 2005). Penelitian logam berat dalam partikel halus ( $\text{PM}_{2.5}$ ) sebanyak 8 logam berat dari empat musim berbeda di Taiyuan akibat pembakaran batubara. Hasil menunjukkan bahwa logam berat yang terikat pada  $\text{PM}_{2.5}$  yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara memainkan peran penting dalam toksisitas miokard dan berkontribusi terhadap risiko kesehatan yang bergantung pada musim (Zhang et al., 2016, pp. 380–390).  $\text{PM}_{2.5}$  adalah partikel halus yang ditemukan dalam emisi kendaraan bermotor, atau dalam produksi sekunder melalui reaksi fotokimia dari hidrokarbon dan oksida nitrogen di udara.  $\text{PM}_{2.5}$  di udara sekitar semakin menarik perhatian komunitas kesehatan dan badan pengaturan pemerintah karena hal tersebut berhubungan dengan daftar efek kesehatan yang semakin memburuk, termasuk masalah kardiopulmoner, kematian dini, dan kanker paru-paru (Chiang et al., 2014). Unsur pada partikel coarse yaitu Na, Al, Mg dilaporkan signifikan terhadap rawat inap untuk penyakit pernapasan Pun et al., 2014, pp. 1086–1095).

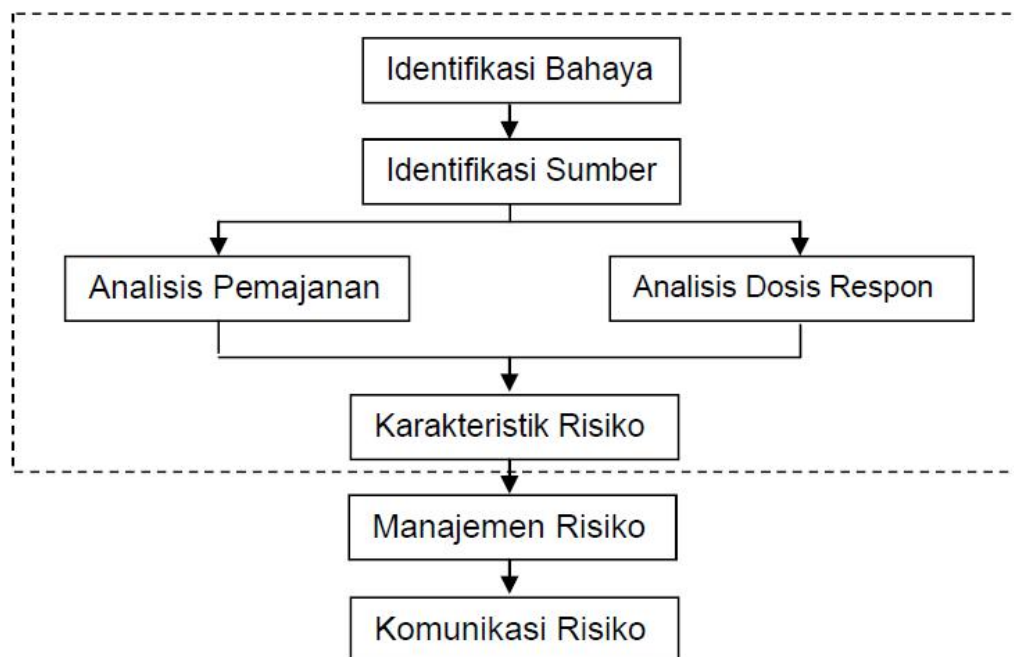
Beberapa penelitian menunjukkan bahwa polusi partikulat ambien dikaitkan dengan efek kesehatan dan lingkungan tertentu (Hao et al., 2007, pp. 401–408; Din et al., 2015, pp. 19–24; Biancofiore et al., 2017, pp. 652–659; Liu et al., 2017, pp. 398–406). Materi partikulat (PM), khususnya materi partikulat halus (yaitu PM<sub>2.5</sub>, diameter aerodinamik  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ), berdampak buruk bagi kesehatan manusia (Wang et al., 2018, pp. 1–23). Penilaian risiko kesehatan manusia (RA) sebagai "Metodologi yang paling tepat untuk mengekspresikan evaluasi ilmiah, berdasarkan pada data yang divalidasi, dampak potensial dari suatu proyek mampu menghasilkan di daerah yang terkena dampak". Oleh karena itu, pendekatan ini adalah penilaian prospektif dari potensi hasil kesehatan yang merugikan, yang disebabkan oleh masa depan oleh polutan emisi, dan prosedur ini didasarkan pada penilaian risiko karsinogenik dan non-karsinogenik (Piersanti et al., 2018). Pembangkit listrik tenaga batu bara mungkin merupakan sumber polusi udara yang penting, yang menyebabkan dampak kesehatan pada penduduk populasi (Senapati, 2011, pp. 1791–1794; Kuo et al., 2014, pp. 117–124; Mokhtar et al., 2014, pp. 476–485; Tang et al., 2013, pp. 315–322).

