

BAB III METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian di DTA dan perairan WGM. DTA WGM dengan luas 1.244 km² dan perairan WGM dengan luas 8800 ha. Sumber air perairan WGM berasal dari 7 sub DAS, yaitu: Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro. Luas permukaan perairan WGM sekitar 88 km² pada saat air tinggi dan 38 km² saat air rendah, kedalaman rata-rata 8,5 m dan kedalaman tertinggi 38 m berada di atas permukaan DAM. Kegiatan masyarakat di DTA yang menghasilkan limbah cair dan di buang ke sungai, seperti pertanian, industri, domestik mengalir ke perairan WGM melalui aliran 7 sub DAS.

Stasiun pengambilan sampel sumber polutan dari DTA terletak pada outlet irigasi wilayah pertanian, outlet limbah domestik, outlet industri, outlet sungai dari 7 sub DAS dan muara waduk. Sedangkan stasiun pengambilan sampel sumber polutan di perairan WGM berada pada lokasi KJA dan area wisata. Waktu pengambilan sampel pada musim penghujan dan musim kemarau di tahun 2014.

B. Tata Laksana Penelitian

1. Sosial Ekonomi Budaya Masyarakat DTA WGM

a. Jenis Penelitian dan Perancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelusuran data sekunder, yang diperlukan untuk mendukung penelitian utama. Jenis penelitian ini merupakan penelitian deskriptif, yang menggambarkan kondisi eksisting sosial ekonomi budaya masyarakat di DTA WGM. Data mengenai keadaan sosial ekonomi budaya masyarakat DTA WGM, merupakan data sekunder, yang diperoleh dari Pemerintah Kabupaten Wonogiri dan unit-unit terkait. Peninjauan keadaan sosial ekonomi budaya masyarakat DTA WGM, berdasarkan data penduduk, sosial ekonomi, kesehatan dan kondisi eksisting DTA WGM yang menggambarkan keadaan masing-masing sub DAS ditinjau dari: luas lahan, curah hujan, debit air dan tampungan air WGM.

b. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian tahap ini adalah data-data sekunder dari pemerintah Kabupaten Wonogiri dan unit-unit terkait, yang berhubungan dengan data penduduk, ekonomi, kesehatan, penggunaan lahan, curah hujan, debit air masing-masing sub DAS, dan tampungan air waduk.

c. Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi dan sampel penelitian ini adalah penduduk Kabupaten Wonogiri khususnya penduduk yang berada pada wilayah DTA WGM, yaitu tujuh wilayah sub DAS.

d. Variabel penelitian

Variabel yang digali pada penelitian ini adalah jumlah penduduk, ekonomi, kesehatan, penggunaan lahan, curah hujan, debit air dan tampungan air waduk.

e. Definisi operasional.

Definisi operasional deskripsi data pendukung penelitian ini meliputi:

- 1) Penduduk DTA, adalah seluruh penduduk Kabupaten Wonogiri yang diambil dari Wonogiri Dalam Angka tahun 2010 sampai 2014 dan jumlah penduduk di tiap desa yang termasuk pada wilayah administratif masing-masing sub DAS WGM. Data diambil dari program kolaborasi penanganan DAS Bengawan Solo Hulu tahun 2012, Bappeda Kabupaten Wonogiri. Disajikan pula data pertumbuhan penduduk Kabupaten Wonogiri dari tahun 2010 sampai dengan tahun 2014.
- 2) Sosial Ekonomi Penduduk DTA WGM, adalah kondisi sosial ekonomi yang ditinjau dari data pendidikan, pekerjaan dan pertumbuhan ekonomi. Data diambil dari Wonogiri Dalam Angka tahun 2014.
- 3) Kesehatan, data ini diambil berdasarkan data penyakit dominan yang banyak diderita masyarakat Wonogiri, seperti penyakit diare. Penyakit diare dikaitkan dengan keberadaan bakteri *coliform fecal*, misalnya *E-coli*. Hal ini berakitan erat dengan perilaku masyarakat di DTA.
- 4) Penggunaan Lahan di sub DAS DTA WGM. Peninjauan luas lahan masing-masing sub DAS ini berdasarkan data sekunder dari BPDAS dan Bappeda.
- 5) Curah Hujan. Data curah hujan di daerah DTA WGM diambil dari hasil pemantauan curah hujan harian di titik pantau sub DAS oleh BPDAS.

Berdasarkan data sekunder tersebut dari tahun 2010 sampai tahun 2014, dapat diketahui pola jumlah curah hujan

- 6) Debit Air. Data debit air masing-masing sungai sub DAS yang masuk ke perairan WGM, disajikan berdasarkan data debit maksimum dan debit minimum tiap bulan dari tahun 2010 sampai 2014. Data sekunder diperoleh dari BPDAS.
- 7) Tampung Air Waduk. Daya tampung air efektif sebelum WGM beroperasi (1980) sampai setelah beroperasi (2011) diambil dari data sekunder BBWS. Sedangkan rata-rata elevasi air WGM tahun 2011-2013 diperoleh dari sumber data PJT.

f. Teknik Pengumpulan Data Penelitian

Data penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari sumber data instansi pemerintah, seperti Wonogiri Dalam Angka (WDA) tahun 2010-2014 dari Bappeda, Data debit air dari BPDAS, data curah hujan dari BPDAS, data tampungan waduk dan elevasi muka air waduk dari PJT.

g. Teknik Analisis Data Penelitian

Data sekunder yang telah dikumpulkan, kemudian dianalisis dengan metode grafik, untuk mengetahui tren kenaikan dan perkembangan jumlah penduduk, luas lahan, pola curah hujan, pola debit air yang masuk ke waduk dan tampungan waduk.

2. Sumber polutan WGM dan Kualitas Perairan WGM

a. Jenis Penelitian dan Perancangan Penelitian

Penelitian tahap ini dilakukan untuk menjawab rumusan masalah yang pertama. Penelitian ini merupakan penelitian *deskriptif spasial-laboratoris*, untuk menggambarkan eksisting aliran sumber timbulan limbah *based on activity* masyarakat di DTA WGM, melalui peta spasial berdasarkan analisis data laboratorium.

b. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan dan alat yang digunakan pada penelitian ini bermacam-macam, disesuaikan dengan tujuan penelitian.

- 1) Bahan dan alat yang digunakan untuk menganalisis parameter polutan, dari sumber polutan yang berasal dari kegiatan masyarakat di DTA maupun di dalam perairan WGM, berdasarkan prosedur terstandar nasional dan internasional, yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Public Health Association* (APHA). Secara lengkap alat dan bahan pada masing-masing parameter yang dianalisis pada penelitian ini disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Alat dan Bahan Penelitian Laboratorium

Kegiatan Penelitian	Alat Penelitian	Bahan Penelitian
1. Sampling limbah, 6989.59:2008	air SNI	Water sampler, GPS, Jerigen, bok pendingin.
Sampling permukaan, 6989.57:2008	air SNI	
Sampling Sedimen dan Ikan	<i>Eckman Grabe Sampler</i> , jaring dan plastik PE	
2. Analisis parameter fisika		
a. Suhu SNI 06-6989.23-2005	Termometer air raksa skala 110°C	
b. TSS SNI 06-6989.27-2005	Neraca analitik, cawan porselen, oven, tanur, penjepit kertas, penjepit cawan, alat penyaring yang dilengkapi dengan penghisap, penangas air, pipet dan desikator.	Air suling dengan daya listrik 2 μ S/cm, kertas saring bebas abu,
3. Analisis parameter kimia		
c. BOD SNI 6989.72:2009	Botol DO, <i>water cooler</i> , botol dari gelas 5L-10L, pipet volumetrik 1,0mL &10mL, labu ukur 100,0 mL; 200,0 mL & 1000 mL, pH meter, DO meter, <i>shaker</i> , blender, oven, timbangan analitik	Air bebas mineral, buffer fosfat pH 7,2, MgSO ₄ 0,225%, CaCl ₂ 0,275%, larutan suspensi bibit mikroba, larutan pengencer, larutan glukosa-asam glutamat, NaOH 1N, H ₂ SO ₄ 1N, Na ₂ SO ₃ 0,01575%, inhibitor nitrifikasi Allylthiourea, KI 10%, indikator amilum 2%.

