

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### A. Tinjauan Pustaka

##### 1. Ekosistem Perairan Waduk

Ekosistem adalah suatu sistem ekologi yang terbentuk oleh hubungan timbal balik antara makhluk hidup dengan lingkungannya. Ekosistem bisa dikatakan juga suatu tatanan kesatuan secara utuh dan menyeluruh antara segenap unsur lingkungan hidup yang saling mempengaruhi. Ekosistem meliputi dua bagian, yaitu ekosistem alami dan ekosistem buatan. Ekosistem Waduk merupakan contoh ekosistem buatan. Waduk (*reservoir*) merupakan ekosistem darat yang menggenang, yang dibuat oleh manusia (UNEP-IETC/ILEC, 2000), kaya akan keragaman fungsi, hayati, dan sosial budaya. Waduk memiliki potensi yang sangat mendukung kehidupan manusia. Waduk mempunyai fungsi ekologi, sebagai penyimpan air (*water conserver*), sebagai habitat kehidupan biota air. Waduk berperan sebagai *reservoir*, memiliki manfaat antara lain untuk pengendali banjir (*flood control*), sumber bahan baku air minum, pembangkit listrik tenaga air, pariwisata (Yang *et al*, 2012), untuk sistem irigasi pertanian, industri, usaha perikanan, dan lain-lain.

Waduk merupakan habitat air tawar, karena di dalam waduk terdapat media yang merupakan tempat hidup berkembangnya berbagai organisme air tawar. Waduk juga sebagai ekosistem air tawar karena merupakan tempat berlangsungnya hubungan timbal balik antara makhluk hidup dengan faktor lingkungannya. Sebagai habitat air tawar, terdapat suatu kondisi lingkungan yang sering menjadi faktor penentu kualitas air tawar tersebut, sehingga layak untuk kehidupan organisme air tawar. Faktor-faktor tersebut antara lain: suhu, transparansi, arus, kadar gas karbondioksida, kadar oksigen terlarut, kadar garam biogenik, serta derajat keasaman (Daniel, 2000).

Waduk merupakan penampung alami dalam pengumpulan unsur nutrisi, bahan padat tersuspensi dan bahan toksik yang akhirnya mengendap di dasar waduk. Penampungan tersebut berlangsung bertahun-tahun sehingga proses pendangkalan tidak dapat dihindari (Darmono, 2001).

Deposit logam berat seperti Zn, Cu, Hg, dan unsur nutrisi seperti N,  $P_2O_5$  dalam sedimen di teluk Banten mempunyai pola distribusi spasial yang sama, konsentrasi yang lebih tinggi ditemukan pada mulut sungai untuk parameter  $Fe_2O_3$ , Zn, Cu,  $P_2O_5$  dan total N (Suwandana dkk., 2011). Pengendapan unsur nutrisi dapat menyebabkan eutrofikasi, yang ditandai dengan berkembangnya enceng gondok ataupun tanaman air lainnya seperti azola, dll (Anonim, 2001).

Waduk merupakan suatu ekosistem buatan, yang berupa bangunan penahan atau penimbun air untuk berbagai keperluan, misalnya untuk irigasi, pembangkit listrik, tempat rekreasi, dan sarana olahraga. Selain itu, waduk merupakan ekosistem baru, dengan substrat dasar biasanya berasal dari kebun atau sawah, maupun hutan dengan sifat geologi yang berbeda-beda.

Pada SK Bupati Wonogiri nomor 133 tahun 1986, ekosistem perairan WGM dibagi dalam 5 (lima) zona yaitu zona I merupakan zona bahaya; zona II merupakan zona wisata; zona III merupakan zona suaka; zona IV merupakan zona bebas dan zona V merupakan zona pengembangan usaha budidaya ikan dengan KJA. Budidaya ikan yang dikembangkan adalah sistem alami dan sistem KJA.

Budidaya KJA ini dikembangkan pada zona V WGM, dengan luas area budidaya sekitar 880 Ha. Terletak di Dusun Cakaran, Desa Sendang, Kecamatan Wonogiri. Jenis ikan yang dibudidayakan, adalah nila merah, karper. Sektor ini mendukung 99,50% produksi ikan di Wonogiri (Bappeda, 2007). Hasil penelitian Sudarmono (2006) menunjukkan bahwa perkembangan jumlah karamba yang menempati perairan waduk Gadjah Mungkur, telah menyimpang dari peraturan yang ditetapkan. Lokasi usaha karamba seharusnya hanya berada pada zona usaha perikanan telah menyebar ke zona wisata, zona suaka serta zona bebas. Kualitas air waduk pada daerah budidaya ikan dalam KJA telah melebihi baku mutu kualitas air kelas dua PP RI 82 tahun 2001 pada parameter N- $NO_2$ , N- $NH_3$ , fosfat dan pada musim kemarau terjadi eutrofikasi (Pujiastuti, 2009).

Komponen dalam ekosistem waduk meliputi komponen biotik, yang terdiri dari ikan, plankton, makrophyta, bentos, dan sebagainya, sedangkan komponen abiotik terdiri dari tanah, air, dan sebagainya. Menurut penelitian Ambarwati (2003), jenis plankton indikator yang dijumpai dominan di WGM antara lain *Spirogyra sp*,

*Microcystys flasaqua* dan *Staurastum sp.* Plankton yang dijumpai dapat menggambarkan kondisi fisika-kimia perairan WGM.

Terdapat tiga kelas makrozoobentos, yaitu *Tubificidae*, *Chironomidae* dan *Gastropoda* pada inlet, tengah, KJA dan outlet WGM. Kelas *Tubificidae* memiliki jumlah jenis terbesar yaitu empat jenis. Kelimpahan berkisar antara 442-544 ind/m<sup>2</sup> pada tiap stasiun penelitian. *Aludrilus sp.*, *Limnodrilus sp.* dan *Branchiura sworbyi* cukup tinggi kelimpahannya, sedangkan *Olygochaeta* sebarannya cukup merata. Menurut Wijaya dan Utomo (2011) dan Utomo dkk. (2011), kualitas perairan pada WGM masih tergolong cukup baik bagi kehidupan makrozoobentos.

Jumlah jenis ikan yang tertangkap di waduk WGM sebanyak 19 jenis, termasuk dalam kelompok Herbivora, Karnivora dan Omnivora (BRPPU, 2009). Ikan nila (*Oreochromis niloticus*), jambal sius (*Pangasius hypophthalmus*) dan tawes (*Barbonymus gonionotus*) dapat berkembang dengan baik di WGM (Utomo dkk., 2011). Beberapa jenis lainnya antara lain: kutuk, sogo, uceng-uceng, bader, dan lain-lain. Rata-rata kepadatan ikan per area di WGM sebesar 600 ind/ha dan rata-rata kepadatan ikan per volume 300 ind/1000 m<sup>3</sup>. Rata-rata biomass ikan WGM sebesar 114 kg/ha (BRPPU, 2010).

## 2. Gambaran DTA Waduk Gajah Mungkur Wonogiri

Daerah tangkapan air (DTA), sering disebut daerah aliran sungai (DAS), merupakan daerah kuasa sungai pengisi waduk yang terletak di bagian hulu waduk, yang menjadi pengatur utama (*drainage*). Menurut PP RI 37/2011 tentang Bendungan, DAS adalah wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke waduk secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografi dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan.

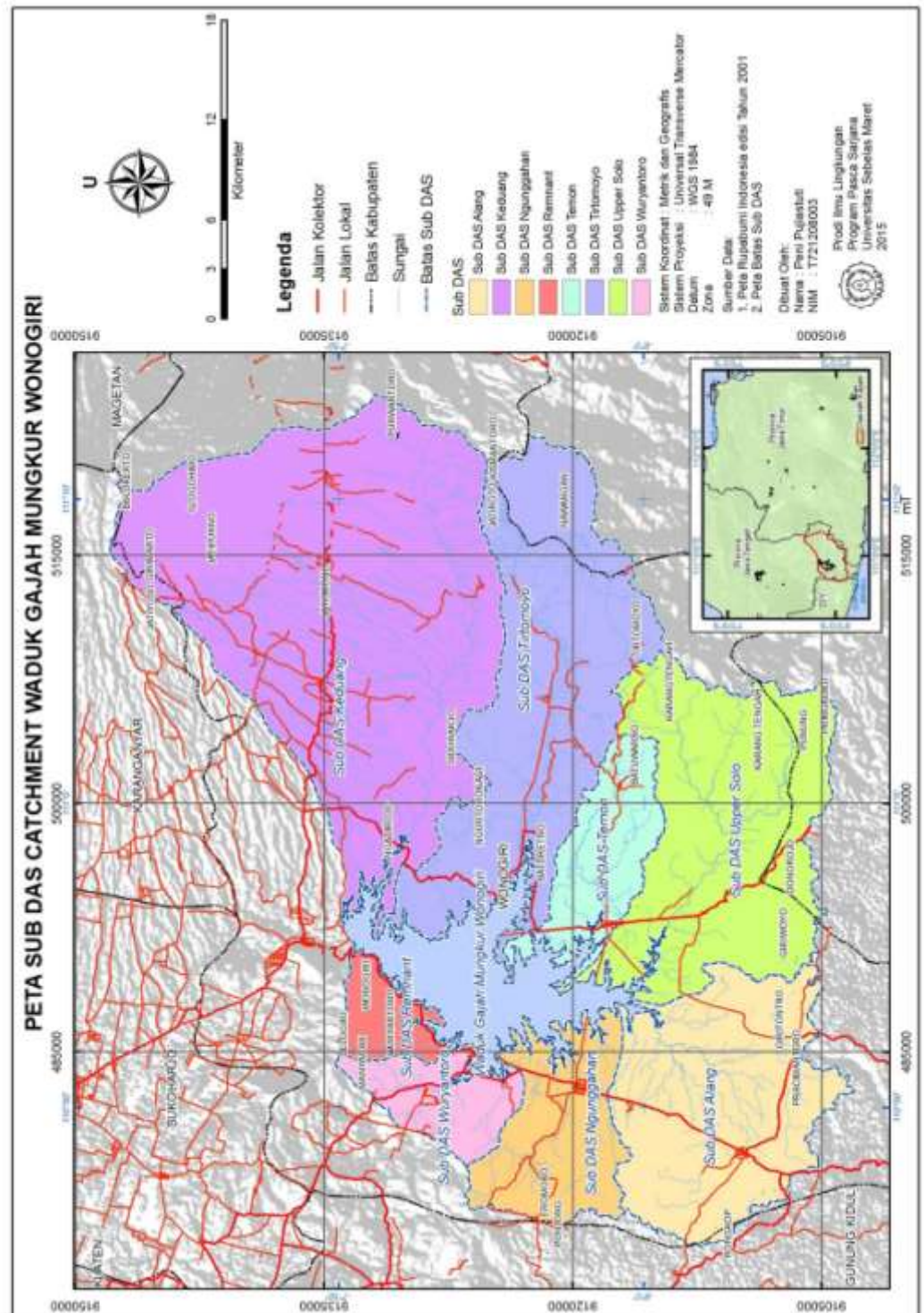
Batas DTA waduk merupakan garis maya sepanjang pegunungan atau lahan meninggi, yang memisahkan sistem aliran air permukaan yang satu dengan sistem aliran air permukaan tetangganya. Sembilan puluh persen luas DTA WGM merupakan perbukitan yang dimanfaatkan penduduk untuk pertanian lahan kering, lahan terbuka, dan 10% sisanya berupa kawasan hutan (Anshori, 2008).

**a. DTA Waduk Gajah Mungkur Wonogiri**

WGM merupakan waduk serbaguna, diresmikan tanggal 17 November 1981. DTA seluas 1.244 km<sup>2</sup>, ditahan bangunan bendungan setinggi 40 m, luas daerah genangan waduk mencapai 90 km<sup>2</sup>, volume total tampungannya sebesar 735 juta m<sup>3</sup> (Anshori, 2008). Mempunyai aliran seluas 1350 km<sup>2</sup>, sumber air masuk dari Sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngunggahan dan Wuryantoro.

**Sub DAS Keduang** memiliki luas wilayah 40.116,0735 Ha, merupakan penyumbang air masuk terbesar ke WGM, dengan aliran maksimal 146,552 m<sup>3</sup>/dt pada musim penghujan dan minimal 2,766 m<sup>3</sup>/dt pada musim kemarau. **Sub DAS Wiroko** mempunyai luas 19.593,6715 Ha menyumbang air ke WGM dengan aliran rata-rata 79,20 m<sup>3</sup>/dt. **Sub DAS Temon** dengan luas wilayah 6.170,405 Ha menyumbang air melalui sungai Temon, dengan kecepatan aliran maksimal pada musim penghujan sebesar 109,880 m<sup>3</sup>/dt, pada musim kemarau tidak ada air yang masuk ke WGM. **Sub DAS Bengawan Solo Hulu** mempunyai luas wilayah 19.147,9390 Ha, menyumbang air ke WGM melalui aliran sungai Bengawan Solo Hulu. **Sub DAS Alang** dengan luas wilayah 17.720,822 Ha, menyumbang air ke WGM melalui sungai Alang dengan kecepatan aliran maksimal pada musim penghujan sebesar 29,360 m<sup>3</sup>/dt. Sebelum masuk ke parairan WGM, ujung sungai Alang bertemu ujung sungai Bengawan Solo Hulu, alirannya menyatu kemudian mengalir ke WGM. **Sub DAS Ngunggahan**, luas wilayah 9.615,280 Ha menyumbangkan air ke WGM melalui sungai Ngunggahan. **Sub DAS Wuryantoro**, luas wilayah 5.267,8815 Ha menyumbangkan air ke WGM melalui sungai Wuryantoro, kecepatan aliran maksimal pada musim penghujan 19,887 m<sup>3</sup>/dt.

