

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Persiapan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (untuk selanjutnya disebut PLTN) di Indonesia sudah diawali sejak tahun 1971. Setelah melalui serangkaian studi akhirnya lokasi calon tapak PLTN Muria yang direkomendasikan antara lain adalah di Ujung Lemahabang, Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara (Batan-Undip, 2005 dan Batan-Undip, 2006).

Dalam rangka mempercepat diversifikasi energi untuk pembangkit tenaga listrik ke non-bahan bakar minyak (dalam hal ini adalah batubara) maka di Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara telah dibangun dan dioperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Uap berbahan bakar batubara (untuk selanjutnya disebut PLTU Batubara) dengan kapasitas 2x660 MW (PLTU Tanjungjati B, 2007).

Lokasi calon tapak PLTN terletak di Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara dan lokasi tapak PLTU Batubara terletak di Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara. Perairan pesisir PLTU Batubara Tanjungjati B berbatasan dengan perairan pesisir calon tapak PLTN. Berdasarkan studi NEWJEC (1996) secara ekologis perairan pesisir tersebut berada dalam hamparan ekosistem pesisir Semenanjung Muria.

Ekosistem pesisir merupakan tempat peralihan daratan dan lautan yang ditandai gradien perubahan ekosistem yang tajam (Pariwono, 1992). Apabila terjadi lepasan material radioaktif ke lingkungan perairan pesisir maka untuk memprediksi sebarannya diperlukan data basis radioaktivitas alam. Menurut Smith (1984), kondisi fisis yang mempengaruhi persebaran radionuklida di perairan laut antara lain suhu, kerapatan, salinitas, arus, gelombang dan kedalaman perairan. Menurut Ophel (1977), konsentrasi radionuklida dalam massa air ditentukan oleh faktor persebaran, perpindahan dan peluruhan radionuklida. Parameter penting persebaran radionuklida di perairan pesisir adalah pergerakan massa air.

Di dekat lokasi calon tapak PLTN, sejak 14 Oktober 2006 telah dioperasikan PLTU Tanjungjati B Unit 1 dan Unit 2 berkapasitas 2x660 MW dan akan dibangun Unit 3 dan Unit 4 berkapasitas 2x660 MW (PLTU Tanjungjati B, 2007). Penggunaan batubara sebagai bahan bakar di PLTU Tanjungjati B Unit 1 dan Unit 2 adalah 305 ton/jam/unit dan kandungan *ash* sekitar 4,8% (PLTU Tanjungjati B, 2010). Proses pembakaran batubara ini menghasilkan *fly ash* dan *bottom ash* yang ditimbun di *ash yard*. Penimbunan *fly ash* dan *bottom ash* di *ash yard* bisa menimbulkan pelindian (*leaching*) sehingga akan ada air lindi (*leachate*) yang meresap ke dalam tanah dan dapat mempengaruhi kualitas air laut.

Hasil pengukuran kualitas air laut di sekitar *jetty* PLTU Tanjungjati B yang tercantum dalam Laporan Pelaksanaan RKL dan RPL PLTU Tanjungjati B (2010), memperlihatkan nilai parameter Fisika dan Kimia telah memenuhi Baku Mutu Air Laut sesuai dengan Keputusan Menteri

Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut (Kepmen LH 51, 2004). Tidak ada laporan hasil identifikasi dan pengukuran radionuklida alam dalam air laut. Apabila merujuk Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut, parameter radionuklida alam memang tidak diatur dalam keputusan menteri tersebut sehingga laporan pelaksanaan RKL dan RPL PLTU Tanjungjati B Unit 1 dan Unit 2 tidak mencantumkan parameter radionuklida alam. Padahal, apabila merujuk penelitian Marinkovic *et al.* (2010), batubara sebagai bahan tambang yang berasal dari kerak bumi mengandung radionuklida alam ^{238}U (radionuklida Uranium dengan nomor massa 238), ^{232}Th (radionuklida Thorium dengan nomor massa 232), ^{226}Ra (radionuklida Radium dengan nomor massa 226) dan ^{40}K (radionuklida Kalium dengan nomor massa 40) sehingga *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batubara dapat mencemari lingkungan laut.

Berdasarkan paparan masalah tersebut, penulis mencoba untuk melakukan pemodelan persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di perairan pesisir Semenanjung Muria, Desa Tubanan dan Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara yang mencakup areal perairan pesisir di sekitar *jetty* PLTU Tanjungjati B dan areal perairan pesisir lokasi calon tapak PLTN.

Maksud penelitian ini adalah memperkenalkan penerapan model hidrodinamika dalam analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di perairan pesisir dan mengusulkan parameter radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K masuk ke dalam Baku Mutu Air Laut.

1.2. KEASLIAN DAN KEBARUAN (*NOVELTIES*)

Penelitian ini merupakan penelitian asli karena sebelumnya belum pernah dilakukan pemodelan hidrodinamika untuk analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di perairan pesisir Semenanjung Muria terkait dengan pencemaran lingkungan oleh radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang berasal dari pelindian *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batubara PLTU Batubara.

Kebaruan (*novelties*) penelitian ini adalah:

- (1) Diterapkannya Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel untuk analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di perairan pesisir Semenanjung Muria terkait dengan pencemaran lingkungan oleh radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang berasal dari pelindian *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batubara PLTU Batubara.
- (2) Digunakannya Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel sebagai Basis Pengelolaan Pesisir dalam Satu *Coastal Sediment Cell*.
- (3) Diusulkannya Konsep Baku Mutu Air Laut yang memuat parameter Radionuklida Alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K . Baku mutu air laut yang berlaku selama ini, yaitu yang diatur dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut, hanya mengatur parameter Radionuklida untuk komposisi yang tidak diketahui (gross- α , gross- β , gross- γ) tetapi belum mengatur tentang jenis dan aktivitas radionuklida alam di perairan pesisir.

Bukti-bukti penguat tentang keaslian dan kebaruan penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

- (1) Mellawati (2004), telah melakukan penelitian tentang pencemaran lingkungan oleh unsur radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra tetapi dilakukan di sekitar kawasan industri fosfat di perairan pesisir Gresik, Jawa Timur yang berbeda kondisi "*coastal sediment cell*"-nya dengan perairan pesisir Semenanjung Muria. Selain itu, industri fosfat meski bahan bakunya adalah mineral tambang dari kerak bumi tetapi karakteristik lepasannya berbeda dengan PLTU Batubara.
- (2) Haynes (2009), telah mengkaji aspek reklamasi dan revegetasi tapak disposal *fly ash* di Queensland dan memperkirakan sekitar 70-75% residu pembakaran PLTU Batubara adalah *fly ash*. Kajiannya hanya fokus pada cemaran logam-logam berat *non-decaying* (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb), tetapi tidak membahas cemaran unsur radionuklida alam.
- (3) Marinkovic *et al.* (2010), telah melakukan penelitian untuk identifikasi radionuklida alam dalam *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Batubara "Nicola Tesla", Polandia, dan berhasil mengidentifikasi radionuklida alam ^{238}U , ^{235}U , ^{40}K , ^{226}Ra ^{232}Th pada sampel penelitian tetapi penelitian tidak dilakukan terhadap sampel air laut.
- (4) Uslu dan Gokmese (2010) telah meneliti kandungan radioaktif alam di 11 PLTU Batubara di Turki. Kajian difokuskan pada efek radiasi radionuklida alam di batubara, *fly ash* dan *bottom ash* tetapi tidak mengkaji sebaran radionuklida alam yang terlindi air laut.

- (5) Gitari *et al.* (2009), telah meneliti dua PLTU Batubara di Afrika Selatan dan fokus pada penelitian elemen-elemen toksik seperti As, Se, Cd, Cr, Pb yang terlindi keluar dari *fly ash* ketika kontak dengan badan air tetapi penelitiannya tidak mengkaji radionuklida alam yang terlindi keluar dari *fly ash* ketika kontak dengan badan air.
- (6) Lovrencic *et al.* (2005), telah melakukan karakterisasi radiologis air lindi dari *fly ash* dan *bottom ash* di badan air dan sedimen, berhasil mendeteksi ^{226}Ra dan ^{238}U dan mendapati bahwa 37% total U terlindi dari *ash* oleh air laut. Penelitian ini dilakukan di Teluk Kastela (Laut Adriatik) yang kondisi oseanografinya berbeda dengan perairan pesisir Semenanjung Muria dan Teluk Kastela tidak direncanakan sebagai lokasi tapak PLTN oleh Pemerintah Kroasia.
- (7) Orescanin *et al.* (2005), telah melakukan penelitian sejenis dengan Lovrencic *et al.* (2005) yaitu tentang pengaruh deposisi *fly ash* dan *bottom ash* tetapi terhadap kualitas sedimen Teluk Kastela dan juga berhasil mendeteksi radionuklida alam ^{226}Ra dan ^{238}U .
- (8) Aguado *et al.* (2004), telah melakukan penelitian di estuarin Huelva, Spanyol Barat Daya, di lokasi industri fosfat, berhasil menemukan ^{226}Ra dan berbagai radionuklida luruhan-Uranium. Radionuklida alam ini berhasil terdeteksi di sekitar industri fosfat yang bahan bakunya adalah mineral tambang yang berasal dari kerak bumi tetapi karakteristik lepasannya berbeda dengan PLTU Batubara.

- (9) Mljak dan Krizman (1996), menemukan adanya unsur radionuklida alam ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{210}Pb di sungai Paka yang berasal dari pelindian PLTU Batubara Sostanj, Slovenia, yang batubaranya berasal dari tambang Velenje. Penelitian ini dilakukan di badan air sungai yang kondisi hidrodinamikanya berbeda dengan perairan laut.
- (10) Penelitian tentang radionuklida alam di perairan pesisir telah dilakukan oleh penulis (dan rekan) di perairan pesisir Semarang:
- (a) Sasongko dan Setiabudi (1996), telah melakukan penelitian radioaktivitas- α dan radioaktivitas- β perairan laut Semarang untuk mengukur gros- α dan gros- β perairan pesisir Semarang;
 - (b) Taftazani dan Sasongko (1997), telah meneliti radioaktivitas lingkungan pesisir laut Semarang;
 - (c) Sasongko (1997a), telah melakukan kajian radioaktivitas alam perairan pesisir Semarang;
 - (d) Sasongko (1997b), telah melakukan identifikasi radionuklida alam laut pesisir Semarang;
 - (e) Taftazani dan Sasongko (1998), telah melakukan penelitian Faktor Distribusi dan Bioakumulasi Radionuklida dalam Sedimen dan Kerang di Perairan Semarang dan berhasil mengidentifikasi radionuklida alam ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{210}Pb ;
 - (f) Sasongko (1998), telah melakukan penelitian Sedimen Perairan Semarang dan berhasil memetakan distribusi radionuklida alam ^{40}K dan ^{208}Tl ;

(g) Sasongko (2001), telah melakukan penelitian Evaluasi Kadar Hg di Lingkungan Perairan Pesisir Semarang Menggunakan Metode Analisis Pengaktifan Neutron;

(h) Sasongko (2002), telah melakukan peruntukan unsur kelumit Hg di Lingkungan Perairan Pesisir Semarang Menggunakan Metode Analisis Pengaktifan Neutron;

Radionuklida alam yang berhasil diidentifikasi di perairan pesisir Semarang ini merupakan paparan radiasi alam yang bersumber dari alam (batuan dasar perairan laut, sedimen dasar perairan laut dan badan air laut) di perairan pesisir Semarang sementara penelitian dalam Disertasi ini adalah pemodelan persebaran radionuklida alam yang bersumber dari kegiatan manusia (hasil pelindian *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Batubara).

(11) Penelitian sejenis oleh peneliti dari Badan Tenaga Nuklir Nasional (Batan) antara lain adalah:

(a) Syarbaini *et al.* (1998), telah meneliti status kandungan dan distribusi radionuklida buatan dalam ekosistem laut Semenanjung Muria. Penelitian ini dilakukan di perairan laut yang masuk Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara (lokasi calon tapak PLTN) tetapi tidak mencakup perairan laut Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara (lokasi PLTU Batubara) sementara yang diidentifikasi adalah radionuklida buatan, bukan radionuklida alam yang berasal dari kegiatan PLTU Batubara.

- (b) Tjokrokardono *et al.* (2004a), telah melakukan pemetaan radioaktivitas tanah permukaan di Semenanjung Muria tetapi tidak memasukkan radioaktivitas air laut dalam kajiannya.
- (c) Tjokrokardono *et al.* (2004b), telah melakukan pemetaan geologi dan radioaktivitas alam di Semenanjung Muria, Jawa Tengah, berhasil mengidentifikasi ${}^e\text{U}$, ${}^e\text{Th}$ dan K dalam sampel tanah, air, dan lumpur di lokasi yang melingkupi areal penelitian dalam Disertasi ini tetapi pada saat penelitian dilakukan (1995/1996 – 1998/1999) PLTU Batubara belum beroperasi.
- (d) Wahyudi *et al.* (2011), telah berhasil mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi radionuklida alam ${}^{40}\text{K}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{228}\text{Ra}$, ${}^{228}\text{Th}$ dalam sampel tanah dari Jawa Timur tetapi tidak meneliti sampel air laut dan sedimen dasar dari perairan pesisir.
- (12) Baku mutu air laut yang berlaku selama ini, yaitu yang diatur dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut (Kepmen LH 51, 2004), hanya mengatur parameter Radionuklida untuk komposisi yang tidak diketahui (gross- α , gross- β , gross- γ) tetapi belum mengatur tentang jenis dan aktivitas radionuklida alam di perairan pesisir.
- (13) Cahyana (2005), telah melakukan kajian tentang pemodelan hidrodinamika yang dapat digunakan untuk prakiraan persebaran unsur radioaktif di lingkungan perairan laut tetapi kajiannya merupakan kajian pustaka sehingga tidak ada verifikasi model dan validasi dengan data empirik.

1.3. TUJUAN

- (1) Melakukan identifikasi radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang bersumber dari pelindian *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batubara PLTU Batubara **di air laut** perairan pesisir.
- (2) Melakukan identifikasi radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang bersumber dari pelindian *fly ash* dan *bottom ash* hasil pembakaran batubara PLTU Batubara **di sedimen** perairan pesisir.
- (3) Mengajukan alternatif Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel untuk analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K **di air laut** perairan pesisir.
- (4) Mengajukan alternatif Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel untuk analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K **di sedimen** perairan pesisir.
- (5) Mengusulkan parameter radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K masuk ke dalam Baku Mutu Air Laut.

1.4. HIPOTESIS

Dalam rangka mempercepat diversifikasi energi untuk pembangkit tenaga listrik ke non-bahan bakar minyak (dalam hal ini adalah batubara), Pemerintah Republik Indonesia telah menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 71 Tahun 2006 tentang Penugasan kepada PT. PLN (Persero) untuk Melakukan Percepatan Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik yang Menggunakan Batubara (PP 71, 2006).

Penggunaan batubara yang merupakan bahan tambang dari kerak bumi akan meningkatkan pencemaran lingkungan perairan pesisir oleh radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang lepas ke lingkungan melalui kegiatan pengangkutan, penimbunan di *coal yard*, proses pembakaran, pemindahan dan penimbunan *fly ash* dan *bottom ash* ke *ash silo* dan *ash yard* serta pelindian di *ash yard* yang berdekatan dengan perairan pesisir. Adanya pelindian *fly ash* dan *bottom ash* akan meningkatkan kandungan radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di air laut sehingga dapat tersuspensi ke sedimen layang, terendapkan ke sedimen dasar dan/atau terakumulasi secara biologis ke biota laut dan terpapar ke manusia.

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah:

1. Terdapat pelindian radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di air laut di perairan pesisir Semenanjung Muria.
2. Terdapat pelindian radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di sedimen di perairan pesisir Semenanjung Muria.
3. Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K **di air laut** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran.
4. Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K **di sedimen** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran.

1.5. MANFAAT

1.5.1. Manfaat Akademis

- (1) Dapat digunakannya Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan bantuan perangkat lunak *ArcView GIS* 3.3 untuk pemetaan batimetri, perangkat lunak *CD-Oceanography* 4.0 untuk plot grafik arus, perangkat lunak *Surface-water Modeling System* (SMS) 8.1 untuk model pembangkitan arus dan arus pasang surut dalam analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di air laut perairan pesisir.
- (2) Dapat digunakannya Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan bantuan perangkat lunak *ArcView GIS* 3.3 untuk pemetaan batimetri, perangkat lunak *CD-Oceanography* 4.0 untuk plot grafik arus, perangkat lunak *Surface-water Modeling System* (SMS) 8.1 untuk model pembangkitan arus dan arus pasang surut dalam analisis persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di sedimen perairan pesisir.

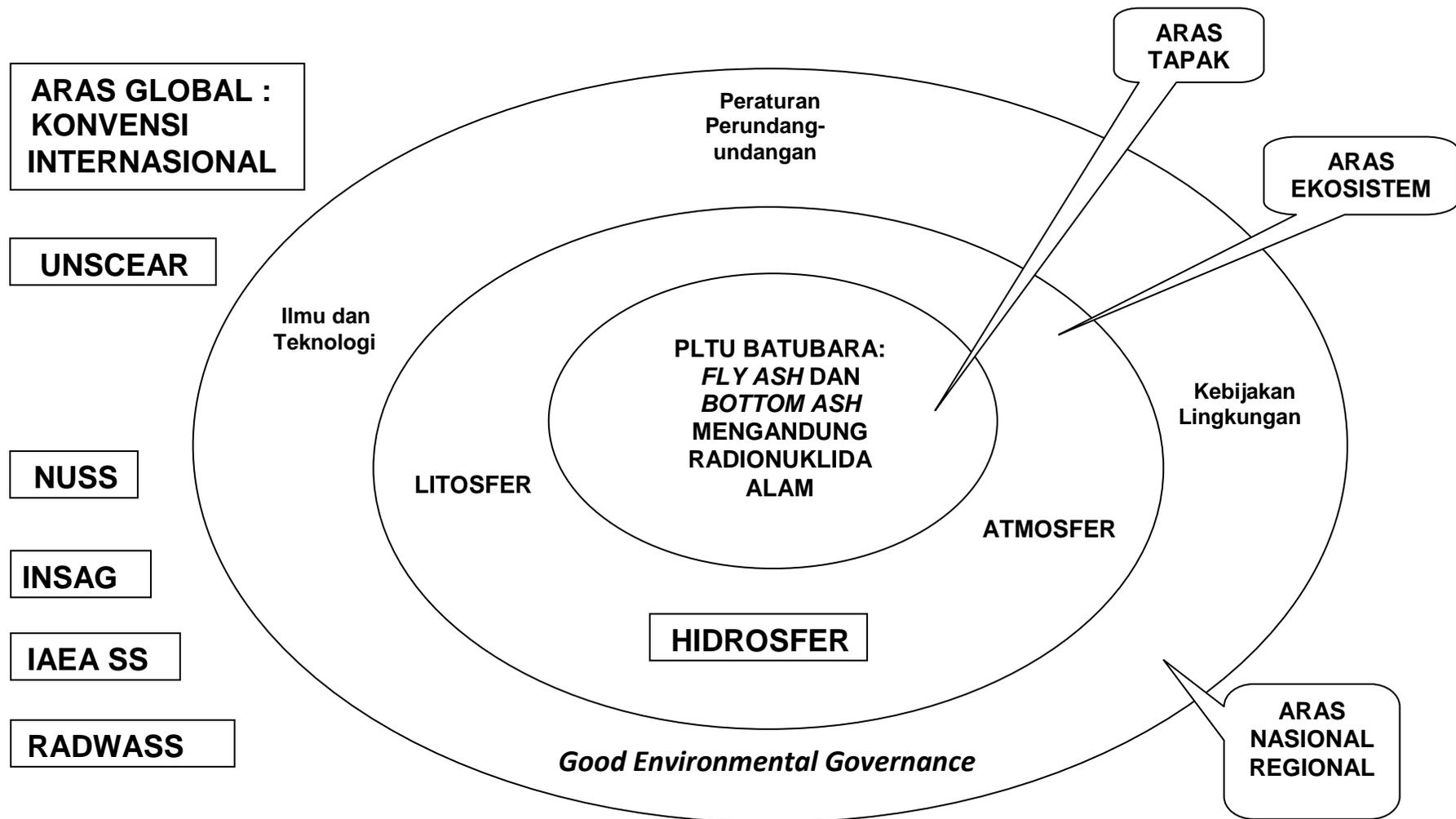
1.5.2. Manfaat Praksis

- (1) Dapat diusulkannya parameter radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K masuk ke dalam Baku Mutu Air Laut.
- (2) Dapat disajikannya data basis radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di perairan pesisir Semenanjung Muria yang dapat digunakan untuk identifikasi, prediksi dan evaluasi dampak rencana kegiatan PLTN terhadap lingkungan perairan pesisir Semenanjung Muria.

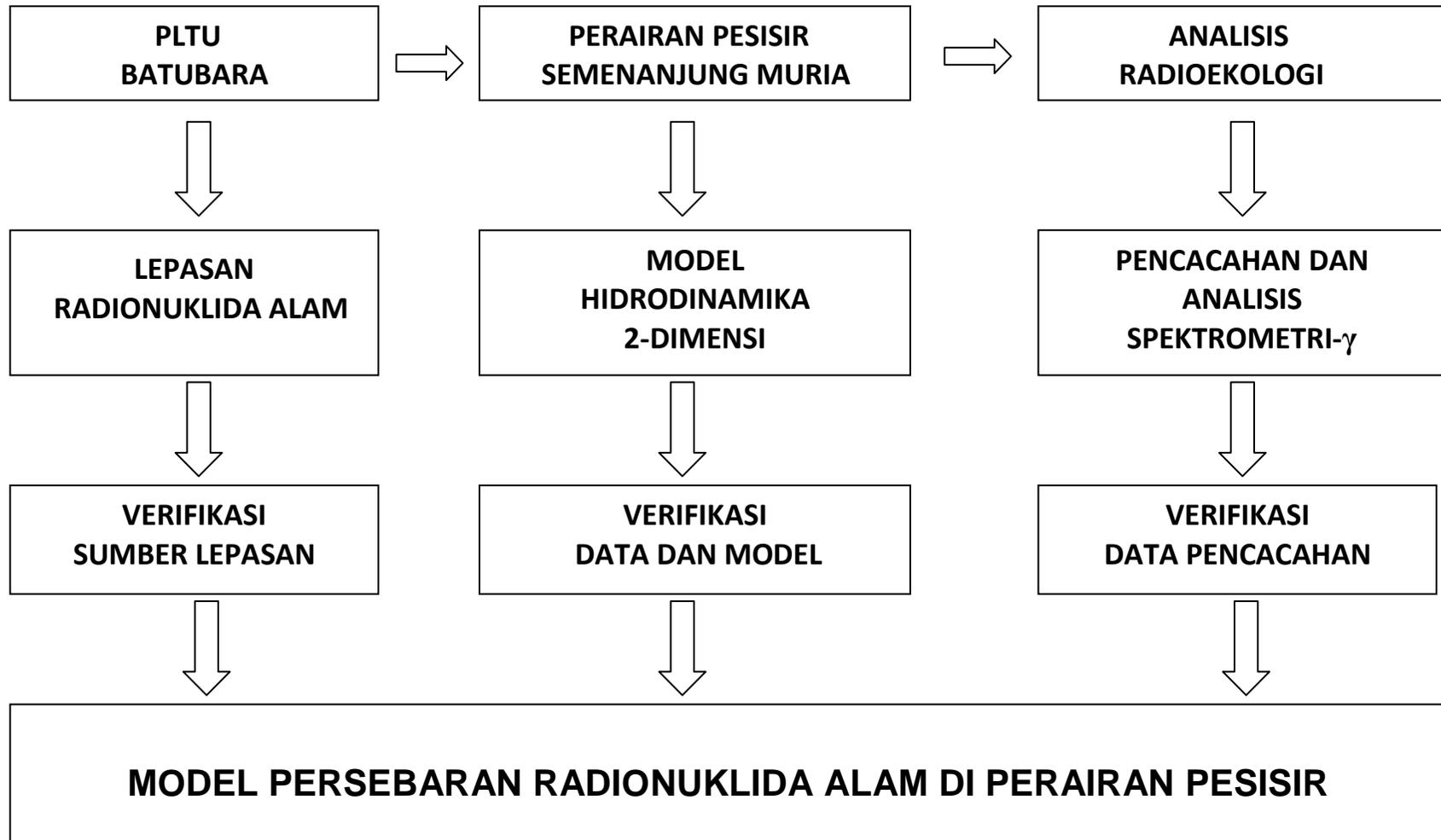
(3) Dapat dikembangkannya program pemantauan radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di lingkungan perairan pesisir Semenanjung Muria untuk mengantisipasi dan mengevaluasi dampak program percepatan PLTU Batubara 10.000 MW terhadap lingkungan radio-ekologi perairan pesisir.