- d. COD
SNI 6989.73:2009
- Digestion vessel, heating block*, mikroburet, labu ukur 100,0 mL dan 1000,0 mL, pipet volumetrik 5,0 mL; 10,0 mL; 25,0 mL, pipet ukur 5,0 mL; 10,0 mL; 25,0 mL, Erlenmeyer, gelas piala, *magnetic stirrer*, timbangan analitik dengan ketelitian 0,1 mg.
- Air bebas organik, larutan pereaksi asam sulfat, larutan baku $K_2Cr_2O_7$ 0,01667M, larutan indikator ferroin, FAS 0,05M, NH_2SO_3H , H_2SO_4 pekat, Kalium Hidrogen Ftalat (KHP).
- e. P- PO_4
APHA 2012, Section 4500.PB.5 & 4500.OG
- Hot plate, Autoclave, Glass scoop*
- Indikator *Phenolphthalein*, H_2SO_4 pekat, $(NH_4)_2S_2O_8$ atau $K_2S_2O_8$, NaOH 1N
- f. N- NH_3
SNI 19-1655-1989
- Spektrofotometer 400-425 nm, kuvet ketebalan 1cm, labu destilasi lengkap dengan pendingin, pH meter, Tabung Nessler 50 mL, Alat gelas,
- Aquadest bebas amonium, Larutan: penyangga pospat, NaOH 1N & 6N, H_2SO_4 pekat, $ZnSO_4$, $KNaC_4H_4O_6$, H_3BO_4 , pereaksi Nessler, Baku amonium, NaAsO₂
- g. N- NO_3
APHA 2012, Section 4500- NO_3
- Spektrofotometer UV, *Cuvettes* 1cm, *Pipettor* 1-5 mL, *Cuvette Mixer*, Computer dan software.
- Larutan Nitrat stok 100 mg NO_3 -N/L, Nitrat bebas air.
- h. N- NO_2
SNI 6989.9-2004
- Spektrofotometer sinar tampak dengan kuvet silica, Labu ukur 50 mL-1000 mL, Pipet volumetrik 1 mL-50 mL, Pipet ukur 5 mL, Gelas piala 200 & 400 mL, Erlenmeyer 250 mL, Neraca analitik.
- Aquadest bebas nitrit, *Glass wool*, Kertas asring bebas nitrit dengan pori 0,45 μm , Larutan sulfanilamida $H_2NC_6H_4SO_2NH_2$, Larutan NED Dihidroklorida, $Na_2C_2O_4$ 0,05N, FAS 0,05N, Larutan induk nitrit 250 mg/L, $KMnO_4$ 0,05N.
- i. Cr
SNI 6989.65:2009
- SSA, labu ukur 110,0 mL & 1000,0 mL, pipet volumetrik 1,0 mL; 2,0 mL; 5,0 mL, 10 mL, 20 mL & 50 mL, gelas piala 100 mL, timbangan analitik, botol *polyethylene*.
- Air bebas mineral, HNO_3 p.a., larutan *matrix modifier* magnesium nitrat, serbuk CrO_3 , saringan membran berpori 0,45 μm , larutan HNO_3 0,05 M, larutan HNO_3 5%,

j. Cd SNI 6989.16:2009	AAS, Labu Ukur 100,0 mL; 500,0 mL; 1000,0 mL, Pipet volumetrik 1,0 mL; mL; 2,0 mL; 5,0 mL;10,0mL, Gelas Piala 500mL,botolpolyethylene, timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g dan kaca arloji	Air bebas mineral, HNO ₃ p.a.,
k. Cu SNI 6989.66:2009	AAS, Labu Ukur 100,0 mL; 500,0 mL; 1000,0 mL, Pipet volumetrik 1,0 mL; mL; 2,0 mL; 5,0 mL; 10,0 mL, Gelas Piala 500 mL, botol polyethylene, timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g dan kaca arloji	Logam Cu, air bebas mineral, HNO ₃ p.a., HNO ₃ 1:1, saringan berpori 0,45µm, HNO ₃ 0,05M, HNO ₃ 5%
l. Pb SNI 06-6989.46:2009	AAS, Labu Ukur 100,0 mL; 500,0 mL; 1000,0 mL, Pipet volumetrik 1,0 mL; mL; 2,0 mL; 5,0 mL; 10,0 mL, Gelas Piala 500 mL, botol polyethylene, timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g dan kaca arloji	Air bebas mineral, HNO ₃ p.a.,

4. Pemeriksaan biologis

a. Total Coliform APHA 2012, Section 9221-F	<i>Rotare fermentation tube, EC-MUG tube, water bath.</i>	EC-MUG <i>medium</i> : Tryptose, Lactose, Bile salts mixture, K ₂ HPO ₄ , NaCl, 4-Methylumbellifery-β-D-glucuronide (MUG), Reagent-grade water.
b. <i>Escherichia coli</i> APHA 2012, Section 9221-F	<i>Rotare fermentation tube, EC-MUG tube, water bath.</i>	EC-MUG <i>medium</i> : Tryptose, Lactose, Bile salts mixture, K ₂ HPO ₄ , NaCl, 4-Methylumbellifery-β-D-glucuronide (MUG), Reagent-grade water.

- 2) Peralatan yang digunakan untuk membuat peta spasial kondisi eksisting WGM adalah peta RBI Wonogiri dan peta dasar yang meliputi peta administrasi waduk, sub-DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo

hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro, peta penggunaan lahan, *software ArcView GIS*.

c. Populasi dan sampel penelitian

Populasi adalah keseluruhan obyek yang menjadi perhatian peneliti. Obyek penelitian ini dapat berupa makhluk hidup, benda-benda, sistem dan prosedur, fenomena, parameter-parameter, dll. Sedangkan sampel penelitian adalah anggota populasi yang diambil secara representatif untuk digunakan dalam penelitian. Titik pengambilan sampel, merupakan lokasi sampel sumber polutan, berupa outlet kegiatan masyarakat di DTA yang dapat mencemari waduk, outlet dan muara sungai tujuh sub DAS, serta *water bodys* WGM, diambil secara representatif, dan didata dengan GPS.

Populasi penelitian ini adalah perairan WGM dan DTA WGM yang meliputi tujuh anak sungai besar yang menjadi pengisi WGM, yaitu sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro.

Sampel penelitian meliputi 1) air limbah kegiatan masyarakat di hulu waduk (pertanian, permukiman, peternakan dan industri) yang diperkirakan menimbulkan pencemaran waduk, dan terdapat pada sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro, 2) air waduk di sekitar kegiatan KJA dan wisata 3) partisipasi masyarakat dari informan sekitar WGM, sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro. 4) Sedimen dan ikan pada zona tercemar di perairan WGM.

Pengambilan Sampel Penelitian: Berdasarkan Permenlh 01/2010, pemilihan lokasi pengambilan sampel ditentukan berdasarkan prioritas yang disusun, antara lain jumlah dan jenis kegiatan serta distribusi sumber dan jenis pencemar. Prioritas pemilihan lokasi pengambilan sampel disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Prioritas Pemilihan Lokasi Pengambilan Sampel

Parameter Prioritas	Lokasi Sampling Sumber Tertentu (PS)	Lokasi Sampling Sumber Tak Tentu (NPS)
Jumlah dan jenis kegiatan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aliran limbah dari jenis kegiatan dengan kontribusi pencemar dominan, dan berpotensi menghasilkan pencemar berbahaya 2. Jumlah lokasi sampling proporsional terhadap jumlah kegiatan sejenis yang mewakili 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aliran limbah dari jenis kegiatan dengan kontribusi pencemar dominan, dan berpotensi menghasilkan pencemar berbahaya 2. Jumlah lokasi sampling proporsional terhadap luas wilayah kegiatan sejenis yang mewakili
Distribusi pencemar sumber	<ol style="list-style-type: none"> 1. Outlet terakhir saluran pembuangan limbah menuju sumber air 2. Outlet terakhir pembuangan limbah setiap kegiatan/industri bergantung pada besar dominan dan toksisitas pencemar yang dihasilkan 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Daerah tangkapan pembuangan limbah kegiatan (misal daerah hulu dan hilir suatu ruas sungai sepanjang area kegiatan)

Titik pengambilan sampel sumber pencemar dari aktivitas penduduk di **DTA waduk**, ditentukan secara *stratified proporsional random sampling* berdasarkan *activity source* pada sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngunggan dan Wuryantoro, dengan memperhatikan keragaman aktifitas yang berpotensi menimbulkan pencemaran WGM. Berdasarkan citra satelit dan data sekunder pemanfaatan lahan setiap sub-DAS, dipilih kawasan pemanfaatan lahan yang secara proporsional dapat mewakili *activity source* sebagai sumber pencemar tersebar atau *non point source* (NPS) seperti pertanian, peternakan dan permukiman, dan sumber pencemar titik atau *point source* (PS) seperti limbah industri. Selanjutnya sampel air limbah NPS

diambil pada outlet irigasi sebelum masuk sungai. Sedangkan limbah PS, yang dikeluarkan industri diambil pada outlet industri tersebut. Sampling juga dilakukan pada outlet sungai pada tujuh sub-DAS dan inlet waduk dari tujuh sub DAS. Secara lengkap titik pengambilan sampel outlet dan muara sub DAS serta perairan WGM disajikan pada Tabel 8. Gambar peta lokasi sampling disajikan pada Lampiran.