Aliran dari seluruh sub-DAS tersebut dapat mencapai luas permukaan aliran perairan waduk sekitar 88 km<sup>2</sup> saat air rendah, kedalaman rata-rata 8,5 m dan kedalaman tertinggi 38 m berada di atas permukaan DAM. Luas waduk WGM adalah 8800 ha. Peta spasial DTA WGM disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta spasial DTA WGM

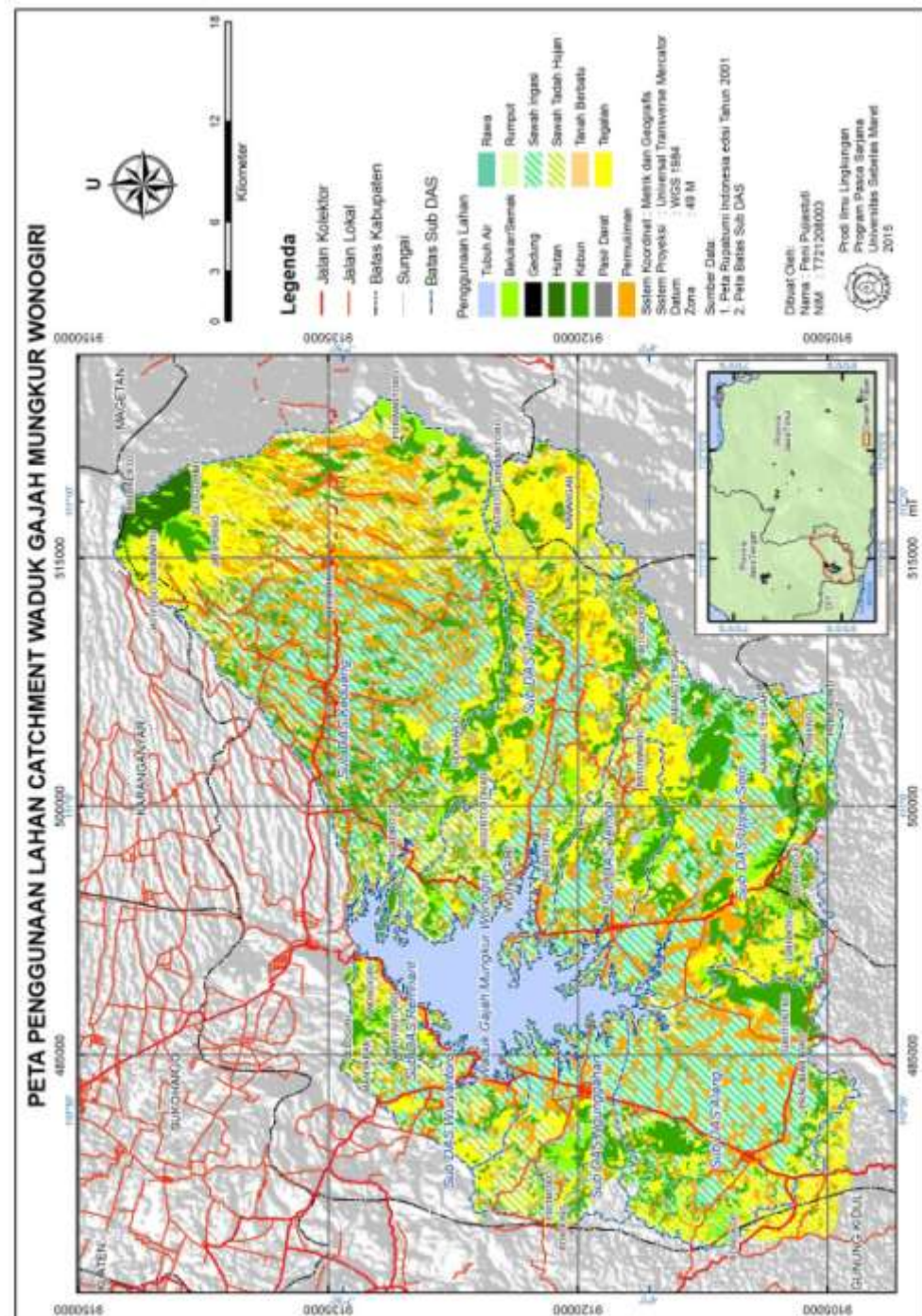


## b. Penggunaan Lahan Wilayah Sub DAS

Perairan waduk Gajah Mungkur Wonogiri memperoleh input dari wilayah DTA, yang mengalir melalui 7 (tujuh) Sub DAS, dengan luasan wilayah yang berbeda-beda. Penggunaan lahan pada wilayah DTA WGM, antara lain: permukiman, sawah, sawah tadah hujan, bangunan/gedung, tegalan/ladang, padang rumput, perkebunan/kebun, semak belukar, hutan, bukit batuan, air tawar/sungai dan rawa, secara lengkap disajikan pada Gambar 2. Pemanfaatan lahan untuk kegiatan penduduk diprediksi dapat mengeluarkan air limbah dan menjadi sumber timbulan limbah WGM, yang ditunjukkan pada parameter TSS, DO, BOD, COD, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub>, Fe, Mn, Pb, Cr, *E-coli* dan total *coliform*.

Sebagian besar penggunaan lahan di DTA WGM untuk persawahan, kegiatan pertanian tidak ramah lingkungan akan menyumbangkan limbah ke WGM sebagai sumber polutan pada parameter TSS, pestisida, N-NO<sub>3</sub> dan P-PO<sub>4</sub>. Penggunaan lahan untuk peternakan yang air limbahnya dibuang ke sungai, akan menyebabkan peningkatan kandungan parameter TSS, BOD dan *E-coli*. Limbah permukiman meningkatkan kandungan parameter polutan TSS, BOD, COD dan *E-coli*. Lahan untuk industri berpotensi sebagai sumber polutan pada parameter TSS, BOD, COD dan logam berat.

Sub DAS Keduang mempunyai wilayah yang paling luas, yaitu sebesar 40.116,0735 Ha, pemanfaatan lahan yang berpotensi menyebabkan pencemaran WGM adalah untuk permukiman (26,5%) dan sawah (36,7%). Luas wilayah Sub DAS Wiroko sebesar 19.593,6715 Ha 23,5% untuk sawah. Sub DAS Temon mempunyai luas wilayah sebesar 6.170,4085 Ha 8,64% untuk sawah. Sub DAS Bengawan Solo Hulu mempunyai luas wilayah sebesar 19.149,9390 Ha 17,17% untuk sawah dan 20,60% untuk permukiman. Sub DAS Wuryantoro mempunyai luas wilayah sebesar 5.267,8815 Ha untuk sawah 17,07%. Sub DAS Alang mempunyai luas wilayah sebesar 17.720,822 Ha, dan Sub DAS Ngunggahan mempunyai luas wilayah sebesar 9.615,280 Ha (Bappeda, 2012).



Gambar 2. Peta Penggunaan Lahan DTA WGM

### c. Kegiatan Masyarakat Wilayah Sub DAS

Terdapat berbagai kegiatan masyarakat di wilayah sub DAS pada DTA WGM, yang menghasilkan air limbah dan dibuang ke lingkungan, sehingga menyumbangkan polutan ke perairan WGM, melalui aliran sungai pada masing-masing sub DAS. Kegiatan masyarakat di DTA WGM antara lain: industri tahu, industri tempe, industri tapioka, industri *rice mill*, industri krupuk/opak, industri penyulingan minyak cengkeh, industri rumah sakit, bengkel dan lain-lain. Tidak semua industri tersebut ada di setiap wilayah sub DAS di DTA WGM, wilayah sub DAS Keduang mempunyai jumlah industri penyumbang air limbah lebih banyak dari sub DAS lainnya dan sub DAS Wuryantoro mempunyai jumlah industri paling sedikit, secara lengkap macam industri yang menghasilkan air limbah disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber Polutan dari Kegiatan Masyarakat di DTA WGM yang Berpotensi Menimbulkan Pencemaran

SUB DAS	JENIS KEGIATAN MASYARAKAT	KECAMATAN	JUMLAH	DEBIT M <sup>3</sup> /HR	
				MIN	MAX
Keduang	Industri Tahu	Ngadirojo	2	50	106
		Sidoharjo	31	0,5	1
		Jatisrono	28	0,9	12,50
		Jatiroto	23	0,9	14,50
		Bulukerto	1		
		Jatipurno	5	0	100
		Nguntoronadi	2	40	50
	Industri Tempe	Jatipuro	122	30	40
		Nguntoronadi	5	15	25
		Jatisrono	3	0,5	1
	Industri Tapioka	Ngadirojo	1	70	
		Nguntoronadi	153	0,60	54,00
		Girimarto	5	0,75	
	Industri Rice Mill	Jatipurno	25	40	50
	Bengkel Sepeda, Mobil, Las	Jatipuro	21		
		Sidoharjo	8		
		Jatisrono	19		
		Ngadirojo	2		
	Mebel	Jatipurno	18		
	RS, Puskesmas	Slogohimo	2	84	174
		Jatisrono	3	30	42
		Jatiroto	1	84	
		Bulukerto	1	72	96
		Ngadirojo	2	36	168



SUB DAS	JENIS KEGIATAN MASYARAKAT	KECAMATAN	JUMLAH	DEBIT M <sup>3</sup> /HR	
				MIN	MAX
Wiroko		Nguntoronadi	2	24	30
		Sidoharjo	1	45	
	Industri Tahu	Nguntoronadi	6	40	50
		Tirtomoyo	1	100	100
		Baturetno	1	50	50
	Industri Tempe	Nguntoronadi	25	15	25
		Tirtomoyo	1	50	100
	Industri Tapioka	Nguntoronadi	45	0,15	6,15
	Industri Rice Mill	Tirtomoyo	49	40	60
	Krupuk/ Opak	Baturetno	3	15	20
	Bengkel Sepeda & Mobil	Batuwarno	1		
		Nguntoronadi	4		
		Tirtomoyo	3		
	RSU, RSMPD & Puskesmas	Baturetno	3	24	36
		Tirtomoyo	2	24	30
Temon	Penyulingan Cengkeh	Tirtomoyo	6	70	
	Industri Tahu	Baturetno	1	50	50
	Bengkel Puskesmas, RB	Baturetno	2		
		Batuwarno	4	36	45
B. Solo Hulu	Industri Tahu	Giriwoyo	1	50	50
	Industri Tempe	Giriwoyo	8		
		Baturetno	23	5	15
	Industri Rice Mill	Karangtengah	19	60	150
		Giriwoyo	1		
	Bengkel Motor	Baturetno	3		
		Batuwarno	2		
		Giriwoyo	21		
	Mebelair	Giriwoyo	2		
	Penyulingan Cengkeh	Karangtengah	8	40	50
	Tobong Gamping Puskesmas	Giriwoyo	2	70	
		Karangtengah	1	18	
		Giriwoyo	2	24	36
Alang-Ngunggan	Industri Tahu	Pracimantoro	15	0,25	20
	Industri Tempe	Pracimantoro	48	0,25	200

SUB DAS	JENIS KEGIATAN MASYARA KAT	KECAMATAN	JUMLAH	DEBIT M <sup>3</sup> /HR	
				MIN	MAX
	Bengkel motor, mobil & las	Giriwoyo	2		
	RSU, Puskesmas	Giritontro	2	36	144
		Pracimantoro	3	30	36
Wuryantoro	Industri Tahu	Wuryantoro	3	5	5
	Industri Tempe	Wuryantoro	6	0,5	1
	Bengkel & cuci mobil	Wuryantoro	6		
	RSPMD, Puskesmas	Eromoko	3	36	96
		Wuryantoro	2	36	42

Sumber: BLH, 2012

**Sub DAS Keduang** memiliki luas wilayah 40.116,0735 Ha, dengan jumlah penduduk 339.074 orang. Merupakan penyumbang air masuk terbesar ke WGM, karena berdasarkan wilayah administrasi di Kabupaten Wonogiri terdapat 91 (sembilan puluh satu) desa dalam sembilan kecamatan yang masuk ke Sub DAS Keduang, di mulai dari kecamatan paling hulu yaitu Slogohimo, Jatipurno, Jatisrono, Jatiroto, Girimarto, Sidoharjo, Ngadirojo, Nguntoronadi dan Wonogiri. Perincian jumlah desa di masing-masing kecamatan yang masuk DTA Sub DAS Keduang adalah Slogohimo meliputi 15 desa, Jatipurno meliputi 11 desa, Jatisrono meliputi 17 desa, Jatiroto meliputi 14 desa, Girimarto meliputi 14 desa, Sidoharjo meliputi 12 desa, Ngadirojo meliputi 5 desa, Nguntoronadi meliputi 2 desa dan Wonogiri meliputi 1 desa (Bappeda, 2012). Sebesar 36,7% wilayah Sub DAS Keduang digunakan untuk persawahan, meliputi 19.3% untuk sawah irigasi dan 17.4% sawah tadah hujan. Kegiatan pertanian yang tidak ramah lingkungan menyebabkan Sub DAS Keduang merupakan penyumbang sedimen terbesar ke perairan WGM.

Terdapat beberapa kegiatan industri kecil yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, antara lain:

- 1) Industri tahu dan industri tempe. Terdapat 92 industri tahu, dengan debit air limbah sebesar 0,5 m<sup>3</sup>/dt - 106 m<sup>3</sup>/dt. Jumlah industri tempe sebanyak 130

buah dengan debit air limbah antara 0,5 – 40 m<sup>3</sup>/dt, industri tempe terbanyak terletak di kecamatan Jatipuro. Berdasarkan Perda Jateng nomor 5 tahun 2012, kadar maksimal air limbah yang dikeluarkan oleh industri tahu maupun industri tempe pada tiap parameternya adalah BOD<sub>5</sub> 150 mg/L, COD 275 mg/L, TSS 100 mg/L, debit maksimum industri tahu 20 m<sup>3</sup>/ton kedelai dan industri tempe 10 m<sup>3</sup>/ton kedelai.