1.6. KERANGKA PEMIKIRAN

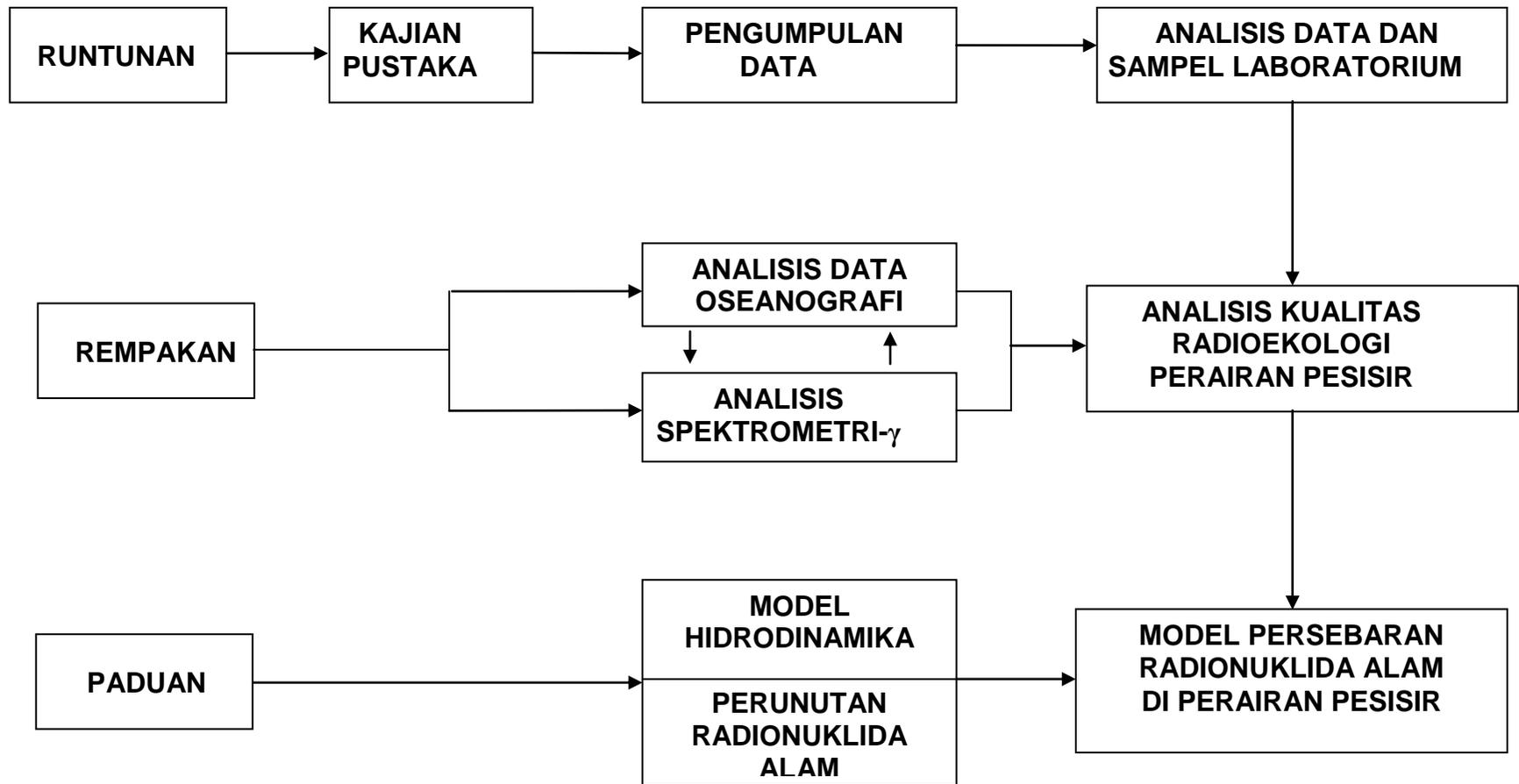
Berdasarkan paparan latar belakang tersebut, kerangka pemikiran yang dijadikan landasan dalam alur alur penelitian ini disajikan pada **Gambar 1.1** (Perangkat Manajemen Radioekologi Perairan Pesisir), **Gambar 1.2** (Kerangka Alur Pikir), **Gambar 1.3** (Moda Kajian yang Digunakan) dan **Gambar 1.4** (Diagram Alir Penelitian).



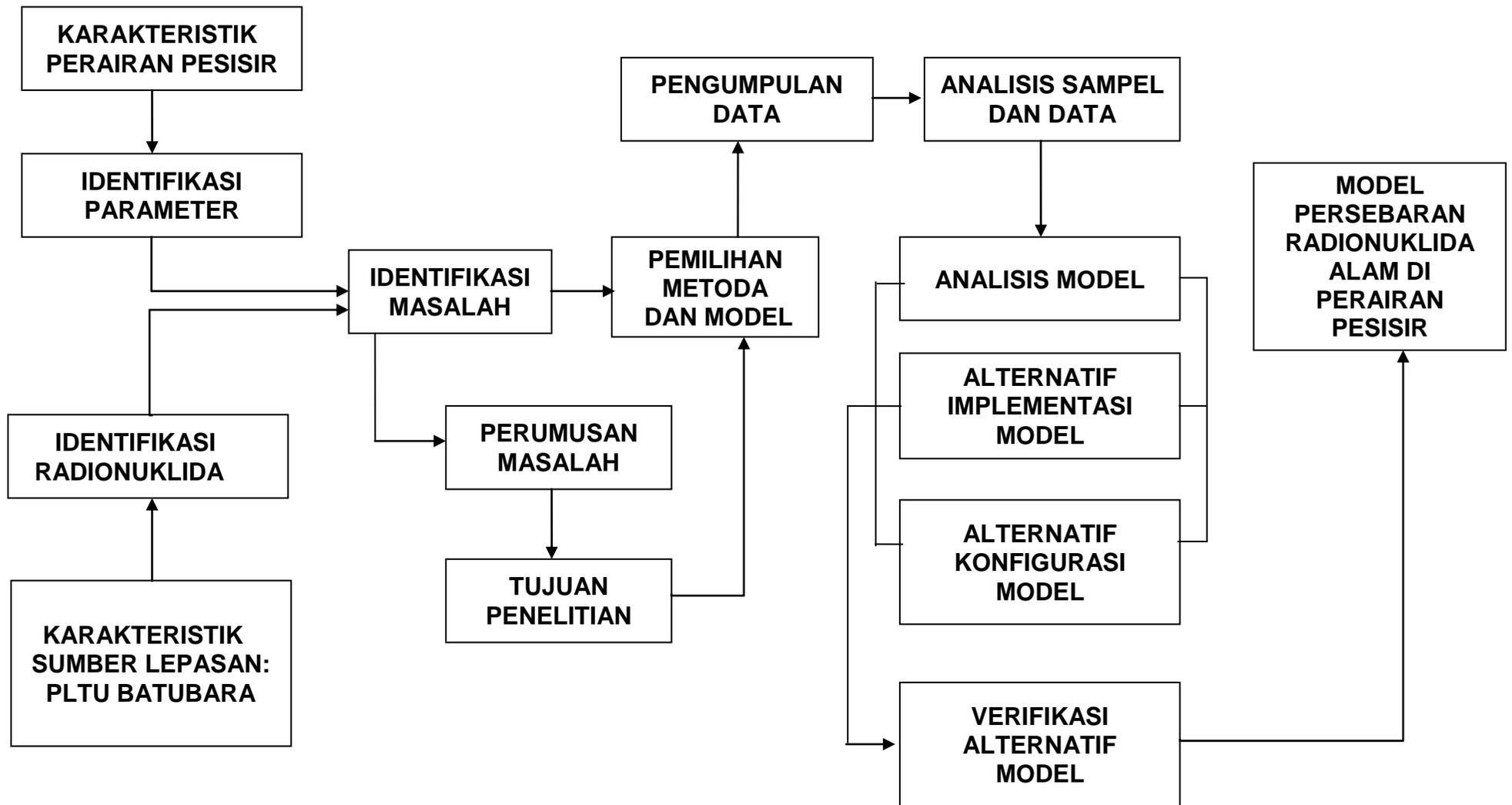
Gambar 1.1. Perangkat Manajemen Radioekologi Perairan Pesisir



Gambar 1.2. Kerangka Alur Pikir



Gambar 1.3. Moda Kajian yang Digunakan



Gambar 1.4. Diagram Alir Penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. WILAYAH PESISIR

Hingga saat ini, konsep dan definisi wilayah pesisir sangat beragam karena definisi yang dipakai para pakar kelautan, ekonomi, politik, militer dan pelayaran ternyata berbeda-beda.

Salah satu definisi wilayah pesisir yang sering dipakai adalah definisi yang dirumuskan oleh LON LIPI (1976), yakni “... *daerah pertemuan antara darat dan laut dengan batas ke arah darat meliputi bagian daratan yang masih mendapat pengaruh sifat-sifat laut dan batas ke arah laut mencakup bagian atau batasan terluar dari daerah paparan benua yang masih dipengaruhi oleh proses alami yang terjadi di darat...*”.

Definisi tentang “wilayah pesisir” menurut Undang-undang Nomor 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil (UU 27, 2007), pada Pasal 1 angka 2, disebutkan bahwa: “*Wilayah Pesisir adalah daerah peralihan antara Ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan di darat dan laut*”. Sementara definisi tentang “perairan pesisir” ada pada Pasal 1 angka 7: “*Perairan Pesisir adalah laut yang berbatasan dengan daratan meliputi perairan sejauh 12 (dua belas) mil laut diukur dari garis pantai, perairan yang menghubungkan pantai dan pulau-pulau, estuari, teluk, perairan dangkal, rawa payau, dan laguna*”.

Ditinjau dari berbagai macam peruntukannya, wilayah pesisir merupakan wilayah yang sangat produktif (Supriharyono, 2000). Wilayah pesisir adalah suatu wilayah peralihan antara ekosistem daratan dan lautan, yang saling berinteraksi dan membentuk suatu kondisi lingkungan (ekologis) yang unik (Dahuri *et al.*, 1996).

Menurut Dahuri *et al.* (1996), wilayah pesisir sampai sekarang belum memiliki definisi baku. Wilayah pesisir adalah suatu wilayah peralihan antara daratan dan lautan, batas ke arah darat adalah jarak secara *arbitrer* dari rata-rata pasang tinggi (*mean high tide*) dan batas ke arah laut adalah batas yurisdiksi wilayah.

Meskipun per definisi rumusannya berbeda-beda tetapi secara konseptual pengertian mengenai wilayah pesisir adalah sama, yakni mencakup proses interaksi antar-komponen daratan, lautan dan atmosfer, yang proses interaksinya sudah berlangsung sejak bumi terbentuk dan kenampakan wilayah pesisir saat ini merupakan hasil keseimbangan dinamik proses-proses penghancuran dan pembentukan dari ketiga unsur tersebut (Sutikno, 1991).

Menurut Pariwono (1992), wilayah pesisir sebagai tempat peralihan daratan dan lautan ditandai oleh gradien perubahan ekosistem yang tajam. Wilayah pesisir merupakan wilayah yang dinamik, selalu berubah-ubah utamanya disebabkan oleh proses pengendapan, abrasi, dan transportasi sedimen. Karakteristik fisik wilayah pesisir dibentuk oleh parameter gelombang, pasang, arus, angin, salinitas, suhu dan perubahan permukaan air laut.

Menurut Riley dan Skirrow (1975), secara kimia wilayah pesisir dicirikan oleh kandungan banyak unsur kimia seperti gas-gas terlarut, garam dan berbagai partikel tersuspensi yang mempengaruhi komposisi kimia air laut. Proses oseanografi kimia yang terjadi antara lain adalah daur kimia, transfer udara-air, daur nutrien, proses anorganik, oksigenasi, karbonasi dan *trace element*.

Menurut Knox dan Miyabara (1984), wilayah pesisir dicirikan oleh produktivitas hayati yang tinggi karena masuknya air sungai ke wilayah pesisir membawa pasokan nutrien dari daratan. Produktivitas perairan wilayah pesisir ini terkait dengan proses fotosintesis yang baik dan ketersediaan nutrisi dan CO₂ yang melimpah.

Menurut Watson (1992), wilayah pesisir sebagai zona penyangga antara daratan dan lautan memiliki tingkat keanekaragaman hayati lebih tinggi dibandingkan daratan. Berbagai satwa migrasi banyak terdapat di wilayah pesisir.

2.2. MODEL HIDRODINAMIKA

Menurut Cahyana (2005), model hidrodinamika sangat penting untuk simulasi pola gerak air laut dan dapat digunakan untuk mengkaji sebaran radionuklida yang terlepas ke badan air laut. Dalam kasus pengoperasian PLTU Batubara, efluen radionuklida alam dapat terlepas dan terdispersi ke badan air laut sehingga dapat mempengaruhi ekosistem laut.

Berbagai program komputer yang menggunakan model hidrodinamika telah dikembangkan untuk berbagai keperluan model di laut seperti *Princeton Ocean Model* (POM) yang dikembangkan oleh Mellor (1998). Mekanisme persebaran unsur radioaktif (alam dan artifisial) di lingkungan perairan pesisir dapat disimulasikan dengan bantuan model menggunakan POM, yang tidak lain adalah Model Hidrodinamika.

Menurut Cahyana (2005), hasil pemodelan hidrodinamika dapat digunakan untuk prakiraan persebaran unsur radioaktif di perairan laut sehingga dapat digunakan sebagai data basis penyusunan rencana penanggulangan pencemaran radioaktivitas di perairan laut. Pola persebaran unsur radioaktif di perairan laut sangat erat berhubungan dengan kondisi hidrooseanografi sehingga perlu dilakukan analisis data oseanografi fisika yang meliputi arus, pasang surut, dan gelombang karena dinamika perairan laut akan menentukan pola dan jangkauan sebaran unsur radioaktif sebagai fungsi waktu dan *self purification* perairan laut. Pemodelan menggunakan model hidrodinamika apabila tidak mengkaji persebaran arah vertikal (hanya fenomena permukaan saja) maka pemodelannya mencakup penyelesaian sistem dua dimensi yang terkait dengan adanya kekekalan massa air, momentum, salinitas dan energi.

Menurut Purwanto (2005), model merupakan representasi dari dunia nyata, yang disajikan dalam bentuk persamaan matematika yang mudah dipahami dan diselesaikan secara analitik atau dengan perangkat lunak program komputer.

Konsep dan definisi dari Purwanto (2005) ini dapat diadopsi untuk lingkungan perairan pesisir, yakni model hidrodinamika yang digunakan untuk menggambarkan fenomena oseanografi ke dalam bentuk persamaan matematika yang dapat diselesaikan secara analitik atau dengan perangkat lunak program komputer. Persamaan matematika yang diterapkan adalah persamaan diferensial karena fenomena oseanografi merupakan suatu sistem fisika yang dapat dimodelkan dengan persamaan diferensial mekanika fluida.

Menurut Purwanto (2005), model matematika merupakan perumusan masalah dalam bentuk persamaan matematika. Konsep ini dapat diterapkan untuk pemodelan hidrodinamika perairan pesisir yaitu proses angkutan massa air dalam suatu kolom air yang memuat mekanisme adveksi dan mekanisme dispersi.

Menurut Chapra (1997), mekanisme transpor massa fluida dapat dikategorikan menjadi mekanisme adveksi dan dispersi. Adveksi dihasilkan oleh aliran *unidirectional*, tidak mengubah identitas substansi yang mengalir dan mekanisme adveksi ini yang menggerakkan suatu zat alir dari satu posisi ke posisi lain di dalam ruang.

Vektor rapat fluks massa (\mathbf{J}) suatu angkutan massa akibat adveksi dapat dituliskan dalam pendekatan 1-dimensi ke arah-x seperti disajikan dalam Persamaan 2.1:

$$\mathbf{J}_x = \mathbf{v}_x C \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

\mathbf{J}_x adalah vektor rapat fluks massa ke arah sumbu-x
 \mathbf{v}_x adalah vektor kecepatan aliran massa ke arah sumbu-x
 C adalah konsentrasi massa (fraksi massa setiap satuan volume).

Dispersi merupakan salah satu mekanisme transpor massa yang dapat menyebabkan fraksi massa (seperti radionuklida) menyebar di dalam air. Mekanisme dispersi ini terjadi karena adanya perbedaan kecepatan aliran-aliran dalam suatu badan air sehingga menyebabkan fraksi massa yang terlarut dalam badan air akan menyebar atau tercampur di sepanjang sumbu yang sejajar arah aliran.

Menurut Fischer *et al.* (1979), fenomena dispersi ini dapat direpresentasikan dalam bentuk proses difusi Fickian, dikenal dengan nama Hukum Fick Pertama, yang menyatakan adanya hubungan proporsional antara vektor rapat fluks massa (\mathbf{J}) dengan *gradient* konsentrasi seperti disajikan dalam Persamaan 2.2:

$$\mathbf{J}_x = -D \frac{dC}{dx} \mathbf{i} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

\mathbf{J}_x adalah vektor rapat fluks massa ke arah sumbu-x
 C adalah konsentrasi massa (fraksi massa setiap satuan volume)
 D adalah koefisien difusi (difusivitas molekular)
 \mathbf{i} adalah vektor satuan ke arah sumbu-x
 Tanda negatif menyatakan arah aliran dari konsentrasi tinggi ke rendah.

Untuk aliran massa pada suatu kolom air 1-dimensi dan tak-ajeg (*unsteady*) berlaku hukum kekekalan massa (Fischer *et al.*, 1979) seperti disajikan dalam Persamaan 2.3:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial \mathbf{J}_x}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

\mathbf{J}_x adalah rapat fluks massa ke arah sumbu-x
 C adalah konsentrasi massa (fraksi massa setiap satuan volume)
 Tanda negatif menyatakan arah aliran dari konsentrasi tinggi ke rendah.

Substitusi Persamaan 2.2 ke Persamaan 2.3 diperoleh Persamaan 2.4:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots (2.4)$$

Substitusi Persamaan 2.1 ke Persamaan 2.3 diperoleh Persamaan 2.5:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial(v_x C)}{\partial x} = - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad \dots\dots (2.5)$$

sehingga gabungan Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5 menjadi Persamaan 2.6:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots (2.6)$$

Persamaan 2.6 dalam bentuk 2-dimensi dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.7:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - (v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y}) + (D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}) \quad \dots\dots (2.7)$$

Persamaan 2.6 dalam bentuk 3-dimensi dapat dituliskan menjadi Persamaan 2.8:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - (v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z}) + (D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}) \quad \dots\dots (2.8)$$

atau dalam bentuk Persamaan 2.9:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla C + D \nabla^2 C \quad \dots\dots (2.9)$$

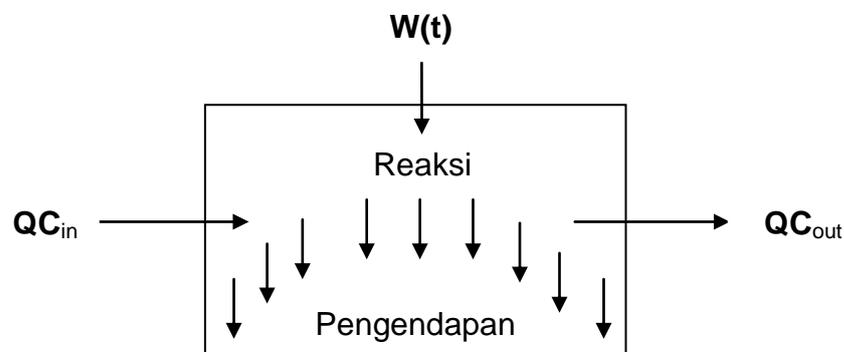
\mathbf{v} adalah vektor kecepatan aliran massa

v_x adalah komponen kecepatan aliran massa ke arah sumbu-x

v_y adalah komponen kecepatan aliran massa ke arah sumbu-y

v_z adalah komponen kecepatan aliran massa ke arah sumbu-z

Merujuk Potter *et al.* (2010) dan Yudhita (2008), transpor massa secara adveksi dan dispersi dapat disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Mekanisme transpor massa dalam kolom air

$C = \frac{m}{V}$ adalah konsentrasi massa (fraksi massa setiap satuan volume),
 $W = \frac{m}{t}$ adalah laju massa (massa yang mengalir setiap satuan waktu),
 $Q = \frac{V}{t}$ adalah debit massa (volume yang mengalir setiap satuan waktu),

Hukum kekekalan massa dapat dinyatakan sebagai berikut:

Akumulasi = Inflow - Outflow - Reaksi - Pengendapan

Dengan mengabaikan suku-suku reaksi dan pengendapan, pernyataan tersebut secara matematis (1-dimensi) dapat dituliskan dalam Persamaan 2.10:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{W(t)}{V} - \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \left(D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad \dots\dots (2.10)$$

yang bersesuaian dengan Persamaan 2.8 atau Persamaan 2.9 dengan memasukkan faktor laju alir massa (W). Persamaan 2.10 ini dikenal sebagai Model Adveksi-Dispersi dalam bentuk persamaan diferensial parsial orde dua (Yudhita, 2008) yang penyelesaiannya menggunakan penyelesaian numerik dengan metode beda-hingga.

Model ini, dengan berbagai variasi notasi penulisan, digunakan sebagai dasar model hidrodinamik dalam bentuk persamaan diferensial parsial orde-2. Menurut Smith (1996), penyelesaian persamaan diferensial parsial orde-2 dapat menggunakan pendekatan numerik beda hingga. Menurut Muhammadi *et al.* (2001) model yang baik harus dapat merepresentasikan keadaan yang sebenarnya.

Dengan notasi penulisan yang berbeda, bentuk persamaan fenomena transpor massa yang dapat digunakan dalam permodelan hidrodinamika (Putri dan Mihardja, 1999; Fisher, 1981) adalah seperti yang tertulis pada Persamaan 2.11:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla C_i + K \nabla^2 C_i + R(C_1, C_2, \dots, C_n) + S_i(x, y, z, t) \quad \dots\dots (2.11)$$

C_i adalah konsentrasi polutan i pada koordinat ruang dan waktu.

\mathbf{v} adalah vektor kecepatan

K adalah konstanta difusivitas polutan

S_i adalah emisi sumber dari polutan i

T adalah waktu

R_i adalah laju reaksi kimia antara media dan polutan i

$$\nabla \text{ adalah operator del} = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

yang bersesuaian dengan Persamaan 2.9 dengan memasukkan faktor R dan S . Persamaan 2.11 dalam bentuk tiga dimensi dapat dituliskan dalam Persamaan 2.12:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \left(v_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \left(K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right) + R(C_1, C_2, \dots, C_n) + S_i(x, y, z, t) \quad \dots\dots (2.12)$$

Model hidrodinamika yang digunakan untuk menggambarkan fenomena hidrooseanografi dalam penelitian ini, massa air adalah air laut dan polutan adalah unsur radionuklida alam.

Apabila laju reaksi kimia diabaikan (asumsi tidak terjadi reaksi kimia antar-polutan) maka Persamaan 2.12 menjadi Persamaan 2.13:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \left(v_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \left(K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right) + S_i(x, y, z, t)$$

..... (2.13)

Apabila yang dikaji adalah fenomena persebaran polutan di permukaan laut maka variabel kecepatan yang digunakan hanya v_x dan v_y untuk menggambarkan arah kecepatan sepanjang sumbu-x (barat-timur) dan arah kecepatan sepanjang sumbu-y (utara-selatan).