Tabel 8. Lokasi Titik Sampling (Dalam Koordinat UTM)

No	Lokasi	mT	mU
1.	Outlet Keduang	0497582	9130361
2.	Muara Keduang	0491963	9130770
3.	Outlet Wiroko	0497106	9122953
4.	Muara Wiroko	0491999	9126051
5.	Outlet Temon	0492459	9118866
6.	Muara Temon	0491368	9119069
7.	Outlet Alang	S07°54'39.3"	E110°53'44.4"
8.	Outlet Solo Hulu	0488771	9117612
9.	Muara Solo Hulu-Alang	0488103	9121761
10.	Outlet Wuryantoro	0483651	9125932
11.	Muara Wuryantoro	S 07°54'39.3"	E 110°52'38.9"
12.	Karamba (Masyarakat)	0489375	9130382
13.	Karamba (Aquafarm)	0489437	9130147
14.	Outlet Unggahan	0486474	9122058
15.	Muara Unggahan	0486677	9121176
16.	Tengah Waduk	0488558	9126101
17.	Wisata	0490432	9131674

Menggunakan alat bantu GPS, pengambilan sampel dilapangan dilakukan dengan mengacu prinsip pengelolaan dan pengambilan sampel lingkungan (Hadi, 2005), SNI No. 6968.59.2008 tentang metode pengambilan contoh air limbah dan SNI 6989.57:2008 tentang metode pengambilan contoh air permukaan. Waktu pengambilan sampel air di waduk dilakukan sebanyak empat kali, dengan dua kali pada musim penghujan dan dua kali pada musim kemarau. Waktu pengambilan sampel sedimen dan ikan di zona tercemar, dilakukan pada musim kemarau dan penghujan. Pada musim kemarau sampel lebih mudah diambil karena debit airnya kecil dan WGM lebih dangkal. Sedangkan pada musim penghujan terjadi laju erosi permukaan tanah yang tinggi terbawa arus sungai ke waduk, sehingga diharapkan unsur-unsur yang mengendap dalam sedimen lebih banyak.

Titik pengambilan sampel sumber timbulan limbah dari aktivitas penduduk **di dalam waduk** (*water bodys*). Aktivitas masyarakat di dalam *water bodys* adalah budidaya ikan dengan sistem karamba jaring apung (KJA), yang mempunyai kontribusi menimbulkan pencemaran air melalui penumpukan sisa pakan di dalam air. Sampel air waduk diambil pada titik sekitar kawasan KJA yang dikelola oleh PT Aquafarm Nusantara. Karena berdasarkan hasil survey peneliti, kawasan ini mempunyai petak KJA dalam jumlah besar dan pakan diberikan secara terus-menerus dalam jumlah besar, sehingga diasumsikan perairan sekitar KJA tersebut berpeluang mengalami pencemaran yang disebabkan oleh sisa pakan yang mengendap bertahun-tahun. Sampel juga diambil pada titik KJA yang dikelola oleh perorangan, teknik pemeliharaan berbeda dengan PT Aquafarm Nusantara, pakan diberikan secara periodik dan KJA tidak dilengkapi dengan aerator. Seluruh titik pengambilan sampel air limbah dari kegiatan masyarakat di hulu WGM dan di dalam WGM disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Titik Pengambilan Sampel Air

Lokasi Penelitian	Titik Sampling	Jumlah Titik
<i>Water Bodies</i> WGM	Sekitar KJA	3
	Tengah waduk	1
	Inlet waduk	7
	Outlet waduk	1
	Area Wisata	1
Sub DAS Keduang	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4
Sub DAS Bengawan Solo Hulu	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4
Sub DAS Wiroko	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4
Sub DAS Temon	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4

Lokasi Penelitian	Titik Sampling	Jumlah Titik
Sub DAS Alang	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4
Sub DAS Ngunggahan	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4
Sub DAS Wuryantoro	Outlet kawasan pertanian, permukiman, industri & outlet sungai	4

Titik pengambilan sampel outlet sungai sub DAS, ditentukan berdasarkan debit sungai. Sungai dengan debit berkisar antara 5-150 m³/detik, sampel diambil pada dua titik masing-masing pada jarak 1/3 dan 2/3 lebar sungai, pada kedalaman 0,5 kali kedalaman dari permukaan, sehingga diperoleh sampel air dari permukaan sampai dasar secara merata, kemudian sampel dicampurkan (*integrated sample*) (SNI 6989.57:2008).

Titik pengambilan sampel air pada inlet WGM, yaitu di perairan waduk tempat masuknya air sungai, dengan jarak ± 100 m dari muara sub DAS yang diperkirakan telah terjadi pencampuran air sungai dengan air waduk. Karena kedalaman inlet WGM kurang dari 10 m, maka sampel air diambil di dua titik, yaitu permukaan dan bagian dasar waduk, kemudian dicampurkan sebagai sampel komposit kedalaman (SNI 6989.57:2008).

Prosedur Pengambilan sampel. Prosedur yang dilakukan dalam pengambilan sampel di lapangan sampai analisis laboratorium adalah (WHO/UNEP, 1996): 1) menyiapkan wadah sampel; 2) membilas wadah sampel dengan air suling; 3) menyiapkan alat pengambil sampel yang sesuai dengan keadaan sumber air; 4) membilas alat pengambil sampel dengan air suling; 5) membilas alat pengambil sampel sebanyak 3 kali dengan sampel yang akan diambil; 6) mengambil sampel sesuai titik sampling dan memasukkannya ke dalam wadah yang sesuai peruntukkan analisis; 7) mengukur, mencatat kondisi lapangan dan membuat peta lokasi; 8)

melakukan dengan segera pengujian parameter lapangan, seperti suhu, pH dan DO yang dapat berubah dengan cepat dan tidak dapat diawetkan; 9) hasil pengujian parameter lapangan dicatat dalam buku catatan; 10) memberi label pada wadah sampel; 11) melakukan pengawetan sesuai peruntukkan pengujian; 12) menganalisis sampel di laboratorium.

d. Variabel Penelitian

Variabel yang akan digunakan dalam sebuah penelitian perlu ditetapkan, didefinisikan, dan diklasifikasikan. Jumlah variabel yang digunakan bergantung dari keluasan penelitian yang akan dilakukan (Nasir, 2003). Variabel penelitian adalah obyek pengamatan yang menjadi perhatian peneliti. Pada penelitian ini ada beberapa variabel yang menjadi perhatian untuk dilakukan penelitian, yaitu beban pencemaran, toksisitas dan model pengendalian pencemaran.

Variabel bebas pencemaran dalam penelitian ini didefinisikan sebagai beban pencemar yang masuk ke WGM, berasal dari sumber pencemar di DTA, berupa limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas masyarakat, yang berpotensi menimbulkan pencemaran sungai dan aktivitas masyarakat di dalam waduk, sehingga dapat mempengaruhi kualitas perairan WGM. Jadi **variabel bebas** dalam penelitian ini adalah sumber pencemar dari DTA dan dalam waduk, yaitu pertanian, permukiman, industri dan KJA. Sedangkan **variabel terikat** dalam penelitian ini adalah beberapa parameter kualitas air, yaitu pH, TSS, DO, BOD, COD, N-NO₂, N-NO₃, N-NH₃, P-PO₄, Mn, Cu, Fe, Cr, Zn, *E-coli* dan Total *Coliform*.

e. Definisi Operasional

Definisi operasional beberapa hal yang menyangkut penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Perairan WGM adalah badan air waduk Gajah Mungkur Wonogiri, yang mempunyai luas 8800 ha, yang mendapatkan pasokan air dari sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro.