- 2) Industri tapioka. Desa Semin kecamatan Nguntoronadi merupakan sentra industri tapioka, terdapat sebanyak 153 unit mempunyai kapasitas produksi antara 60-5.400 kg/hari, mengeluarkan air limbah dengan debit berkisar antara 0,60 – 54,00 m<sup>3</sup>/hr. Pada sentra tersebut tidak memiliki IPAL bersama, air limbah tidak diolah dan dibuang ke lahan pekarangan. Pada kecamatan Girimarto terdapat 5 unit industri tapioka yang terpusat pada desa Tambakmerang, mempunyai kapasitas produksi sebesar 75 kg/hari, debit air limbah banyak 0,75 m<sup>3</sup>/hari. Pada kecamatan Ngadirojo terdapat industri tapioka dengan debit air limbah 70 m<sup>3</sup>/dt. Perda Jateng nomor 5 tahun 2012, mengatur kualitas air limbah yang dikeluarkan oleh industri tapioka wajib memenuhi kadar parameter BOD<sub>5</sub> maksimal 150 mg/L, COD maksimal 300 mg/L, TSS maksimal 100 mg/L, CN maksimal 0,3 mg/L dan debit maksimal 30 m<sup>3</sup>/ton produk.
- 3) Industri *Rice mill*. Pada Kecamatan Jatipurno merupakan sentra industri *Rice mill*, terdapat 25 unit dengan kapasitas produksi antara 500-1000 kg/hari, dan menghasilkan air limbah rata-rata 50 m<sup>3</sup>/hari.
- 4) Industri rumah sakit, rawat inap dan Puskesmas berjumlah 12 buah, dengan perincian 3 buah RSMPD dan 9 buah Puskesmas. Mempunyai jumlah hunian/kamar/hari sebanyak 25-145 buah, menghasilkan air limbah dengan debit sebanyak 24-174 m<sup>3</sup>/hari yang bersumber dari ruang layanan medis dan WC. Air limbah diolah di IPAL sederhana secara fisika, kimia dan biologi, kemudian dibuang ke sumur resapan. Berdasarkan pantauan di lapangan air limbah seringkali melebihi daya tampung IPAL, sehingga melimpah ke saluran air yang menuju sungai Keduang. Air limbah untuk kegiatan rumah sakit harus memenuhi baku mutu (Perda Jateng 5/2012), yaitu kadar parameter TSS maksimal 30 mg/L, BOD<sub>5</sub> maksimal 30 mg/L, COD 80

mg/L, N-NH<sub>3</sub> bebas maksimal 0,1 mg/L, P-PO<sub>4</sub> maksimal 2 mg/L, kuman golongan Coli maksimal 5.000 MPN/100 mL.

Kegiatan-kegiatan tersebut memberikan kontribusi timbulnya fenomena penurunan kualitas perairan WGM. Sumbangan paling besar adalah sedimen. Permasalahan sedimen ini telah diatasi dengan membuat sungai sudetan dan cek DAM penampung sedimen dari sub DAS Keduang yang telah beroperasi mulai bulan Januari 2014, sehingga sedimen tidak mengalir ke WGM. Gambar sungai sudetan yang saat masih dalam pembangunan dan saat sudah selesai dibangun, disajikan pada Gambar 3.



Sumber: Pujiastuti, 2012

Sumber: Pujiastuti, 2016

Gambar 3. Pembangunan Saluran Pembuangan Sedimen WGM dari Sungai Keduang

**Wilayah Sub DAS Wiroko** mempunyai luas 19.593,6715 Ha, dengan jumlah penduduk sebanyak 101.342 orang, meliputi 30 desa dalam 5 (lima) kecamatan. Jumlah desa pada masing-masing kecamatan yang dimulai dari hulu adalah kecamatan Tirtomoyo meliputi 16 desa, Nguntoronadi meliputi 9 desa, Batuwarno meliputi 3 desa, Baturetno meliputi 3 desa dan Jatiroto meliputi 1 desa. Penggunaan lahan untuk sawah sebesar 23,54% dan tegalan sebesar 34,85% Di wilayah Sub DAS Wiroko terdapat 2 industri kecil (Bappeda, 2012). Kegiatan masyarakat yang menghasilkan air limbah antara lain industri tahu terdapat delapan buah di 3 kecamatan dengan debit 40 – 100 m<sup>3</sup>/dt, terdapat 26 buah industri tempe dengan debit air limbah 15-100 m<sup>3</sup>/dt. Terdapat sentra industri tapioka yang terletak di desa Beji sebanyak 45 unit, dengan kapasitas produksi berkisar antara 15 – 615 kg/hari dan menghasilkan air limbah sebanyak



0,15 – 6,15 m<sup>3</sup>/hari yang dibuang ke lahan pekarangan karena belum memiliki IPAL bersama. Terdapat sentra industri *rice mill* sebanyak 49 unit, dengan kapasitas produksi sebesar 40-5000 kg/hari, volume air limbah yang dihasilkan sebanyak 40-60 m<sup>3</sup>/hari. Terdapat sentra industri penyulingan cengkeh sebanyak 6 unit, dengan kapasitas produksi rata-rata 70 kg/hari, volume air limbah yang dihasilkan rata-rata 70 m<sup>3</sup>/hari. Terdapat 5 buah RSUD, RSMPD dan Puskesmas di wilayah kecamatan Baturetno dan Tirtomoyo, rata-rata menghasilkan air limbah dengan debit 24-36 m<sup>3</sup>/hari.

**Wilayah Sub DAS Temon**, dengan luas 6.170,4085 Ha, jumlah penduduk sebanyak 27.733 orang, meliputi 9 (sembilan) desa dalam 2 (dua) wilayah kecamatan, yaitu Batuwarno meliputi 4 (empat) desa dan Baturetno meliputi 5 (lima) desa. Penggunaan lahan didominasi penggunaan tegalan sebesar 39,38%, dan pekarangan sebesar 18,85% sedangkan sawah sebesar 8,64% (Bappeda, 2012). Kondisi solum tanah di sub DAS Temon yang lebih tipis daripada sub DAS Kedung, membuat penggunaan lahan untuk tegal lebih besar. Penggunaan lahan untuk sawah relatif sedikit (Sunaryo dkk., 2002). Jumlah dan macam kegiatan masyarakat yang menghasilkan air limbah lebih sedikit dibanding sub DAS lain, antara lain industri tahu sebanyak 1 unit dengan kapasitas produksi 50 kg/hari, menghasilkan volume air limbah sebanyak 50 m<sup>3</sup>/hari. Terdapat empat Puskesmas dan Rumah Bersalin, terletak di wilayah kecamatan Batuwarno, setiap hari menghasilkan air limbah dengan debit 36-45 m<sup>3</sup>/hari.

**Wilayah Sub DAS Bengawan Solo Hulu**, dengan luas 19.149,9390 Ha, dengan jumlah penduduk sebanyak 79.633 orang, meliputi 23 (dua puluh tiga) wilayah desa pada lima wilayah kecamatan, yaitu Karangtengah meliputi 4 desa, Girowoyo meliputi 13 desa, Batuwarno meliputi satu desa, Giritontro meliputi satu desa dan Baturetno meliputi empat desa. Penggunaan lahan untuk sawah sebesar 17,17%, tegalan sebesar 48,53%, pekarangan sebesar 20,60% dan kolam sebesar 0,01% (Bappeda, 2012). Terdapat enam macam kegiatan masyarakat yang menghasilkan air limbah dan diprediksi menyumbang beban polutan ke

sungai Bengawan Solo Hulu dan perairan WGM. Industri tahu sebanyak 1 unit, dengan debit air limbah  $50 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Industri Tempe sebanyak 41 unit di kecamatan Giriwoyo dan Baturetno, dengan debit air limbah  $5\text{-}15 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Industri *rice mill* terpusat di kecamatan Karangtengah sebanyak 19 unit dan di Giriwoyo terdapat 1 unit, menghasilkan air limbah dengan debit  $60\text{-}150 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Industri penyulingan cengkeh terpusat di kecamatan Karangtengah sebanyak 8 unit, dengan debit air limbah  $40\text{-}50 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Industri tobong gamping di kecamatan Giriwoyo sebanyak 2 buah, dengan debit air limbah  $70 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Terdapat 3 buah Puskesmas dengan debit air limbah  $18\text{-}36 \text{ m}^3/\text{hari}$ .

**Wilayah Sub DAS Alang**, dengan luas wilayah  $17.720,822 \text{ ha}$  (Wiryanto, 2013), terletak pada wilayah kecamatan Pracimantoro dan Giritontro, yang meliputi 24 desa yaitu: desa Besuhan, Glinggangrejo, Gebangharjo, Karangwuni, Gedang, Pracimantoro, Watangrejo, Sambiroto, Sedayu, Lebak, Wonodadi, Sindukarto, Panekan, Tubokarto, Jimbar, Suci, Baleharjo, Sumberharjo, Minggarharjo, Sirnobojo, Pucanganom, Platerejo, Giritontro dan Jatirejo. Terdapat 3 macam kegiatan masyarakat yang menghasilkan air limbah dan diprediksi menyumbang beban polutan ke sungai Alang dan perairan WGM. Industri tahu sebanyak 15 unit terpusat di kecamatan Pracimantoro, dengan debit air limbah  $0,25\text{-}20 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Industri tempe sebanyak 48 unit, terpusat di kecamatan Pracimantoro, dengan debit air limbah sebesar  $0,25\text{-}200 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Terdapat 5 RSU dan Puskesmas dengan debit air limbah sebesar  $30\text{-}144 \text{ m}^3/\text{hari}$ .

**Wilayah Sub DAS Ngunggahan**, dengan luas wilayah  $9.615,280 \text{ ha}$  (Wiryanto, 2013), berada pada wilayah kecamatan Eromoko, yang meliputi 10 desa yaitu Ngandong, Tempurharjo, Tambakromo, Pucung, Puloharjo, Eromoko, Ngunggahan, Mojopuro, Ngadirejo dan Tegalharjo. Kegiatan masyarakat yang menghasilkan limbah kebanyakan industri tahu dan tempe, terdapat 60 unit dengan debit air limbah  $0,30 - 3,60 \text{ m}^3/\text{hari}$ .

**Wilayah Sub DAS Wuryantoro**, dihuni oleh 19.488 orang penduduk, memiliki luas wilayah  $5.267,8815 \text{ Ha}$ , meliputi 10 desa pada 2 kecamatan, yaitu

Wuryantoro terdapat 8 desa dan Manyaran terdapat dua desa. Penggunaan lahan untuk sawah sebesar 17,07%, tegalan sebesar 37,11% dan untuk pekarangan sebesar 14,49% (Bappeda, 2012). Terdapat empat macam kegiatan masyarakat yang menghasilkan air limbah dan diprediksi menyumbang beban polutan ke sungai Wuryantoro dan perairan WGM. Industri tahu sebanyak tiga unit, dengan debit air limbah 5 m<sup>3</sup>/hari. Industri tempe sebanyak enam unit, dengan debit air limbah 0,5-1 m<sup>3</sup>/hari. Bengkel motor dan cuci mobil sebanyak 6 unit. RSMPD dan Puskesmas sebanyak lima unit, dengan debit air limbah 36-96 m<sup>3</sup>/hari.

### 3. Potensi Pencemaran Waduk Gajah Mungkur Wonogiri

Potensi pencemaran waduk disebabkan oleh masuknya beban limbah ke dalam waduk. Buangan dari kegiatan masyarakat di hulu dan di dalam waduk merupakan sumber timbulan bahan pencemar. Sumber timbulan bahan pencemar adalah tempat setiap kegiatan yang membuang atau mengeluarkan bahan pencemar, yang berwujud cair, gas dan partikel tersuspensi dalam kadar tertentu ke dalam lingkungan. Sumber pencemar dari aktivitas rumah tangga, rumah makan, rumah sakit, penginapan, tempat pencucian pakaian/kendaraan menjadi sumber limbah domestik. Sedangkan aktivitas pertanian, peternakan dan industri tergolong sumber pencemar non domestik.

#### a. Klasifikasi Sumber Pencemar Air

Berdasarkan karakteristik limbah yang dihasilkan, dapat dibedakan menjadi sumber limbah domestik dan sumber limbah non domestik (PermenLH 01/2010). Sumber limbah domestik pada umumnya berasal dari daerah permukiman penduduk, sedangkan sumber limbah non domestik berasal dari kegiatan seperti industri, pertanian, peternakan, perikanan, pertambangan, atau kegiatan yang bukan berasal dari wilayah permukiman. Sumber pencemar juga dapat dikelompokkan berdasarkan titik timbulan limbah, yaitu sumber tertentu (*point sources of pollution/PS*) dan sumber tak tentu (*non-point source of pollution/NPS*).

##### 1) Point Sources of Pollution (PS)

PS adalah sumber-sumber pencemar air secara geografis dapat ditentukan lokasinya dengan tepat. Jumlah limbah yang dibuang dapat

ditentukan dengan pengukuran langsung, perhitungan secara neraca massa atau estimasi lainnya. Contoh sumber pencemar air yang berasal dari sumber tertentu, antara lain kegiatan industri dan pembuangan limbah domestik terpadu. Data pencemaran air dari informasi yang dikumpulkan dan dihasilkan pada tingkat kegiatan melalui pengukuran langsung dari efluen dan perpindahannya, atau melalui penggunaan metode untuk memperkirakan atau menghitung pencemaran air.