Pembangkit listrik tenaga batu bara mungkin merupakan sumber polusi udara yang penting, yang menyebabkan dampak kesehatan pada penduduk populasi (Kuo et al., 2014, pp. 117–124; Din et al., 2015, pp. 19–24). Laporan penelitian dari 12 gurun pasir dan 33 pembangkit listrik dengan jarak lokasi yang berbeda dari Hanoi dengan mengukur partikel halus (PM<sub>2.5</sub>), jejak sumber dan kontribusinya di Hanoi, Vietnam, yang dilaksanakan dari 25 April 2001 hingga 31 Desember 2008. Hasil untuk gurun pasir pada 28 hari kondisi ekstrim dengan jarak jauh dari daerah gurun Taklamakan dan Gobi lebih dari 3000 km ke barat laut dengan konsentrasi lebih besar dari  $6 \mu\text{gm}^{-3}$  menyumbang 76% dan emisi dari 33 pembangkit listrik bahan bakar batubara Vietnam dan Cina pada 25 hari dari aktivitas batubara ekstrim dengan konsentrasi lebih besar dari  $30 \mu\text{gm}^{-3}$  dari total 748 hari pengambilan sampel selama masa studi. Tiga pembangkit listrik lokal Vietnam berkontribusi 15%, sementara empat pembangkit listrik Tiongkok antara 300 km dan 1700 km ke timur laut Hanoi menyumbang 50% dari total aktivitas batubara yang ekstrim yang diukur di situs sampel Hanoi (Cohen et al., 2010, pp. 3761–3769). Dalam studi ini lintasan mundur digunakan untuk mengidentifikasi transportasi jarak jauh ke Hanoi untuk, debu yang tertitup angin (tanah) dari 12 gurun besar di Cina dan dari aktivitas ekstrim untuk Tanah. Perlu standart yang ketat terhadap emisi partikel halus dari pembakaran batubara pembangkit listrik, agar tidak memberikan dampak terhadap kesehatan.

Penelitian emisi dari pembangkit listrik dapat menyebabkan sekitar 30 kematian setiap tahun. Setelah menerapkan nilai kehidupan statistik yang sesuai untuk wilayah tersebut, ditemukan total biaya sosial dari emisi pembangkit listrik menjadi sekitar 8 juta dolar AS pada tahun 2001. Partikel sekunder membentuk kontribusi lebih dari 80% dampak kematian, sebagian besar berasal dari pembentukan sulfat (73% dari total dampak), yang dihasilkan dari emisi  $\text{SO}_2$  yang tinggi (López et al., 2005). Menurut (Fjeld et al., 2007 pp. 1-405), *Society for Risk Analysis* tahun 2003 memberikan penjelasan pengertian analisis resiko yaitu pengujian terperinci termasuk penilaian risiko, evaluasi risiko, dan alternatif manajemen risiko yang dilakukan untuk memahami sifat konsekuensi negatif yang tidak diinginkan terhadap kehidupan, kesehatan, properti, atau lingkungan manusia. Sedangkan Food and Drug Administration tahun 2002 mendefinisikan analisis risiko sebagai alat untuk meningkatkan dasar ilmiah dari keputusan peraturan. Hal tersebut termasuk penilaian risiko, manajemen risiko, dan kegiatan komunikasi risiko. Setiap komponen memiliki tanggung jawab yang unik: Penilaian risiko memberikan informasi tentang tingkat dan karakteristik risiko yang dikaitkan dengan bahaya. Manajemen risiko mencakup kegiatan yang dilakukan untuk mengendalikan bahaya. Komunikasi risiko melibatkan pertukaran informasi dan pendapat mengenai risiko dan faktor-faktor terkait risiko di antara para penilai risiko, manajer risiko, dan pihak berkepentingan lainnya (Rohrmann & Renn, 2000). Dampak paparan partikel pada jangka pendek sering dikaitkan dengan penyakit kardiovaskular dan pernapasan, misalnya serangan jantung, asma, dan sebagainya dan pada paparan jangka panjang dapat menyebabkan penurunan substansial dalam kehidupan rata-rata (Wang et al., 2018, pp. 111–123).