- 2) Kualitas Lingkungan Perairan WGM adalah gambaran mutu air yang ditetapkan berdasarkan baku mutu air kelas 2 PP 82/2001, terhadap parameter fisika, kimia dan biologi.
- 3) Model Pengendalian Pencemaran adalah model pengendalian pencemar terhadap pencemar dominan dan yang disimulasikan menggunakan *software original powersim studio 10*.
- 4) Beban limbah adalah jumlah polutan yang masuk ke badan air waduk, yang berasal dari kegiatan masyarakat di DTA yaitu pertanian, industri tahu dan KJA .
- 5) Populasi penelitian adalah keseluruhan obyek yang menjadi perhatian peneliti yaitu perairan WGM dan DTA WGM yang meliputi 7 anak sungai besar yang menjadi pengisi WGM, yaitu sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngunggungahan dan Wuryantoro
- 6) Variabel penelitian ini adalah adalah beban pencemaran, toksisitas dan model pengendalian pencemara

f. Teknik Pengumpulan Data Penelitian

Pengumpulan data penelitian ini secara ringkas disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Matrik Pengumpulan Data Penelitian

Tujuan Penelitian	Indikator	Sumber Data	Teknik Analisis Data
Peta spasial profil eksisting sumber polutan yang masuk ke WGM	1. Sumber Timbulan polutan & KJA	Data sekunder berupa: <ol style="list-style-type: none"> a. RBI wilayah yang dilewati aliran DAS b. Data Geografis wilayah administratif Kabupaten, kecamatan dan desa c. Data hidrologis 7 sub DAS dan penetapan titik sampling Data primer analisis lab sumber polutan	Peta RBI yang digunakan adalah pemetaan tahun 2006 skala 1:25.000. Peta RBI menjadi peta dasar yang lebih lanjut dibuat peta administrasi daerah penelitian, peta kegiatan masyarakat penghasil limbah di wilayah DAS, peta lokasi sampling. Dilakukan di lab GIS Geografi UNS/UGM
	2. Kualitas Air DAS dan KJA	7 sub Data primer dari analisis laboratorium terhadap parameter fisika (suhu, TSS), kimia (pH, Pb, Cr, Cd, CO ₂ , DO, BOD, COD, N-NO ₃ , N-NO ₂ , N-NH ₃ , P-PO ₄) dan biologi (<i>E-coli</i> dan <i>Total Coliform</i>)	Data lab dianalisis dengan metode storet PP 82/2001 untuk menentukan kualitas mutu air

Tujuan Penelitian	Indikator	Sumber Data	Teknik Analisis Data
3.	Beban limbah yang masuk ke waduk	Data primer hasil analisis laboratorium	a. Dari luar waduk, berdasarkan debit dan data lab. b. Dari aktivitas penduduk sekitar, menggunakan rapid assesment c. Dari KJA, pendugaan total bahan organik
4.	Kapasitas asimilasi	Data primer hasil analisis laboratorium	Dihitung dari beban limbah outlet sungai dan muara waduk dan diolah dengan regresi linear pada grafik scatter
5.	Sosial ekonomi budaya masyarakat	Data sekunder dari Bappeda, BPDAS, PJT, BBWS dan observasi	Metode grafik
6.	Persepsi & partisipasi masyarakat serta Pakar tentang pengelolaan waduk	Data primer dari FGD dan wawancara mendalam	Analisis Kebutuhan
7.	Kualitas sedimen zona tercemar terhadap logam berat	Data primer analisis laboratorium pada sampel sedimen	a. <i>Dutch Quality Standard for metals in Sediment</i> b. Indeks kualitas sedimen dihitung berdasarkan nilai SQG-Q
8.	Toksisitas logam Cu pada sedimen zona tercemar	Data primer analisis laboratorium pada sampel sedimen	Analisis Probit
9.	Isolasi dan identifikasi keanekaragaman mikroorganisme dalam sedimen zona tercemar	Data primer laboratorium pada sampel sedimen	Uji cat gram dan uji biokimia

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup nomor 01 tahun 2010, data yang dibutuhkan untuk mengestimasi tingkat pencemar nutrisi dari sumber pencemar pertanian ditinjau dari senyawa N dan P adalah: 1) jumlah pupuk yang dibutuhkan, 2) komposisi nutrisi (N dan P) dalam pupuk, 3) rasio partisi seperti persentase zat yang mudah larut (data kelarutan), 4) data pupuk residu yang diperoleh dari analisis sampel air dan tanah.

g. Teknis Analisis Data Penelitian

Analisis Data Penelitian kondisi eksisting sumber timbulan limbah, dari DTA dan dalam waduk serta perairan WGM, dapat digambarkan dengan membandingkan data laboratorium parameter fisika, kimia dan mikrobiologi dengan kriteria mutu air PP 82 Tahun 2001 pada kelas dua. Analisis spasial sumber timbulan limbah, beban pencemaran yang masuk ke WGM melalui Sub-DAS, Keadaan sosial ekonomi budaya masyarakat dengan *software ArcView GIS*, sehingga dapat diperoleh **peta spasial profil kondisi eksisting WGM**.

Beban pencemaran WGM menggambarkan jumlah suatu unsur pencemar yang terkandung dalam air WGM atau air limbah dari sumber timbulan limbah yang masuk ke badan WGM. Analisis beban pencemaran dengan perhitungan yang didasarkan atas pengukuran debit sungai dan konsentrasi limbah di muara sungai berdasarkan persamaan menurut Mitsch & Goesselink (1993 dalam Marganof, 2007):

$$BP = Q \times C$$

Keterangan:

BP : beban pencemaran pertahun (ton/tahun)

Q : debit sungai (m³/detik)

C : konsentrasi limbah (mg/liter)

Total beban pencemaran dari seluruh DAS yang bermuara di perairan waduk dihitung dengan persamaan:

$$TBP = \sum_{i=1}^n (B.P)$$

Keterangan: TBP = Total beban pencemaran

n = Jumlah DAS

i = Beban limbah sungai ke-i

Untuk mengkonversi beban limbah ke dalam ton/tahun dikalikan dengan $10^{-6} \times 3600 \times 24 \times 360$.

Estimasi besarnya beban pencemaran yang berasal dari aktivitas penduduk di sekitar perairan waduk dilakukan berdasarkan pendekatan *Rapid Assesment* (Marganof, 2007) dengan persamaan:

$$BP = a \times f$$

Keterangan: BP = beban pencemaran pertahun (ton/tahun)

a : jumlah unit penghasil limbah

f : faktor konstanta beban limbah organik

Tabel 11. Faktor Konstanta Beban Limbah Organik

Aktivitas	Konversi			
	BOD	COD	TP	TN
Permukiman	53	101,6	22,7	3,8
Peternakan	694,4	1620	223,1	8,6
Pertanian	-	-	0,04	1,68

Sumber: Marganof (2007)

Analisis data besarnya beban limbah yang berasal dari kegiatan KJA dilakukan dengan metode pendugaan total bahan organik (Marganof, 2007) dengan persamaan:

$$O = TU \times TFW$$

Keterangan:

O = total output bahan organik partikel

TU = total pakan yang tidak dikonsumsi

TFW = total limbah feses

2. Persepsi masyarakat

- a. **Peralatan yang digunakan** untuk analisis persepsi dan perilaku masyarakat tentang pengendalian pencemaran, adalah 1) daftar pertanyaan yang akan menjadi bahan diskusi pada *Focus Group Discussion* (FGD) dan *indepth interview*, 2) pedoman *indepth interview*, dan 3) pedoman FGD. Pedoman diperlukan agar proses *indepth interview* dan FGD tidak menyimpang dari tujuan penelitian. Pedoman disusun berdasarkan tujuan penelitian yaitu

pengendalian pencemaran perairan WGM, dan berdasarkan kajian teori yang berhubungan dengan masalah penelitian. 4) Alat perekam, digunakan untuk membantu peneliti dalam pengambilan data, dengan cara merekam selama diskusi dan wawancara terhadap informan.

- b. **Pengambilan sampel persepsi partisipasi** masyarakat a) di wilayah DTA sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngunggahan, dan Wuryantoro, b) masyarakat pengelola KJA, dan c) Pakar. Sampel penelitian ini ditentukan menggunakan metode *multiple stage random sampling*, karena secara geografis populasi menyebar dan meliputi area DTA wilayah Wonogiri yang mempunyai luas 1.244 km². Teknik pengambilan sampel dimulai dengan tahap menentukan secara acak kecamatan terpilih pada masing-masing DTA wilayah Sub DAS. Dari tiap kecamatan terpilih, dipilih desa penelitian secara acak. Pada tiap desa terpilih, akan dipilih secara acak sederhana informan yang mengetahui dan bertanggung jawab terhadap obyek penelitian. Informan merupakan orang dewasa dengan pekerjaan petani, nelayan, ibu rumah tangga, pemilik dan pekerja industri yang dalam kehidupan sehari-hari berkaitan langsung dengan pembuangan limbah cair.

c. **Teknik Pengumpulan Data Penelitian**

Penelitian persepsi dan perilaku masyarakat di DTA pada sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Solo hulu, Alang, Ngunggahan, Wuryantoro dan sekitar WGM, serta pakar, tentang peran serta masyarakat dalam hal pengendalian pencemaran WGM. Metode yang digunakan untuk pengambilan data adalah *in-depth interview* dan *Focus Group Discussion* (FGD). Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

- a) Tahap pembuatan pedoman pertanyaan *indepth interview* dan FGD, yang berisi pertanyaan mendasar yang akan dikembangkan dalam diskusi maupun wawancara mendalam dengan informan.
- b) Tahap pelaksanaan diskusi dan *indepth interview*. Berdasarkan kesepakatan dengan informan, peneliti melakukan pengambilan data penelitian.