Data yang dibutuhkan untuk melakukan inventarisasi sumber pencemar tertentu, antara lain:

- a) Klasifikasi jenis penghasil limbah, seperti kategori jenis usaha/kegiatan.
- b) Data pencemar spesifik yang dibuang, misalnya jumlah beban pencemar yang terukur/perkiraan yang dibuang ke air dalam satuan massa per unit waktu.
- c) Informasi lokasi dan jenis pencemar khusus yang dibuang, misalnya jenis industri tertentu disuatu daerah menghasilkan beberapa jenis pencemar spesifik.

Data tersebut dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti:

- a) Klasifikasi jenis penghasil limbah dapat disesuaikan dengan kategori jenis usaha dan/atau kegiatan yang terdapat dalam Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 03 tahun 2010, yang mengatur tentang baku mutu air limbah untuk jenis usaha dan/atau kegiatan tertentu, atau peraturan perundangan lainnya yang berlaku di daerah setempat.
- b) Data pencemar spesifik yang dibuang diperoleh berdasarkan laporan penataan izin lingkungan yang berkaitan dengan pembuangan air limbah ke sumber air yang mencantumkan debit air pembuangan limbah yang dibuang, dan data hasil pemantauan untuk setiap parameter spesifik bagi setiap usaha/kegiatan.
- c) Informasi lokasi jenis pencemar yang dibuang, diperoleh dari hasil pemetaan lokasi berpotensi menghasilkan air limbah yang dikelompokkan berdasarkan jenis pencemar yang dibuang menuju perairan.



## 2) *Non-Point Source of Pollution (NPS)*

**NPS**, adalah sumber-sumber pencemar air yang tidak dapat ditentukan lokasinya secara tepat, umumnya terdiri dari sejumlah besar sumber-sumber individu yang relatif kecil. Limbah yang dihasilkan antara lain berasal dari kegiatan pertanian, permukiman, dan transportasi. Penentuan jumlah limbah yang dibuang tidak dapat ditentukan secara langsung, melainkan dengan menggunakan data statistik kegiatan yang menggambarkan aktivitas penghasil limbah. Sumber pencemar air NPS, biasanya berasal dari kegiatan pertanian, peternakan, kegiatan industri kecil-menengah, dan kegiatan domestik/penggunaan barang-barang konsumsi. Sumber-sumber pencemar air ini umumnya terdiri dari gabungan beberapa kegiatan kecil atau individual yang berpotensi menghasilkan air limbah, yang tidak dapat dikelompokkan sebagai PS. Menurut Permenlh 01 tahun 2010, di beberapa daerah, sumber pencemar air NPS menunjukkan kontribusi yang berarti pada total nasional, sehingga keterlibatannya merupakan pertimbangan penting dalam inventarisasi nasional. Sebagai contoh, di daerah yang mengintensifkan kegiatan pertanian dengan melibatkan penggunaan bahan agrokimia dalam skala besar, atau di daerah yang memiliki banyak kegiatan industri kecil, sumber-sumber kecil ini memberikan kontribusi dalam total yang dihasilkan oleh kegiatan industri. Dalam beberapa kasus, menghitung besar kontribusi sumber pencemar NPS dalam inventarisasi sumber pencemar air nasional sangatlah diperlukan untuk memperoleh gambaran total secara nasional. Kontribusi pencemar NPS dan dampak potensialnya terhadap kesehatan dan lingkungan menjadi hal penting dalam tingkat regional. Sebagai contoh di beberapa daerah sentra dindustri kecil yang beroperasi di wilayah permukiman, maka inventarisasi sumber pencemar air NPS akan menjadi data yang berharga bagi perundang-undangan yang berkaitan. Dibutuhkan bebarapa informasi untuk proses inventarisasi sumber pencemar air dari NPS, antara lain:

- a) Data jumlah buangan yang dilepas per jumlah populasi atau aktivitas. Misalnya kg total N/m<sup>2</sup> tanah pertanian.
- b) Data geografis, topografi dan hidrologi: untuk mengetahui lokasi sumber pencemar air, bentang alam terutama daerah perairan seperti batas daerah air

(*watershed*), jalur pembuangan air limbah terutama untuk sistem saluran (*sewerage*), arah aliran permukaan dan air tanah.

- c) Pengidentifikasian batas wilayah. Skala inventarisasi berkaitan erat dengan batas wilayah inventarisasi. Ini sangat menentukan tingkat akurasi estimasi tingkat pencemar. Semakin kecil wilayah geografis, maka semakin akurat. Batas wilayah geografis yang diidentifikasi dalam kegiatan inventarisasi adalah:

- 1) Wilayah ekologi (*catchment area*), meliputi batas zona perairan (*watershed*) dan jenis perairan, seperti sungai dan anak-anak sungai, danau, waduk, rawa, laut, muara sungai, dan sumber air lainnya.
- 2) Wilayah administratif, meliputi batas administratif wilayah inventarisasi, misalnya wilayah kabupaten/kota, provinsi, dan negara.
- 3) Identifikasi batas wilayah merupakan hal penting untuk dilakukan, mengingat sumber penyedia data dan informasi yang relevan umumnya berada dalam tingkat wilayah inventarisasi.

- d) Pengidentifikasian sumber pencemar air.

Semua sumber pencemar air yang berada dalam wilayah inventarisasi kemudian diidentifikasi berdasarkan jenis pencemar dan sumbernya. Jenis pencemar yang berasal dari limbah domestik akan berbeda dengan jenis pencemar dari limbah non domestik. Tabel 2 menyajikan contoh karakteristik air limbah domestik (*Untreated Domestic Wastewater*).

Tabel 2 Karakteristik Air Limbah Domestik yang Belum Diolah

Jenis Pencemar	Unit	Konsentrasi		
		Rendah	Sedang	Tinggi
Padatan total (TS)	mg/L	350	720	1200
Padatan terlarut (TDS)	mg/L	250	500	850
Padatan tersuspensi (TSS)	mg/L	100	220	350
<i>Settleable solids</i>	mg/L	5	10	20
BOD <sub>5</sub>	mg/L	110	220	400
COD	mg/L	250	500	1000
Organic Carbon Total (TOC)	mg/L	80	160	290
Nitrogen Total	mg/L	20	40	85
Organik	mg/L	8	15	35
Amoniak bebas	mg/L	12	25	50
Nitrit	mg/L	0	0	0

Jenis Pencemar	Unit	Konsentrasi		
		Rendah	Sedang	Tinggi
Pospor Total	mg/L	4	8	15
• Organik	mg/L	1	3	5
• Inorganik	mg/L	3	5	10
Klorida	mg/L	30	50	100
Sulfat	mg/L	20	30	50
Alkalinitas sebagai CaCO <sub>3</sub>	mg/L	50	100	200
Lemak	mg/L	50	100	150
Koliform total	No./100 mL	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
VOCs	g/L	< 100	100-400	> 400

Sumber: PermenLH. No. 01/2010

Parameter dominan dari kegiatan pemanfaatan lahan disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Parameter dominan kegiatan pemanfaatan lahan

Pemanfaatan lahan	Parameter Utama
Pertanian	Sedimen, N, P, Pestisida, BOD, Logam berat
Aliran irigasi/pengairan	TDS
Peternakan	Sedimen, N, P, BOD
Urban Runoff	Sedimen, N, P, BOD, Pestisida, TDS, logam berat, koliform
Jalan raya	Sedimen, N, P, BOD, TDS, Logam berat
Konstruksi	Sedimen, Logam berat
<b>Terrestrial disposal</b>	<b>N, P, TDS, Logam berat, pencemar lainnya</b>
Pertambangan	Sedimen, logam berat, keasaman

Sumber: Permenlh. No.01 tahun 2010

Karakteristik limbah yang diidentifikasi, ditentukan tingkat bahaya dan toksisitasnya. Semakin tinggi tingkat bahaya dan toksisitasnya menjadi prioritas inventarisasi. Hal ini menjadi isu penting dalam identifikasi jenis pencemar, mengingat adanya beberapa pencemar yang bersifat toksik walaupun jumlahnya yang relatif kecil. Selain itu karakteristik limbah juga diidentifikasi berdasarkan jenis pencemar spesifik untuk masing-masing kegiatan. Jenis pencemar spesifik untuk setiap usaha dan/atau kegiatan didasarkan pada parameter kunci yang terdapat dalam lampiran peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 03 tahun 2010, yang mengatur baku mutu air limbah untuk setiap kegiatan. Juga diatur dalam peraturan Gubernur Jawa Tengah nomor 5 tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah Industri.

Sumber bahan pencemar yang masuk ke badan air waduk atau sungai dibedakan menjadi dua (2), yaitu *point source of pollution* (**PS**) dan *non-point source of pollution* (**NPS**). PS adalah titik sumber bahan pencemar teridentifikasi secara jelas baik tempat, jenis bahan pencemar dan volume buangnya seperti limbah dari outlet industri. NPS adalah sumber pencemar tidak satu titik, melainkan tersebar di banyak tempat dan tidak dapat diidentifikasi secara pasti jenis dan volume buangnya (EPA-US, 2009). Penetapan titik sumber buangan limbah terkait dengan penataan ruang wilayah secara benar, sehingga dapat diidentifikasi antara titik pembuangan PS dan NPS (Utomo dkk., 2011).

#### b. **Jenis Bahan Pencemar**

Menurut Davis dan Master (2004, dalam Utomo dkk., 2011), terdapat tiga jenis, bahan pencemar yaitu 1) bahan pencemar fisik, berupa material tersuspensi seperti lumpur, tanah, pasir dan bahan organik, 2) bahan pencemar kimia, berupa zat organik seperti minyak, sabun, deterjen, zat warna, karbohidrat dan protein, juga berupa zat anorganik, berupa unsur bebas, logam berat, asam, basa dan garam, 3) bahan pencemar biologi, meliputi mikroorganisme patogen dan mikroorganisme yang pertumbuhannya tak terkendali (*blooming*) karena efek eutrofikasi, seperti ganggang (*algae*), fitoplankton, dan enceng gondok. Mikroorganisme patogen terutama berasal dari tinja manusia terdiri dari empat kelompok virus, bakteri, protozoa dan cacing. Adanya sumber bahan pencemar air oleh logam berat dari berbagai sumber, akan menyebabkan terganggunya populasi biota air di perairan tersebut. Masuknya zat pencemar logam berat ke dalam perairan selain mengendap di dasar perairan juga akan diakumulasi oleh tumbuhan dan hewan air (Utomo dkk., 2011).

#### c. **Sumber Timbulan Bahan Pencemar**

Sumber timbulan bahan pencemar WGM berasal dari kegiatan masyarakat di DTA dan kegiatan masyarakat di dalam badan waduk.



### 1) Limbah dari Kegiatan Masyarakat

**Limbah dari kegiatan masyarakat di DTA** yang dibuang ke badan sungai dan masuk ke perairan WGM melalui tujuh sub DAS, yaitu sub DAS Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo hulu, Alang, Ngunggahan dan Wuryantoro. Kegiatan masyarakat di hulu waduk, seperti restoran, peternakan, pertanian, hotel dan industri, yang mengalir melalui aliran Sub-DAS ke WGM berpotensi membawa beban pencemar. Hasil penelitian Pujiastuti (2010), beban pencemar yang paling besar masuk ke WGM adalah TSS dari sub DAS Keduang dengan sumbangan beban pencemar 291,84 ton/th. Sub DAS tersebut membawa sedimen akibat erosi tanah yang ada di sekitarnya pada saat hujan dengan total beban pencemaran akibat sedimen adalah 891,71 ton/th. Beban pencemaran organik berdasar parameter BOD dan COD, menempati urutan kedua sebagai penyumbang pencemar ke perairan WGM.

Kegiatan masyarakat di bagian hulu dapat mengancam fungsi waduk (Anonim, 2001). Pencemaran DAS menyebabkan pencemaran di waduk (Haryadi, 2003). Pertanian tidak ramah lingkungan menyebabkan erosi lahan dan sedimentasi (Anshori, 2008), residu pestisida karbamat (Manuba, 2009), sumber polutan parameter TSS, N-NO<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub> (KemenLH, 2010). Limbah peternakan meningkatnya kandungan TSS, BOD, *E-coli* (KemenLH, 2010). Limbah permukiman sebagai sumber polutan parameter BOD, COD, TSS dan *E-coli*, sedang limbah industri menyumbang naiknya parameter BOD, COD, TSS, Fenol, pH, Cd, Pb, dll (KemenLH, 2010) pada sungai dan waduk. Limbah domestik sebagai sumber polutan pada parameter BOD, TSS dan minyak lemak.

Terdapat bermacam-macam kegiatan industri kecil di wilayah DTA WGM, antara lain industri tahu-tempe, air limbah yang dihasilkan mempunyai kontribusi sebagai sumber polutan perairan WGM pada parameter BOD, COD dan TSS. Keberadaan sentra Industri tapioka di beberapa kecamatan, air limbahnya berpeluang menyumbang polutan pada parameter BOD, COD, TSS dan CN. Industri *rice mill* juga mempunyai peluang sebagai sumber polutan pada parameter BOD, COD dan TSS. Industri rumah sakit, Puskesmas, Rawat Inap dan Rumah bersalin juga menghasilkan air limbah yang mempunyai kontribusi sebagai sumber polutan pada parameter TSS, BOD, COD dan E-coli.