Dalam partikel halus pengayaan elemen jejak lebih tinggi dan sebagian besar terdapat senyawa bersifat toksik antara lain logam berat (Yao et al., 2015, pp. 105-121). Meskipun logam berat hanya menyumbang sebagian kecil dari  $\text{PM}_{2.5}$ , mereka tidak hanya tidak dapat didegradasi ketika melekat pada partikel tetapi juga dapat melakukan bioakumulasi melalui rantai makanan dan berkontribusi terhadap toksisitas (Zhang et al., 2016, pp. 380-390). Terdapat studi yang dilaporkan Chen dan Lippmann (2009) tentang hubungan antara logam yang terikat PM dan efek kesehatan potensial (Chen dan Lippmann, 2009). Apalagi Niu et al. (2013) melaporkan bahwa logam tertentu mungkin merupakan komponen penting yang bertanggung jawab untuk efek kardiovaskular yang diinduksi  $\text{PM}_{2.5}$  (Niu et al., 2013).

Berdasarkan Keputusan Menteri Kesehatan No. 876 Tahun 2001 tentang Pedoman Teknis Analisis Dampak Kesehatan Lingkungan (ADKL), Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) didefinisikan sebagai suatu pendekatan untuk mencermati potensi besarnya risiko. Pada aplikasinya, ARKL dapat digunakan untuk memprediksi besarnya risiko dengan titik tolak dari kegiatan pembangunan yang sudah berjalan, risiko saat ini dan memprakirakan besarnya risiko di masa yang akan datang. Analisis risiko menggunakan berbagai macam ilmu seperti science, engineering, probability, dan statistic untuk mengestimasi dan mengevaluasi seberapa besar dan seberapa mungkin risiko tersebut berdampak pada kesehatan dan lingkungan.



**Gambar 2.1.** Bagan Alur Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

Berikut ini adalah langkah-langkah dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL).

#### 1. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Bahaya (*hazard*) merupakan suatu keadaan yang dapat menyebabkan kerugian dan kerusakan. Bahaya lingkungan dapat dikategorikan kedalam tiga kategori, yaitu bahaya fisik, kimia, biologi. Pada analisis risiko bahaya diinterpretasikan sebagai bahan beracun atau kondisi yang berpotensi menimbulkan bahaya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Mengidentifikasi bahaya adalah langkah pertama yang dilakukan sebelum dapat menilai toksisitas suatu zat. Dengan mengidentifikasi bahaya tersebut, maka akan diperoleh karakteristik dari suatu bahaya. Penilaian toksisitas dilakukan guna untuk menilai efek dari suatu bahan dan dampaknya terhadap manusia dan lingkungan. Tahapan ini harus menjawab beberapa pertanyaan mengenai agen

risiko spesifik berbahaya, agen resiko di media lingkungan, kandungan/konsentrasi agen risiko di media lingkungan, potensi gejala kesehatan. Bahaya dapat diketahui melalui literasi dan dengan beberapa cara antara lain wawancara dengan populasi yang dianggap berisiko, data sekunder dari tempat yang akan dilakukan identifikasi risiko atau MSDS (*Material safety data sheet*) atau menggunakan Air Quality Index (EPA). Dampak pada partikel debu oleh EPA (environmental protection agency) di Amerika diatur dengan menetapkan Air Quality Index (AQI). EPA melakukan standarisasi untuk kesehatan hanya pada ukuran kecil yaitu PM<sub>2.5</sub>.