Kemampuan model yang didasarkan pada model hidrodinamika untuk kondisi antara dua macam elemen, dalam hal ini adalah air laut sebagai media dan unsur radionuklida alam sebagai polutan, dilakukan dengan asumsi tidak terjadi reaksi kimia di antaranya.

Berdasarkan *Manual SMS 8.1* (SMS, 2004), simulasi dimulai dari penentuan model. Model yang dipakai adalah simulasi dinamis menggunakan persamaan transpor massa 2-dimensi. Sebaran sebagai fungsi waktu divisualkan secara 2-dimensi. Efek yang timbul dianalisis secara kuantitatif. Tahap berikutnya adalah penyusunan skenario. Dalam skenario ini *input* yang telah diidentifikasi dimasukkan dalam model simulasi. *Input* untuk simulasi hidrodinamika ini adalah:

1. Parameter model
2. Bentuk persamaan yang diinginkan
3. Data batimetri
4. Sistem grid
5. Data hidrodinamika
6. Kandungan kontaminan
7. Kondisi batas.

Menurut Sasongko (2002), pembuatan model memerlukan perangkat lunak sistem berbasis komputer dengan referensi keruangan yang memiliki kemampuan memanipulasi data digital dengan kombinasi data atribut dan data georeferensi. *Input* data berupa data spasial maupun data nonspasial. Proses *input* data memerlukan konversi data digital, digitasi dan konversi data manual. Data dapat diolah, dimodifikasi dan/atau dimanipulasi menjadi informasi dalam wujud data basis yang siap di-*update* setiap saat sesuai skenario model.

Setelah semua data *input* yang diperlukan lengkap, simulasi dilaksanakan. *Hardware* yang digunakan adalah *Personal Computer* Pentium dengan *monitor* VGA, *Harddisk*, *CD drive*, dan *CD writer*. Sistem operasi yang digunakan adalah Windows. *Software* yang digunakan adalah *CD-Oceanography 4.0* untuk plot grafik arus. Data batimetri hasil akuisisi merupakan data DTM (*Digital Terrain Model*) yang terdiri dari posisi horisontal dan vertikal. Data divisualisasikan dalam bentuk peta kontur 2-dimensi. Perangkat lunak yang digunakan untuk membuat kontur batimetri adalah *ArcView GIS 3.3*. Pembuatan model menggunakan perangkat lunak SMS 8.1.

2.3. ANALISIS PERSEBARAN

Apabila merujuk hasil penelitian Lovrencic *et al.* (2005), Orescanin *et al.* (2005) serta Mljak dan Krizman (1996), *fly ash* dan *bottom ash* yang mengalami pelindian ke badan air laut dapat dianggap sebagai padatan tersuspensi di perairan pesisir sehingga analisis persebaran unsur radionuklida alam dalam *fly ash* dan *bottom ash* yang terlindi dapat dianggap sebagai analisis persebaran padatan tersuspensi dalam badan air laut.

Merujuk pada Mellor (1994, 1998), tahap pelaksanaan analisis yang digunakan dalam pemodelan ini adalah:

- a. Menghitung arus yang ditimbulkan oleh pasang surut dan angin dengan menggunakan model dua dimensi horizontal yang dirata-ratakan terhadap kedalaman.
- b. Nilai kecepatan arus yang diperoleh pada butir (a) selanjutnya digunakan untuk menghitung besarnya transpor sedimen baik yang berada di dasar (*bed load*) maupun yang melayang (*suspended load*) dengan menyelesaikan persamaan transpor adveksi/difusi.

Model yang digunakan adalah sirkulasi arus (hidrodinamika) 2-dimensi horizontal, model transpor sedimen *bed load* dan *suspended load*. Model hidrodinamika yang digunakan adalah model POM (*Princeton Ocean Model*) untuk kasus model 2D yang dikembangkan oleh Mellor (1994, 1998). Persamaan-persamaan dasar untuk model 2-dimensi yang digunakan dalam model POM adalah seperti pada Persamaan 2.14 sampai Persamaan 2.16.

Persamaan kontinuitas :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots (2.14)$$

Persamaan gerak dalam arah x dan y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial U}{\partial y} + gH \frac{\partial \xi}{\partial x} + rU \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{H^2} \\ + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = \lambda W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad \dots\dots (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial V}{\partial y} + gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + rV \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{H^2} \\ + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = \lambda W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad \dots\dots (2.16)$$

- x,y : koordinat untuk arah barat-timur (x) dan selatan-utara (y)
u, v : kecepatan arus rerata terhadap kedalaman dalam arah x dan y
U : komponen kecepatan transpor dalam arah-x (m/det)

$$U = \int_{-h}^{\xi} u dz$$

- V : komponen kecepatan transpor dalam arah-y (m/det)

$$V = \int_{-h}^{\xi} v dz$$

- t : waktu (detik)
 ξ : elevasi muka air laut relatif terhadap referensi tertentu (m)
g : kecepatan gravitasi (m/det²)
h : kedalaman sebenarnya = d + ξ (m)
d : kedalaman perairan konstan (m)
r : koefisien gesekan dasar
A : koefisien difusi turbulen horizontal (m²/det)
 λ : koefisien gesekan angin permukaan
W_x, W_y : komponen kecepatan angin pada arah x dan y

Setelah mendapat pola arus berdasarkan model hidrodinamika, langkah selanjutnya adalah menentukan konsentrasi sedimen layang, transpornya dan transpor *bed load*. Konsentrasi sedimen layang dihitung berdasarkan persamaan transpor adveksi-difusi yang dirata-ratakan terhadap kedalaman seperti Persamaan 2.17 sebagai berikut:

$$\frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial HuC}{\partial x} + \frac{\partial HvC}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_t H \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_t H \frac{\partial C}{\partial y} \right) = E - D \quad \dots\dots (2.17)$$

- C : konsentrasi sedimen yang dirata-ratakan terhadap kedalaman
 u,v : komponen kecepatan arah x dan y rerata terhadap kedalaman
 t : waktu (detik)
 ε_t : koefisien difusi dari sedimen
 E : laju erosi, $E = \gamma W_s C_e$
 D : laju deposisi, $D = \gamma W_s C$
 γ : faktor profil, $\gamma = C_{b,e} / C_e$
 H : kedalaman total, $H = h + \xi$
 h : kedalaman dari titik *mean sea level*

Transpor *Suspended Load* disajikan pada Persamaan 2.18:

$$q_{s,x} = \int_a^h \left(uc - \varepsilon_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) dz = uhC - \varepsilon_t h \frac{\partial C}{\partial x}$$

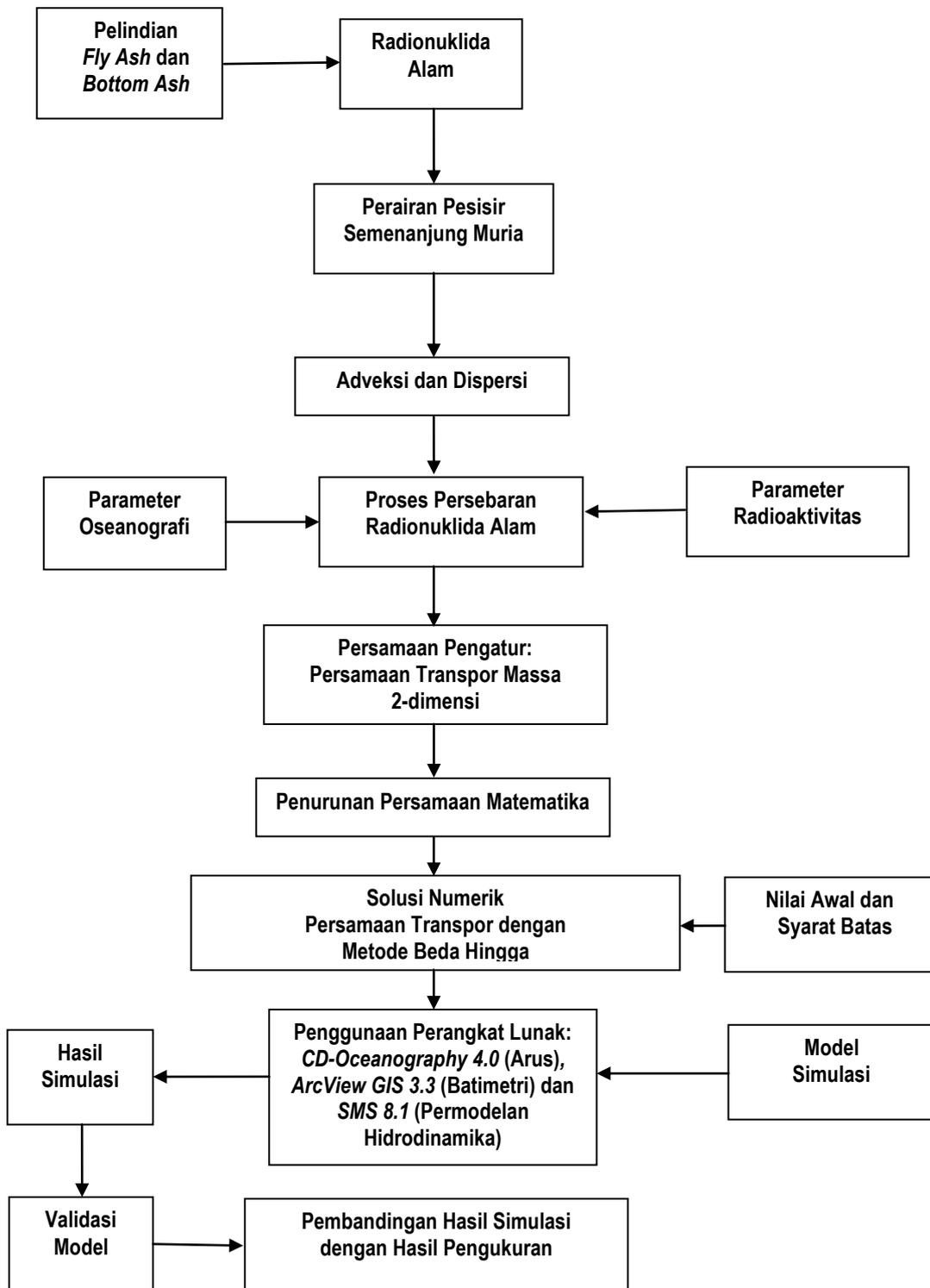
$$q_{s,y} = \int_a^h \left(vc - \varepsilon_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) dz = vhC - \varepsilon_t h \frac{\partial C}{\partial y} \quad \dots\dots (2.18)$$

Transpor *Bed Load* disajikan pada Persamaan 2.19:

$$\bar{q}_b = 0.053(\Delta g)^{0.5} (d_{50})^{1.5} (T^{2.1}/D_*)^{2.1} \quad \dots\dots (2.19)$$

- T : parameter stress *bed-shear*
 D* : parameter besarnya partikel
 Δ : panjang *bed form*

Kerangka konsep permodelan hidrodinamika disajikan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2. Kerangka Konsep Model Hidrodinamika

2.4. RADIOAKTIVITAS

Menurut Susetyo (1988), radioaktivitas adalah proses perubahan inti atom (nuklir) secara spontan yang disertai radiasi berupa zarah-zarah dan/atau gelombang elektromagnetik. Perubahan dalam inti atom membawa perubahan suatu nuklida menjadi nuklida lain. Proses perubahan ini dikenal sebagai desintegrasi inti atau peluruhan radioaktif. Gejala radioaktivitas ini semata-mata ditentukan oleh kondisi inti atom yang bersangkutan, tidak dapat dipengaruhi, dipercepat atau diperlambat dengan mengubah kondisi eksternal seperti suhu dan tekanan. Peristiwa peluruhannya merupakan peristiwa acak murni yang tunduk pada kaidah-kaidah statistik.

Gejala radioaktivitas disebabkan oleh ketidakstabilan inti atom akibat perbandingan nilai N/Z (perbandingan jumlah neutron dan proton pada inti atom) yang lebih besar atau lebih kecil dari suatu nilai $(N/Z)_{\text{stabil}}$ atau nomor atom yang terlalu besar ($Z > 83$). Nilai N/Z suatu inti atom sangat menentukan kestabilan inti tersebut dan menentukan apakah suatu inti bersifat radioaktif atau tidak. Nilai $(N/Z) > (N/Z)_{\text{stabil}}$ akan mengakibatkan peluruhan β^- . Nilai $(N/Z) < (N/Z)_{\text{stabil}}$ akan mengakibatkan peluruhan β^+ atau tangkapan elektron. Inti atom dengan $Z > 83$ akan mengakibatkan peluruhan- α . Pancaran α , β^- , β^+ biasanya disertai gelombang elektromagnetik (sinar- γ).

Menurut Beisser (1987), radioaktivitas adalah pemancaran sinar radioaktif dari unsur-unsur radioaktif sebagai sumber pemancar. Jenis radiasinya antara lain adalah sinar- α , sinar- β , sinar- γ , sinar-X, dan

radiasi neutron. Inti atom yang dapat memancarkan radiasi radioaktif disebut **radionuklida**. Radiasi sinar radioaktif yang berasal dari radionuklida alam disebut radioaktivitas alam sedangkan yang berasal dari radionuklida buatan disebut radioaktivitas buatan.

Menurut Odum (1996), radioekologi adalah sesuatu yang berkaitan dengan senyawa radioaktif, radiasi dan lingkungan hidup. Fokus kajian radioekologi adalah pengaruh radiasi pada ekosistem dan pengendalian penyebaran radioaktivitas yang terlepas ke lingkungan hidup. Radiasi yang dipancarkan senyawa radioaktif memiliki tenaga yang sangat kuat sehingga mampu mengionisasi. Ionisasi ini yang dipercaya sebagai penyebab utama kerusakan pada protoplasma. Jenis radiasi yang penting secara ekologi adalah radiasi jenis korpuskular (zarah- α , zarah- β) dan elektromagnetik (sinar- γ , sinar-X).

Menurut Aarkrog (1989), dua terminologi penting yang berkaitan dengan radiasi lingkungan adalah radiasi internal (sumber radiasi adalah unsur-unsur radioaktif yang bersarang di tubuh manusia) dan radiasi eksternal (sumber radiasi berasal lingkungan di luar tubuh manusia). Jika dilihat dari kemampuan daya tembus sinar radioaktif maka urutan kekuatan daya tembus adalah sinar- γ , sinar- β , dan sinar- α . Jenis radiasi lain adalah sinar neutron, yang tidak bermuatan listrik tetapi ukurannya yang besar dapat menyebabkan rangsangan radioaktivitas dalam material yang tidak radioaktif atau dalam jaringan hidup yang dilewatinya.

Dengan melihat potensi bahaya yang dapat ditimbulkan oleh radiasi radioaktif yang dapat menyebabkan ionisasi, maka sejak tahun 1958 telah diterbitkan serial laporan mengenai sumber, efek dan risiko radiasi pengion oleh *United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 1958-1988). Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency*, IAEA), telah menerbitkan Serial Standar Keselamatan (IAEA *Safety Standards*), *Nuclear Safety Standard* (NUSS), *Radioactive Waste Safety Standards* (RADWASS), dan pembentukan *International Organization for Standardization* (INSAG).

Radioaktivitas alam berasal dari sinar kosmis dan atau dari radionuklida alam (UNSCEAR, 1988). Paparan radiasi alam terbesar berasal dari radionuklida ^{40}K (umur paro $1,28 \times 10^9$ tahun), ^{238}U (umur paro $4,56 \times 10^9$ tahun), deret peluruhan ^{232}U (umur paro $8,8 \times 10^8$ tahun) berkadar 0,714%, deret peluruhan ^{238}U (umur paro $9,56 \times 10^9$ tahun) berkadar 99,238%, dan radionuklida ^{234}U (umur paro $2,48 \times 10^9$ tahun). Umur paro radionuklida alam ini sangat panjang sehingga memiliki laju peluruhan yang sangat rendah.

Menurut Beisser (1987), unsur radioaktif adalah unsur yang tidak stabil dan akan memancarkan sinar radioaktif untuk mencapai kestabilan. Perubahan suatu unsur radioaktif menjadi unsur yang stabil sambil memancarkan sinar radioaktif akan menciptakan deret radioaktif. Di alam ada 4 jenis deret radioaktif yang dicirikan oleh nomor massa nuklida, yaitu deret $4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n+3$. Deret radioaktif

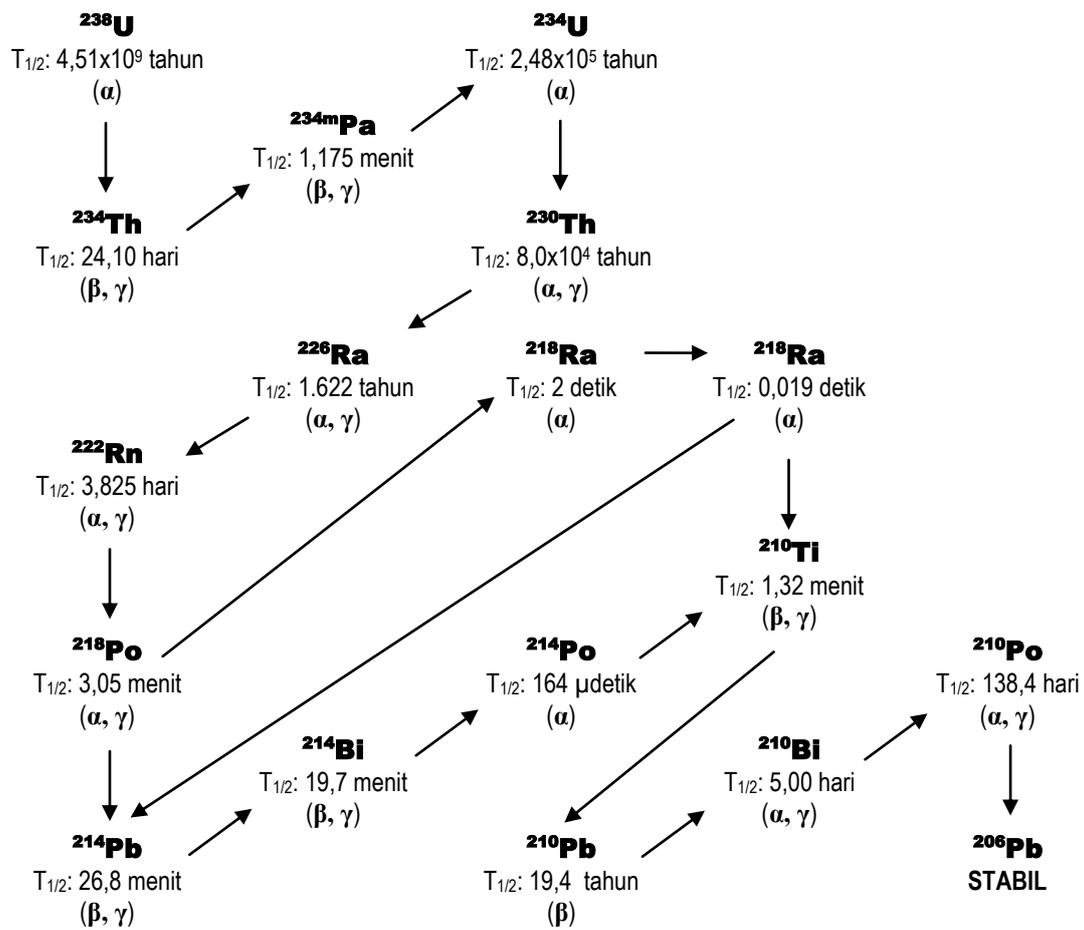
tersebut berawal dari unsur induk, memancarkan sinar radioaktif, menjadi unsur anakan, dan menjadi stabil. Keempat jenis deret radioaktif alam disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Deret Peluruhan Radioaktivitas Alam

Nomor massa	Nama deret	Unsur induk	Umur paro (tahun)	Unsur stabil
4n	Thorium	^{232}Th	$1,39 \times 10^{10}$	^{208}Pb
4n+1	Neptunium	^{237}Np	$2,25 \times 10^{06}$	^{209}Bi
4n+2	Uranium	^{238}U	$4,51 \times 10^{09}$	^{206}Pb
4n+3	Aktinium	^{235}U	$7,07 \times 10^{08}$	^{207}Pb

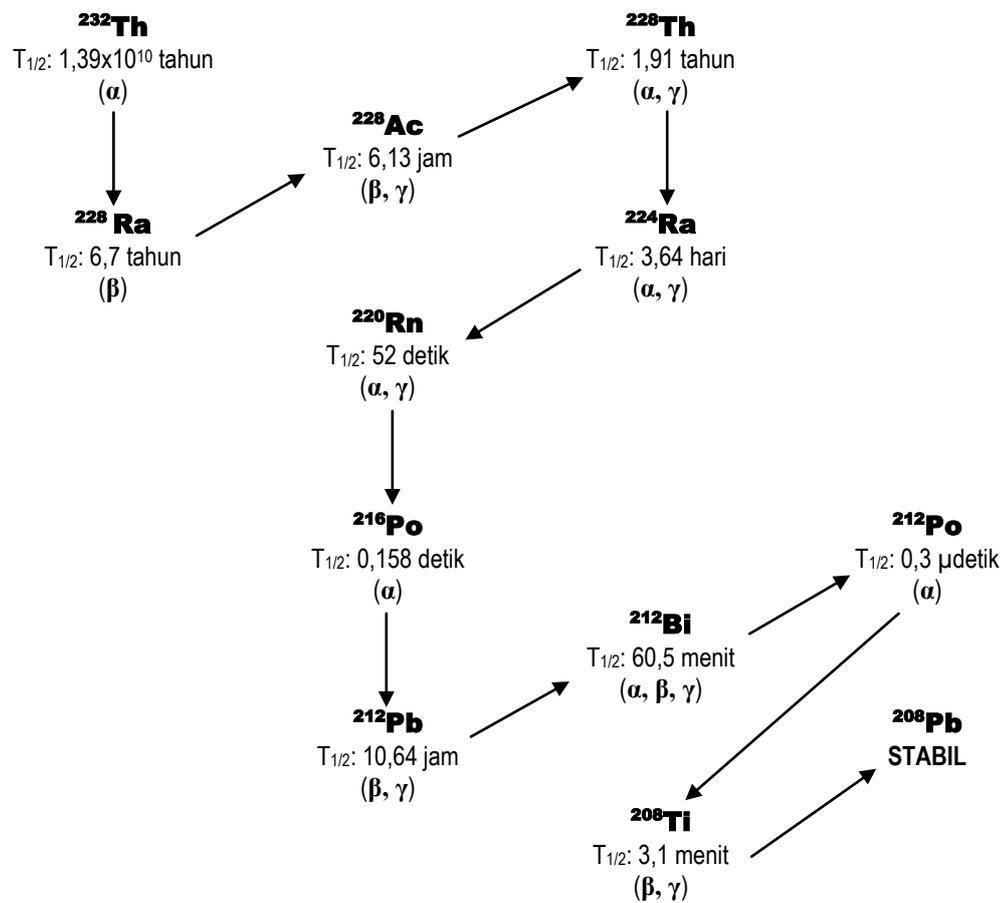
Sumber: Beiser, 1987

Deret Uranium (kelompok radionuklida ^{238}U beserta anak luruhnya) dan Deret Thorium (kelompok radionuklida ^{232}Th beserta anak luruhnya) disajikan pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.4**.



Gambar 2.3. Deret Peluruhan Radionuklida Alam ^{238}U

Sumber: IAEA (1990) dan Cember (1996) dalam Mellawati (2004)



Gambar 2.4. Deret Peluruhan Radionuklida Alam ^{232}Th
 Sumber: IAEA (1990) dan Cember (1996) dalam Mellawati (2004)

2.5. RADIOEKOLOGI KELAUTAN

Menurut Smith (1984), perilaku radionuklida di lingkungan perairan pesisir dapat digambarkan oleh berbagai model. Kondisi fisis yang mempengaruhi persebaran radionuklida di perairan pesisir antara lain adalah suhu, kerapatan, salinitas, pola arus, pola gelombang dan kedalaman air.