## 2) Sumber Timbulan Limbah dari dalam WGM

Sumber timbulan limbah dari dalam WGM, berasal dari kegiatan masyarakat berupa usaha budidaya ikan dalam KJA. Jumlah petak meningkat dari 185 petak di tahun 1997 menjadi 1187 petak di tahun 2010 (Pujiastuti, 2013). KJA mengembangkan ikan nila merah dan karper, yang mendapatkan makanan dari pellet, diberikan secara di tabur. Dari pakan yang diberikan hanya 70% yang dimakan oleh ikan, 30% sisanya akan lepas ke badan perairan sebagai bahan pencemar (Marganof, 2007).

Salah satu manfaat air waduk adalah untuk budidaya ikan dengan sistem KJA. Kegiatan ini akan memberikan buangan berupa pakan yang tidak termakan dan feses ke badan air. Semakin banyak KJA yang beroperasi akan semakin banyak limbah yang masuk ke perairan. Pertumbuhan ikan ditentukan oleh proses metabolisme bioenergi dalam memanfaatkan pakan. Efisiensi pemanfaatan pakan di KJA ditentukan oleh ikan dan tingkat pemberian pakan. Pemberian pakan yang berlebih akan menimbulkan dampak lanjut ke perairan berupa kotoran dan sisa pakan. Risiko terjadinya dampak tersebut ditentukan oleh: pola distribusi spasial dan temporal oksigen dan tingkat beban bahan organik serta cadangan oksigen yang tersedia (Pujiastuti, 2013).

Ikan nila merah dan karper yang dikembangkan selain mendapat makanan alami juga di beri pakan berupa *pellet*. Kandungan gisi *pellet* ikan CP 788 adalah mengandung protein 26-28%, lemak 3-5%, serat 4-6%, abu 5-8% dan kadar air 11-13% (PT Central Pangan Pertiwi). Pada saat survei lapangan jumlah pakan yang diberikan dihitung terlebih dahulu dengan memperhitungkan jumlah populasi yang ada. Dengan padat tebar sebesar 214,4 kg benih yang ditebar, pemberian pakan 3% dari berat total biomass ikan yaitu sebesar 6,4 kg pakan perhari. Frekuensi pemberian pakan setiap hari antara jam 12.00-13.00 WIB, dan sore hari jam 17.00-18.00 WIB (Pujiastuti, 2013). Untuk menentukan jumlah pakan yang di berikan pada waktu selanjutnya perlu dilakukan sampling ikan, misalnya diperoleh berat rata-rata ikan sebesar 93 gram per ekor, ikan yang disampling sejumlah 4-8 ekor, pemberian pakan selanjutnya meningkat menjadi 17,08 kg/hari. Pada sampling yang ke tiga atau pada tujuh minggu pemeliharaan

diperoleh berat ikan rata-rata 138 gram/ekor. Dari data hasil sampling selain dapat ditentukan jumlah pakan yang akan diberikan juga dapat menentukan perkembangan berat ikan selama pemeliharaan. Pola pemberian pakan yang dilakukan selama puluhan tahun ini sedikit banyak dapat merubah kualitas air WGM.

Kegiatan budidaya ikan di keramba jaring apung oleh PT. Aquafarm Nusantara sudah merupakan sumber pencemaran yang berpotensi untuk menurunkan kualitas lingkungan perairan Danau Toba (Sihotang, 2009). Kandungan ammonia bebas yang terlarut dalam perairan Danau Toba di lokasi KJA PT. Aquafarm Nusantara bila digunakan sebagai air minum sudah tidak layak untuk 4 lokasi pengukuran. Pada pH kondisi basa rata-rata di atas pH 8 pada 14 lokasi tersebut cenderung dapat meningkatkan kadar amonia bebas terlarut dalam perairan sekitar KJA PT. Aquafarm Nusantara tersebut, dan dikawatirkan akan memberikan dampak lanjutan pada kesehatan manusia pada konsentrasi tertentu apabila tidak segera ditanggulangi, yakni antara lain: Uapnya dapat menimbulkan iritasi sistem pernafasan, iritasi pada mata, dapat menimbulkan kebutaan, dan cairannya bisa membakar/iritasi pada kulit. Meningkatnya gas ammonia pada pH basa dikarenakan oksigen terlarut turun, dan proses perubahan ammonium ke nitrat akan lambat (proses oksidasi berkurang) (Sihotang, 2009). Kompas (7 dan 8 Januari 2009) memuat berita tentang matinya 13.413 ekor ikan karamba di danau Maninjau dan air danau berubah menjadi keruh kehijauan. Dugaan selama ini selalu berkisar pada peristiwa naiknya belerang dari dasar danau akibat angin kencang yang terjadi sebelumnya. Tapi melihat pertumbuhan jumlah karamba yang terus meningkat, yang berarti terus meningkatnya jumlah ikan yang dipelihara di perairan danau tersebut, patutlah untuk diduga keras terjadinya endapan sisa pakan dan kotoran ikan di dasar danau yang terus menumpuk dari waktu ke waktu. Dengan pemeliharaan intensif dan bibit unggul 1,5-2,0 kg pakan akan menghasilkan 1 kg daging ikan. Dapat disimpulkan bahwa sisa pakan dalam bentuk kotoran ikan yang jatuh ke perairan sekitar 50% dari pakan yang diberikan (Marganof, 2007). Secara kimiawi, kotoran ini akan berubah menjadi amoniak dan amonium ( $\text{NH}_3$  dan  $\text{NH}_4$ ) yang oleh bakteri pengurai akan dirubah menjadi Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) yang

bersifat racun bagi ikan. Lebih lanjut Nitrit akan diuraikan menjadi Nitrat yang tidak berbahaya seperti Nitrit, tapi merangsang pertumbuhan Algae. Adalah benar bahwa angin kencang akan dapat membongkar tumpukan Nitrit ini dari dasar danau. Terjadinya “*Algae Bloom*” atau ledakan pertumbuhan Algae di perairan Maninjau akibat konsentrasi Nitrogen yang tinggi.

#### d. Toksisitas Logam Berat

Logam berat merupakan kelompok logam yang mempunyai spesifikasi graviti lebih besar dari  $4 \text{ g/cm}^3$  (Palar, 2002), seperti Cd, Cr, Cu, Hg, Pb dan Zn. Sumber pencemaran logam berat berasal dari kegiatan industri, pertambangan, pembakaran bahan bakar, kegiatan domestik, dll. Jumlah logam berat akan semakin meningkat dengan meningkatnya kegiatan masyarakat, akan mengalami bioakumulasi pada biota air, sehingga menimbulkan efek toksik pada manusia.

Logam berat Be, Co, Au, Se, Hg, Ni, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb, Sn, Cd, Bi dan Pt, termasuk katagori sangat toksik dan relatif banyak keberadaannya. Hg merupakan logam berat yang memiliki tingkat toksisitas paling tinggi terhadap hewan air, selanjutnya berturut-turut ke tingkat toksisitas lebih rendah adalah logam berat Cd, Zn, Pb, Cr, Ni dan Co. Alian, *et all* (2014) menyatakan bahwa Pb dan Zn adalah logam yang paling *bioavailable* dalam sedimen sungai di Malaysia. Logam Fe, Al, Cr dan Si terdeteksi pada sedimen inlet WGM dan logam Fe, Al dan Cr terdeteksi pada sedimen di lokasi karamba, sedangkan pada lokasi outlet WGM ditemukan logam Fe dan Al (Sudaryo dan Sucipto, 2010).

Keberadaan logam berat dalam sedimen, berasal dari limbah cair industri yang dibawa oleh aliran sungai pada sub DAS. Selanjutnya logam tersebut mengalami proses fisika dan kimia seperti absorpsi dan pengendapan, sehingga terakumulasi dalam sedimen. Logam berat yang masuk ke perairan waduk, akan dipindahkan dari badan air melalui pengendapan, adsorpsi dan absorpsi oleh organisme perairan. Logam berat mempunyai sifat mudah mengikat bahan organik dan mengendap di dasar perairan, kemudian bersatu dengan sedimen, sehingga kadar logam berat sedimen lebih tinggi dibanding dalam air. Kandungan logam berat pada sedimen dipengaruhi oleh musim, pada musim kemarau kandungan

logam berat lebih kecil daripada musim penghujan. Akumulasi logam berat di perairan tenang lebih besar daripada di perairan deras (Cahaya, 2012).

Tingkat toksisitas logam berat dalam perairan dapat ditentukan dengan menghitung nilai  $LC_{50}$ , menggunakan biota uji. Suatu bahan kimia dinyatakan berkemampuan toksik akut bila aksi langsungnya mampu membunuh 50% atau lebih populasi uji dalam selang waktu yang pendek, misal 24 jam, 48 jam s/d 14 hari. *Lethal Concentration* ( $LC_{50}$ ) merupakan konsentrasi suatu zat yang secara statistik dapat menyebabkan 50% kematian biota uji. Nilai  $LC_{50}$  selama 96 jam pada setiap spesies berbeda-beda, pada ikan bandeng sebesar 224,7 ppm, sedangkan pada ikan tombro sekitar 8,72 ppm (Setiadi 2000 dalam Cahaya, 2012). Ikan yang terpapar dalam air yang tercemar oleh logam berat dalam konsentrasi subletal akan menyerap bahan aktif tersebut melalui permukaan tubuh, membran insang dan difusi kutikular. Penyerapan berlangsung terus menerus sampai tercapai keadaan *steady state*, yaitu kondisi dimana jumlah bahan uji yang diserap dan didepurasi persatuan waktu seimbang pada suatu konsentrasi bahan dalam air (Nagel and Loskill, 1991 dalam Taufik, dkk., 2009).

#### **e. Daya Tampung Beban Pencemaran Pada Air Waduk**

Daya tampung beban pencemaran (DTBP) waduk, sering disebut dengan beban harian maksimum total (*total maximum daily loads*), merupakan kemampuan air waduk untuk menerima masukan beban pencemaran tanpa mengakibatkan air waduk menjadi tercemar (PermenLH, 01/2010). Penetapan DTBP merupakan pelaksanaan pengendalian pencemaran air (*water quality-based control*). Pendekatan ini bertujuan mengendalikan zat pencemar yang masuk ke dalam perairan waduk, dengan mempertimbangkan kondisi instrinsik air waduk dan baku mutu air yang ditetapkan pada PP 82 tahun 2001. Hasil perhitungan DTBP dapat dipergunakan sebagai dasar pengalokasian beban (*waste load allocation*) yang diperbolehkan masuk ke perairan waduk dari berbagai sumber pencemar, supaya tindakan pengendalian yang tepat dapat dilakukan, sehingga baku mutu air dapat dipenuhi, yang dapat berimplikasi mutu air di masa yang akan datang dapat tetap terjaga. Terdapat beberapa faktor yang menentukan DTBP waduk, antara lain (PermenLH, 01/2010):

- 1) Kondisi hidrologi, morfologi, kualitas air waduk yang ditetapkan DTBPnya
- 2) Kondisi klimatologi waduk, seperti suhu udara, kecepatan angin dan kelembaban udara
- 3) Baku mutu air atau kelas air untuk sungai dan muara, atau baku mutu air dan kriteria status tropik air bagi waduk
- 4) Beban pencemar sumber tertentu (*point source*)
- 5) Beban pencemar sumber tak tentu (*non point source*)
- 6) Karakteristik dan perilaku zat pencemar yang dihasilkan sumber pencemar
- 7) Pemanfaatan atau penggunaan air waduk
- 8) Faktor pengaman (*margin of safety*) yang merupakan nilai ketidakpastian dalam perhitungan. Ketidakpastian tersebut bersumber dari tidak memadainya data dan informasi tentang hidrolika dan morfologi air waduk, selain kurangnya pengetahuan mengenai karakteristik dan perilaku zat pencemar.

Terdapat beberapa tahap yang perlu diperhatikan dalam melakukan perhitungan DTBP (Permenlh 01/2010).

- 1) **Tahap pertama** dalam perhitungan DTBP adalah menetapkan prioritas sumber air yang akan ditentukan DTBP-nya. Penentuan prioritas didasarkan pada hasil kajian status mutu air dan status tropik air waduk, yaitu: 1) Sungai dan muara yang memiliki status mutu air paling tercemar. 2) Waduk yang memiliki status mutu air paling tercemar dan kadar hara paling tinggi. Penentuan prioritas juga didasarkan pada tingkat potensi sumber pencemar yang berpotensi menerima jumlah beban pencemar yang terbesar.
- 2) **Tahap ke dua** dalam perhitungan DTBP adalah melakukan inventarisasi dan identifikasi kondisi hidrologi, morfologi dan faktor-faktor lain yang berpengaruh terhadap kondisi air waduk. Data tersebut paling sedikit meliputi: 1) peta dasar: peta rupa bumi Indonesia. 2) data klimatologi dan meteorologi, seperti radiasi sinar matahari, curah hujan, suhu udara, kecepatan angin dan kelembaban udara. 3) data hidrolis sumber air yang meliputi: debit, volume, panjang, lebar, kedalaman, kemiringan hidrolis, kecepatan air. 4) data kualitas air waduk.
- 3) **Tahap ke tiga**, adalah melakukan identifikasi baku mutu air untuk sungai dan muara atau baku mutu air, dan kriteria status tropik air bagi waduk. Apabila



baku mutu air atau status tropik air belum ditentukan, dapat digunakan kualitas air kelas II, sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001, tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.