**Tabel 2.4.** Tingkat konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> dalam 24 Jam ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Konsentrasi		Nilai AQI (Air Quality Index)	Dampak Kesehatan dari PM <sub>2.5</sub>	Tindakan Pencegahan
PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>			
0-55	0 - 12.0	Bagus 0 - 50	Tidak ada risiko	Tidak ada
55.1- 155	12.1 - 35.4	Sedang 51 - 100	Individu yang sangat sensitif dapat mengalami gejala pernapasan.	Individu yang sangat sensitif dapat mengurangi kegiatan yang lama/berat.
155.1- 255	35.5 - 55.4	Tidak Sehat untuk individu yang sensitif 101 - 150	Peningkatan kemungkinan gejala pernapasan pada individu yang sensitif, pemburukan penyakit jantung atau paru dan kematian dini pada orang dengan penyakit kardiopulmoner dan orang tua.	Orang dengan penyakit pernapasan atau jantung, orang tua dan anak-anak harus membatasi aktivitas yang berkepanjangan.
255.1- 355	55.5 - 150.4	Tidak Sehat  151 - 200	Peningkatan penyakit jantung atau paru dan kematian dini pada orang dengan penyakit kardiopulmoner dan orang tua Peningkatan efek pernapasan pada populasi umum.	Orang dengan penyakit pernapasan atau jantung, orang tua dan anak-anak harus menghindari aktivitas yang lama; semua orang harus membatasi pengerahan tenaga yang berkepanjangan.
355.1- 425	150.5 - 250.4	Sangat Tidak Sehat 201 - 300	Memperburuk penyakit jantung atau paru yang signifikan dan kematian dini pada orang dengan penyakit kardiopulmoner dan orang tua Peningkatan yang signifikan dalam efek pernapasan pada populasi umum.	Orang dengan penyakit pernapasan atau jantung, orang tua dan anak-anak harus menghindari aktivitas di luar ruangan; semua orang harus menghindari aktivitas yang berkepanjangan.
425.1- 605	250.5 - 500.4	Berbahaya  301 - 500	Perburukan serius penyakit jantung atau paru-paru dan kematian dini pada orang dengan penyakit kardiopulmoner dan orang tua; risiko serius efek pernapasan pada populasi umum.	Setiap orang harus menghindari aktivitas di luar; orang dengan penyakit pernapasan atau jantung, orang tua dan anak-anak harus tetap di dalam ruangan.

Sumber : U.S. EPA, 2014

## 2. Analisis Dosis-Respon (*Dose-Response Assessment*)

Analisis dosis respon terdiri dari nilai konsentrasi referensi (RfC) dan /atau *slope factor* (SF) atau dosis referensi (RfD) agen risiko dapat digunakan sebagai analisis dosis-respon. Dosis/konsentrasi referensi (RfC/RfD) adalah dosis/konsentrasi dari pajanan harian agen risiko non karsinogenik yang diperkirakan tidak menimbulkan efek yang mengganggu walaupun pajanannya terjadi seumur hidup. Langkah analisis dosis respon ini bertujuan untuk:

- a. Mengetahui jalur pajanan (*pathways*) suatu agen resiko masuk ke dalam tubuh manusia.
- b. Memahami perubahan efek kesehatan atau gejala akibat peningkatan dosis agen resiko atau konsentrasi yang masuk ke dalam tubuh.
- c. Mengetahui konsentrasi referensi (RfC) atau *slope factor* (SF) atau dosis referensi (RfD) dari agen risiko tersebut.