Di perairan pesisir, radionuklida akan diencerkan dan tersebar dalam badan air laut dan kemudian berpindah menjadi partikel tersuspensi (*suspended load*) atau terdeposisi ke sedimen dasar (*bed load*) selain ke material biologis. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap konsentrasi radionuklida di perairan pesisir antara lain adalah proses pencampuran, persebaran dan interaksi dengan komponen-komponen di badan air laut (UNSCEAR, 1982).

Menurut Ophel (1977), konsentrasi radionuklida dalam massa air ditentukan oleh faktor persebaran, perpindahan, dan peluruhan radionuklida.

2.6. PELINDIAN *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* KE PERAIRAN PESISIR

Menurut Haynes (2009), PLTU Batubara (*coal-fired power plant*) saat ini merupakan sumber pembangkit energi listrik utama di dunia. Sekitar 70-75% sisa pembakaran batubara berupa *fly ash* dan *bottom ash* sedangkan yang digunakan untuk pemanfaatan lain hanya sekitar 30%. Sisa *fly ash* dan *bottom ash* yang tidak digunakan ditimbun dan diolah di *ash yard*.

Karena lokasi PLTU Batubara biasanya terletak di tepi pantai maka *fly ash* dan *bottom ash* berpotensi untuk mengalami pelindian ke badan air laut sehingga mencemari perairan pesisir.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 18 Tahun 1999 juncto Peraturan Pemerintah Nomor 85 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (PP 18, 1999), *fly ash* dan *bottom ash* yang merupakan limbah dari sumber spesifik PLTU Batubara masuk kategori Limbah B3 (Lampiran II: Kode Limbah D223). Karena masuk kategori Limbah B3 maka tempat penimbunan dan pengolahannya wajib memenuhi peraturan yang tertuang dalam Keputusan Kepala Bapedal Nomor 4 Tahun 1995 tentang Tata Cara Penimbunan Limbah B3 (Kepka Bapedal 4, 1995).

PLTU Tanjungjati B Unit 1 dan Unit 2 yang menggunakan bahan bakar batubara, telah memiliki izin penimbunan limbah B3 (termasuk *fly ash* dan *bottom ash*) dari Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 175 Tahun 2008 (PLTU Tanjungjati B, 2010a). Berdasarkan laporan pelaksanaan RKL-RPL periode Oktober-Desember 2010 (PLTU Tanjungjati B, 2010b) pasokan batubara berasal dari KPC Berau Provinsi Kalimantan Timur dengan kandungan *ash* berkisar 5,1 sampai 5,5%. Dengan perkiraan konsumsi batubara 305 ton/jam/unit maka diperkirakan ada sekitar 1,55 sampai 1,68 ton/jam *ash* yang harus ditampung. Tempat penimbunan sementara kapasitasnya $2 \times 2.500 \text{ m}^3$ untuk 3 hari operasi.

Batubara, yang digunakan sebagai bahan bakar PLTU, merupakan bahan tambang yang berasal dari kerak bumi sehingga mengandung unsur-unsur radionuklida alam seperti ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K (Marinkovic *et al.*, 2010). Menurut Jankowski *et al.* (2005), sekitar 80% limbah padat PLTU berbentuk *fly ash* dan *bottom ash*, yang karakteristiknya bergantung sifat fisika dan kimia batubara, ukuran partikel batubara dan proses pembakaran. Berdasarkan penelitian Marinkovic *et al.* (2010) yang dilakukan di PLTU Nicola Tesla menghasilkan simpulan bahwa selama proses pembakaran, sebagian besar Uranium, Thorium dan unsur-unsur turunannya akan terlepas dari batubara dan terdistribusi antara fase gas dan padat (*ashes*). Selama proses pembakaran, terjadi reduksi volume batubara sekitar 85% yang menyebabkan peningkatan konsentrasi unsur radionuklida alam dalam batubara. Perilaku pelindian *fly ash* dan *bottom ash* serta sifat-sifat radioaktivitasnya berdampak penting terhadap lingkungan hidup. Karena lokasi *ash yard* berdekatan dengan akuifer dan sumber air permukaan maka masalah ekologisnya menjadi kompleks karena pelindian *fly ash* dan *bottom ash* yang mengandung unsur radionuklida alam berdampak terhadap pencemaran badan air penerima. Kontaminan radioaktif yang berhasil diidentifikasi dalam kandungan *fly ash* dan *bottom ash* adalah: ^{238}U , ^{235}U , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th .

Kandungan unsur radionuklida abu batubara dari PLTU Nicola Tesla disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Analisis Spektrometri- γ Abu Batubara

Radionuklida	<i>Fly ash</i> (Bq/kg)	<i>Bottom ash</i> (Bq/kg)
^{238}U	129 ± 36	161 ± 42
^{235}U	10 ± 1	$6,3 \pm 0,8$
^{40}K	396 ± 40	358 ± 36
^{226}Ra	126 ± 13	86 ± 8
^{232}Th	86 ± 9	63 ± 6

Sumber: Marinkovic *et al.*, 2010.

Keterangan: Bq (*becquerel*) adalah satuan aktivitas radionuklida sebesar 1 cacah per detik.

Kajian yang dilakukan Orescanin *et al.* (2005) di Kastel Gomilica, Kroasia, menemukan adanya limbah radioaktif dengan aktivitas tinggi yaitu ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra dalam abu yang dihasilkan dari unit termoelektrik pembakaran batubara. Analisis yang dilakukan Orescanin *et al.* (2005) terhadap sampel *slag* dan *ash* seberat 1 kg yang diambil dari lokasi *sampling* dan dikeringkan sampai suhu 105°C , setelah dicacah dengan detektor semikonduktor HPGe dengan penganalisis salur Canberra 8192, diperoleh spektrum: aktivitas ^{40}K pada puncak energi 1460,75 keV, ^{226}Ra pada puncak energi 609,3 keV, ^{228}Ra pada puncak energi 911,1 keV, ^{235}U pada puncak energi 186 keV. Diperoleh hasil aktivitas ^{232}Th antara $5,0 \pm 1,7$ Bq/kg sampai $28,9 \pm 1,8$ Bq/kg, aktivitas ^{226}Ra antara $83,2 \pm 0,8$ Bq/kg sampai $681,4 \pm 3,7$ Bq/kg, aktivitas ^{238}U antara $178,9 \pm 8,3$ Bq/kg sampai $696,9 \pm 15,3$ Bq/kg.

Uslu dan Gokmese (2010), telah meneliti kandungan radioaktif alam dari 11 PLTU berbahan bakar batubara di Turki. Batubara yang digunakan di Turki pada umumnya dengan kadar kalori rendah (1.000 – 2.000 kkal/kg). **Di dalam batubara:** Kandungan U bervariasi dari 5,9 µg/g di PLTU Kutahya-Seyitomer sampai 82 µg/g di PLTU Mugla-Yatagan. Kandungan Th bervariasi dari 1,3 µg/g di PLTU Sivas-Kangal sampai 30 µg/g di PLTU Manisa-Soma. Kandungan K bervariasi dari 0,2% di PLTU Afsin-Elbistan sampai 1,6% di PLTU Catalagzi. **Di dalam fly ash:** Kandungan U bervariasi dari 12 µg/g di PLTU Kutahya-Seyitomer sampai 129 µg/g di PLTU Mugla-Yatagan. Kandungan Th bervariasi dari 7,5 µg/g di PLTU Sivas-Kangal sampai 43 µg/g di PLTU Manisa-Soma. Kandungan K bervariasi dari 0,5% di PLTU Afsin-Elbistan sampai 3,5% di PLTU Catalagzi. Dari data kandungan radionuklida di dalam batubara dan di dalam *fly ash* terlihat adanya peningkatan konsentrasi yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pembakaran batubara. Aktivitas ^{238}U tercatat 20 Bq/kg (di batubara) dan 200 Bq/kg di *fly ash*. Aktivitas ^{232}Th tercatat 20 Bq/kg (di batubara) dan 70 Bq/kg di *fly ash*. Aktivitas ^{40}K tercatat 50 Bq/kg (di batubara) dan 265 Bq/kg di *fly ash*. Data ini juga memperlihatkan adanya peningkatan radioaktivitas yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pembakaran batubara.

Penelitian Lovrencic *et al.* (2005) tentang karakterisasi radiologi air lindi dari *fly ash* dan *bottom ash* di badan air dan sedimen berhasil mendeteksi ^{226}Ra dan ^{238}U dan mendapati bahwa 37% total U terlindi

dari *ash* oleh air laut. Penelitian dilakukan di Teluk Kastela (Laut Adriatik). Penelitian bertujuan untuk memahami perilaku pelindian *fly ash* dan *bottom ash* di air laut dan sedimen Teluk Kastela, Kroasia.

2.7. PENCACAHAN RADIOAKTIF

Penelitian Sasongko (1997a; 1997b) tentang radioaktivitas perairan dan identifikasi radionuklida alam di perairan Semarang dengan teknik spektrometri- γ berhasil mengidentifikasi unsur $^{212,214}\text{Pb}$ dalam sampel sedimen dengan kandungan $1,8 \times 10^{-16}\%$ berat kering dan dalam sampel zoobentos dengan kandungan $0,87 \times 10^{-16}\%$ berat kering. Unsur $^{212,214}\text{Pb}$ yang teridentifikasi adalah radionuklida alam dari deret peluruhan alam ^{238}U . Metoda yang diadopsi ternyata berhasil mengukur kandungan radionuklida yang sangat rendah (10^{-16} persen berat kering atau 10^{-12} mg/kg berat kering).

Menurut Taftazani *et al.* (1996) sampel (air laut/sedimen) yang mengandung unsur radioaktif dapat memancarkan sinar- γ dan dapat dianalisis secara spektrometri- γ untuk menentukan spektrum tenaga karakteristiknya agar dapat diidentifikasi dan dihitung aktivitas unsur radioaktivitasnya.

Menurut Susetyo (1988), sinar- γ yang dipancarkan berbagai unsur radioaktif dalam sampel dapat dianalisis secara spektrometri- γ . Analisis kualitatif dilakukan menggunakan "kalibrasi tenaga" untuk identifikasi unsur radioaktif dan analisis secara kuantitatif menggunakan "kalibrasi efisiensi" untuk menentukan aktivitas unsur radioaktif dalam sampel.

Sampel dari lingkungan perairan pesisir yang dapat dianalisis secara spektrometri- γ bisa berupa air laut dan/atau sedimen. Setelah sampel terkumpul diperlukan preparasi khusus karena menurut Nareh dan Sutarman (1993) pengukuran tingkat radioaktivitas pada sampel lingkungan memerlukan alat dan teknik ukur yang khusus karena aktivitasnya sangat rendah, cacahnya mendekati cacah latar sehingga sering menimbulkan kesulitan dalam interpretasi data.

Menurut Kessler (1989), beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan dalam pengukuran aktivitas tingkat rendah adalah *laju cacah latar*, *efisiensi detektor*, *Figure of Merit (FOM)* dan *batas deteksi terendah*. Alat yang digunakan harus mempunyai laju cacah latar sangat rendah, efisiensi pencacahan sangat tinggi, dan gangguan latar serendah mungkin. Pencacahan- γ dilakukan menggunakan detektor koaksial semikonduktor Ge(Li) atau HP-Ge, dilengkapi *stabilizer*, catu daya, penguat spektroskopi, catu daya tegangan tinggi, penganalisis banyak salur (*multi channel analyzer*, MCA) dan rumah timbal sebagai pelindung radiasi luar.

Kestabilan alat ukur diuji secara statistik memakai metoda *chi-kuadrat* dengan menguji hasil pencacahan sumber radioaktif standar secara berulang-ulang dalam kondisi peralatan yang sama. Persamaan yang digunakan adalah Persamaan 2.20 (Susetyo, 1988):

$$\chi^2 = (1/X) \sum^n (X_i - X)^2 \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

X_i = hasil cacah ke- i , dan X = cacah rerata.

Hasil perhitungan χ^2 kemudian dibandingkan dengan distribusi kebolehjadian χ^2 . Hasil uji alat dianggap stabil jika χ^2 hasil perhitungan lebih besar atau sama dengan nilai χ^2 pada taraf signifikansi 95%.

Cacah latar dari radionuklida alam yang ada di dalam bahan detektor, bahan penahan radiasi, bahan wadah sampel, bahan sekitar dan sinar kosmis digunakan untuk mendapatkan cacah terkoreksi. Penurunan cacah latar diperlukan untuk memperbesar FOM.

Efisiensi pencacahan- γ dihitung menggunakan kurva kalibrasi tenaga dari sumber standar multi- γ ^{152}Eu yakni mencari hubungan antara tenaga dan nomor salur dengan cara mencacah sumber standar yang sudah diketahui tenaganya kemudian dibuat plot tenaga sinar- γ standar versus nomor salur puncak serapan total untuk masing-masing tenaga. Hubungan tenaga versus nomor salur tersebut bersifat linier dan untuk pengolahan data digunakan metoda regresi linier. Persamaan yang digunakan adalah Persamaan 2.22 (Susetyo, 1988):

$$Y = aX + b \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\begin{aligned} Y &= \text{tenaga sinar-}\gamma \text{ (keV)} \\ X &= \text{nomor salur} \\ a &= [(\sum X_i Y_i) - (1/n)(\sum X_i)(\sum Y_i)] / [(\sum X_i^2) - (1/n)(\sum X_i)^2] \\ b &= (1/n)(\sum Y_i) - a(1/n)(\sum X_i) \end{aligned}$$

Karena pengukuran dilakukan secara spektrometri (hanya ditujukan pada salah satu tenaga dari sekian banyak tenaga dan moda peluruhan yang ada dalam sampel) maka efisiensi pencacahan masih ditentukan oleh nilai *yield* (intensitas mutlak) melalui Persamaan 2.22 (Susetyo, 1988):

$$E = (C_s/A_{st} \cdot Y) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

- C_{st} = laju cacah standar/net (cps)
 A_{st} = laju peluruhan sumber standar ^{152}Eu (dps) = $A_0 \exp(-0,693t/t_{1/2})$
 A_0 = aktivitas awal
 t = waktu luruh sumber standar sampai saat pengukuran
 $t_{1/2}$ = waktu paro sumber (432,6 tahun)
 Y = kelimpahan tenaga sinar- γ (< 1)

Analisis spektrometri- γ untuk identifikasi unsur dilakukan secara kualitatif melalui tenaga sinar- γ yang dipancarkan unsur radioaktif dalam sampel. Tenaga sinar- γ ini sangat karakteristik untuk setiap radionuklida. Tenaga sinar- γ sampel yang dihitung memakai Persamaan 2.22 kemudian dicocokkan dengan *Buku Tabel Isotop* yang disusun oleh Erdtmann (1976) dan Erdtmann dan Soyka (1979), untuk menentukan radioisotop yang terdapat dalam sampel. Setelah nilai efisiensi diperoleh untuk setiap nomor salur (tenaga) maka data diolah dengan cara regresi linier seperti pada Persamaan 2.23 (Susetyo, 1988):

$$Y = aX + b \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

- Y = $\ln \varepsilon(E)$; $\varepsilon(E)$ = efisiensi fungsi tenaga
 X = $\ln(E)$; E = tenaga
 a = $[(\sum X_i Y_i) - (1/n)(\sum X_i)(\sum Y_i)] / [(\sum X_i^2) - (1/n)(\sum X_i)^2]$
 b = $(1/n)(\sum Y_i) - a(1/n)(\sum X_i)$

Dari Persamaan (2.23) diperoleh:

- (1) Efisiensi: $\varepsilon(E) = \ln^{-1}(Y)$
- (2) Aktivitas- γ dalam sampel: $A = (\text{cps}) / Y(E) \cdot \varepsilon(E)$
- (3) Berat unsur dalam sampel: $W = N M / 6,02 \times 10^{23}$
 dengan $N = AT / \ln 2$ = jumlah atom; T = umur paro; M = berat atom

Besaran yang digunakan untuk menilai kinerja alat ukur adalah FOM, memakai Persamaan 2.24 (Kessler, 1989):

$$\mathbf{FOM = E^2/B} \quad \dots\dots (2.24)$$

E = efisiensi pencacahan (%), dan B = laju cacah latar (cpm).

Batas deteksi terendah (*low level detection* = LLD) merupakan besaran yang dipakai untuk menilai kemampuan sistem pengukuran. Aktivitas terendah yang dapat dideteksi dengan tingkat signifikansi 95% menggunakan Persamaan 2.25 (Kessler, 1989):

$$\mathbf{LLD = (4,66 S_d)/(E.Y)} \quad \dots\dots (2.25)$$

LLD = batas deteksi terendah (dpm)
 S_d = standar deviasi (cpm) = $\sqrt{c_b/t_b}$
 c_b = laju cacah latar (cpm)
 t_b = waktu cacah latar (menit)
 E = efisiensi (%)
 Y = kelimpahan energi (< 1)

Pada pengukuran radioaktivitas lingkungan biasanya digunakan besaran konsentrasi dalam satuan Bq/l atau Bq/kg sehingga LLD sering diasosiasikan dengan "konsentrasi terendah yang dapat dideteksi" (*minimum detectable concentration*/MDC), yang modelnya disajikan oleh Persamaan 2.26 (Kessler, 1989):

$$\mathbf{MDC = (4,66 S_d)/(E.Y.W)} \quad \dots\dots (2.26)$$

MDC = konsentrasi terendah yang terdeteksi (Bq/l atau Bq/gr atau Bq/m²)
 S_d = standar deviasi (cpm) = $\sqrt{c_b/t_b}$
 c_b = laju cacah latar (cpm)
 t_b = waktu cacah latar (menit)
 E = efisiensi (%)
 Y = tenaga (< 1)
 W = berat atau volume atau luas sampel.

BAB III

MATERI DAN METODE

3.1. WAKTU DAN LOKASI

Penelitian dilakukan sejak tahun 2006 untuk survai oseanografi: pengumpulan data primer batimetri, arus, gelombang dan pasang surut (28 Mei 2006 sampai 13 Juni 2006). Data sekunder pasang surut dikumpulkan dari stasiun pasang surut LPWP Undip (periode 1 Januari 2011 sampai 30 April 2011). Data sekunder angin dikumpulkan dari Stasiun Meteorologi Semarang (periode tahun 2000 sampai tahun 2010). Rincian pengumpulan data adalah sebagai berikut:

- a) Pengukuran arus dan gelombang dilakukan 29 Mei 2006 sampai 1 Juni 2006, lokasi di perairan pesisir Desa Tubanan dan Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, pada koordinat $110^{\circ} 44' 39.94''$ BT dan $6^{\circ} 24' 54.49''$ LS, pada kedalaman antara 11-12 meter.
- b) Pengukuran pasang surut dilakukan 29 Mei 2006 sampai 13 Juni 2006, lokasi di TPI Beringin pada koordinat $110^{\circ}49'54.4''$ BT dan $6^{\circ}26'11.0''$ LS.
- c) Pengukuran batimetri dilakukan 29 Mei 2006 sampai 2 Juni 2006.
- d) Pengumpulan data sekunder pasang surut periode 1 Januari 2011 sampai 30 April 2011 (data 4 bulan).
- e) Pengumpulan data sekunder angin periode tahun 2000 sampai tahun 2010 (data 10 tahun).

Pemutakhiran data oseanografi dilakukan pada 27-29 April 2011 menggunakan teknologi *Acoustic Doppler Current Meter Profiler* (ADCP) *Sontek Argonaut-XR Extended Range* untuk pengumpulan data gelombang dan arus bawah permukaan selama 2x24 jam.

Pengambilan sampel air dan sedimen perairan pesisir dilakukan tanggal 22 April 2011 untuk enam lokasi perairan di sekitar *jetty* PLTU Tanjungjati B yang masuk Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, dan tanggal 23 April 2011 untuk 10 lokasi perairan di sekitar Ujung Lemahabang yang masuk Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara.

Preparasi sampel air laut dan sedimen dilakukan pada bulan Mei 2011 sampai Juli 2011. Pencacahan unsur radionuklida alam dilakukan bulan Agustus 2011 sampai September 2011 sedangkan verifikasi dan kompilasi data dilakukan pada bulan Oktober 2011. Terhitung sejak penyerahan sampel pertama tanggal 25 April 2011, data hasil analisis terakhir bisa terselesaikan dan dikirim pada 12 November 2011.

Lokasi pengambilan sampel disajikan pada Tabel 3.1, Tabel 3.2 dan **Gambar 3.1**.

Tabel 3.1.
Lokasi Pengambilan Sampel Air Laut dan Sedimen
Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara

No.	Sandi Lokasi	Sandi Sampel	Jenis Sampel	Koordinat		Kedalaman (m)
				S / LS	E / BT	
1.	TJB-01	TJB-01-A	Air laut	0470150	0470150	7,5
		TJB-01-S	Sedimen	6° 26' 27.67"	110° 43' 48.19"	
2.	TJB-02	TJB-02-A	Air laut	0469600	9289014	15,5
		TJB-02-S	Sedimen	6° 25' 55.81"	110° 43' 30.31"	
3.	TJB-03	TJB-03-A	Air laut	0471211	9288476	7,5
		TJB-03-S	Sedimen	6° 26' 13.36"	110° 44' 22.74"	
4.	TJB-04	TJB-04-A	Air laut	0471304	9288145	6,0
		TJB-04-S	Sedimen	6° 26' 24.14"	110° 44' 25.77"	
5.	TJB-05	TJB-05-A	Air laut	0471642	9287928	6,0
		TJB-05-S	Sedimen	6° 26' 31.21"	110° 44' 36.77"	
6.	TJB-06	TJB-06-A	Air laut	0472427	9288068	4,0
		TJB-06-S	Sedimen	6° 26' 26.66"	110° 45' 2.33"	

Tabel 3.2.
Lokasi Pengambilan Sampel Air Laut dan Sedimen Dasar
Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara

No.	Sandi Lokasi	Sandi Sampel	Jenis Sampel	Koordinat		Kedalaman Perairan (m)
				S / LS	E / BT	
1.	LBA-01	LBA-01-A	Air laut	0471738	9290898	15,0
		LBA-01-S	Sedimen	6° 24' 54.49"	110° 44' 39.94"	
2.	LBA-02	LBA-02-A	Air laut	0471483	9289844	12,0
		LBA-02-S	Sedimen	6° 25' 28.81"	110° 44' 31.62"	
3.	LBA-03	LBA-03-A	Air laut	0472049	9288666	7,5
		LBA-03-S	Sedimen	6° 26' 7.18"	110° 44' 50.03"	
4.	LBA-04	LBA-04-A	Air laut	0473529	9290568	11,0
		LBA-04-S	Sedimen	6° 25' 5.26"	110° 45' 38.24"	
5.	LBA-05	LBA-05-A	Air laut	0475151	9290460	10,0
		LBA-05-S	Sedimen	6° 25' 8.81"	110° 46' 31.04"	
6.	LBA-06	LBA-06-A	Air laut	0473769	9288266	1,0
		LBA-06-S	Sedimen	6° 26' 20.23"	110° 45' 46.02"	
7.	LBA-07	LBA-07-A	Air laut	0475283	9291478	12,0
		LBA-07-S	Sedimen	6° 24' 35.66"	110° 46' 35.35"	
8.	LBA-08	LBA-08-A	Air laut	0476525	9291342	11,0
		LBA-08-S	Sedimen	6° 24' 40.10"	110° 47' 15.78"	
9.	LBA-09	LBA-09-A	Air laut	0476933	9290436	9,0
		LBA-09-S	Sedimen	6° 25' 9.61"	110° 47' 29.05"	
10.	LBA-10	LBA-10-A	Air laut	0477176	9289886	6,0
		LBA-10-S	Sedimen	6° 25' 25.73"	110° 47' 36.96"	

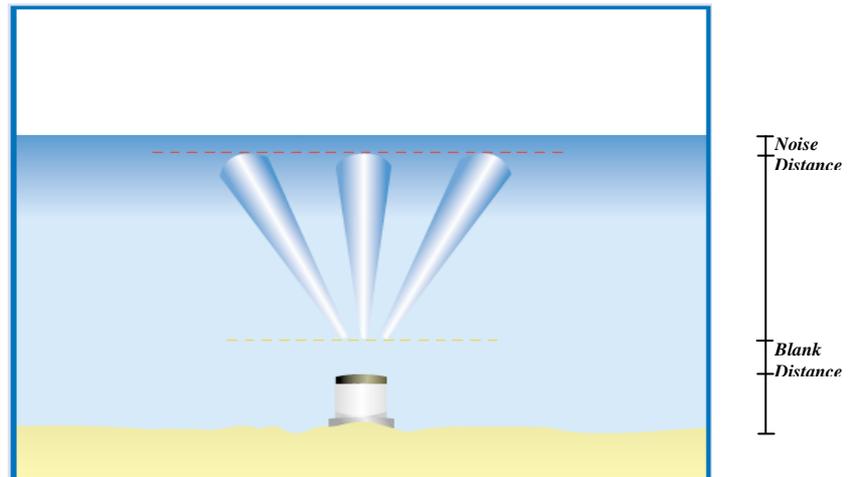
3.2. PENGUMPULAN DATA OSEANOGRAFI

3.2.1. Pengumpulan Data Gelombang dan Arus

Pengambilan data gelombang dan arus dilakukan bersamaan menggunakan metoda *Euler* (Emery dan Thomson, 2001). Pengukuran arus dan gelombang pertama kali dilakukan tanggal 29 Mei 2006 sampai 1 Juni 2006 kemudian dilakukan pemutakhiran data melalui pengukuran tanggal 27 – 29 April 2011. Pengambilan data menggunakan teknologi *Acoustic Doppler Current Meter Profiler (ADCP) Sontek Argonaut-XR Extended Range* (lihat **Gambar 3.2** dan **Gambar 3.3**).