- 4) **Tahap ke empat**, adalah melakukan inventarisasi dan identifikasi jenis, jumlah beban (debit dan konsentrasi) dan karakteristik sumber pencemar, meliputi: a) sumber pencemar tertentu (*point source*): saluran irigasi, drainase, anak sungai, outlet limbah industri atau domestik (IPAL, rumah tangga terpadu, hotel, dan rumah sakit). b) sumber pencemar tak tentu (*non point source*): rumah tangga tanpa IPAL, pertanian, peternakan dan pertambangan.
- 5) **Tahap ke lima** adalah melakukan identifikasi pemanfaatan sumber air.
- 6) **Tahap ke enam** adalah melakukan perhitungan DTBP sumber air, dengan menggunakan berbagai metode, antara lain: 1) perhitungan kesetimbangan neraca massa. 2) pemodelan analitis menggunakan persamaan matematika yang secara ilmiah telah teruji misalnya metode *streeter-phelps*, QUALK2W. 3) pemodelan numerik terkomputasi (*computerized numerical modeling*). 4) metode lain yang didasarkan pada perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, sepanjang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

#### 4. Degradasi Perairan Waduk

Degradasi perairan adalah suatu *penurunan kualitas* perairan, baik berupa penurunan kualitas fisis, kualitas secara kimia, kualitas berdasarkan bakteriologis dalam perairan, maupun kualitas berdasarkan radioaktivitas dalam perairan, serta bisa juga berupa *penurunan kuantitas* perairan. Beberapa fenomena sebagai indikator terjadinya degradasi perairan antara lain: terjadinya ketimpangan debit air saat musim penghujan dengan musin kemarau, penurunan tampungan perairan akibat sedimentasi, terjadinya pencemaran perairan berdasarkan parameter fisika, kimia dan biologi, terjadinya pengkayaan unsur nutrisi tanaman yang ditandai dengan meningkatnya total Nitrogen dan eutrofikasi.

Perairan WGM telah mengalami degradasi, hal ini dilihat dari beberapa fenomena yang telah terjadi di WGM dari saat mulai difungsikan sampai penelitian ini dilaksanakan. Berdasarkan penelusuran pustaka dapat disajikan beberapa fenomena degradasi perairan WGM, yaitu:

### a. Penurunan Tampungungan Waduk

Laju sedimentasi WGM lebih cepat dari yang direncanakan, sehingga kehilangan tampungungan  $\pm 0,62\%$ /tahun (Kironoto, 2010). Berdasarkan laporan JICA tahun 2005, tampungungan efektif waduk sudah berkurang 13,4% akibat sedimentasi (Wulandari dkk., 2013), disajikan pada Tabel 2. WGM direncanakan beroperasi selama 100 tahun terhitung mulai operasi tahun 1982 sampai tahun 2082, namun setelah 20 tahun beroperasi, WGM mengalami masalah sedimentasi yang serius. WGM mempunyai kemampuan maksimal penyimpanan sedimen (*dead storage*) sebesar 120 juta  $m^3$  dengan asumsi laju sedimen (endapan lumpur) sebesar 2 milimeter per tahun. Tetapi kenyataan laju sedimentasi mencapai 8 milimeter per tahun (2009). Selama 22 tahun, dari 1982 s/d 2004 laju sedimentasi WGM mencapai 7,5 juta  $m^3$ /th, jauh dari perkiraan diawal perencanaan sebesar 1,2 juta  $m^3$ /th (Nippon Koei and Yachiyo, 2005 dalam Kironoto 2010). Pengoperasian waduk penampung sedimen dapat menurunkan besarnya deposisi netto yang terjadi pada waduk  $\pm 30,41\%$  bila dibandingkan dengan kondisi sebelum adanya waduk penampung (Sardi dkk., 2008).

Tabel 4. Kapasitas Tampungungan WGM Hasil Pengukuran 2005

Zona Tampungungan	Kisaran Elevasi (m)	Tampungungan Waduk Tahun 1980 ( $10^6 m^3$ )	Tampungungan Waduk Tahun 2005 ( $10^6 m^3$ )	Berkurangnya Tampungungan tahun 1980-2005(%)
Flood Control	135,5 – 138,3	220	218	0,9
Irigasi dan PLTA	127,0 – 136,0	440	375	13,4
Sedimen	< 127,0	120	61,1	49,1

Sumber: Tim Studi JICA/BBWS B. Solo, 2007.

Penurunan kapasitas tampungungan efektif waduk ini mengurangi ketersediaan air waduk untuk melayani kebutuhan irigasi dan pembangkit tenaga listrik, terutama pada musim kemarau.

### b. Ketimpangan Debit Air

Terjadi ketimpangan debit air antara musim penghujan dan musim kemarau. Pada musim penghujan debit air melimpah, sedangkan musim kemarau terjadi kekeringan. Menurut laporan tim studi JICA (2005 dalam Sardi dkk., 2008), rerata debit air dari beberapa sungai pada sub DAS yang masuk ke

WGM sebagai berikut sungai Keduang sebesar 12,7 m<sup>3</sup>/dt, Tirtomoyo/Wiroko sebesar 7,9 m<sup>3</sup>/dt, Temon sebesar 2,0 m<sup>3</sup>/dt, Bengawan Solo Hulu sebesar 5,1 m<sup>3</sup>/dt, Alang sebesar 4,1 m<sup>3</sup>/dt, secara detil debit bulanan selama satu tahun 2005 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Debit Bulanan Sungai-Sungai Utama WGM Tahun 2005

Sub DAS	Debit Bulanan (m <sup>3</sup> /detik)												Rerata (m <sup>3</sup> /detik)
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Keduang	26,4	35,3	29,6	18,3	6,6	3,9	2,1	1,0	1,5	2,4	8,9	15,9	12,7
Tirtomoyo	16,4	21,9	18,4	11,4	4,1	2,4	1,3	0,7	1,0	1,5	5,5	9,9	7,9
Temon	4,2	5,6	4,7	2,9	1,1	0,6	0,3	0,2	0,2	0,4	1,4	2,5	2,0
B. Solo	10,6	14,2	11,9	7,4	2,7	1,6	0,9	0,4	0,6	1,0	3,6	6,4	5,1
Alang	8,5	11,3	9,5	5,9	2,1	1,2	0,7	0,3	0,5	0,8	2,8	5,1	4,1

(Sumber : Tim Studi JICA, 2005)

Berdasarkan wawancara peneliti dengan BPDAS, rerata debit air tiap sub DAS pada tahun 2012 sebagai berikut: Keduang maksimal 146,552 m<sup>3</sup>/dt dan minimal 2,766 m<sup>3</sup>/dt, Temon maksimal 109,880 m<sup>3</sup>/dt dan minimal 0 m<sup>3</sup>/dt, Alang maksimal 29,360 m<sup>3</sup>/dt dan minimal 0 m<sup>3</sup>/dt, Wuryantoro maksimal 19,887 m<sup>3</sup>/dt dan minimal 0,01 m<sup>3</sup>/dt.

**c. Terjadinya Pencemaran Berdasarkan Beberapa Parameter Fisika, Kimia atau Biologi.**

Berdasarkan pemantauan Badan Lingkungan Hidup Kabupaten Wonogiri dari tahun 2009 sampai dengan tahun 2012, terhadap outlet sub DAS yang masuk ke perairan WGM yaitu Keduang, Temon, Wiroko, Alang, Bengawan Solo Hulu, Wuryantoro dan perairan WGM terdapat beberapa parameter yang telah melebihi baku mutu kualitas air kelas dua, seperti BOD, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub> dan TSS. Pada beberapa titik sampling di *water bodys* Terdapat sebanyak delapan parameter yang di bawah baku mutu air kelas 2 PP 82 tahun 2001, yaitu TSS, DO, BOD, COD, N-NO<sub>2</sub>, P-PO<sub>4</sub>, Fecal coliform dan total coliform (Pujiastuti, 2010). Rata-rata mempunyai status mutu tercemar ringan sampai berat terhadap kualitas air kelas dua dilihat dari 8 parameter TSS, DO, BOD, COD, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub> (Pujiastuti, 2013).

## 5. Pengendalian Pencemaran Perairan Waduk

Pencemaran perairan waduk, oleh limbah domestik maupun limbah yang dihasilkan dari kegiatan masyarakat, merupakan masalah serius yang dapat mengancam keberadaan sumberdaya perairan dan kerusakan lingkungan. Oleh sebab itu diperlukan upaya untuk mengendalikan, sehingga dapat meminimalkan dampak berantai terhadap nilai-nilai manfaat waduk (Pujiastuti, 2009). Upaya pengendalian pencemaran dengan mengurangi beban pencemaran yang masuk ke perairan sungai dan waduk dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, antara lain: (1) pendekatan teknologi dengan membangun IPAL, (2) pendekatan hukum, (3) pendekatan sosial ekonomi dan budaya (Brahmana dkk., 2002).

### a. Pendekatan Sistem

**Pendekatan Sistem**, diartikan sebagai suatu metodologi penyelesaian masalah yang dimulai secara tentative, mendefinisikan atau merumuskan tujuan dan hasilnya adalah suatu sistem operasi yang secara efektif dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang kompleks. Ada beberapa tahapan, yang harus diikuti yaitu: (1) analisis kebutuhan, bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan dari semua perilaku, (2) Formulasi permasalahan, yang merupakan kombinasi dari semua permasalahan dalam sistem, (3) identifikasi sistem, bertujuan untuk menentukan variabel-variabel sistem dalam rangka memenuhi kebutuhan semua pelaku dalam sistem, (4) pemodelan abstrak, pada tahap ini mencakup suatu proses interaktif antara analisis sistem dengan pembuat keputusan, yang menggunakan model untuk mengeksplorasi dampak dari berbagai alternatif dan variabel keputusan terhadap berbagai kriteria sistem, (5) implementasi, tujuan utamanya adalah untuk memberikan wujud fisik dari sistem yang diinginkan, (6) operasi, pada tahap ini akan dilakukan validasi system. Pada tahap formulasi permasalahan terjadi modifikasi-modifikasi tambahan karena cepatnya perubahan lingkungan pada sistem tersebut (Eriyanto, 2003).

### b. Pemodelan

Model merupakan suatu bentuk yang dibuat untuk menirukan suatu gejala atau proses. Dalam pelaksanaan pendekatan sistem, pengembangan model

merupakan hal yang sangat penting yang akan menentukan keberhasilan dalam mempelajari sistem secara keseluruhan. Pada sistem dinamis, diagram sebab akibat akan digunakan sebagai dasar untuk membuat diagram alir yang disimulasikan dengan menggunakan program *powersim*. Program ini dapat memberikan gambaran tentang perilaku sistem, sehingga dengan simulasi dapat ditentukan alternatif terbaik dari sistem yang dibangun. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan kesimpulan dan kebijakan apa yang harus dilakukan untuk mengantisipasi atau mengubah perilaku sistem yang terjadi (Marganof, 2007).

## 6. Model *System Dynamics*

*System Dynamics* merupakan pengetahuan untuk memahami dan mempelajari dinamika sistem. Dinamika adalah menggambarkan perubahan, sehingga memunculkan skenario dalam memodelkannya. Hal ini menjadi syarat dalam *system dynamics*. Sedangkan sistem menggambarkan suatu unsur yang kompleks dan saling terkait, untuk melakukan satu fungsi. Dalam sistem dinamik minimal harus ada satu loop balik (*feedback*). Ada tiga syarat penerapan *system dynamics*, yaitu: 1) ada skenario, 2) memiliki minimal satu loop balik (*feedback*), 3) mempunyai *time series*. Model adalah suatu bentuk penyederhanaan dari sistem yang rumit, untuk mempresentasikan dunia nyata atau keadaan sesungguhnya (Firmasyah, 2015).

Model *System Dynamics* merupakan metode analisis kebijakan yang telah dan sedang berkembang sejak diperkenalkan pertama kali oleh Jay W. Forrester pada tahun 1950-an dan berpusat di MIT Amerika Serikat. Metode ini erat hubungannya dengan pertanyaan-pertanyaan tentang tendensi-tendensi dinamika sistem-sistem yang kompleks, yaitu pola-pola tingkah laku yang dibangkitkan oleh sistem itu dengan bertambahnya waktu (Tasrif, 2005). *System Dynamics* dirancang untuk analisis sistem kompleks fisika-sosial dan ekonomi (Shen *et al.*, 2009). Metodologi *system dynamics* secara detil dijelaskan oleh Forrester (1968 dalam Widiatmaka dkk., 2014). Penerapan metodologi *system dynamics* telah dilakukan dalam berbagai bidang, termasuk kelestarian lingkungan (Forrester 1961, 1968 dalam Widiatmaka 2014), perencanaan tanah dan sumber daya air (Ford, 1996;

Zarghami dan Akbariyeh, 2012 dalam Widiatmaka 2014), pengendalian pencemaran air sungai Surabaya (Swami, 2012), dan lain-lain.

Penggunaan metodologi ini lebih ditekankan kepada tujuan-tujuan peningkatan pengertian tentang bagaimana tingkah laku sistem itu muncul dari strukturnya. Pengertian ini sangat penting dalam perancangan kebijaksanaan yang efektif. Persoalan yang dapat dengan tepat dimodelkan menggunakan *System Dynamics* adalah masalah yang: 1) mempunyai sifat dinamis, yaitu berubah terhadap waktu, 2) struktur fenomenanya mengandung paling sedikit satu struktur umpan balik (*feedback structure*) (Tasrif, 2005).