Teknik Pengambilan Data Penelitian. Metode pengambilan data primer tanggapan yang melibatkan responden pakar dilakukan melalui wawancara mendalam (*in-depth interview*). Wawancara mendalam dilakukan dengan menggunakan pedoman (*guide*) wawancara untuk menjawab pertanyaan *how and why* seputar pengendalian pencemaran WGM. Para pakar yang dilibatkan dalam penelitian ini adalah beberapa pihak yang mempunyai kepentingan dan keterkaitan secara langsung maupun tidak langsung terhadap pengendalian pencemaran perairan WGM. Pakar yang terkait langsung adalah 1) Dinas terkait, meliputi: Dinas Lingkungan Hidup, Bappeda, Dinas Kelautan dan Perairan, Dinas Pariwisata, Jasa Tirta, PLTA, PDAM, Dinas Pertanian dan BPDAS. 2) Akademisi, meliputi para peneliti yang melakukan penelitian di WGM. 3) Lembaga Swadaya Masyarakat, yaitu lembaga yang dibentuk masyarakat setempat yang mempunyai kepedulian terhadap kelestarian perairan WGM.

Metode pengambilan data primer tanggapan masyarakat di wilayah DTA sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Solo hulu, Alang, Ngunggan, Wuryantoro. dan sekitar WGM menggunakan *Focus Group Discussion* (FGD). FGD dinilai paling tepat dalam menggali permasalahan yang bersifat spesifik, khas, dan lokal. FGD yang melibatkan masyarakat setempat dipandang sebagai pendekatan yang paling sesuai. Beberapa persiapan FGD meliputi: 1) Membentuk tim ; 2) Memilih tempat dan mengatur tempat; 3) Menyiapkan logistik; 4) Menentukan jumlah peserta; dan 5) Rekrutmen peserta.

d. Teknis Analisis Data Penelitian

Analisis data persepsi perilaku masyarakat dan pakar tentang pengelolaan waduk. Analisis data primer yang diperoleh dari wawancara mendalam dengan informan pakar, menggunakan analisis naratif, *hermeneutik*. Sedangkan analisis data primer FGD menggunakan analisis naratif, hermeneutik, entografi. Hasil pencatatan selama proses pengambilan data primer dikelompokkan secara rinci berdasarkan kategori sesuai kata kunci yang muncul. Selanjutnya dirangkum dan dianalisis hubungan antar katagori untuk kemudian

diambil kesimpulan. Analisis spasial persepsi partisipasi masyarakat dalam pengelolaan perairan WGM dengan *software ArcView GIS*.

3. Toksisitas logam berat zona tercemar

a. Jenis Penelitian dan Perancangan Penelitian

Penelitian tahap ini dilakukan untuk menyelesaikan rumusan masalah yang ke dua. Penelitian ini merupakan penelitian *deskriptif spasial-laboratoris*, untuk menggambarkan sebaran logam berat dalam sedimen dan ikan pada zona tercemar, yang telah dipetakan pada penelitian pertama.

b. Bahan dan Alat Penelitian

Bahan dan peralatan yang digunakan, untuk mengambil sampel sedimen pada zona tercemar, di perairan WGM adalah *Eckman Grabe Sampler*, plastik PE dan bok pendingin. Peralatan untuk menangkap ikan adalah jaring. Peralatan untuk mengukur logam berat pada sedimen dan ikan, antara lain: oven, penangas, AAS, HNO₃ pekat, larutan pereaksi, H₂SO₄. Secara lengkap disajikan pada Tabel 6.

c. Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi penelitian tahap ini adalah sedimen dan ikan pada zona tercemar di WGM. Sampel sedimen berupa sedimen permukaan yang ada di zona tercemar di WGM, yaitu di titik muara Wuryantoro, Bengawan Solo Hulu-Alang, muara Wiroko, Muara Keduang, KJA petani ikan tradisional, KJA PT Aquafarm, tengah waduk, daerah bebas dan daerah wisata. Sedangkan ikan yang digunakan sebagai sampel penelitian adalah ikan nila merah (*Oreochromis niloticus*), yang berada di zona tercemar tersebut.

Teknik pengambilan sampel sedimen dan ikan pada zona tercemar.

- 1) **Sampling sediman**, berdasarkan USEPA (2005), pengambilan sampel sedimen dapat dilakukan dengan urutan sebagai berikut: a) dilakukan pada perairan WGM di titik zona tercemar hasil pemetaan penelitian tahap pertama, b) sampel sedimen diambil menggunakan *Eckman Grabe Sampler*.

Pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan menurunkan *Eckman Grabe sampler* dalam posisi terbuka dan lurus, diturunkan secara perlahan hingga dirasa telah menyentuh dasar waduk. Kemudian *Eckman Grabe sampler* sedikit digoyangkan agar mulutnya menutup dan secara cepat ditarik kembali ke atas. *Eckman Grabe sampler* kemudian dibuka dan sampel sedimen yang ada di dalamnya dituangkan ke dalam wadah, kemudian air yang ada di dalam wadah tersebut dibuang sehingga yang tersisa adalah sedimen (Nisa, dkk., 2013). c) Sampel sedimen kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik bebas kontaminan dan diberi label sesuai dengan kode lokasi, plastik ditutup tanpa ada rongga udara. d) Dengan menggunakan bok pendingin sampel sedimen dibawa ke laboratorium untuk dilakukan analisis. e) Mencatat temperatur, pH, warna sedimen dan salinitas. f) Dengan box pendingin, sampel sedimen di bawa ke laboratorium untuk dianalisis kandungan logam berat, bentos dan mikroorganismenya.

- 2) **Pengambilan sampel ikan** nila merah (*Oreochromis niloticus*). Jenis ikan ini merupakan salah satu biota yang direkomendasikan oleh USEPA sebagai hewan uji untuk studi toksikologi, karena penyebarannya cukup luas, banyak dibudidayakan, mempunyai kemampuan yang tinggi dalam mentolerir lingkungan yang buruk, dan mudah dipelihara di laboratorium. Disamping itu ikan nila merupakan ikan yang paling banyak dibudidayakan diperairan WGM menggunakan sistem KJA. Jadi ikan yang diambil untuk penelitian ini adalah ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang dibudidayakan di KJA, diambil yang siap panen pada petak milik Aqufarm Nusantara, dengan menggunakan jaring. Ikan dimasukkan ke dalam plastik dan bok pendingin, kemudian dibawa ke laboratorium, untuk di analisis kandungan logam beratnya.

d. Variabel Penelitian

Variabel penelitian pada tahap ini, adalah unsur kimia dominan, meliputi variabel terikat adalah logam berat Hg, Cu, Cd, Pb, Cr, Ni dan mikro bentos. Sedangkan variabel bebas adalah titik sampling pada zona tercemar. Unsur

kimia dominan yang dimaksudkan pada penelitian ini adalah parameter-parameter air waduk hasil uji laboratorium, setelah diuji dengan Storet dinyatakan tercemar ringan sampai berat. Polutan logam berat yang berada zona tercemar merupakan akumulasi dari limbah kegiatan masyarakat di DTA dan di perairan WGM. Logam berat yang masuk ke perairan waduk akan dipindahkan dari badan air melalui pengendapan, absorpsi dan adsorpsi oleh organisme perairan. Logam berat mempunyai sifat mudah mengikat bahan organik dan mengendap didasar perairan dan bersatu dengan sedimen. Sedimen dan ikan dipilih sebagai variabel bebas untuk menguji variabel tetap kandungan logam berat. Toksisitas pada sistem lingkungan merupakan hasil kontaminasi oleh pestisida, industri kimia atau logam berat (Boyd, 2005). Uji toksisitas logam berat pada zona tercemar merupakan uji LC_{50} terhadap biota uji ikan nila (*Oreochromis niloticus*), pada paparan 96 jam dalam larutan logam berat yang dominan di sedimen, ikan dan air dengan konsentrasi tertentu. Variabel bebas pada uji toksisitas adalah variasi konsentrasi logam berat dari 0; 2; 4; 8 mg/L (Boyd, 2005).

e. **Teknik Pengumpulan Data Penelitian**

Prosedur analisis logam berat dalam sedimen pada zona tercemar.