Cara kerja alat menurut *Manual ADCP Sontek Argonaut-XR Extended Range* adalah berdasarkan prinsip efek Doppler. Bunyi yang dipancarkan pada frekuensi tertentu melalui sebuah *transducer* akan menerima kembali pantulan bunyi setelah melewati pemantul (*scatterers*) dalam air laut. Pemantul bunyi dalam air tersebut adalah plankton atau partikel kecil yang merefleksikan kembali bunyi ke alat. Dari sinyal yang diterima kembali dapat diketahui data kecepatan arus 3 dimensi (utara selatan, timur barat, vertikal), tinggi gelombang (H) dan periode gelombang (T). Karena pemantul bunyi tersebut digerakkan oleh aliran air, pada kecepatan yang sama ada jarak sebagai akibat efek Doppler di mana dianggap mewakili kecepatan arus ADCP memiliki kemampuan mengukur profil arus perairan pada kolom air. Peralatan diletakan di dasar laut dengan diberi tatakan rangka *stainles steel* agar tidak terbenam ke dalam lumpur serta diikat pada perahu yang buang jangkar di tempat yang telah ditetapkan.

Peralatan akan merekam arus dan gelombang secara otomatis dengan selang waktu perekaman 10 menit untuk arah sumbu x (timur-barat/E), y (utara-selatan/N), dan z (atas-bawah/U).



Gambar 3.2. Perekaman Data Kecepatan dan Arah Arus Menggunakan ADCP



Gambar 3.3. Alat Pencatat Data Arus dan Gelombang ADCP

3.2.2. Pengumpulan Data Pasang Surut

Pengamatan pasang surut dilakukan langsung di lapangan. Alat yang digunakan berupa rambu pasut berskala yang berimpit dengan permukaan air secara terus menerus pada selang waktu tertentu (Ilahude, 1999). Pengukuran pasang surut dilakukan tanggal 29 Mei 2006 sampai 13 Juni 2006 (selama 16 hari dengan interval waktu 30 menit), lokasi di TPI Beringin. Pengumpulan data sekunder pasang surut dilakukan di Stasiun Pasang Surut LPWP Undip Pantai Kartini Jepara untuk periode 1 Januari 2011 sampai 30 April 2011 (data 4 bulan).

Pengukuran langsung tahun 2006 digunakan sebagai acuan dalam koreksi hasil *sounding* terhadap pasang surut pada pemetaan batimetri. Penggunaan data sekunder periode 4 bulan (1 Januari 2011 – 30 April 2011) digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta harmonik pembentuk pasang surut (dengan metode *Admiralty*) sehingga dapat diketahui tipe pasang surut Perairan Pesisir Semenanjung Muria.

3.2.3. Pengumpulan Data Batimetri

Pengukuran batimetri dilakukan 29 Mei 2006 sampai 2 Juni 2006 untuk memetakan kedalaman perairan pesisir Semenanjung Muria di Desa Tubanan dan Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, sehingga dapat dijadikan acuan dalam analisis deformasi gelombang. Metode yang digunakan dalam survai batimetri untuk kegiatan ini adalah survai menggunakan alat penentu GPS (*Global Positioning System*) dan perekam kedalaman *Echosounder*.

Konfigurasi peralatan di *sounding boat* dan prinsip dasar pengukurannya adalah sebagai berikut.

1. Konfigurasi Peralatan di *Sounding Boat*

Pada prinsipnya peralatan terbagi dalam 3 besar, yaitu :

- a. *Echosounder*, alat pengukur kedalaman dasar laut terhadap permukaan air saat itu. Peralatan ini mempunyai luaran data digital dalam bentuk ASCII serial.
- b. *GPS Receiver*, alat untuk menentukan posisi suatu titik.
- c. Komputer, peralatan ini digunakan untuk menggabungkan data yang berasal dari *echosounder* dan GPS.

2. Prinsip Dasar Pengukuran

- a. Perencanaan

Rencana survai yang dibuat yaitu pembuatan jadwal kegiatan, penentuan *base-camp*, penentuan jalur *sounding*. Penentuan jalur *sounding*, memperhatikan interval jalur yang terkait dengan skala peta, kedalaman rerata, lokasi peruntukan sehingga kerapatan jalur *sounding* sangat diperhatikan.

- b. Pemasangan Stasiun Pasut

Untuk mendapatkan nilai koreksi dari kedalaman terukur terhadap datum vertikal maka dilakukan pengamatan tinggi permukaan laut selama survai berlangsung. Dari data ini dapat diketahui datum vertikal relatif terhadap titik referensi darat. Pengamatan pasang surut dilakukan 29 Mei 2006 sampai 13 Juni 2006 selama 16 hari dengan interval waktu pengamatan setiap 30 menit. Stasiun pasut

dibuat menggunakan alat sederhana yaitu rambu ukur sepanjang 3 meter yang diletakkan secara tegak. Titik nol rambu berada di bawah permukaan air laut tersurut di titik itu. Datum vertikal diturunkan dari perhitungan konstanta harmonik yang diperoleh dari hasil pengamatan pasut. Metode hitungan menggunakan metode *admiralty*.

c. Instalasi Peralatan di Kapal Survai (*Sounding boat*)

Peralatan yang dipasang di kapal meliputi GPS *receiver*, *echosounder*, *transducer*, dan komputer. Penentuan ukuran kapal survai ditentukan berdasarkan kebutuhan, di antaranya besarnya *transducer* yang akan digunakan, kecepatan kapal, dan ruangan yang cukup untuk menaruh beberapa peralatan seperti komputer dan *echosounder*.

d. Akuisisi Data

Setelah semua peralatan terpasang dengan baik dan dapat berfungsi, maka akuisisi data batimetri dimulai. Data batimetri meliputi kedalaman, waktu, posisi, dan suhu.

3.3. PENGOLAHAN DATA OSEANOGRAFI

3.3.1. Pengolahan Data Gelombang dan Angin

Menurut Triatmodjo (1999), data hasil pengamatan gelombang dianalisis dengan metode penentuan gelombang representatif menggunakan Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2 sebagai berikut:

$$H_s = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \quad \dots\dots (3.1)$$

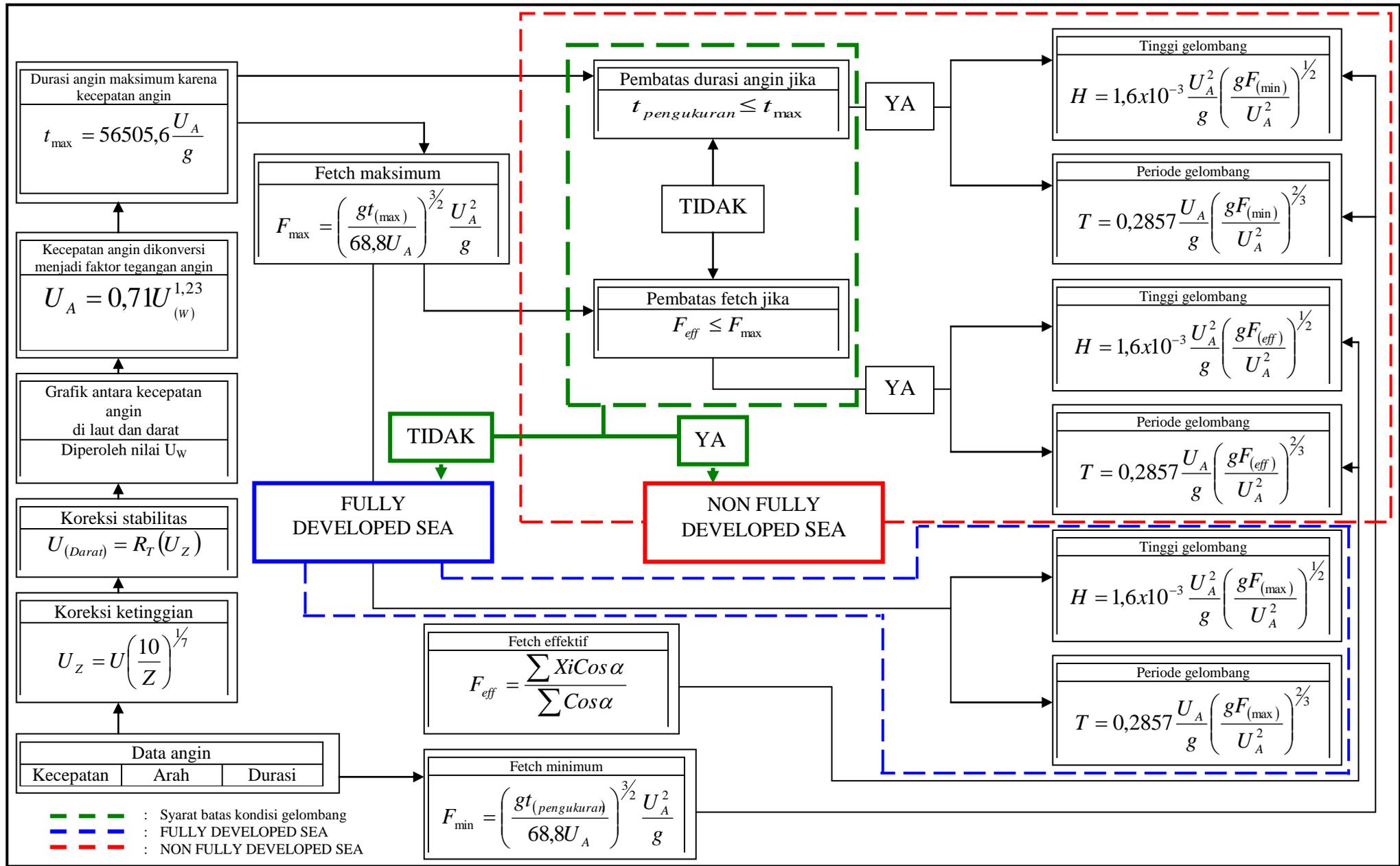
$$T_s = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} \quad \dots\dots (3.2)$$

$n = 33,3\% \times$ jumlah data.

Nilai H_s dihitung dari 33,3% kejadian tinggi gelombang tertinggi, nilai T_s dihitung dari 33,3% kejadian periode gelombang besar.

Untuk mendapatkan data angin dalam kurun waktu yang lebih lama, dilakukan perhitungan konversi gelombang berdasarkan data angin dengan metode SMB (*Sverdrup-Munk-Bretschneider*) (lihat **Gambar 3.4**). Data angin yang diperoleh diolah untuk mengetahui *fetch* perairan pesisir. Asumsi yang digunakan untuk mencari *fetch* efektif dengan metode SMB adalah:

- a. Angin berhembus melalui permukaan air melalui lintasan yang berupa garis tegak lurus.
- b. Angin berhembus dengan mentransfer energinya dalam arah gerakan angin menyebar dalam radius 42° terhadap sisi kiri dan kanan arah angin dominan.
- c. Angin mentansfer satu unit energi pada air dalam arah pergerakan angin dan ditambah satu satuan energi yang ditentukan oleh harga cosinus sudut antara jari-jari terhadap arah angin.
- d. Gelombang diabsorpsi secara sempurna di pantai.



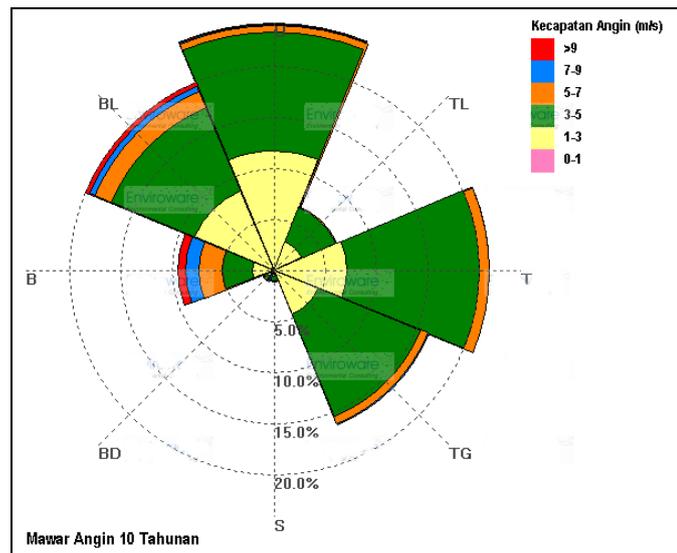
Gambar 3.4. Diagram Alir Konversi Gelombang dari Data Angin dengan Metode Sverdrup-Munk-Bretschneider (Sumber: CERC, 1984) 60

Langkah untuk menentukan panjang *fetch* efektif adalah:

- a. Menentukan arah angin dominan berdasarkan mawar angin tiap interval waktu yang diinginkan.
- b. Menggambar kipas *fetch* dengan *base point* perairan dengan bantuan *software* AutoCad. Kipas terdiri dari 15 jari-jari dengan selang sudut di antaranya sebesar 6° .
- c. Menghitung panjang jari-jari dari titik *base point* sampai titik di mana masing-masing jari-jari memotong daratan untuk pertama kalinya ($=X_i$).
- d. Menghitung cosinus sudut masing-masing jari-jari terhadap sumbu utama ($\cos \alpha_1$).
- e. Menghitung panjang *fetch* efektif menggunakan Persamaan 3.3 (Triatmodjo, 1996) :

$$F_{efektif} = \frac{\sum X_1 \cos \alpha_1}{\sum \cos \alpha_1} \dots\dots (3.3)$$

Data angin yang digunakan adalah data sekunder dari Stasiun Meteorologi Semarang selama 10 tahun (2000-2010). Data angin dikelompokkan berdasar arah datang angin dan skala kecepatan angin, setelah itu data diolah dalam bentuk diagram mawar angin (*wind rose*). Penyajian diberikan dalam bentuk tahunan dan contohnya disajikan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5. Contoh Mawar Angin

3.3.2. Pengolahan Data Arus

Dari pengukuran data lapangan diperoleh besar dan arah arus total. Besar dan arah arus ini diuraikan komponennya menjadi komponen U (timur-barat) dan V (utara-selatan). Berdasarkan Manual *CD-Oceanography 4.0*, besar komponen U diperoleh dari Persamaan 3.4:

$$U = V_{Total} \sin \left(\frac{Dir \pi}{180} \right) \quad \dots\dots (3.4)$$

Besar komponen V didapat dari Persamaan 3.5:

$$V = V_{Total} \cos \left(\frac{Dir \pi}{180} \right) \quad \dots\dots (3.5)$$

dengan π adalah 3,14 dan *Dir* merupakan arah arus (dalam derajat). Hasil perhitungan komponen U dan V ini kemudian di plot ke dalam grafik. Perangkat lunak yang digunakan dalam plot grafik adalah *CD-Oceanography 4.0*. Contoh grafik vektor arus disajikan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6. Contoh Grafik Vektor Arus

3.3.3. Pengolahan Data Pasang Surut

Menurut Karmadibrata (1985), pasang surut merupakan gerakan naik turunnya muka air laut secara bersamaan yang disebabkan oleh gaya tarik matahari dan bulan. Letak matahari, bumi, dan bulan yang selalu berubah setiap saat menyebabkan keadaan pasang surut di bumi juga akan selalu berubah. Perubahan kedudukan tersebut berlangsung secara teratur dan memberikan efek perubahan pasang surut secara harmonik yang masing-masing dapat dinyatakan dalam suatu bilangan komponen harmonik. Komponen harmonik pasang adalah komponen yang menyebabkan terjadinya pasang di laut. Karena sifatnya yang harmonik terhadap waktu maka komponen tersebut dinamakan konstanta harmonik. Hal ini sesuai dengan gaya penyebabnya yang periodik pula. Adapun komponen-komponen tersebut adalah M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1 , M_4 , MS_4 .

Menurut Karmadibrata (1985), komponen-komponen pasang dibagi menjadi komponen utama dan bukan utama. Komponen utama adalah sebagai akibat gaya tarik bulan dan matahari. Sedang komponen bukan utama adalah sebagai akibat dari faktor non astronomis, seperti penguapan, tekanan atmosfer, curah hujan dan pengaruh arus laut. Untuk mengetahui konstanta harmonik tersebut, maka dilakukan analisis terhadap data pasang surut yang telah diperoleh dengan menggunakan *Metode Admiralty*. Hasil analisis tersebut disajikan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Format Tabel Hasil Analisis dengan Metoda *Admiralty*

	S₀	M₂	S₂	N₂	K₂	K₁	O₁	P₁	M₄	MS₄
A										
g°										

- S₀ : *Mean Sea Level* yang sudah terkoreksi
 M₂ : Pasut semi diurnal yang dipengaruhi oleh bulan
 S₂ : Pasut semi diurnal yang dipengaruhi oleh gaya tarik matahari
 N₂ : Pasut semi diurnal (pengaruh perubahan jarak akibat lintasan bulan elips).
 K₁ : Pasut diurnal yang dipengaruhi perubahan deklinasi bulan dan matahari
 O₁ : Pasut diurnal yang dipengaruhi perubahan deklinasi bulan
 M₄ : Kecepatan sudutnya dua kali M₂ dan termasuk kelompok perairan dangkal.
 MS₄ : Hasil interaksi S₂ dan M₂ dimana kecepatan sudutnya sama dengan sudut S₂ dan M₂ dan termasuk kelompok perairan dangkal.
 K₂ : Dipengaruhi oleh perubahan jarak revolusi bumi terhadap matahari.
 P₁ : Pasut diurnal yang dipengaruhi oleh perubahan deklinasi matahari
 A : Amplitudo
 g° : Beda fase

Menurut Lizitsin (1974) sifat pasang di perairan dapat ditentukan dengan Persamaan Formzahl dalam bentuk Persamaan 3.6:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad \dots\dots (3.6)$$

Keterangan :

F adalah konstanta pasang harian utama

K_1 dan O_1 adalah konstanta pasang harian utama

M_2 dan S_2 adalah konstanta pasang ganda utama

Dari rumus tersebut sifat pasang dibagi menjadi :

1. Pasang ganda : $F \leq 0.25$
2. Pasang campuran (dominasi ganda) : $0.25 < F \leq 1.5$
3. Pasang campuran (dominasi tunggal) : $1.5 < F \leq 3$
4. Pasang tunggal : $F > 3$

Data pasang surut diolah dengan metode *admiralty* untuk mendapatkan konstanta pasut dan nilai rata-rata elevasi muka air laut.

Langkah-langkah (dikenal dengan istilah skema) dalam metode *admiralty* disajikan pada **Gambar 3.7**. Uraian masing-masing skema (dimodifikasi dari Hidayat, 2010) adalah sebagai berikut:

1. Skema-1

Data pengamatan yang akan dihitung disusun menurut waktu pertengahan pengamatan dan standar waktu yang ditentukan terhadap GMT, lalu ditentukan bacaan tertinggi dan bacaan terendah. Bacaan tertinggi menunjukkan kedudukan air terendah.

2. Skema-2

Untuk setiap hari pengamatan, ditentukan bacaan positif (+) dan negatif (-) untuk $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_4,$ dan Y_4 . Besaran positif (+) dan (-) dari suatu konstanta pada saat tertentu diperoleh dengan mengalikan besaran untuk konstanta tersebut dengan pengamatan pada saat atau tanggal tersebut. Untuk kontrol hitungan, dijumlahkan nilai positif (+)

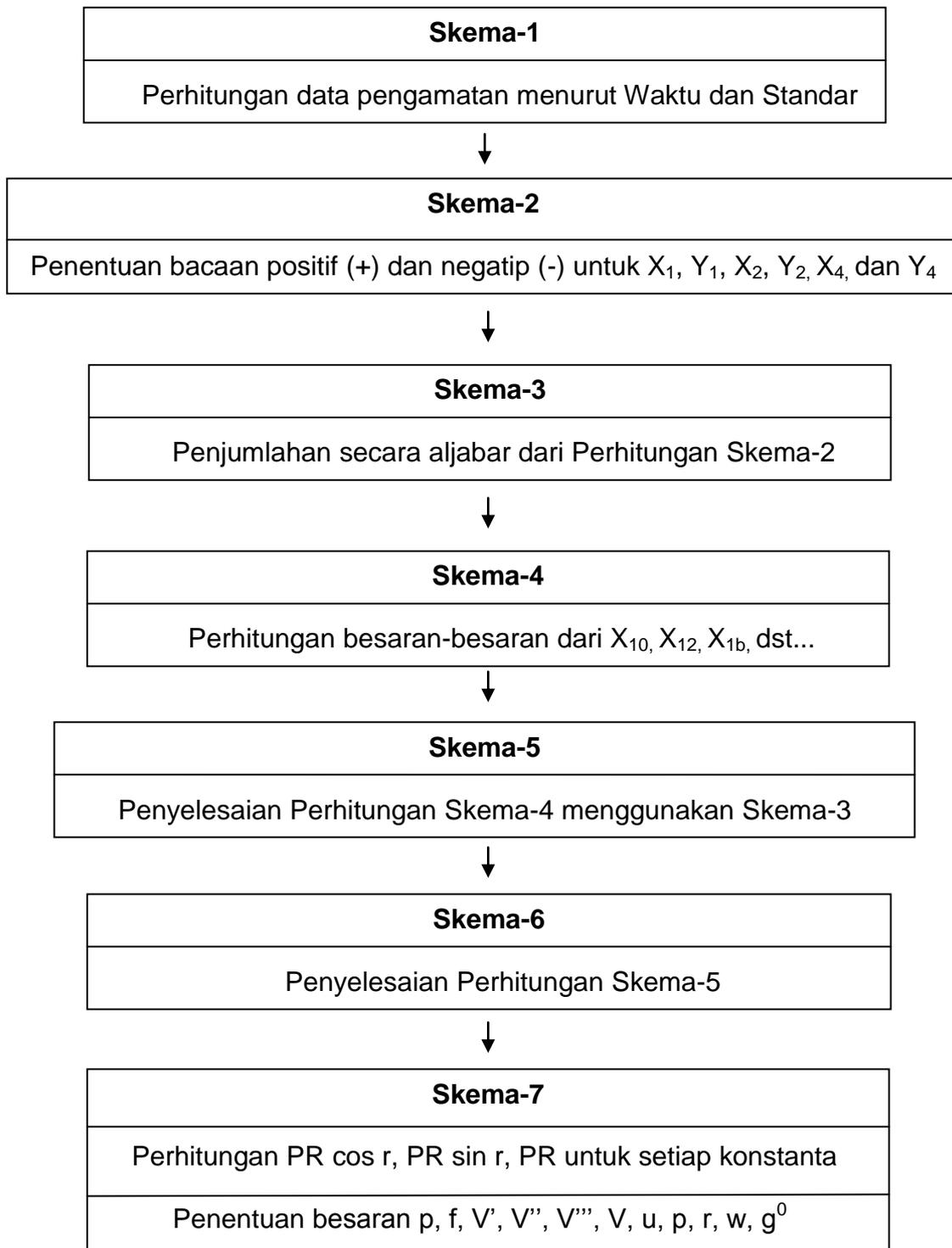
dan negatif (-) dari tiap-tiap pengamatan (dengan melihat besarnya saja) untuk X_1 , Y_1 , X_2 , Y_2 , dan Y_4 (kecuali untuk X_4), sehingga jumlahnya sama dengan jumlah ke samping dari tabel yang dibuat pada Skema-1. Apabila sudah terkontrol, kemudian disusun ke dalam tabel baru.