Prinsip-prinsip pembuatan model dinamik menurut Sterman (1981 dalam Tasrif 2005) meliputi: 1) Keadaan yang diinginkan dan keadaan yang sebenarnya terjadi harus dibedakan di dalam model, 2) Adanya struktur stok dan aliran dalam kehidupan nyata harus dapat direpresentasikan di dalam model, 3) Aliran-aliran yang berbeda secara konseptual, di dalam model harus dibedakan, 4) Hanya informasi yang benar-benar tersedia bagi aktor-aktor di dalam sistem yang harus digunakan dalam pemodelan keputusannya, 5) Struktur kaidah pembuatan keputusan di dalam model haruslah sesuai (cocok) dengan praktek-praktek manajerial, 6) Model haruslah *robust* (kuat) dalam kondisi-kondisi ekstrim. Menurut Firmansyah (2015), terdapat beberapa hal penting yang perlu diperhatikan dalam membuat model sistem dinamik, yaitu:

- a. Mengenali sistem dan batasan sistem, agar mengetahui dari mana akan memulainya dan lingkup kajiannya.
- b. Menyerederhanakan sistem yang sudah dikenali, dalam bentuk *causal loops*. Hal ini penting yang harus diperhatikan saat membuat *Stock Flow Diagram*, adalah pemilahan terhadap variabel-variabel yang akan dimasukkan. Secara jelas dibedakan antara *stock/level*, *flow* dan *auxiliary* serta konstanta. Perlu dilakukan pemilahan terlebih dahulu dan dikelompokkan, hal ini untuk mempermudah dalam membangun struktur sistem nantinya.
- c. Memahami kelebihan dan kekurangan tools yang akan digunakan. Contoh tools untuk penerapan sistem dinamik adalah Powersim, Vensim, Stella, Ithink, karena hal terpenting adalah filosofi dan berpikir sistem.
- d. Memulai dengan sistem pendekatan. Ada tiga hal yang harus diperhatikan:



- 1) Menentukan tujuan sistem yang akan ditinjau. Tujuan model ada di output yang diinginkan dalam sistem black box.
  - 2) Menentukan variabel yang akan dilihat perilakunya.
  - 3) Membuat analisis kebutuhan bidang/kelompok/sektor/ stakeholder, dll., sehingga nantinya dapat melihat kombinasi tingkat kebutuhan yang dominan.
- e. Melakukan pemilahan analisis kebutuhan berdasarkan kriteria untuk mempermudah dalam pengembangan formula masalah. Misalnya Stakeholder meliputi Pemerintah, Masyarakat, Pelaku Usaha, LSM dan Akademisi. Dimensi, meliputi sosial, ekonomi, lingkungan, teknologi, hukum dan kelembagaan). Analisis kebutuhan dapat dikembangkan lebih luas lagi, tergantung aspek yang dikaji.
- f. Memformulasikan permasalahan. Memfokuskan permasalahan agar sejalan dengan permasalahan umum dari semua stakeholder, bidang dan aspek lainnya, serta permasalahan mampu mengarah pada tujuan yang akan dicapai. Perlu memuat list daftar seluruh permasalahan yang ada. Dalam memformulasikan masalah dapat diperoleh dari penelitian sebelumnya, atau hasil kajian analisis sebelumnya, ataupun dengan *expert judgement*. Hal ini agar permasalahan dapat terakomodir dari berbagai bidang/ stakeholder/sektor/aspek.
- g. Identifikasi sistem. Dalam melakukan identifikasi sistem akan melalui beberapa tahapan yang perlu diperhatikan, antara lain:
- a. Kinerja sistem yang dipengaruhi (*black/grey/white box*) dimana di dalamnya terdapat: 1) variabel output yang dikehendaki, yang ditentukan berdasarkan hasil analisis kebutuhan. 2). Variabel output yang tidak dikehendaki. 3). Variabel input terkontrol. 4). Variabel input yang tidak terkontrol, 5). Variabel input lingkungan dan 6). Variabel kontrol sistem.
  - b. Untuk mempermudah melihat hubungan antar variabel-variabel dalam sistem, sebaiknya digambarkan dalam diagram lingkaran sebab-akibat (*causal loop diagram/CLD*). Sebaiknya membuat causal loop dari model umum terlebih dahulu, baru dapat dibagi sesuai kebutuhan untuk masing-masing sub modelnya.

- h. *Causal Loop*. Perlu kehati-hatian dalam membuat hubungan *causal loop*, tidak boleh terbalik. Cara paling aman memang melihat dari rumus yang dibuat. Tetapi untuk mempermudah terlebih dahulu membuat kondisi variabel penyebab, yaitu keadaan real atau tetap, selanjutnya menentukan positif/negatifnya *causal loop*.
- i. Pemilahan variabel. Dari CLD yang telah dibangun, kemudian dengan menggunakan Tabel, dibuat lis dan memilah semua konstanta, flow dan level termasuk unit/satuan, baik yang ada dari variabel pada CLD, maupun di luar CLD tetapi dapat mempengaruhi (input) dan dipengaruhi (output) sistem untuk menggambarkan lebih detil teknis struktur model yang akan dibangun. Untuk mempermudah membatasi model, Perlu diperhatikan faktor yang berpengaruh walaupun sebagai “given” pada model.
- j. Membangun struktur model. Pada bagian pembangunan struktur sistem dan input data, sebaiknya sedikit demi sedikit di “*Running*”, agar mudah dalam pembuatan dan melihat keterkaitan antar variabel yang tergambar pada rumusnya.
- k. *Running* model. Saat *running* model, perlu diperhatikan perilaku dari sistem pada variabel yang disimulasikan (atau semua variabel output), harus menghindari yang bernilai negatif. Pada umumnya tidak ada yang bernilai negatif, sekalipun secara logika ada, sebagai contoh uang atau simpanan, jika negatif artinya adalah hutang, sebaiknya dibuat variabel baru sebagai hutang. Sehingga tidak ada nilai yang minus. Hal ini untuk mempermudah saat sudah menemukan *equation* yang semakin komplek.
- l. *Data time series*. Data yang digunakan dalam model sebaiknya *time series*, hal ini digunakan untuk proses perhitungan validasi nantinya. Proses validasi bertujuan untuk menilai keobyektifan dari suatu pekerjaan ilmiah, karena pengetahuan ilmiah yang bersifat obyektif harus taat fakta. Kecuali model yang baru dikembangkan, sehingga tidak ada data *time series*, perlu dengan pendekatan validasi tersendiri, seperti kajian sosial terkait dengan sikap, persepsi dan perilaku. Validasi perilaku model dilakukan dengan membandingkan antar data besar dan sifat kesalahan. Validasi dapat menggunakan:

- 1) *Absolute Mean Error* (AME), adalah penyimpangan (selisih) antara nilai rata-rata (*mean*) hasil simulasi terhadap nilai aktual.

$$AME = [(S_i - A_i)/A_i]$$

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

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

N = interval waktu pengamatan

- 2) *Absolute Variation Error* (AVE), adalah penyimpangan nilai varian (*variance*) simulasi terhadap aktual.

$$AVE = [(S_s - S_a)/S_a]$$

$S_s = (S_i - \bar{S_i})^2 N$ , deviasi nilai simulasi

$S_a = ((A_i - \bar{A_i})^2 N$ , deviasi nilai aktual

Batas penyimpangan yang dapat diterima adalah antara 1-10%.

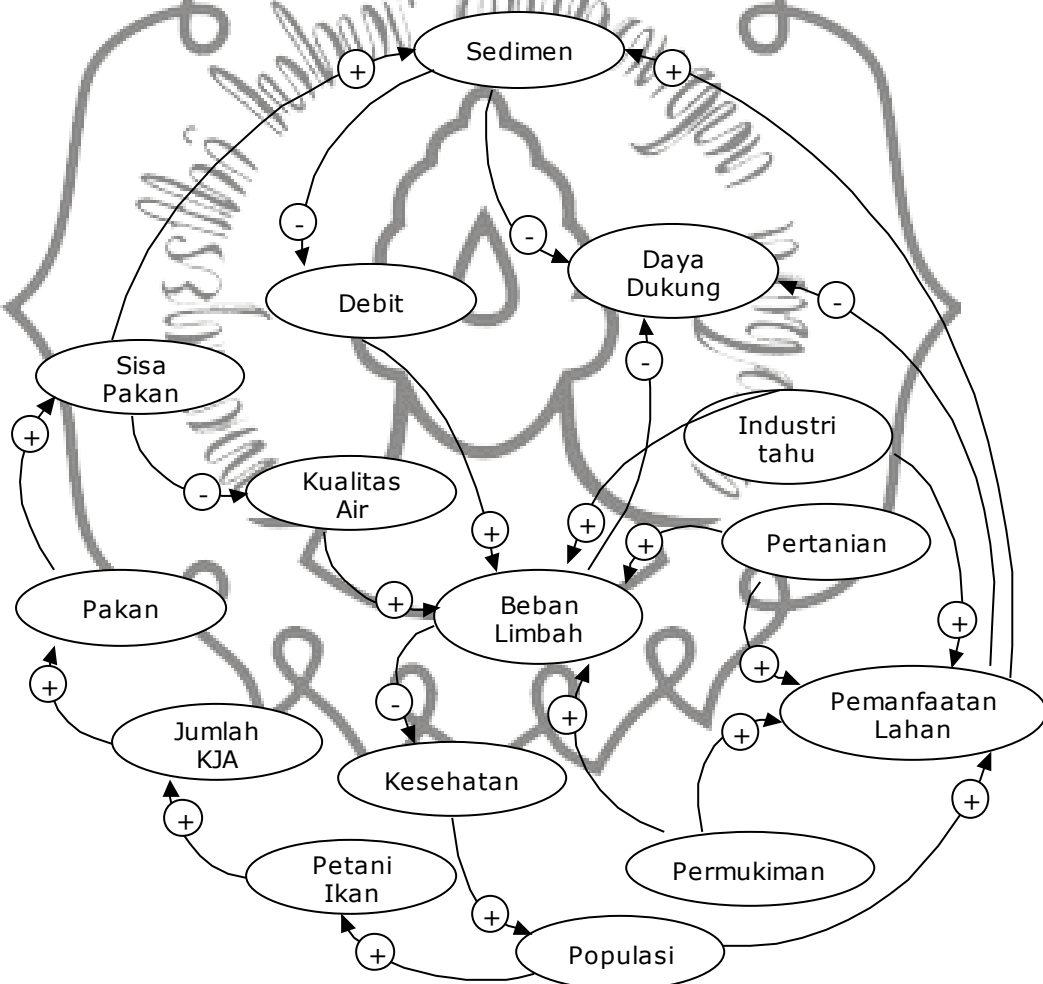
- m. Modifikasi data. Ada beberapa syarat apabila akan melakukan modifikasi data, yaitu:
- 1) Jika menemukan data *time series* yang tidak lengkap, sebaiknya dilakukan terlebih dahulu dengan analisis regresi, untuk memperkirakan nilai yang hilang tersebut.
  - 2) Jika tidak terdapat data *time series*, dilakukan dengan pendekatan validasi lainnya, misal menggunakan *matrix pedigree*.
- n. Skenario faktor penting. Menggunakan faktor-faktor yang telah terpilih dari formulasi masalah, faktor pengungkit atau faktor dominan untuk mensimulasikan skenario kebijakan. Karena faktor tersebut yang terpilih dalam fokus kajian pembuatan kebijakan. Jika faktor terpilih bersifat kualitatif sebaiknya dilakukan kuantifikasi baik dari hasil scoring atau hasil pakar. Hasil dapat berupa skor atau prosentase.
- o. Dominasi faktor penting. Dominasi kemungkinan faktor pengungkit dimasa yang akan datang, yang telah diperoleh dikombinasikan untuk melihat prediksi yang dominan terjadi, sehingga perilaku sistem yang terbentuk adalah kejadian yang dominan dari semua faktor yang ada.
- p. Unit model. Apabila model merupakan gabungan unit-unit model atau sub-sub model, perlu dilakukan pengecekan terhadap semua satuan waktu (hari, bulan

dan tahun), semua variabel harus memiliki satuan waktu yang sama misalnya tahun. Serta terhadap satuan matematis dan lainnya.

## B. Landasan Teori

### 1. *Causal Loop Diagram (CLD)*

Fenomena penurunan kualitas perairan WGM, dipengaruhi aliran beban limbah yang masuk WGM, digambarkan hubungan timbal balik dengan faktor lain melalui *Causal Loop Diagram (CLD)*. Gambar 4. menyajikan hubungan timbal balik terjadinya pencemaran di WGM, antara beberapa komponen dalam sistem yang saling berinteraksi dan mempengaruhi kinerja sistem.



Gambar 4. Diagram lingkaran sebab-akibat (*causal-loop diagram*) sistem pengendalian pencemaran perairan waduk

Terjadi hubungan timbal balik antara aliran beban limbah yang disebabkan oleh kegiatan masyarakat di DTA WGM yang menghasilkan limbah

dan masuk ke WGM melalui aliran sungai 7 sub DAS dan budidaya ikan dengan sistem KJA, sehingga menambah beban pencemaran perairan WGM. Peningkatan beban limbah menyebabkan penurunan kualitas perairan WGM. Peningkatan populasi penduduk akan meningkatkan kebutuhan lahan pertanian. Peningkatan lahan pertanian akan meningkatkan kebutuhan penggunaan pupuk dan insektisida/herbisida, pupuk yang tidak terserap tanaman akan meningkatkan beban limbah di WGM.

## 2. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan dasar pemikiran peneliti, dalam memecahkan akar masalah penelitian ini, disajikan dalam gambar 5. Masalah penelitian yang diangkat pada disertasi ini adalah mempelajari terjadinya degradasi kualitas lingkungan perairan, akibat aktifitas masyarakat di DTA dan di dalam waduk, untuk membangun model pengendalian pencemaran perairan WGM.