Sedimen dari masing-masing titik sampling dimasukkan ke cawan porselin dikeringkan dalam oven pada suhu $\pm 60^{\circ}\text{C}$ selama 2 hari. Sedimen kering disortir digerus dengan mortir dan dihomogenkan. Sebanyak 2 gram sampel didestruksi dengan 20 ml *aquaregia* ($\text{HNO}_3\text{-HCl}$, 1:3) dalam beker glas yang ditutup dengan kaca arloji. Kemudian didestruksi di atas hotplate dengan suhu $110\text{-}140^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam, menurut Chen dan Ma (2001; Birch et al, 2001 dalam Utomo dkk., 2011). Hasil destruksi disaring dan diencerkan dengan aquades hingga volume 100 mL. Filtrat hasil destruksi sedimen diukur absorbansinya dengan AAS.

Prosedur analisis logam berat dalam daging ikan. Daging diambil dari masing-masing ikan, masing-masing dipotong-potong kecil-kecil dan ditimbang massa basahanya, kemudian dicuci dengan akuades dan dikeringkan dalam oven pada temperatur 100°C selama 8 jam, Jordao et al (2002, dalam

Utomo dkk., 2011) melakukan pada suhu 70°C selama 48 jam. Daging ikan kering masing-masing digerus hingga halus dalam mortar, dihomogenkan dan dipanaskan lagi dalam oven pada temperatur 80°C selama 1 jam. Daging ikan kering yang diperoleh ditimbang massa keringnya dan disimpan dalam desikator sampai masa konstan. Sampel ikan kering halus ditimbang seberat 8 gram, dimasukan dalam gelas beker dan ditambahkan 10 mL HNO₃ pekat, didiamkan selama 1 malam untuk permulaan dekomposisi (Utomo dkk., 2011) atau larutan dipanaskan 2 jam, larutan ditambah HNO₃ pekat 5 mL dan dipanaskan lagi 2 jam, kemudian di tambah 5 ml HNO₃ pekat dan dipanaskan lagi selama 3 jam atau sampai diperoleh larutan jernih kekuningan. Larutan didinginkan pada suhu kamar, diencerkan dalam labu ukur hingga 50 mL dengan akuabides. Filtrat hasil destruksi sedimen diukur absorbansinya dengan AAS.

Prosedur analisis LC₅₀ pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*) meliputi sebanyak 3 tahap, yaitu 1) Tahap persiapan wadah uji, air dan larutan media uji. Untuk pemeliharaan adalah air WGM yang telah disaring, dan dilakukan aklimatisasi untuk penyesuaian kondisi lingkungan baru. 2) Melakukan penelitian pendahuluan untuk menentukan konsentrasi batas atas (LC₁₀₀-96 jam), yaitu konsentrasi tertinggi logam berat yang tidak dapat mematikan ikan nila dan konsentrasi batas bawah (LC₀-96jam), yaitu konsentrasi terendah logam berat yang dapat mematikan ikan nila. Berdasarkan data uji pendahuluan kemudian dibuat larutan uji pada kisaran tersebut, dan kontrol 0 ppm (Hendri, dkk., 2010). 3) Membuat 5 deret konsentrasi logam berat yang berada pada ambang atas dan bawah untuk menentukan nilai median letal LC₅₀ dengan paparan 96 jam. 4) Memaparkan 20 ekor ikan nila pada media uji selama 96 jam. 5) Melakukan penggantian larutan uji setiap 24 jam, untuk mempertahankan kualitas air pada parameter pH dan DO sesuai kualitas air perikanan, agar kualitas media uji tetap terjaga, sehingga tidak mempengaruhi pengukuran. 6) Menghitung jumlah ikan yang mati setelah 96 jam pemaparan. 7) Menentukan LC₅₀-96 jam menggunakan analisis Probit (USEPA, 2002).

f. Teknik Analisis Data Penelitian.

Analisis data kajian hidrokimia sebaran toksisitas logam berat pada zona tercemar. Penelitian pada tahap ini didahului dengan membuat zonasi status mutu air WGM, berdasarkan analisis data laboratorium pada masing-masing titik sampling inlet WGM dan KJA, menggunakan metode STORET pada mutu air kelas 2 PP 82 Tahun 2001. Tujuan kajian ini untuk mempelajari sebaran logam Hg, Pb, Cr, Mn, Cu, Fe dan Zn pada zona tercemar dalam sampel sedimen dan ikan. Menurut Emadodin (2011), sedimen merupakan geoindikator terjadinya pencemaran lingkungan akibat kegiatan manusia dalam jangka panjang. Penelitian tahap ini dilakukan setelah peneliti dapat menentukan zonasi kualitas perairan WGM. Logam berat Hg, Pb, Cr, Mn, Cu, Fe dan Zn pada perairan WGM dapat mengalami pengendapan dan bioakumulasi, sehingga dapat ditemukan dalam daging ikan, bentos dan sedimen. Logam berat dalam daging ikan dan sedimen berkorelasi dengan konsentrasi logam berat di perairan pada zona tercemar.

Teknik Analisis Data, berdasarkan hasil pengukuran AAS pada tiap sampel sedimen dan ikan diperoleh konsentrasi logam berat dalam satuan ppm, selanjutnya dikonversikan dalam mg/kg massa kering sedimen dan mg/kg massa basah daging ikan, dihitung dengan rumus (Utomo dkk, 2011):

$$\frac{mg}{kg} \text{ massa kering} = \frac{\left[A(ppm) \times Y \frac{ml}{1000ml} \right]}{X} g \times 1000 \frac{g}{kg}$$

Keterangan:

A: kadar logam berat sampel terukur AAS (ppm)

Y: volume akhir destruksi (mL)

X: massa sampel yang didestruksi (g)

Kandungan logam berat pada sedimen dibandingkan dengan standar baku mutu dari ANZECC dan Swedia Environmental Protection Agency (SEPA). Sedangkan kandungan logam berat dalam ikan dibandingkan dengan SNI No. 7387 : 2009 tentang Batas Maksimum Cemar Logam Dalam Pangan. (Hidayah dkk., 2012), disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Standar Mutu Logam Berat Pada Sedimen berdasar ANZECC dan SEPA

No	Logam Berat	Satuan	ANZECC	SEPA Th 2000
1	Pb	mg/kg	-Low	0- kelas I
2	Cd	mg/kg	1,5-Low	≤0,8-kelas I
3	Cr	mg/kg	80-low	≤10-kelas I
4	Cu	mg/kg	65-low	

Sumber: Hidayah dkk., 2012

Analisis mutu logam berat dalam sedimen dapat dapat juga ditentukan berdasarkan *Dutch Quality Standard for metals in Sediment*, yang membagi kualitas mutu menjadi 5 level, yaitu 1) level target, jika konsentrasi kontaminan yang ada pada sedimen memiliki nilai di bawah nilai level target, maka substansi yang ada pada sedimen tidak terlalu bahaya bagi lingkungan. 2) level limit, jika konsentrasi kontaminan yang ada pada sedimen memiliki nilai maksimum yang dapat ditolerir bagi kesehatan manusia maupun ekosistem. 3) level tes, jika konsentrasi kontaminan yang ada pada sedimen berada pada kisaran nilai antara level limit dan level tes, maka dikategorikan sebagai tercemar ringan. 4) level intervensi, jika konsentrasi kontaminan yang ada pada sedimen berada pada kisaran nilai antar level tes dan level intervensi, maka dikategorikan sebagai tercemar sedang. 5) level bahaya, jika konsentrasi kontaminan yang ada pada sedimen berada pada nilai lebih besar dari level bahaya, maka dikategorikan sangat tercemar. Secara lengkap nilai baku mutu logam berat ke lima level tersebut disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Nilai Baku Mutu Logam dalam Sedimen Berdasarkan *Dutch Quality Standard for Metals in Sediment*

Logam	level Target	level Limit	Level Tes	Level Interferensi	level Bahaya
Ni	3,5	35	45	210	200
Cd	0,8	2	7,5	12	30
Cu	35	35	90	190	400
Cr	100	380	380	380	1000
Arsen	29	55	55	55	150

Sumber: IADC/CEDA, 1997 dalam Dani 2012

Estimasi LC_{50} dapat ditentukan dengan model Probit dan model Logit (Hamilton et.al., 1977). Analisis data mortalitas hewan uji pada uji utama, merupakan acuan

untuk menghitung nilai LC_{50} dengan analisis Probit (*probability unit*). Prosen mortalitas dihitung dengan rumus, sebagai berikut:

$$\% \text{ mortalitas} = \frac{\text{jumlah ikan mati}}{\text{jumlah ikan uji}} \times 100\%$$

Berdasarkan prosen mortalitas, nilai probit dapat ditentukan. Nilai probit dari % mortalitas hewan uji merupakan fungsi linear $y = a + bx$

Nilai LC_{50-96} didapat dari hasil antilog nilai uji m . Nilai m merupakan nilai x pada persamaan, dan nilai y merupakan Probit mortalitas sebesar 50% (Hendri, dkk, 2010). Nilai y dilihat dari Tabel Probit, disajikan pada Tabel 12. Nilai LC_{50-96} jam diperoleh dari antilog m , dimana m merupakan logaritma konsentrasi logam berat pada $y=5/\text{nilai Probit } 50\% \text{ hewan uji}$.

$$m = \frac{5 - a}{b}$$

$$b = \frac{\sum XY - 1/n(\sum X \sum Y)}{\sum X^2 - 1/n(\sum X)^2}$$

$$a = \frac{1}{n} (\sum Y - b \sum X)$$

Tabel 14. Transformasi % Kematian Hewan Uji ke Tabel Probit.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
—	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Sumber: USEPA, 2002

4. Pemodelan pengendalian pencemaran

a. Jenis Penelitian dan Perancangan Penelitian

Penelitian tahap ini dilakukan untuk menjawab rumusan masalah yang ke tiga. Penelitian ini merupakan penelitian *deskriptif-analitik ex ante*, yaitu menganalisis kebijakan suatu fenomena yang belum terjadi. Subyek penelitian adalah fenomena penurunan kualitas perairan WGM akibat aliran beban limbah kegiatan penduduk di DTA dan di dalam waduk. Sedangkan pemodelan sistem pengendalian pencemaran WGM dengan menggunakan metodologi *System Dynamics*.