3. Skema-3

Kolom pada Skema-3 ini berisi penjumlahan secara aljabar dari hitungan pada Skema-2. Jumlah dari penjumlahan bilangan yang negatif ditambahkan dengan suatu jumlah B , sehingga nilainya menjadi positif. Besarnya B tersebut merupakan suatu kelipatan dari 1000. Jumlah besaran B yang akan ditambahkan itu diletakkan di atas kolom dan bilangan hasil pertambahan atau perjumlahannya dengan B untuk X_1 , Y_1 , X_2 , Y_2 , X_4 , dan Y_4 disusun dalam tabel baru lagi. Kolom untuk tabel ini tidak mempunyai kontrol hitungan.

4. Skema-4

Besaran-besaran yang telah ditambahkan dengan B telah dapat ditentukan, selanjutnya menghitung besaran-besaran dari X_{10} , X_{12} , X_{1b} , dan seterusnya. Nilai indeks kedua dicari menggunakan tabel akhir. Nilai dari besaran tersebut diperoleh dengan mengalikan besaran yang telah ditambah B dengan besaran-besaran yang diberikan pada kolom 0, 2, b, dan seterusnya, dalam perhitungannya diperhatikan lama pengamatan 29 piantan.



Gambar 3.7. Diagram Alir Penghitungan Pasut dengan Metoda *Admiralty*
(Sumber: Modifikasi dari Hidayat, 2010)

a. Menghitung besaran X_{00}

X_{00} ditentukan dari jumlah X_0 langkah-3 untuk semua piantan.

b. Penentuan besaran X_{10} dan Y_{10}

Untuk pengamatan 29 piantan dengan indeks sama dengan nol (0), dengan bilangan penambah B, bilangan penambah X adalah $-29 B$.

c. Penentuan besaran X_{12} dan Y_{12} .

Untuk pengamatan 29 piantan dengan indeks kedua sama dengan 2, besaran X_{12} dan Y_{12} diselesaikan melalui contoh hitungan pada halaman berikutnya.

d. Penentuan besaran X_{1b} dan Y_{1b} .

Untuk pengamatan 29 piantan dengan indeks kedua b, ditentukan nilai B (bilangan penambah) = 0, jadi hanya diisi 2 baris saja. Kalikan semua konstanta dengan nilai pengamatan.

e. Penentuan besaran X_{13} dan Y_{13} .

Untuk pengamatan 29 piantan dengan indeks kedua 3, ditentukan kolom ketiga = $-1 B$, jadi diisi 3 baris. Kalikan semua konstanta dengan nilai-nilai pengamatan.

5. Skema-5

Untuk menyelesaikan perhitungan-perhitungan dalam Skema-5 digunakan data dari Skema-4.

6. Skema-6

Menyelesaikan perhitungan-perhitungan dalam Skema-5.

7. Skema-7

a. Menghitung besarnya PR cos r

Besaran PR cos r untuk setiap konstanta (seperti S_0 , M_2, \dots) dihitung melalui Skema-5. Perhitungan dilakukan dengan menjumlah besaran-besaran yang terdapat pada kolom tersebut.

b. Menghitung besarnya PR sin r

Besaran PR sin r untuk setiap konstanta (seperti S_0 , M_2, \dots) dihitung melalui Skema-6. Perhitungan dilakukan dengan menjumlah besaran-besaran yang terdapat pada kolom tersebut.

c. Menghitung besarnya PR

Besarnya PR untuk setiap konstanta (seperti S_0 , M_2, \dots) pada kolom VII, dihitung melalui persamaan:

$$(PR)^2 = (PR \cos r)^2 + (PR \sin r)^2$$

d. Menentukan besaran p

Menggunakan tabel, besaran komponen diisi pada Langkah-7.

e. Menentukan besaran f

Berdasarkan waktu menengah pengamatan, diperoleh nilai f dengan cara interpolasi, diperoleh:

$$f(M_2)$$

$$f(K_1)$$

$$f(O_1)$$

$$f(K_2)$$

besaran f untuk S_2 , N_2 , M_4 dan MS_4 ditentukan dengan cara:

$$f(S_2)$$

$$f(N_2)$$

$$f(M_4)$$

besaran-besaran tersebut diisikan pada baris ke 5

f. Menentukan nilai V'

$$V'(N_2)$$

$$V'(K_1)$$

$$V'(O_1)$$

besaran tersebut diisikan pada baris ke 6

g. Menentukan nilai V''

$$V''(N_2)$$

$$V''(K_1)$$

$$V''(O_1)$$

besaran tersebut diisikan pada baris ke 7

h. Menentukan nilai V'''

$$V'''(N_2)$$

$$V'''(K_1)$$

$$V'''(O_1)$$

besaran tersebut diisikan pada baris ke 8

i. Menentukan nilai V

Penentuan nilai V untuk M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , M_4 dan MS_4 , serta K_2

dan K_1 dilakukan melalui perhitungan:

$$V(M_2) = V'(M_2) + V''(M_2) + V'''(M_2)$$

$$V(S_2) = 0$$

$$V(N_2) = V'(N_2) + V''(N_2) + V'''(N_2)$$

$$V(K_1) = V'(K_1) + V''(K_1) + V'''(K_1)$$

$$V(O_1) = V'(O_1) + V''(O_1) + V'''(O_1)$$

$$V(M_4) = 2 \times V(M_2)$$

$$V(MS_4) = V(M_2)$$

besaran tersebut diisikan pada baris ke 9

j. Menentukan nilai u

Nilai u ditentukan berdasarkan interpolasi waktu menengah seperti sebelumnya. Besaran tersebut diisikan pada baris ke 10.

k. Menentukan nilai p

Dengan memakai tabel diperoleh nilai p untuk semua konstanta. Besaran tersebut diisikan pada baris ke 11.

l. Menentukan nilai r

Nilai r untuk suatu konstanta ditentukan dari nilai $PR \sin r$, sedangkan $PR \cos r$ didapat dari persamaan:

$$\operatorname{tg} r = \frac{PR \sin r}{PR \cos r}$$

m. Menentukan nilai $(1+W)$ dan w

Penentuan $(1+W)$ dan w untuk setiap konstanta dilakukan melalui perhitungan sebagai berikut :

- Menentukan besarnya $(V(K_1) + u(K_1))$
- Menentukan besarnya $2V(K_1) + u(K_1)$
- Menentukan besarnya $3V(M_2) - 2V(N_2)$

n. Menentukan nilai g

Besaran g untuk suatu konstanta ditentukan melalui persamaan:

$$G = V + u + w + p + r$$

o. Menentukan kelipatan dari 360°

Kelipatan 360° di sini dimaksudkan untuk mencari nilai kelipatan 360° terhadap nilai g. Besaran diisikan pada baris ke 15.

p. Menentukan amplitudo

$$A = PR : (P.f.(1+W))$$

q. Menentukan besaran g° (kolom terakhir)

Penentuan besaran ditentukan melalui perhitungan:

$$\begin{aligned} g^{\circ} &= g \text{ (yang dihitung dari 0) - (kelipatan } 360^{\circ}) \\ &= \dots \text{ (dibulatkan).} \end{aligned}$$

besaran tersebut diisikan pada baris terakhir.

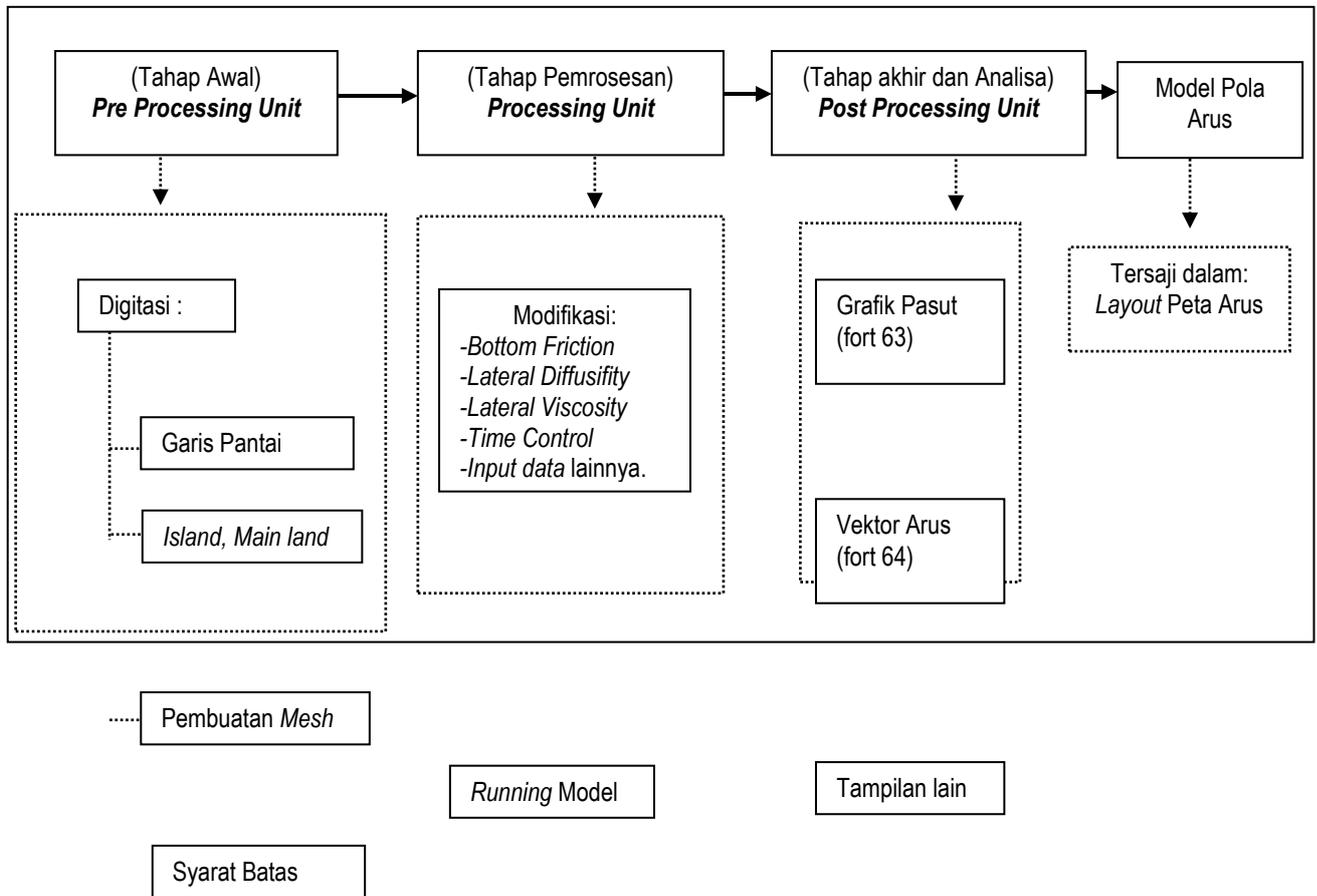
3.3.4. Pengolahan Data Batimetri

Data batimetri hasil survai mempunyai format digital ASCII sehingga tahapan pemrosesan data lebih mudah dan cepat. Data primer hasil akuisisi selanjutnya disaring untuk menghilangkan data yang salah. Data hasil filterisasi kemudian dikoreksi dan diinterpolasi dengan data pasut berinterval 30 menit. Selain dikoreksi dengan data pasut, juga dikoreksi dengan kedalaman *transducer* terhadap permukaan air.

Data batimetri hasil akuisisi merupakan data DTM (*Digital Terrain Model*) yang terdiri dari posisi horisontal dan vertikal. Data dapat divisualisasikan dalam bentuk peta kontur 2-dimensi. Perangkat lunak yang digunakan untuk membuat kontur adalah *ArcView GIS 3.3*.

3.4. MODEL PENJALARAN GELOMBANG DAN ARUS

Pembuatan model matematik menggunakan perangkat lunak SMS 8.1. Berdasarkan *Manual SMS 8.1* pembuatan model dibagi tiga tahap proses: tahap permodelan serta parameternya (*pre-processing unit*), tahap pemrosesan program komputasi (*running*) dan tahap tampilan hasil *running* (*post-processing unit*). Penyajian diagram alir tahap pembuatan model matematik disajikan pada **Gambar 3.8**.

**Keterangan:**

- : Tahapan berikutnya.
→ : Tahapan yang berlangsung dalam proses

Gambar 3.8. Penyusunan Model Arus

3.4.1. Data *input* untuk Desain Model SMS Version 8.1.

Berdasarkan Manual SMS 8.1 (SMS, 2004), masukan data yang akan digunakan dalam perhitungan ini dalam *software* SMS disebut kondisi batas atau *boundary condition*, dan diisikan pada sub menu *time control* ADCIRC. Penjelasan tentang kondisi batas untuk desain model pada ADCIRC adalah sebagai berikut:

a. Menentukan syarat batas dan proses digitasi

Dalam pendesainan model yang diperlukan adalah *base map* dari lokasi penelitian. Proses digitasi dilakukan untuk menentukan daerah batas darat, batas laut dan obyek-obyek lain yang terdapat pada perairan. Peta Lingkungan Laut Nasional dari skala 1 : 200.000 diperlukan untuk digitasi batimetri dan garis pantai.

b. Pembuatan Grid (*Mesh*/Jaring-jaring elemen hingga)

Setelah proses digitasi dari peta dasar untuk menentukan batas laut darat, batas laut selesai, langkah selanjutnya membuat *mesh/grid*, di mana pada setiap elemen memiliki parameter yang berbeda untuk kemudian perhitungan hidrodinamika dilakukan secara komputasi (*running*) dengan dasar persamaan kontinuitas dan momentum.

3.4.2. Data Input untuk *Setting Model SMS Version 8.1*.

Berdasarkan *Manual SMS 8.1*, *setting* model dalam SMS dimaksudkan untuk memasukkan beberapa parameter hidrodinamika yang menunjang perhitungan komputasi. Parameter untuk *setting* model disesuaikan secara coba-coba (*trial and error*) sedemikian rupa sehingga hasil simulasi mendekati data lapangan. Parameter-parameter tersebut di-*input* dari sub-menu ADCIRC, yaitu *ADCIRC model control*. Parameter yang digunakan dalam model arus perairan adalah sebagai berikut:

- a. *Bottom friction*, tipe yang di-*input* adalah *paving*, dengan nilai bervariasi antara 0.0025.
- b. *Tidal force*. Komponen pasut yang di-*input* berasal dari *file legi*, merupakan file yang berisi 9 komponen pasut yang merupakan

suatu fasilitas yang telah tersedia secara *default* dari perangkat lunak SMS 8.1. 9 komponen pasut utama tersebut adalah K_1 , K_2 , L_2 , M_2 , N_2 , O_1 , P_1 , Q_1 , dan S_2 .

- c. *Harmonic Analysis*, nilainya diisikan 0.
- d. *Time control*. Dalam menu *time control*, kostituen diisikan masing-masing untuk *global elevation* dan *global velocity*:
- *Start day* : 0 day
 - *Time step* : 4 sec.
 - *Run time* : 15 days.
 - *Output every 60 minutes*.
 - *End day* : 15 days.
- e. *Wind Stress* : *None*.
- f. *Generalized* :
- | | |
|----------------------------|---------------|
| <i>Wave continuity</i> | : 0.1 - 0.001 |
| <i>Lateral viscosivity</i> | : 5 |
| <i>Lateral Diffusivity</i> | : 5 |

Parameter-parameter lain yang diperlukan sebelum SMS dieksekusi (*running*) yang menentukan berhasil tidaknya *running* dan perlu untuk disertakan dalam modul ADCIRC adalah:

No.	Uraian	Data Input
1.	n (Koefisien Manning) pada permukaan dasar laut	0.0025 – 0.4
2.	n (Koefisien Manning) pada aliran	-
3.	Percepatan Gravitasi	9.810 m/def ²
4.	Suhu air	27° C.
5.	Interval perhitungan	1/2 jam.
6.	Lama pengujian	24 x 30 hari.
7.	<i>Minimum angel for tangensial flow</i>	90 deg.
8.	<i>Coriolis option</i>	<i>Variable</i> .
9.	<i>Wind stress/surface pressure</i>	<i>None</i> .
10.	<i>Model type</i>	2D DI
11.	<i>Coordinates system</i>	<i>Spherical</i>

Beberapa data yang diberikan pada saat pengumpulan data ADCIRC sebagai *Boundary Condition* adalah:

Kondisi batas untuk elevasi pada *open ocean boundary* dan *mainland boundary*.

Pada bagian *open ocean* penelitian ini kondisi batas berupa tinggi muka air pada saat pasang tertinggi yang diisikan pada *string* atau diistilahkan BHL (*Boundary Head Line*). Pada *Z coordinate* nilainya dimasukkan 0.

Material Properties

Material properties digunakan untuk memberikan definisi pada setiap elemen, yaitu empat koefisien pertukaran turbulensi (turbulensi normal arah X dan Y dan turbulensi tangensial arah X dan Y) dan satu nilai *n* Manning.

1) Koefisien pertukaran turbulensi (*Eddy Viscosity*)

Dalam banyak penggunaan, keempat koefisien pertukaran turbulensi memiliki nilai yang sama. Koefisien pertukaran turbulensi ini dinamakan *Eddy Viscosity*, disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Nilai *Eddy Viscosity*

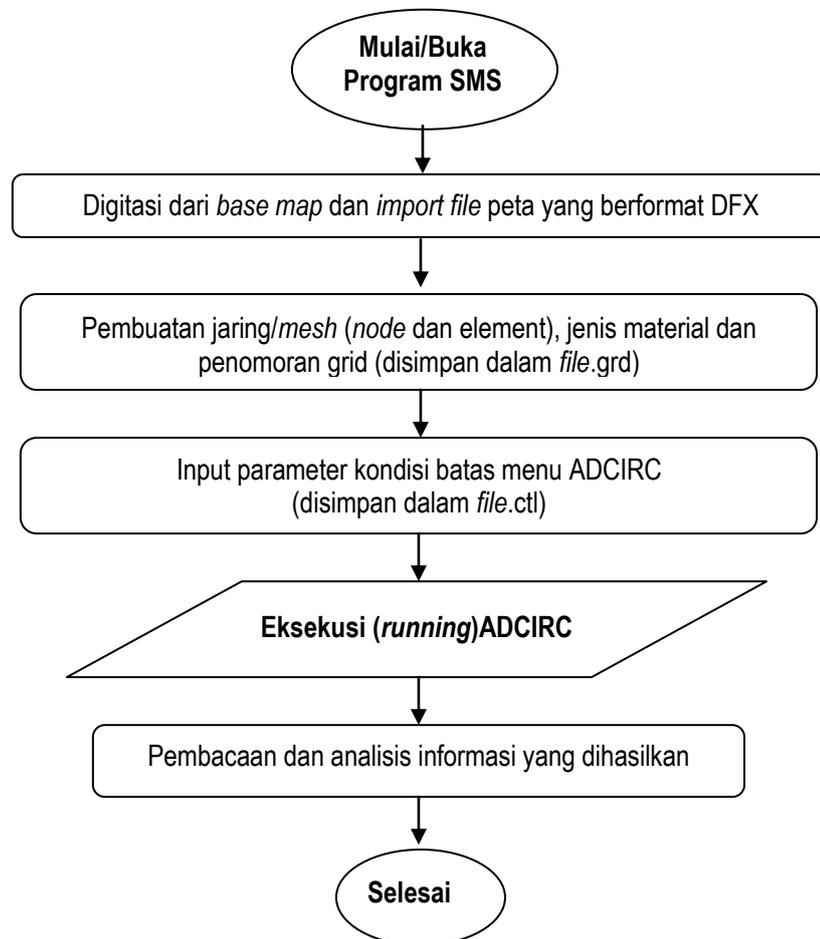
Kondisi sungai	ϵ (m ² /detik)
Aliran tenang melalui sungai dangkal	240 – 1200
Aliran cepat melalui sungai dangkal	1200 – 2400
Muara yang dalam airnya	2400 – 4800
Muara yang dangkal airnya	9500 – 14400
Tanah basah dengan air pasang surut	4800 – 9500
Aliran pemisahan di sekitar struktur	50 – 240

Sumber: Chow (1959)

2) Koefisien Kekasaran Manning (*n*)

Menurut Chow (1959), penentuan Koefisien Kekasaran Manning (*n*) didasarkan pada kondisi dasar dan pertimbangan kepastian geometri. Semakin besar nilai *n* berarti bahwa kondisi dasar aliran semakin kasar.

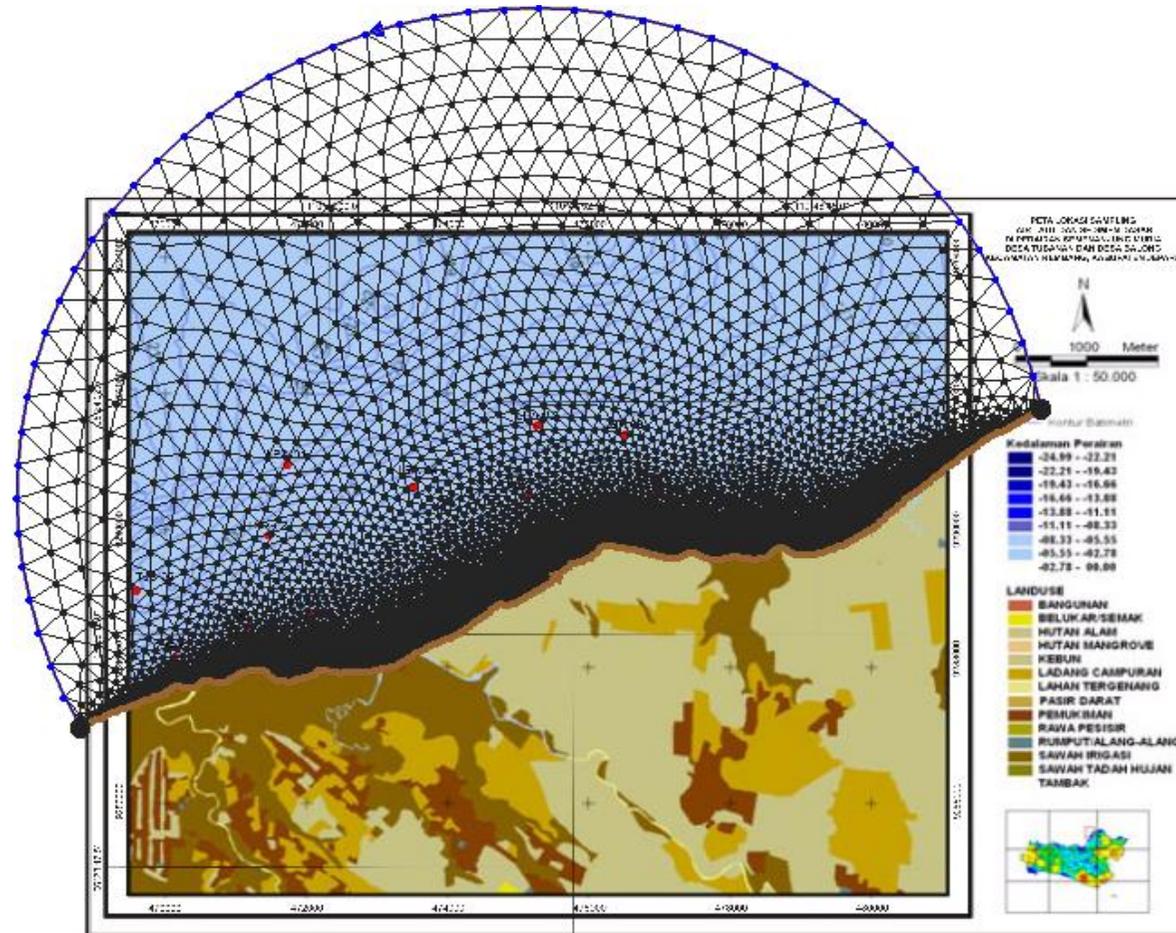
Proses pemodelan secara keseluruhan dirangkum dalam diagram alir yang disajikan pada **Gambar 3.9**.