Beban limbah yang masuk ke WGM mengalir melalui tujuh sub DAS, yaitu Keduang, Wiroko, Temon, Bengawan Solo Hulu, Alang, Ngungghahan dan Wuryantoro. Sumber polutan berasal dari kegiatan masyarakat di DTA WGM, seperti pertanian, industri, domestik dan usaha budidaya ikan KJA di *water bodys*, serta kegiatan wisata di sekitar WGM, dapat menyebabkan penurunan kualitas perairan WGM. Penurunan kualitas perairan dapat dilihat dari hasil analisis laboratorium terhadap parameter: kimia, meliputi pH, logam berat (Cu, Cd, Cr, Pb, Fe, Zn), COD, BOD, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub>. Sedangkan parameter biologi meliputi Total *Coliform* dan *E-coli*. Beban limbah dapat ditentukan melalui analisis laboratorium terhadap air limbah dari sumber polutan. Parameter fisika air limbah yang dianalisis meliputi suhu dan TSS.

Beban limbah yang masuk ke WGM juga dipengaruhi oleh keadaan sosial ekonomi dan budaya masyarakat di DTA WGM, persepsi dan perilaku masyarakat terhadap pelestarian perairan sungai dan WGM. Persepsi dan perilaku masyarakat diukur melalui FGD, kuesioner dan wawancara mendalam terhadap para stakeholders WGM. Masyarakat pada penelitian ini meliputi petani, nelayan dan penduduk yang berada di bantaran sungai di DTA WGM.

Perilaku masyarakat di bantaran sungai pada Sub DAS, diteliti terhadap perilaku membuang limbah rumah tangga dan limbah kegiatan MCK.

Data laboratorium dianalisis terhadap mutu air kelas dua PP RI 82 tahun 2001, dengan menggunakan uji Storet. Selanjutnya dibuat peta spasial yang menggambarkan kondisi eksisting status mutu air sumber polutan di DTA WGM dan di *water bodys* WGM, keadaan sosial ekonomi budaya masyarakat di DTA dan tingkat persepsi masyarakat tentang pelestarian perairan sungai dan WGM.

Perairan WGM pada zona tercemar yang digambarkan pada peta eksisting, akan dilakukan penelitian lanjutan yang lebih mendalam untuk mengetahui tingkat toksisitas dan unsur kimia dominan penyebab pencemaran. Sampel sedimen, bentos, ikan dan air diambil pada zona tercemar di perairan WGM. Selanjutnya dilakukan penentuan kandungan logam berat pada sampel sedimen, bentos, ikan dan air tersebut. Keberadaan polutan logam berat dalam sedimen berasal dari limbah kegiatan masyarakat di DTA WGM, yang di bawa oleh aliran sungai pada sub DAS, selanjutnya logam tersebut mengalami proses fisika dan kimia seperti absorpsi dan pengendapan sehingga terakumulasi dalam sedimen, ikan dan bentos WGM. Setelah diketahui jenis logam berat pada sedimen dan status mutunya berdasarkan *Dutch Quality Standard for Metals in Sediment* konsentrasinya dinyatakan melebihi baku mutu, maka selanjutnya logam berat tersebut dipilih untuk dilakukan penelitian uji toksisitas LC<sub>50</sub>.

*Lethal Concentration* (LC<sub>50</sub>) logam berat merupakan dosis tunggal suatu zat yang secara statistik dapat menyebabkan sebanyak 50% kematian biota uji. Pada penelitian ini digunakan hewan uji ikan nila (*Oreochromis niloticus*), karena banyak dibudidayakan di KJA, dan juga direkomendasikan oleh USEPA sebagai hewan uji untuk studi toksikologi, serta mempunyai kemampuan tinggi dalam mentolerir lingkungan yang buruk, dan mudah dipelihara di laboratorium. Uji hayati untuk menentukan nilai LC<sub>50</sub> dari logam berat dominan yang melebihi baku mutu terhadap ikan nila setelah waktu pemaparan 96 jam.

Setelah diketahui dinamika beban pencemaran WGM berdasarkan parameter-parameter kualitas air yang berperan dalam menimbulkan pencemaran, yang bersumber dari kegiatan masyarakat di DTA, dan dinamika pola partisipasi masyarakat di DTA dalam melestarikan sungai dan waduk, maka



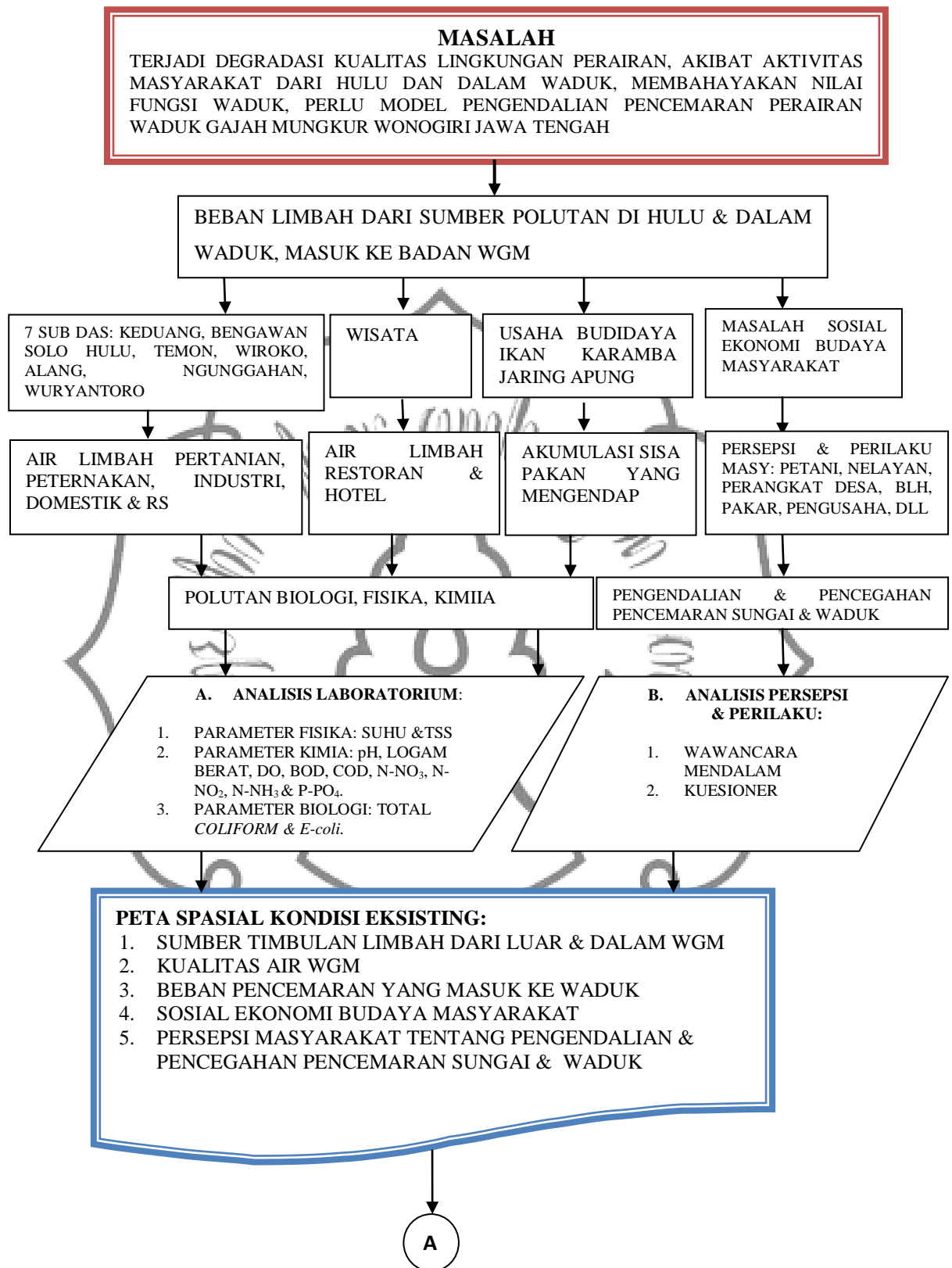
dilanjutkan untuk memodelkan penanggulangan pencemaran waduk menggunakan pendekatan *System Dynamics*.

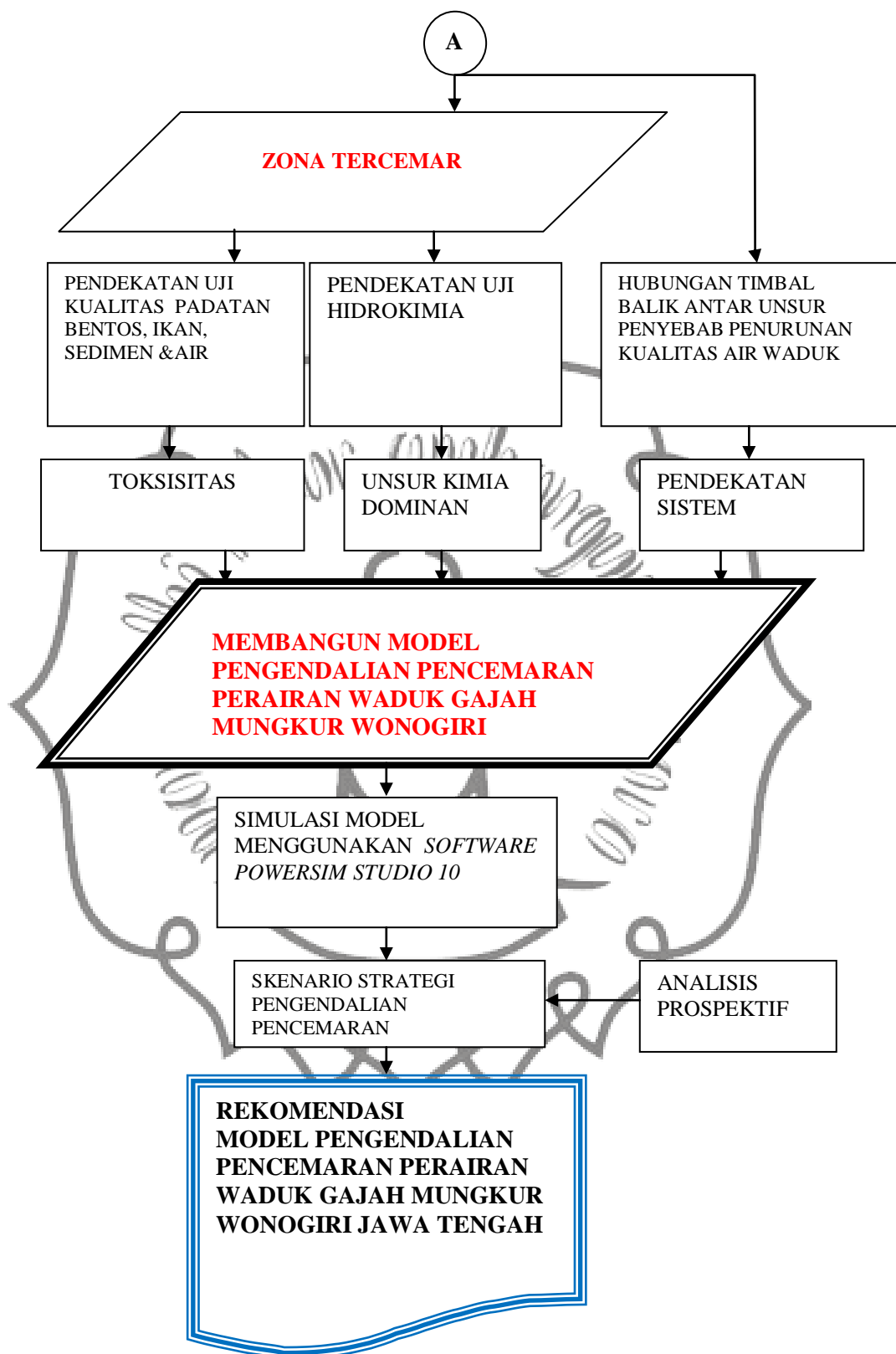
Desain model dinamik pengendalian pencemaran perairan WGM menggunakan pendekatan sistem, merupakan metode pemecahan masalah yang mulai dengan fase identifikasi isu, tujuan dan batasan. Terjadinya pencemaran perairan WGM, yang berasal dari kegiatan masyarakat di DTA dan di dalam waduk merupakan isu yang diangkat pada penelitian ini. Tujuan pemodelan ini adalah mencari model terpadu untuk meningkatkan kualitas perairan WGM dan menjaga kelestarian WGM. Juga mencari skenario-skenario untuk menurunkan beban polutan yang masuk WGM. Batasan model adalah beban polutan dari DTA melalui 7 Sub DAS dan KJA. Model dibangun dari sub model lingkungan dan sub model sosial ekonomi budaya. Sub model lingkungan dibangun dari sub-sub model: sumber polutan dari kegiatan masyarakat seperti pertanian, industri, KJA dan wisata. Sub model sosial ekonomi budaya dibangun dari sub-sub model penduduk dan permukiman. Selanjutnya simulasi model menggunakan *software powersim studio 10*. Pengembangan skenario model pengendalian pencemaran WGM menggunakan pendekatan analisis prospektif.

### C. Hipotesis

Berdasarkan latar belakang masalah dan kerangka berpikir, dalam penelitian ini terdapat tiga buah hipotesis.

1. Berdasarkan analisis Storet kualitas air kelas dua (2) PP 82/2001, lebih dari 50% lokasi perairan WGM tercemar berat oleh parameter dominan TSS, P-PO<sub>4</sub> dan COD,.
2. Pada zona tercemar terdapat polutan logam berat dominan yang melebihi baku mutu dan memiliki toksisitas (LC<sub>50-96</sub>) tinggi terhadap biota air.
3. Peningkatan beban limbah di WGM karena meningkatnya parameter dominan TSS, P-PO<sub>4</sub>, COD dari kegiatan pertanian, industri, domestik dan KJA, yang mengakibatkan kualitas perairan WGM semakin menurun.





Gambar 5. Kerangka berpikir penelitian