Dosis merupakan angka yang menyatakan tingkat agen risiko yang masuk ke dalam organ atau kadar pajanan yang menjadi sasaran. Nilai toksisitas kuantitatif efek non karsinogenik merupakan RfD atau RfC yang menyatakan nilai pajanan harian yang dianggap tidak akan menimbulkan efek merugikan kesehatan walaupun pajanan agen risiko dapat berlangsung seumur hidup. RfC merupakan nilai dosis referensi untuk pajanan melalui inhalasi sedangkan RfD merupakan nilai dosis referensi pada pajanan oral atau tertelan. Kedua nilai RfC ataupun RfD diukur dalam satuan mg/kg/hari. Untuk mengetahui RfC, RfD, dan SF dari suatu agen risiko, kita dapat melihatnya pada *Integrated Risk Information System* (IRIS). Jika tidak tertera, maka nilai dapat diturunkan dari dosis eksperimental yang lain seperti LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*), NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*), maupun NAAQS (*National Ambient Air Quality Standard*)

## 3. Analisis Pajanan (*Exposure Assessment*)

Menghitung *intake* dari agen risiko dapat dilakukan untuk dapat menganalisis pajanan. *Intake* adalah jumlah asupan *risk agent* yang diterima rata-rata sampel per berat badan rata-rata sampel per hari. Sebuah rumus digunakan untuk menghitung *intake*. Data primer dan data sekunder merupakan data yang digunakan untuk melakukan perhitungan

## 4. Karakteristik Risiko (*Risk Characterization*)

Karakteristik risiko dilakukan untuk menentukan apakah agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat atau tidak atau juga bahkan untuk menentukan tingkat risiko.

## 5. Manajemen Risiko (*Risk Management*)

Manajemen risiko adalah tindak lanjut dari tahap analisis risiko kesehatan lingkungan pada saat proses karakteristik risiko menunjukkan kondisi yang tidak aman. Pengendalian risiko dibagi menjadi dua yaitu strategi manajemen risiko dan cara manajemen risiko. Strategi manajemen risiko merupakan penentuan waktu pajanan, ambang batas aman dari konsentrasi agen risiko, frekuensi pajanan serta durasi pajanan. Setelah strategi manajemen risiko dilakukan, maka cara pengendalian risiko menjadi langkah yang dapat dilakukan selanjutnya dimana pada langkah ini dapat dilakukan dengan beberapa hal sebagai berikut:

### a. Pengelolaan teknologi

Pengelolaan menggunakan teknologi dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi agen risiko, yang mana hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan teknik dan metode serta alat dalam mengendalikan risiko

### b. Pengelolaan sosial-ekonomis

Efisiensi proses, penerapan *compensation system*, serta mengajak keikutsertaan pihak-pihak terkait yang berhubungan.

### c. Pengelolaan institusional

Pengelolaan institusional dilakukan dengan cara mengikuti jalur serta birokrasi kelembagaan untuk dapat bekerjasama dengan pihak lain.

## 6. Komunikasi Risiko

Komunikasi risiko dilakukan dengan tujuan untuk menyampaikan informasi risiko kepada masyarakat (populasi yang berisiko), pemerintah, dan pihak yang berkepentingan lainnya. Komunikasi risiko merupakan tanggung jawab dari pemrakarsa atau pihak yang menyebabkan terjadinya risiko dan juga merupakan tindak lanjut dari pelaksanaan ARKL. Komunikasi risiko dapat dilakukan dengan teknik atau metode diskusi interaktif atau ceramah dengan menggunakan media komunikasi yang ada seperti televisi, media massa, radio ataupun dalam format pemetaan dengan menggunakan *geographical information system* (GIS).

### 2.11. Persepsi Masyarakat

Persepsi dapat diartikan sebagai gambaran dalam pikiran tentang suatu obyek yang menjadi perhatian seseorang dan dapat memberikan proses penilaian seseorang terhadap obyek tertentu (Wangke, 2010). Dampak persepsi muncul sebagai akibat adanya proyek dan lebih sulit diidentifikasi serta diukur (Hadi, 2009, pp. 1–21). Persepsi masyarakat dapat berupa persepsi positif maupun negatif., jika persepsi



seseorang mempunyai nilai positif terhadap lingkungannya maka akan memberikan motivasi perilaku masyarakat yang positif terhadap lingkungannya dan sebaliknya apabila persepsi seseorang terhadap lingkungannya mempunyai nilai negatif maka dapat memberikan motivasi perilaku masyarakat yang negatif pula terhadap lingkungannya (Liu et al., 2017, pp. 398–406). Terdapat 3 faktor eksternal yang dapat mempengaruhi persepsi seseorang (Robbins & Kirk, 1996) yaitu :