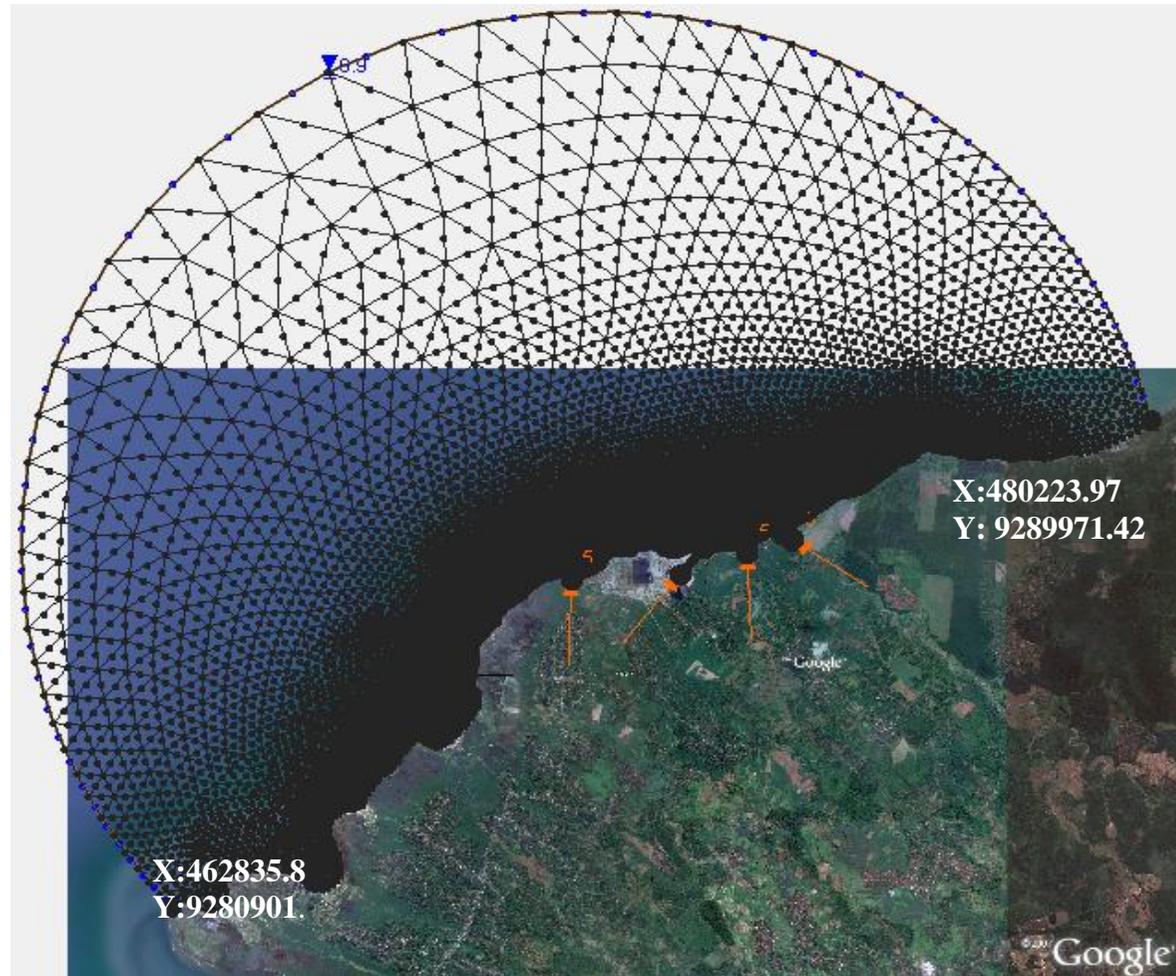
Gambar 3.9. Diagram Alir Proses Pemodelan Arus
(Sumber: SMS, 2004)

3.5. SISTEM GRID YANG DIGUNAKAN

Sistem grid yang digunakan dalam pemodelan ini disajikan pada **Gambar 3.10** sampai **Gambar 3.12**.



Gambar 3.10. Sistem Grid Model Arus
 (Sumber Peta Dasar: Batan-Undip, 2006)



Gambar 3.11. Sistem Grid Model Persebaran Radionuklida Alam
(Sumber Peta Dasar: www.map.google.com, November 2011)

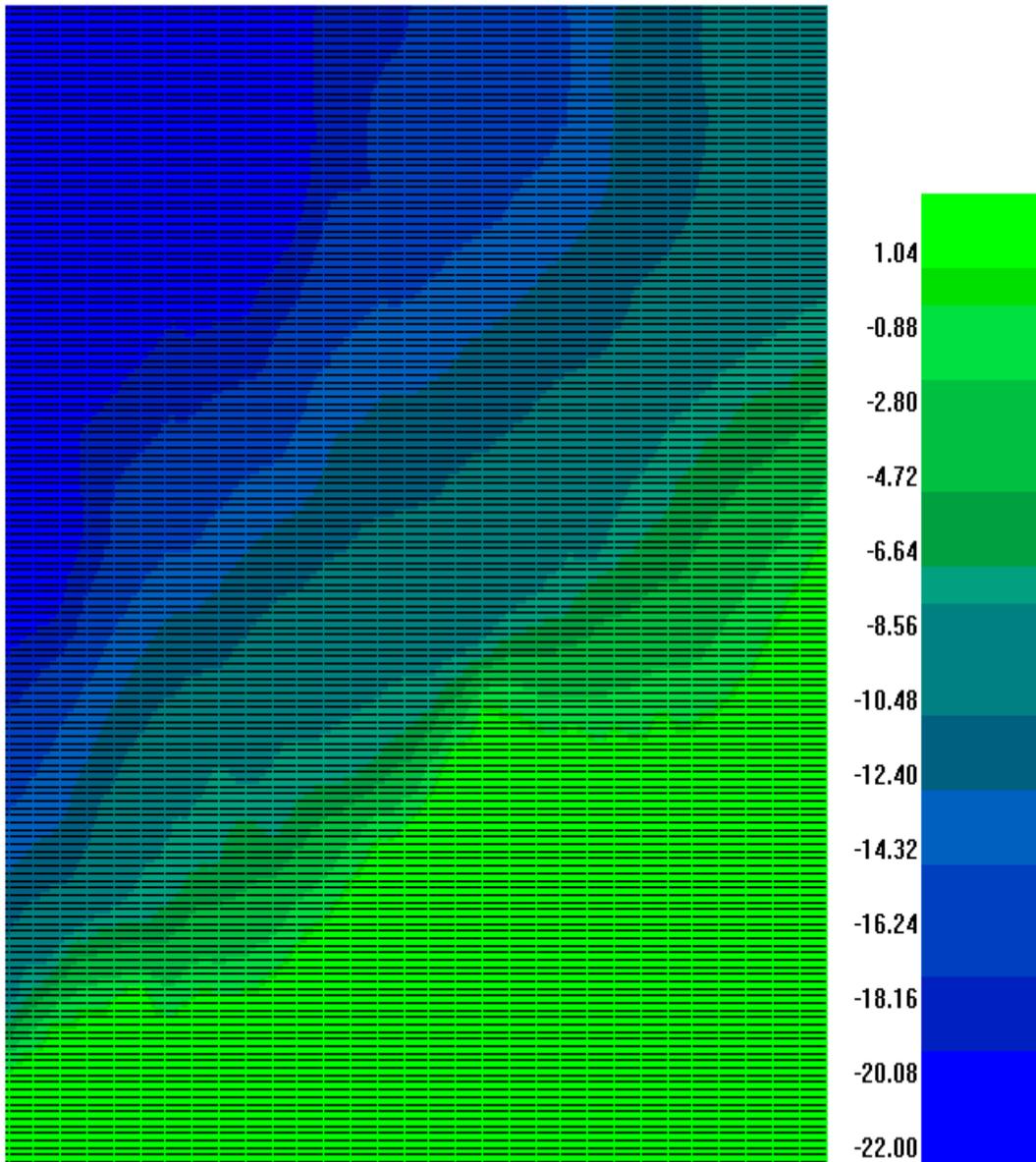
Keterangan Gambar 3.10 dan Gambar 3.11:

Permodelan dilakukan dengan $\Delta t = 1$ jam, T total = 360 jam (15 hari).

Ukuran grid, dx dan dy , pada daerah di dekat sumber adalah 10 meter sedangkan di daerah batas luar (laut) menggunakan ukuran grid dari 100 meter sampai 1500 meter.

Data *input* yang digunakan:

1. Batas perairan laut menggunakan data pasang surut hasil pengamatan 29 Mei 2006 sampai 13 Juni 2006 di Stasiun TPI Beringin (Batan-Undip, 2006).
2. Batas perairan sungai menggunakan debit konstan $5 \text{ m}^3/\text{detik}$.
3. Debit *outlet* rerata sebesar $226.800 \text{ m}^3/\text{jam}$ atau $63 \text{ m}^3/\text{detik}$ (PLTU Tanjungjati B, 2007). Dengan mempertimbangkan fluktuasi debit *outlet* air pendingin dan *outlet* sumber-sumber lain, diambil nilai $73 \text{ m}^3/\text{detik}$.
4. Sumber lepasan radionuklida alam diasumsikan berasal dari perlindian *fly ash* dan *bottom ash* digunakan data dari titik terdekat dengan *outlet*. Posisi *outlet* terletak pada $0,6 d$ (*mid-water depth*).
5. Nilai adveksi-difusi digunakan per 10 m.
6. Permodelan menggunakan *software* SMS 8.1 (*Surface-water Modeling System*), aktivitas radionuklida di air laut menggunakan modul RMA4, aktivitas radionuklida di sedimen menggunakan Sed2D. Permodelan arus pasang surut menggunakan modul ADCIRC dan RMA 2 yang terintegrasi (digunakan untuk *running* model RMA4 dan Sed2D).



Gambar 3.12. Sistem Grid Model Gelombang

Keterangan Gambar 3.12:

Pemodelan gelombang dilakukan dengan *Software* CEDAS modul ST-WAVE:

1. Dilakukan dengan tiga arah kejadian gelombang (Barat Laut, Utara, dan Timur Laut)
2. Tinggi gelombang dihitung berdasarkan kecepatan angin (sumber data BMKG Semarang tahun 2000 sampai 2010 dengan kecepatan angin tertinggi 15,42 m/s).
3. Tinggi gelombang dihitung dengan metode SMB (*Svendrup Monk and Bretschneider*) CERC 1984 (US Army, 2002).

Perhitungan gelombang dengan durasi 3 jam.

Grid x dan y yang digunakan dalam model gelombang adalah 10 meter.

Batas pemodelan dalam sistem UTM WGS 1984 untuk wilayah Indonesia

Zona 49 S:

$$X_1 = 469463.20 \quad Y_1 = 9294350.52$$

$$X_2 = 469463.20 \quad Y_2 = 9286350.52$$

$$X_3 = 481563.20 \quad Y_3 = 9286350.52$$

$$X_4 = 481563.20 \quad Y_4 = 9294350.52$$



3.6. PERANGKAT LUNAK YANG DIGUNAKAN

Perangkat lunak (*software*) yang digunakan dalam pengolahan data dan/atau pemodelan disajikan dalam Tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3.5. Perangkat Lunak yang Digunakan

No.	ITEM	Perangkat Lunak / Manual
1.	Pemetaan Bathimetri ⁽¹⁾	ArcView GIS 3.3
2.	Penghitungan Konstanta Pasang Surut dengan Metode <i>Admiralty</i>	Manual.xls
3.	Pengolahan Data Angin	Manual.xls
4.	Pembuatan Mawar Angin	Windrose & Waverose Plotter 1.0
5.	Penghitungan Konversi Angin-Gelombang	Manual.xls
6.	Pengolahan Data Gelombang	MIKE 21
7.	Penghitungan <i>Raw Data</i> Tinggi Gelombang	Manual.xls
8.	Pembuatan Mawar Gelombang	MIKE 21
9.	Pemodelan Penjalaran Gelombang	Modul ST-WAVE ⁽¹⁾
10.	Pembuatan Grafik Kecepatan Arus	Manual.xls
11.	Pembuatan Profil Kecepatan Vertikal Arus	Manual.xls
12.	Pembuatan <i>Scatter Plot</i> Arus	CD Oceanography 4.0
13.	Pembuatan <i>Vector Plot</i> Arus	CD Oceanography 4.0
14.	Pembuatan Mawar Arus	MIKE 21
15.	Pemodelan Pembangkitan Arus	Modul RMA2 ⁽²⁾ dari SMS 8.1 ⁽⁵⁾
16.	Pemodelan Arus Pasang Surut	Modul ADCIRC ⁽¹⁾ dan RMA2 ⁽²⁾ dari SMS 8.1 ⁽⁵⁾
17.	Pemodelan Sebaran Radionuklida Alam di Air Laut	Modul RMA4 ⁽³⁾ dari SMS 8.1 ⁽⁵⁾
18.	Pemodelan Sebaran Radionuklida Alam di Sedimen	Modul SED2D ⁽⁴⁾ dari SMS 8.1 ⁽⁵⁾

Sumber:

⁽¹⁾US Army (2001);

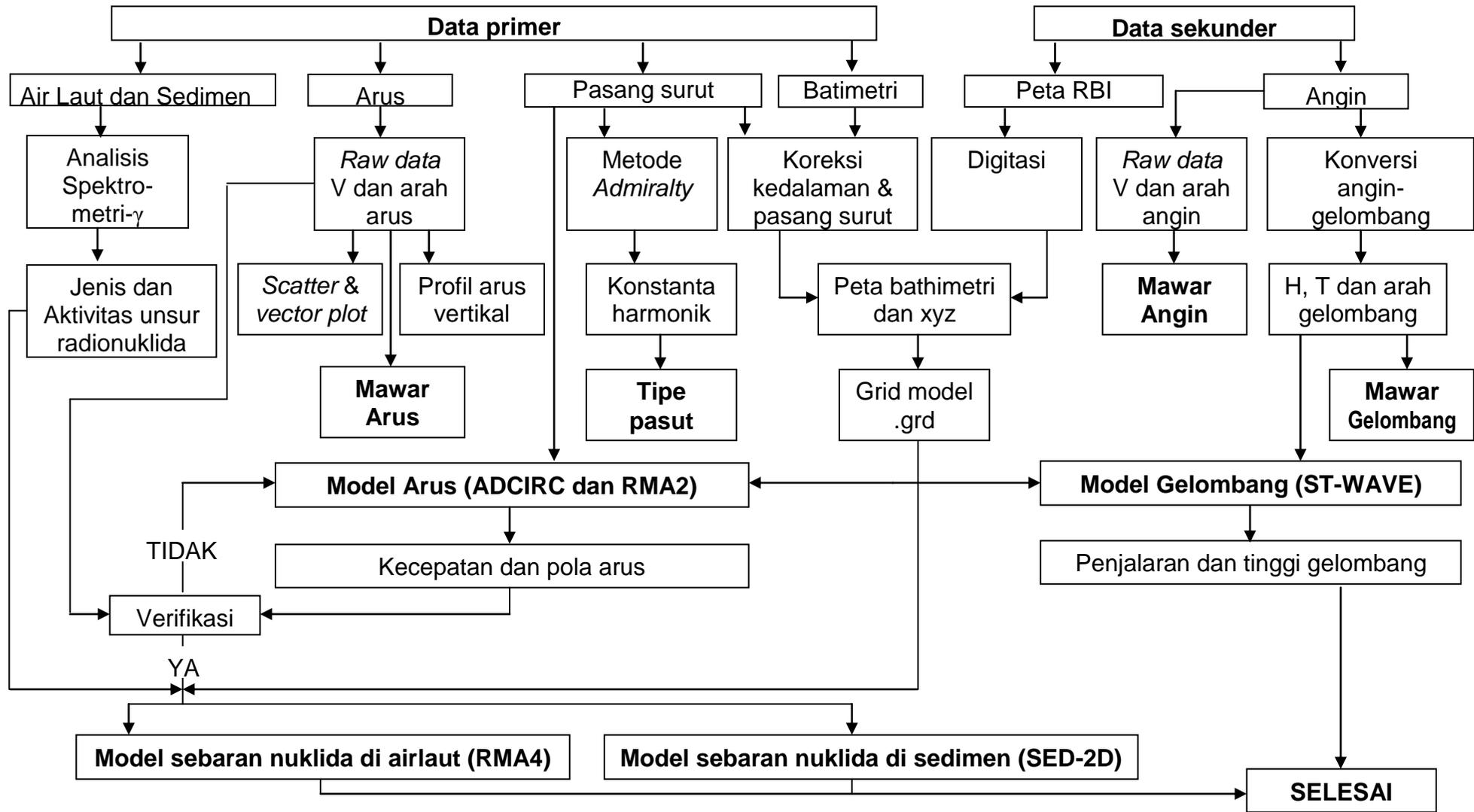
⁽²⁾US Army (2003a);

⁽³⁾US Army (2003b);

⁽⁴⁾US Army (2003c);

⁽⁵⁾SMS (2004) dan US Army (2002).

Note: *Approved for public release; distribution is unlimited.*



Gambar 3.13. Diagram Alir Penggunaan Perangkat Lunak

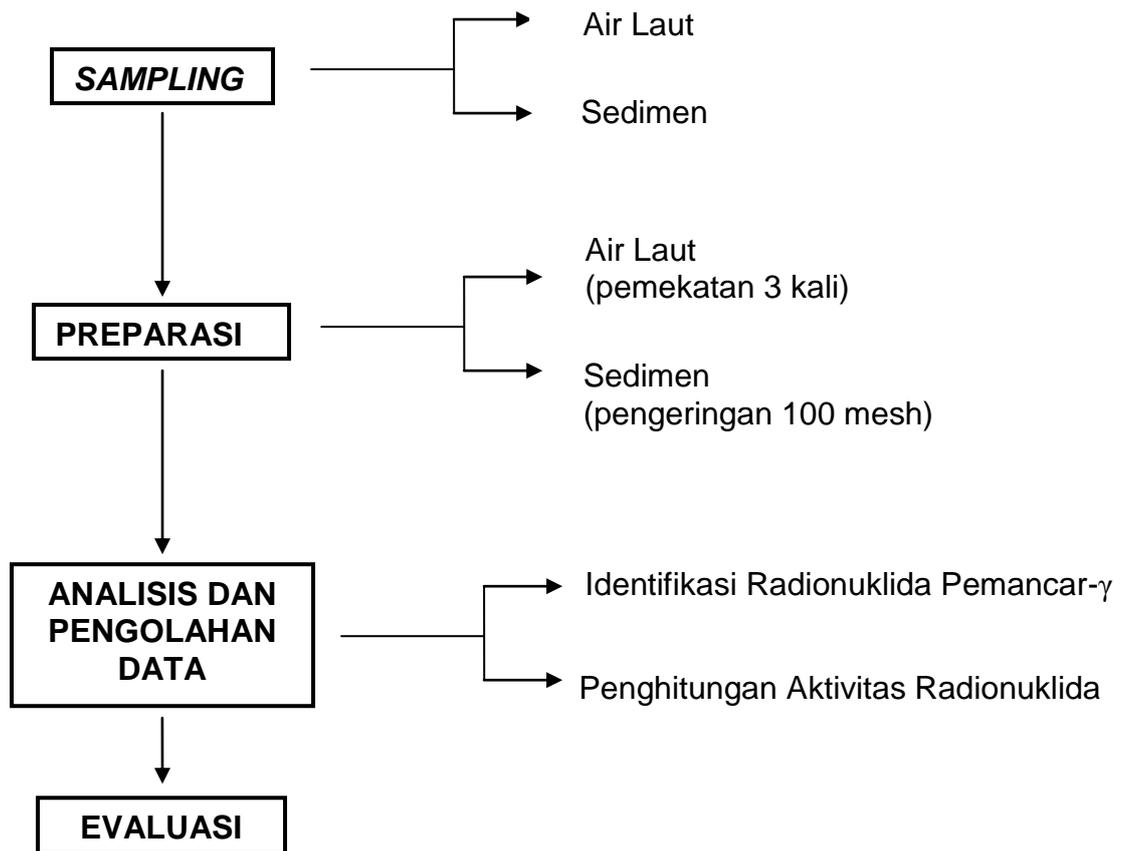
3.7. ANALISIS RADIOAKTIVITAS

Analisis radioaktivitas dilakukan di Laboratorium Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) Badan Tenaga Nuklir Nasional (Batan), Jakarta, setelah sampel diambil, dipreparasi dan dicacah.

Pengambilan sampel air dan sedimen perairan pesisir dilakukan tanggal 22 April 2011 untuk enam lokasi perairan di sekitar *jetty* PLTU Tanjungjati B yang masuk Desa Tubanan, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, dan tanggal 23 April 2011 untuk 10 lokasi perairan di sekitar Ujung Lemahabang yang masuk Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara. Sampel air dan sedimen yang diperoleh, setelah dilakukan preparasi awal kemudian dikirim melalui jalan darat ke PTKMR Batan di Jakarta dengan waktu tempuh sekitar 10 jam.

Preparasi seluruh sampel diselesaikan dalam kurun waktu 2 bulan, pencacahan 2 bulan, analisis 2 bulan, verifikasi dan kompilasi 1 bulan. Terhitung sejak penyerahan sampel pertama tanggal 25 April 2011, data hasil analisis terakhir bisa terselesaikan dan dikirim pada Sabtu 12 November 2011.

Diagram alir analisis radionuklida disajikan pada **Gambar 3.14**.



Gambar 3.14. Diagram Alir Analisis Radioaktivitas
(Sumber: Dimodifikasi dari **Taftazani, 1997**; **Nareh dan Shaleh, 1993**).

3.7.1. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan pada penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu :

- a) Alat dan bahan yang digunakan untuk pengambilan sampel air laut dan sedimen perairan pesisir.
- b) Alat dan bahan untuk analisis laboratorium, alat dan bahan yang digunakan pada skala laboratorium yang tersedia di Laboratorium PTKMR-Batan, Jakarta.