Wilayah yang dimodelkan adalah sumber timbulan limbah *based on activity* masyarakat di DTA, yang digambarkan sebagai sub model limbah dominan yang mengalir ke WGM melalui 7 sub DAS dan limbah KJA sebagai sub model limbah KJA. Model akan dapat mencerminkan proses pengendalian pencemaran perairan WGM.

b. Peralatan dan bahan penelitian

Peralatan yang digunakan untuk simulasi model pengendalian pencemaran WGM adalah *software powersim studio 10*

c. Variabel Penelitian

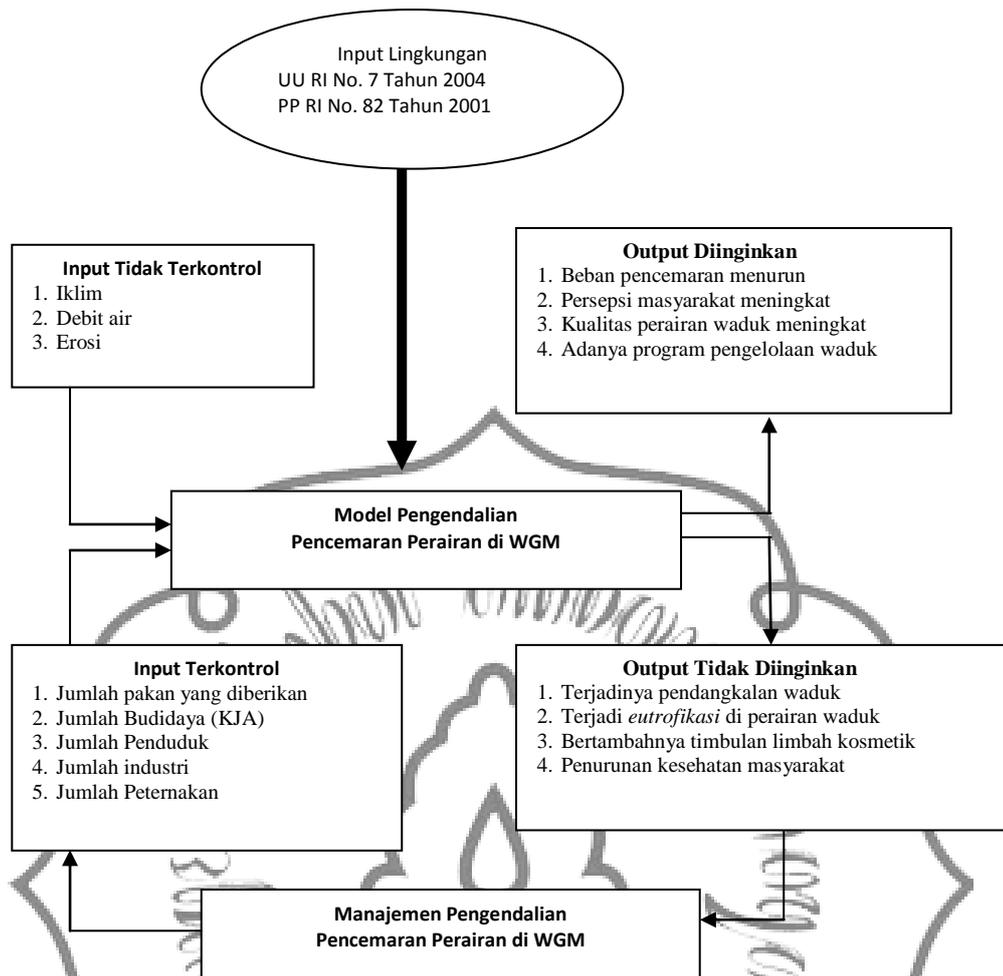
Variabel penelitian yang digunakan dalam model *system dynamics* ini dikelompokkan ke beberapa variabel kunci. Variabel-variabel kunci ditetapkan sesuai dengan aspek penelitian yaitu:

- 1) Aspek lingkungan, variabel kuncinya adalah debit limbah, parameter polutan dominan, sumber polutan, beban limbah dan sedimentasi.
- 2) Aspek kapasitas asimilasi waduk, mempunyai variabel kunci COD, P-PO₄ dan TSS
- 3) Aspek sosial, variabel kunci yang ditetapkan adalah penduduk dan permukiman.

d. Teknik Pengumpulan Data Penelitian

Analisis kajian model pengendalian pencemaran perairan WGM menggunakan *system Dynamics*. Penelitian tahap akhir ini adalah membuat model pengendalian pencemaran WGM dengan pendekatan *system dynamics*. Berdasarkan data eksisting tentang fenomena penurunan kualitas perairan WGM, yang dipengaruhi oleh aliran beban limbah dari kegiatan masyarakat di luar WGM, yang masuk ke perairan WGM melalui Sub DAS Keduang, Sub DAS Wiroko, Sub DAS Alang, Sub DAS Ngunggungan, Sub DAS Bengawan Solo, Sub DAS Temon dan Sub DAS Wuryantoro, serta kegiatan masyarakat di dalam badan waduk yaitu budidaya ikan dalam KJA. Desain model dinamik pengendalian pencemaran WGM dilakukan dengan pendekatan sistem, yaitu metode pemecahan masalah yang diawali dengan identifikasi kebutuhan yang menghasilkan satu sistem operasional yang efisien. Model pengendalian yang dibangun didasarkan pada beban limbah dan karakteristik pencemaran WGM hasil penelitian tahap pertama dan ke dua, serta faktor-faktor yang berpengaruh, seperti: partisipasi masyarakat, pendapat pakar tentang pengendalian pencemaran WGM, dan data demografi penduduk dan sosial ekonomi hasil penelitian tahap pertama.

Analisis sistem pengendalian pencemaran air WGM melibatkan beberapa pelaku yang terlibat dalam sistem tersebut. Diharapkan semua pelaku yang terlibat dalam sistem mendapatkan manfaat dari sistem yang dibangun. Data kebutuhan para pelaku sistem diperoleh pada penelitian tahap ke satu. Pencemaran air bersifat kompleks, berubah dengan waktu (dinamik) dan terkait dengan *multistakeholders*. Maka dalam melakukan analisis sistem pengendalian pencemaran WGM memerlukan beberapa informasi yang dapat digolongkan menjadi beberapa variabel, yaitu variabel *input*, variabel proses dan variabel *output* serta parameter yang membatasi susunan sistem. Diagram *input output* disebut diagram *black box*, yang menggambarkan hubungan antara output yang akan dihasilkan dengan input berdasarkan tahapan analisis kebutuhan dan formulasi permasalahan, secara jelas digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Input-output Sistem Pengendalian Pencemaran WGM

Menurut Manetcsn dan Park dalam Marganof (2007), secara garis besar variabel yang mempengaruhi kinerja sistem ada 6 variabel yaitu: (1) variable output yang dikehendaki; ditentukan berdasarkan hasil analisis kebutuhan, (2) variabel input terkontrol, variabel yang dapat dikelola untuk menghasilkan perilaku sistem sesuai dengan yang diharapkan, (3) variabel output yang tidak dikehendaki; merupakan hasil sampingan atau dampak yang ditimbulkan bersama-sama dengan output yang diharapkan, (4) variabel input terkontrol, (5) variabel input lingkungan; variabel yang berasal dari luar sistem yang mempengaruhi sistem tetapi tidak dipengaruhi oleh sistem, (6) variabel kontrol sistem; merupakan pengendali terhadap pengoperasian system dalam menghasilkan output yang dikehendaki. Variabel yang mempengaruhi kinerja system disajikan pada Gambar 6.