1. faktor personal, seperti sikap secara umum, kepribadian, nilai hidup, emosi, dan inteligensi
2. faktor sosial, seperti usia, jenis kelamin, etnis, tingkat pendidikan, penghasilan, dan kepercayaan atau agama
3. faktor informasi, seperti pengalaman, pengetahuan, dan pemberitaan media massa.

Kualitas udara yang dirasakan sebagai salah satu faktor dalam kualitas lingkungan, yang menimbulkan persepsi dan sikap subyektif yang bervariasi antara kelompok dan individu (Kamp et al., 2003, pp. 5–18). Studi tentang persepsi kualitas udara dalam dan luar ruangan, terutama menunjukkan hubungan yang signifikan secara statistik non-persepsi kualitas udara konsentrasi polutan yang diukur (Pu et al., 2019). Sebaliknya, persepsi kualitas udara tampaknya dipengaruhi oleh pengalaman visual dan penciuman, pengalaman psikologis dan efek fisik atau dampak pada kesehatan (gejala), gangguan atau gangguan, publisitas, interaksi interpersonal dan percakapan, pengetahuan lokal, faktor gaya hidup (misalnya, waktu dihabiskan di luar ruangan dapat memengaruhi persepsi (Brody et al., 2004; Nikolopoulou et al., 2011; Oltra dan Sala, 2014) dan juga suhu variasi dan sensasi termal (Dorizas et al., 2015; Zhang et al., 2011). Sebuah studi empiris nasional dilakukan dari Desember 2016 hingga Februari 2017 dengan 10.653 kuesioner yang lengkap dikumpulkan. Menurut serangkaian strategi penyaringan, 9744 kuesioner yang memenuhi syarat dimasukkan sebagai sampel, yang mencakup 31 provinsi Cina (Hong Kong, Makao dan Taiwan tidak dimasukkan dalam penelitian ini). Penelitian tersebut menemukan bahwa 45% responden tidak puas dengan kualitas udara saat ini, banyak responden yang peduli terhadap polusi udara (76%) dan khawatir tentang konsekuensi berbahaya terkena polusi udara (86%). Ada perbedaan signifikan dalam persepsi risiko publik dan sikap terhadap polusi udara di antara daerah yang berbeda: responden di wilayah timur laut, wilayah pantai utara, wilayah pantai timur dan wilayah sungai Tengah Kuning mempersepsikan risiko pencemaran udara lebih tinggi dan kepuasan lebih rendah dari kualitas udara daerah lain; dan kepercayaan

publik terhadap pemerintah meningkat dari daerah pantai ke daerah pedalaman (Pu et al., 2019).

Pemahaman tentang hubungan antara paparan polusi udara sekitar, persepsi publik tentang kualitas udara, dan kekhawatiran tentang risiko kesehatan kondisi saat ini cenderung tidak lengkap. Dari penelitian 2.869 responden pada survei kesadaran publik terhadap udara berkualitas diselenggarakan antara 2009 dan 2012 di wilayah metropolitan Kota Kansas, Amerika Serikat. Hasilnya terdapat pola spasial terbalik antara distribusi O<sub>3</sub> dan tingkat eksposur PM di mana responden menganggap pencemaran udara semakin buruk dan daerah-daerah di mana penduduk memiliki kepedulian yang lebih tinggi tentang hal itu efek kesehatan dari paparan polusi. Hasil yang berbeda akibat level individu dan area karakteristik demografi dan sosial ekonomi. Kampanye kesadaran publik harus dikombinasikan dengan pendidikan tentang cara-cara publik dapat melindungi diri mereka sendiri dan dirancang secara eksplisit untuk menargetkan populasi yang rentan (mis., lansia, dan orang dengan masalah pernapasan) dan daerah yang rentan secara sosial ekonomi (mis., lebih tinggi segregasi rasial dan kemiskinan) dan mengalami paparan polusi yang lebih tinggi misalnya akibat O<sub>3</sub> dan PM<sub>2.5</sub> (Reames & Bravo, 2019). faktor-faktor yang mempengaruhi persepsi kualitas udara dan untuk mengungkapkan pola potensialnya. Persepsi kualitas udara individu, dalam hal debu dan kualitas udara secara keseluruhan, diperiksa sehubungan dengan polutan udara konsentrasi, variabel meteorologi, karakteristik pribadi serta sensasi termal dan Kondisi kesehatan. Data yang digunakan diperoleh dari pengukuran lingkungan, in situ dan dari stasiun, dan survei kuesioner yang dilakukan di daerah Mediterania perkotaan terbuka, Athena, Yunani (Pantavou et al., 2017).