3.7.1.1. Alat yang digunakan

Alat yang digunakan adalah:

- a. *Water Sampler*, untuk pengambilan sampel air.
- b. *Ekman Grab*, untuk pengambilan sedimen.
- c. Kertas/alat saring *Whatman/Millipore* untuk menyaring air.
- d. Spektrometer- γ dengan detektor HPGe.
- e. Almari asam, cawan porselin besar, lampu pemanas, kompor listrik, planset aluminium.
- f. Saringan Buchner, kertas saring, peralatan gelas, *vial*
- g. Timbangan digital, alat penumbuk, ayakan 100 mesh

3.7.1.2. Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi:

1. Sampel air laut dan sedimen
2. Sumber- γ standar ^{152}Eu
5. HNO_3 Super-pure 1 liter
6. HNO_3 65% GR. 2,5 liter
7. Aseton Gr. 2,5 liter
8. Vial 0,5ml Elkay sebanyak 1 pak (1000 buah)
9. SRM-Hg
10. *Aquabidestilata*
11. Nitrogen Cair

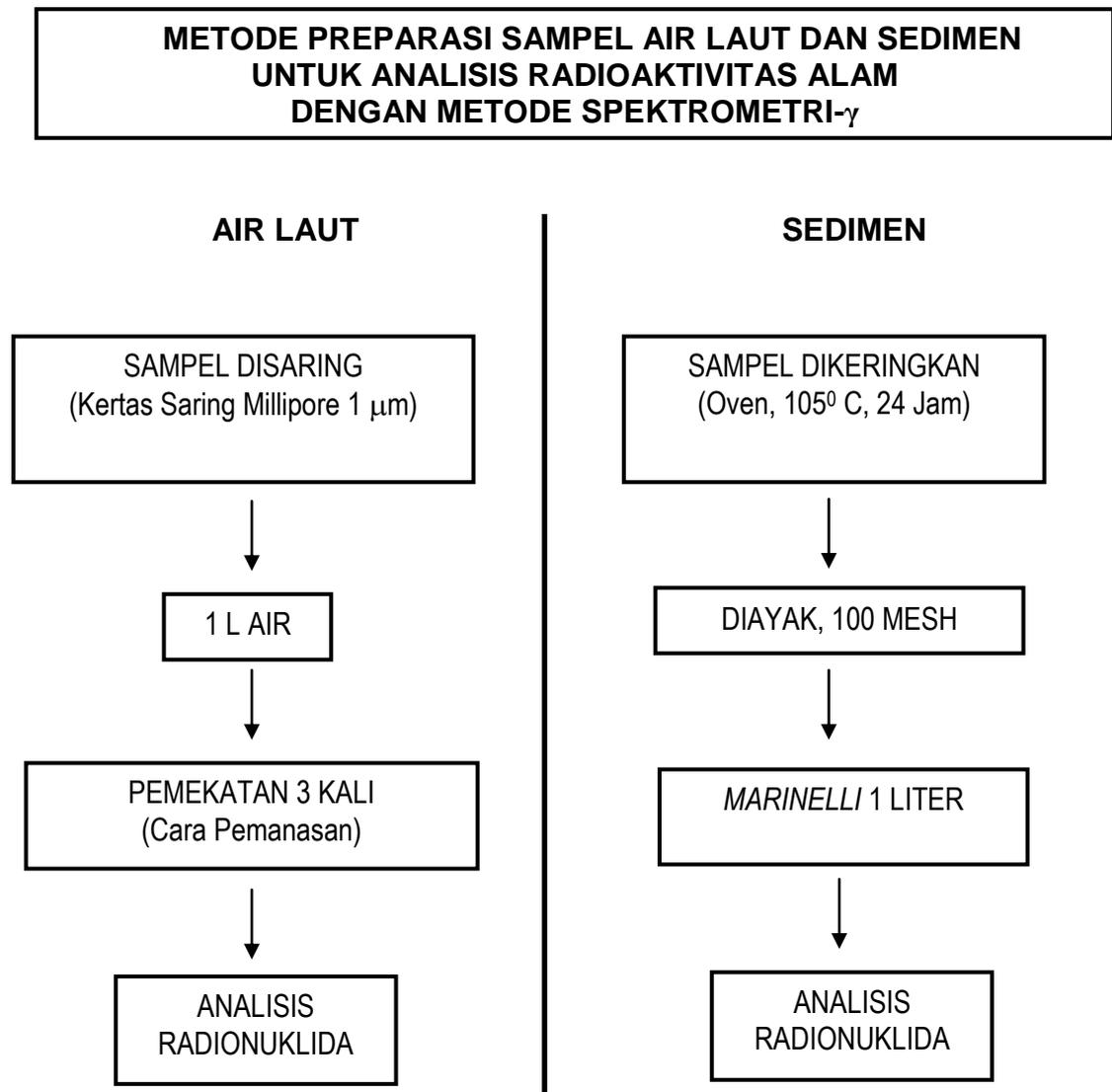
3.7.2. Pengambilan dan Preparasi Sampel

Sampel yang diambil adalah sampel air laut dan sampel sedimen perairan pesisir. Menurut Batan (1998), diperlukan beberapa tahap dalam preparasi sampel di lapangan maupun di laboratorium. Tahap preparasi sampel dilakukan untuk mencegah supaya sampel tidak terkontaminasi dengan bahan-bahan atau unsur senyawa kimia lain yang terikut dalam proses pengambilan sampel di lapangan dan sekaligus matriks sampel disesuaikan dengan alat cacahnya atau alat analisisnya.

3.7.2.1. Pengambilan dan Preparasi Sampel Air Laut

Di setiap titik pengambilan sampel, air laut diambil secara vertikal sesuai kedalaman badan air laut. Ke dalam sampel air laut tersebut kemudian ditambahkan 1ml HNO₃ *Super-pure* untuk setiap liter sampel air laut sampai pH-asam. Tujuan penambahan asam Nitrat *Super-pure* adalah agar unsur tidak terserap/menempel pada pori dinding wadah sampel yang terbuat dari plastik.

Sampel air laut kemudian disaring menggunakan kertas saring Millipore 1 µm sebanyak 1000 mL. Kemudian dilakukan pemekatan dengan cara dipanaskan dengan kompor listrik, untuk air laut dipekatkan 3 kali. Setiap sampel yang sudah dipekatkan kemudian diambil 2 ml, dimasukkan ke dalam *vial*, dan siap untuk dicacah. Skema kerja metode preparasi air laut dan sedimen disajikan pada **Gambar 3.15**.



Gambar 3.15. Metoda Preparasi Sampel Air Laut dan Sampel Sedimen untuk Analisis Radionuklida Alam dengan Metoda Spektrometri- γ . (Sumber: Dimodifikasi dari Taftazani, 1997; Nareh dan Shaleh, 1993).

3.7.2.2. Pengambilan dan Preparasi Sampel Sedimen

Menurut Wahyudi *et al.* (2011a, 2011b), preparasi sampel sedimen dilakukan dengan cara dikeringkan dalam *oven* pada suhu 105°C selama 24 jam kemudian diayak menggunakan ayakan 100 *mesh*. Sampel kemudian ditempatkan dalam *Marinelli* 1 liter dan didiamkan sampai terjadi kesetimbangan radioaktif antara Thorium dan Radium dengan anak luruhnya selama sekitar 4 minggu. Skema kerja metode preparasi sedimen (dan air laut) disajikan pada **Gambar 3.14**.

3.7.3. Pencacahan Sampel

Pencacahan sampel dan analisis radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dilakukan menggunakan spektrometer- γ dengan detektor HPGe di Laboratorium PTKMR-Batan. Kalibrasi efisiensi spektrometer- γ dilakukan dengan membandingkan respon sistem terhadap sumber standar yang telah diketahui aktivitasnya.

Kalibrasi efisiensi dilakukan menggunakan Persamaan 3.7 (lihat Batan, 1998; Debertain dan Helmer, 1988; IAEA, 1989; Susetyo, 1988; dalam Wahyudi *et al.*, 2011a):

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{(N_S / t_S - N_{BG} / t_{BG})}{A_t \cdot p_{\gamma}} \quad \dots\dots (3.7)$$

dengan :

ε_{γ} : efisiensi pencacahan (%)

N_s : cacah standar (cacah)

N_{BG} : cacah latar (cacah)

t_s : waktu cacah standar (detik)

t_{BG} : waktu cacah latar (detik)

A_t : aktivitas sumber standar pada saat pencacahan (Bq)

p_{γ} : kelimpahan energi gamma (%)

Apabila kerapatan sampel yang dianalisis berbeda dengan kerapatan sumber maka diperlukan koreksi faktor serapan diri (lihat Batan, 1998; IAEA, 1989; dalam Wahyudi et al, 2011a) seperti disajikan pada Persamaan 3.8, Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10:

$$F_k = \frac{\mu t}{1 - e^{-\mu t}} \quad \text{..... (3.8)}$$

$$\mu = \mu_m \rho \quad \text{..... (3.9)}$$

$$\mu_m = 1,287 E_\gamma^{-0,435} \quad \text{..... (3.10)}$$

- F_k : faktor koreksi serapan diri
 μ : koefisien serapan linier (cm^{-1})
 t : tebal sampel (cm)
 μ_m : koefisien serapan massa pada energi gamma (cm^2/g)
 ρ : kerapatan sampel (g/cm^3)
 E_γ : energi- γ (keV)

Besarnya nilai koefisien serapan linier (μ) disajikan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Koefisien Serapan Linier Foton pada Wadah Marinelli

Radio-nuklida	Energy (keV)	Koefisien atenuasi linier (cm^{-1})				
		1,1 gr/cm ³	1,2 gr/cm ³	1,3 gr/cm ³	1,4 gr/cm ³	1,5 gr/cm ³
Pb-212	238,63	0,131	0,143	0,155	0,166	0,178
Pb-214	351,92	0,110	0,121	0,131	0,141	0,151
Tl-208	583,19	0,089	0,097	0,105	0,113	0,121
Bi-214	609,32	0,087	0,095	0,103	0,111	0,119
Ac-228	911,16	0,073	0,080	0,086	0,093	0,100
K-40	1460,83	0,059	0,065	0,070	0,076	0,081
Tl-208	2614,53	0,046	0,050	0,055	0,059	0,063

Sumber: Wahyudi, 2011.

Menurut Susetyo (1988), diperlukan beberapa tahap dalam analisis sampel di laboratorium antara lain adalah persiapan untuk menempatkan sampel pada perangkat spektrometer- γ (HPGe *detector*). Analisis spektrometri- γ untuk identifikasi radionuklida dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan untuk identifikasi jenis radionuklida melalui tenaga sinar- γ yang dipancarkan radionuklida dalam sampel. Sampel yang dianalisis semuanya harus melalui proses preparasi. Parameter yang diukur adalah energi (untuk menentukan jenis radionuklida dalam sampel) dan laju cacah (untuk menentukan aktivitas radionuklida yang teridentifikasi).

3.7.3.1. Prosedur pencacahan- γ

1. Sampel yang akan dicacah diletakkan di atas detektor HPGe.
2. Pada saat pencacahan sampel, spektrometer- γ sudah dikalibrasi. Setelah spektrometer- γ dihidupkan, fungsi *real time* diaktifkan pada *presets* (pada layar monitor).
3. Pada saat muncul perintah "*enter real time preset in second*", dimasukkan waktu pencacahan yang diinginkan, dan tombol *enter* pada *keyboard* ditekan.
4. Untuk memulai pencacahan, fungsi *start* diaktifkan pada menu *Acquire*. Untuk mengetahui harga *net* puncak spektrum, puncak tersebut ditandai dengan mengaktifkan fungsi *mark* pada menu ROI. Kemudian Alt+C+A ditekan, harga *net* akan terlihat monitor.

3.7.3.2. Kalibrasi energi

Untuk perangkat spektrometer- γ dan satu *setting* kondisi kerja (tegangan tinggi, *shape time* dan lain-lain) perlu dicari hubungan antara nomor salur dan energi. Hal ini dilakukan dengan mencacah standar multi- γ (dalam penelitian ini digunakan sumber standar ^{152}Eu) yaitu sumber yang sudah diketahui tingkat energi- γ karakteristiknya. Antara energi foton- γ dari sumber standar dan nomor salur dari puncak-puncak spektrum- γ terdapat hubungan linear yang secara matematis dinyatakan dengan persamaan garis yang mempunyai bentuk umum seperti pada Persamaan 3.11 (Susetyo, 1988) :

$$Y = aX + b \quad \dots\dots (3.11)$$

Y = tingkat tenaga
X = nomor salur
a,b = suatu tetapan

Jika Y adalah tenaga, dan absis X adalah nomor salur maka untuk setiap pengukuran puncak serapan total- γ dari sumber standar akan diperoleh sepasang harga (X_i, Y_i). Untuk pengukuran n puncak- γ maka bisa ditentukan nilai *slope* a dan titik b secara regresi linier seperti disajikan pada Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13 (Susetyo, 1988) :

$$a = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad \dots\dots (3.12)$$

$$b = \frac{\sum Y_i}{n} - a \frac{\sum X_i}{n} \quad \dots\dots (3.13)$$

3.7.3.3. Kalibrasi efisiensi

Kalibrasi efisiensi dilakukan dengan jalan mencacah sumber standar radionuklida yang berenergi rendah (100 keV) sampai tinggi (1500 keV) yang sudah diketahui aktivitasnya. Untuk pengukuran puncak spektrum dari sumber multi- γ standar akan diperoleh beberapa pasang nilai energi dan nomor salur. Kurva kalibrasi efisiensi dapat diperoleh dari pengeplotan efisiensi ($\varepsilon(E)$) versus energi (E) yang memiliki hubungan linier. Efisiensi pencacahan ($\varepsilon(E)$) diperoleh dari Persamaan 3.14 (Susetyo, 1988):

$$\varepsilon(E) = \frac{cps_{net}}{A_{st} \cdot Y(E)} \cdot 100\% \quad \dots\dots (3.14)$$

dengan:

$$cps_{net} = \frac{\text{cacah standar} - \text{cacah latar}}{\text{lama pencacahan}} = \text{laju cacah bersih pada saat } t \text{ detik}$$

A_{st} = aktifitas sumber standar

$Y(E)$ = *yield* atau intensitas mutlak (dari tabel isotop)

Kurva kalibrasi efisiensi ini secara matematis dinyatakan dalam bentuk Persamaan 3.14, dimana dalam kalibrasi efisiensi ini, $Y = \ln \varepsilon(E)$ dan $X = \ln E$ sedangkan untuk parameter a dan b ditentukan melalui Persamaan 3.15 dan Persamaan 3.16 (Susetyo, 1982):

$$a = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad \dots\dots (3.15)$$

$$b = \frac{\sum Y_i}{n} - a \frac{\sum X_i}{n} \quad \dots\dots (3.16)$$

3.7.3.4. Minimum Detectable Concentration (MDC)

Kemampuan suatu alat untuk mendeteksi konsentrasi minimum disebut “konsentrasi minimum yang dapat dideteksi” (MDC, *Minimum Detectable Concentration*). MDC Spektrometer- γ sangat dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacah latar dan berat sampel. Perhitungan MDC pada tingkat kepercayaan 95% dilakukan menggunakan Persamaan 3.17 (Batan, 1998 dalam Wahyudi, 2011a):

$$MDC = 4,66 \cdot \frac{\sqrt{\frac{N_{BG}}{t_{BG}^2}}}{\varepsilon_{\gamma} \cdot p_{\gamma} \cdot F_k \cdot w} \quad \dots\dots (3.17)$$

MDC: konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (Bq/kg)

N_B : laju cacah latar (cps)

t_B : waktu cacah latar (detik)

ε_{γ} : efisiensi pencacahan (%)

p_{γ} : kelimpahan energi- γ (%)

F_k : faktor koreksi serapan diri

w : berat sampel (kg)

3.7.4. Identifikasi Radionuklida

Proses identifikasi radionuklida dalam sampel dilakukan dengan menggunakan sinar- γ karakteristik yang dipancarkan oleh radionuklida tersebut atau anak luruhnya (Erdtmann dan Soyka, 1979).

Menurut Wahyudi (2011a), radionuklida ^{40}K ditentukan secara langsung pada puncak energi 1.460,83 keV, radionuklida ^{226}Ra ditentukan dari anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{214}Bi) pada puncak energi 609,32 keV atau ^{214}Pb pada puncak energi 351,92 keV. Radionuklida ^{228}Ra ditentukan dari anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{228}Ac) pada puncak energi 911,16 keV. Radionuklida ^{228}Th

ditentukan dari anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{212}Pb) pada puncak energi 238,63 keV atau ^{208}Tl pada puncak energi 583,19 keV dan 2614,53 keV.

Untuk menghitung konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam sampel sedimen (C_{Sp}) digunakan Persamaan 3.18, Persamaan 3.19 dan Persamaan 3.20 (Batan, 1998 dalam Wahyudi, 2011a):

$$C_{Sp} = C_{avg} \pm U_T \quad \dots\dots (3.18)$$

C_{Sp} : konsentrasi zat radioaktif dalam sampel (Bq/kg)
 C_{avg} : konsentrasi rata-rata zat radioaktif dalam sampel (Bq/kg)
 U_T : ketidakpastian pengukuran (Bq/kg)

$$C_{avg} = \frac{N_{Sp} - N_{BG}}{\epsilon_\gamma \cdot p_\gamma \cdot W_{Sp}} \quad \dots\dots (3.19)$$

N_{Sp} : laju cacah sampel (cps)
 N_{BG} : laju cacah latar (cps)
 ϵ_γ : efisiensi pada energi gamma (%)
 p_γ : *yield* dari energi gamma (%)
 W_{Sp} : berat sampel (kg)

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{u_N^2 + u_B^2 + u_\epsilon^2 + u_p^2 + u_w^2} \quad \dots\dots (3.20)$$

u_N : ketidakpastian pencacahan sampel (%)
 u_B : ketidakpastian pencacahan latar (%)
 u_ϵ : ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%)
 u_p : ketidakpastian *yield* (%)
 u_w : ketidakpastian berat sampel (%).

3.7.4.1. Analisis Kualitatif

Kalibrasi energi diperlukan untuk tujuan analisis kualitatif spektrometer- γ . Setelah kalibrasi dilakukan dan diperoleh hasil yang mantap maka pengukuran sampel dapat dilakukan. Pengukuran sampel dilakukan pada kondisi alat yang tepat sama dengan kondisi kalibrasi. Puncak-puncak dalam spektrum- γ sampel dicatat nomor salurnya (X). Dengan menggunakan persamaan garis kalibrasi: $Y = aX + b$, maka diperoleh nilai energi (Y) puncak- γ yang bersesuaian. Setelah diperoleh nilai energi (Y), dengan merujuk Erdtmann dan Soyka (1979) dapat diperoleh jenis radionuklidanya.

3.7.4.2. Analisis Kuantitatif

Setelah diperoleh persamaan garis kalibrasi maka nilai energi dari pengukuran dapat dimasukkan ke dalam persamaan garis untuk selanjutnya diperoleh nilai efisiensi ($\epsilon(E)$). Selanjutnya, aktivitas sampel dihitung melalui Persamaan 3.21, Persamaan 3.22 dan Persamaan 3.23 (Susetyo, 1988):

$$\text{Aktivitas (A)} = \frac{\text{Laju cacah (cps)}}{Y(E) \cdot \epsilon(E)} \text{ Bq} \quad \dots\dots (3.21)$$

Y(E) = *yield* atau intensitas mutlak (dari tabel isotop)
 $\epsilon(E)$ = efisiensi

$$\text{Laju cacah (cps)} = \frac{\text{Harganet}}{\text{Lama pencacahan (det ik)}} \quad \dots\dots (3.22)$$

$$\text{Aktivitas konversi (A}_k\text{)} = \frac{\text{Aktivitas (Bq)}}{\text{Massa cuplikan (gram)}} \quad \dots\dots (3.23)$$

3.8. METODE UJI HIPOTESIS

3.8.1. Uji Hipotesis Pertama

Uji Hipotesis Pertama: “Terdapat pelindian **radionuklida alam** ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di **air laut** di perairan pesisir Semenanjung Muria” dilakukan dengan cara sebagai berikut.

Setelah sampel air laut dari perairan pesisir Semenanjung Muria dicuplik, dipreparasi, dicacah dan dianalisis secara spektrometri- γ , maka dilakukan proses identifikasi radionuklida dalam sampel air laut yang dilakukan dengan menggunakan sinar- γ karakteristik yang dipancarkan oleh radionuklida atau anak luruhnya (Erdtmann dan Soyka, 1979).

Identifikasi radionuklida dilakukan melalui tahapan “kalibrasi energi” spektrometer- γ : pengukuran sampel dilakukan pada kondisi alat yang tepat sama dengan kondisi kalibrasi. Puncak-puncak dalam spektrum- γ sampel dicatat nomor salurnya (X). Dengan menggunakan persamaan garis kalibrasi: $Y = aX + b$, akan diperoleh nilai energi (Y) puncak- γ yang bersesuaian. Setelah diperoleh nilai energi (Y), dengan merujuk Erdtmann dan Soyka (1979) dapat dilakukan identifikasi jenis radionuklida yang terkandung dalam sampel air laut.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{238}U dari *fly ash* dan *bottom ash* di **air laut** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ ($^{234\text{m}}\text{Pa}$) pada puncak energi 1001 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{232}Th dari *fly ash* dan *bottom ash* di **air laut** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{228}Ac) pada puncak energi 911,16 keV dan/atau 968,97 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{226}Ra dari *fly ash* dan *bottom ash* di **air laut** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{214}Bi) pada puncak energi 609,318 keV dan/atau ^{214}Pb pada puncak energi 351,925 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di **air laut** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan secara langsung dari hasil pencacahan ^{40}K pada puncak energi 1.460,83 keV.

3.8.2. Uji Hipotesis Kedua

Uji Hipotesis Kedua: “Terdapat pelindian **radionuklida alam** ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di **sedimen** di perairan pesisir Semenanjung Muria” dilakukan dengan cara sebagai berikut.

Setelah sampel sedimen dari perairan pesisir Semenanjung Muria dicuplik, dipreparasi, dicacah dan dianalisis secara spektrometri- γ , maka dilakukan proses identifikasi radionuklida dalam sampel sedimen yang dilakukan menggunakan sinar- γ karakteristik yang dipancarkan oleh radionuklida atau anak luruhnya (Erdtmann dan Soyka, 1979).

Identifikasi radionuklida dilakukan melalui tahapan “kalibrasi energi” spektrometer- γ : pengukuran sampel dilakukan pada kondisi alat yang tepat sama dengan kondisi kalibrasi. Puncak-puncak dalam spektrum- γ sampel dicatat nomor salurnya (X). Dengan menggunakan persamaan garis kalibrasi: $Y = aX + b$, akan diperoleh nilai energi (Y) puncak- γ yang bersesuaian. Setelah diperoleh nilai energi (Y), dengan merujuk Erdtmann dan Soyka (1979) dapat dilakukan identifikasi jenis radionuklida yang terkandung dalam sampel sedimen.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{238}U dari *fly ash* dan *bottom ash* di **sedimen** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ ($^{234\text{m}}\text{Pa}$) pada puncak energi 1001 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{232}Th dari *fly ash* dan *bottom ash* di **sedimen** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya

yang memancarkan radiasi- γ (^{228}Ac) pada puncak energi 911,16 keV dan/atau 968,97 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{226}Ra dari *fly ash* dan *bottom ash* di **sedimen** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan dari hasil pencacahan anak luruhnya yang memancarkan radiasi- γ (^{214}Bi) pada puncak energi 609,318 keV dan/atau ^{214}Pb pada puncak energi 351,925 keV.

Berdasarkan Deret Peluruhan Radionuklida Alam Uranium dan Thorium (lihat IAEA, 1990 dan Cember, 1996 dalam Mellawati, 2004; serta Wahyudi, 2011a), uji hipotesis “terdapatnya pelindian **radionuklida alam** ^{40}K dari *fly ash* dan *bottom ash* di **sedimen** di perairan pesisir Semenanjung Muria” ditentukan secara langsung dari hasil pencacahan ^{40}K pada puncak energi 1.460,83 keV.

3.8.3. Uji Hipotesis Ketiga

Uji Hipotesis Ketiga: “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di **air laut** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan cara sebagai berikut.

Model persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di air laut menggunakan *software* SMS 8.1 dengan modul RMA4. Hasil simulasi model persebaran radionuklida alam di air laut ditampilkan

secara sekuensial untuk masing-masing radionuklida alam: ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K . Hasil tampilan memperlihatkan bahwa persebaran aktivitas membentuk peta **kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K hasil pemodelan.**

Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap sampel air laut yang memperlihatkan (apabila hipotesis pertama terbukti) adanya empat unsur radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , hasilnya dapat disajikan dalam bentuk peta **kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K hasil pengukuran**

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{238}U di air laut** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{232}Th di air laut** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{226}Ra di air laut** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{40}K di air laut antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

3.8.4. Uji Hipotesis Keempat

Uji Hipotesis Keempat: “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di sedimen antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Model Hidrodinamika Tak-ajeg 2-Dimensi Sistem Grid Fleksibel dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan cara sebagai berikut.

Model persebaran radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K di sedimen menggunakan *software* SMS 8.1 dengan modul SED2D. Hasil simulasi model persebaran radionuklida alam di sedimen ditampilkan secara sekuensial untuk masing-masing radionuklida alam: ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K . Hasil tampilan memperlihatkan bahwa persebaran aktivitas membentuk peta **kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K hasil pemodelan.**

Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap sampel sedimen yang memperlihatkan (apabila hipotesis kedua terbukti) adanya empat unsur radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , hasilnya dapat disajikan dalam bentuk peta **kontur iso-aktivitas radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K hasil pengukuran**

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{238}U di sedimen** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{232}Th di sedimen** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{226}Ra di sedimen** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).

Uji hipotesis “Terdapat kesesuaian pola kontur iso-aktivitas **radionuklida alam ^{40}K di sedimen** antara Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pemodelan dengan Kontur Iso-Aktivitas Hasil Pengukuran” dilakukan dengan membandingkan kesesuaian pola kontur menggunakan metoda perampalan (*overlay*).