Identifikasi sistem dilakukan untuk memberikan gambaran terhadap komponen-komponen yang terlibat di dalam sistem yang dikaji dalam bentuk diagram lingkaran sebab akibat (*causal loop diagram/CLD*) dan diagram input output. CLD fenomena penurunan kualitas perairan WGM yang dipengaruhi oleh aliran beban limbah yang masuk ke WGM digambarkan pada Gambar 4. Untuk mempermudah dalam pemahaman model yang akan dibangun, maka membangun model diawali dengan mendesain hubungan sebab-akibat (CLD). CLD secara teknis dijabarkan dengan *stock flow diagram* (SFD). Prosedur mendesain CLD adalah sebagai berikut (Firmansyah, 2015):

- a. Membuka *software powersim studio 10*.
- b. Membangun CLD dengan menggunakan *Tool "Frame"*.
- c. Memilih frame yang dibutuhkan. Dalam membangun CLD, tidak ada baku dalam menggunakan bentuknya, tetapi dapat menggunakan diagram alir.
- d. Memberikan nama CLD dengan klik kanan, dan memilih menu "*Edit Text*".
- e. Menghubungkan antar variabel di *causal loop* dengan menggunakan "*Open Free Form*", dari variabel sebab ke variabel akibat.
- f. Merapikan garis dalam bentuk "*curve*", dengan klik kanan dan memilih menu "*Curved Segment*", kemudian kotak/titik kecil dapat ditarik sesuai kebutuhan.
- g. Memberikan tanda plus (+) atau minus (-) pada ujung panah, dengan menggunakan *tool frame*.

Desain model dilakukan untuk melihat perilaku sistem dalam membantu perencanaan strategi pengendalian pencemaran perairan WGM. Model bersandar pada hasil pendekatan geospasial kondisi faktual yang dihubungkan dengan *black box* dan beberapa referensi yang relevan. Simulasi sistem menggunakan *software powersim studio 10*. Desain model dinamik dibangun melalui sub model-sub model (Marganoff, 2007 dan Suwari dkk., 2011), yaitu:

1. Sub model populasi dan petani.
2. Sub model pertanian dan permukiman
3. Sub model pakan ikan, sisa pakan dan sedimen
4. Sub model beban limbah pada parameter P-PO₄, COD dan TSS

5. Sub model daya dukung lingkungan.

Gabungan sub-sub model tersebut akan membentuk sebuah sistem pengendalian pencemaran air WGM, yang tergambarkan dalam bentuk *stock flow* sistem pengendalian pencemaran air waduk. Cara mendesain *stock flow diagram* (SFD) menggunakan software powersim studio 10 adalah sebagai berikut (Firmansyah, 2015):

- a. Memilih tools “Level” , dan klik untuk dimasukkan ke dalam *worksheet*.
- b. Mengganti namanya dengan model yang akan dibuat. Misalnya pemodelan penduduk, maka level tersebut diganti namanya dengan “Penduduk” .

Simulasi Model akan dapat menggambarkan tingkat pencemaran WGM yang ditunjukkan oleh parameter air yang dominan menimbulkan pencemaran. Parameter yang digunakan dalam simulasi model ditentukan berdasarkan hasil analisis peta spasial beban pencemaran WGM dari berbagai sumber polutan yang melebihi baku mutu kelas 2 PP 82 tahun 2001. Simulasi model dilakukan dengan menggunakan *software powersim studio 10*. Tahun simulasi sebesar 20 tahun, dimulai dari tahun 2010 sampai dengan 2030. Hasil simulasi akan dapat menggambarkan terjadinya peningkatan beban pencemaran air WGM, yang disebabkan oleh peningkatan beban parameter dominan penyebab pencemaran WGM.

Analisis Prospektif dilakukan dengan tujuan untuk mempersiapkan tindakan strategis dengan cara menentukan faktor-faktor kunci yang berperan penting dan melihat apakah dibutuhkan perubahan di masa depan berdasarkan kondisi yang ada (Suwari dkk., 2011).

Simulasi skenario model, berdasarkan alternatif keadaan yang teridentifikasi pada beberapa faktor berpengaruh langsung dalam pengendalian pencemaran perairan WGM, dapat disusun skenario yang

mungkin terjadi di masa yang akan datang dengan melakukan kombinasi yang mungkin terjadi antar kondisi faktor tersebut, dengan membuang kombinasi yang *incompatible* (Suwari, dkk., 2011). Kombinasi antara kondisi faktor akan menghasilkan 3 skenario pengendalian pencemaran perairan WGM, yaitu skenario pesimis, moderat dan optimis. Untuk mengkaitkan skenario yang disusun ke dalam model, dilakukan interpretasi kondisi faktor ke dalam peubah model, sehingga skenario yang bersangkutan dapat disimulasikan (Suwari dkk., 2011).

Uji validitas model dilakukan dengan uji kualitatif, uji kesesuaian parameter dan uji statistik. Uji kualitatif dilakukan cara membandingkan perilaku sistem dalam model dengan perilaku sistem dalam realita yang direpresentasikan oleh data empirik di lapangan yang pernah teramati (histori). Apabila hasil simulasi model dapat memperlihatkan kecenderungan perubahan yang sesuai atau mendekati data histori, maka model yang dikembangkan dinyatakan dapat mewakili sistem dalam dunia nyatanya. Sehingga model tersebut dinyatakan valid dan dapat diterima dan selanjutnya dapat dipergunakan untuk keperluan simulasi dalam analisis kebijakan. Model juga diuji melalui uji kesesuaian dalam penggunaan satuan pengukur parameter dari setiap variabel (Anshori, 2008).

Validasi perilaku model dilakukan dengan membandingkan antara besar dan sifat kesalahan dapat digunakan: 1) *Absolute Mean Error* (AME) adalah penyimpangan (selisih) antara nilai rata-rata (*mean*) hasil simulasi terhadap nilai aktual, 2) *Absolute Variation Error* (AVE) adalah penyimpangan nilai variasi (*variance*) simulasi terhadap aktual. Batas penyimpangan yang dapat diterima antara 1-10%.

$$AME = [(S_i - A_i)/A_i] \dots \dots \dots (1)$$

$S_i = S_i N$, dimana S = nilai simulasi

$A_i = A_i N$, dimana A = nilai aktual

N = interval waktu pengamatan

$$AVE = [(S_s - S_a)/S_a] \dots \dots \dots (2)$$

$S_s = ((S_i - \underline{S}_i)^2 N) = \text{deviasi nilai simulasi}$

$S_a = ((A_i - \underline{A}_i)^2 N) = \text{deviasi nilai aktual}$

Evaluasi dan Perancangan Usulan Kebijakan pada model yang dikembangkan dilakukan dengan menjalankan skenario-skenario alternatif dari kondisi-kondisi mungkin muncul. Kebijakan dan strategi apa yang seharusnya atau struktur yang bagaimana yang sebaiknya ada, dicobakan pada model yang dikembangkan. Analisis “bagaimana jika” (*how ...if*) suatu kondisi diberikan untuk melihat pengaruhnya apabila kebijakan diimplementasikan (Gunawan, 2008).

5. Diskusi Teori dan Temuan Penelitian

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian di dalam dan di luar WGM. Penelitian yang telah dilakukan di WGM sampai saat ini masih bersifat parsial, sedangkan penelitian ini mengintegrasikan seluruh kepentingan yang membangun struktur pencemaran kualitas perairan WGM menggunakan *system dynamics*. Metode pendekatan *system dynamics* mengintegrasikan beberapa kepentingan para pelaku yang terlibat dalam sistem pengendalian pencemaran. Metode ini digunakan sebagai tolok ukur dalam merancang atau membangun pemodelannya. Keterbaruan penelitian ini terletak pada 1). tersedianya peta spasial kualitas perairan WGM akibat sumber polutan potensial dari kegiatan masyarakat di DTA, yang mengalir ke WGM melalui 7 sub DAS dan berperan dalam penurunan kualitas perairan WGM, sebagai sistem informasi lingkungan, 2). kajian hidrokimia senyawa/unsur kimia dominan penyebab pencemaran dan kualitas sedimen pada zona tercemar, dan 3). kajian model pengendalian pencemaran perairan WGM menggunakan pendekatan geospasial *system dynamics*. Hasil temuan penelitian akan ditinjau dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu. Hal ini dilakukan untuk menunjukkan *novelty* penelitian disertasi ini. Disamping itu hasil penelitian juga akan disandingkan dengan teori-teori yang telah ada, untuk menjadi bahan diskusi teori, sehingga temuan-temuan dalam penelitian ini menjadi kuat.