Pembangkit listrik terutama dengan bahan bakar batubara, memberikan kesan polusi dan emisi yang tinggi, sehingga proyek pembangkit listrik biasanya mengalami penolakan dari penduduk setempat. Kondisi ini dapat menghalangi kegiatan promosi dari teknologi yang baru. Penelitian terhadap tanggapan masyarakat terhadap proyek pembangkit listrik dan menganalisa pengaruh mekanisme dari faktor dukungan masyarakat. Model penelitian dibuat berdasarkan perasaan terhadap tempat tinggal, rasa kepercayaan, dan sikap terhadap lingkungan sebagai variabel bebas, manfaat dan persepsi kerugian sebagai variabel penengah dan dukungan masyarakat sebagai variabel terikat. Hasil dari penelitian ini berdasarkan perasaan terhadap tempat dan berdasarkan sikap terhadap lingkungan. Perasaan terhadap tempat dengan persepsi manfaat terhadap masyarakat menunjukkan dampak tidak langsung yang sangat kecil, dari persepsi

kerugian memberikan dampak dukungan sebagai efek langsung dari dukungan masyarakat bukan sebagai dampak tidak langsung lebih kecil. Sikap lingkungan memiliki dampak tidak langsung pada dukungan masyarakat melalui persepsi manfaat dan persepsi kerugian lebih kecil. Selain itu, saran kebijakan pada pembuatan keputusan, publisitas proyek dan strategi kompensasi disarankan untuk meningkatkan dukungan masyarakat untuk proyek yang sama (Liu et al., 2017, pp. 398–406).

## **2.12. Respon Masyarakat**

Respon adalah suatu reaksi akibat efek suatu gangguan dan dilanjutkan dengan melihat hubungan sebab dan akibat terjadinya efek tersebut (Roux et al., 1998, pp. 15–30). Pada penelitian aspek kesehatan oleh Berry, et al., (2011, pp. 205–219) disebutkan respons orang terhadap tindakan pencegahan tergantung pada persepsi atau cara mereka melihat rangsangan lingkungan, antara lain pada upaya untuk melindungi kesehatan masyarakat prioritas dengan langkah-langkah adaptasi. Persepsi memainkan peran penting pada respons orang terhadap tindakan pencegahan (Pantavou et al., 2017) dan dapat digunakan untuk pengendalian dampak (Wangke, 2010). Dampak sosial dapat terjadi akibat dampak lanjutan dari terjadinya kontaminasi tanah dan polusi udara, serta dari sisi ekonomi serta dampak langsung akibat suatu kegiatan misal dampak bau, debu, kebisingan serta kemacetan lalu lintas. Dampak sosial juga bisa terdiri dari dua kategori yaitu *real impact* *perceive impact* atau *special impact*. Real impact adalah dampak nyata (*tangible*), bisa diukur seperti kebisingan, bau, debu, mata pencaharian, pendapatan. Perceived impact adalah dampak yang dipersepsikan warga masyarakat yang kemungkinan muncul karena kegiatan proyek, yang sifatnya tidak bisa diukur seperti rasa cemas, khawatir, takut. Persepsi ini kemudian membentuk respon yang terekspresi seperti penolakan terhadap proyek, demo dan lain sebagainya (Hadi, 2009, pp. 36–38).