

TINGKAT AKURASI EMPERICAL AREA REDUCTION METHOD (EARM) UNTUK MEMPREDIKSI KURVA H-V DI WADUK MRICA

Puji Utomo¹⁾, Nanda Melyadi Putri²⁾, Ajeng Yandhika Fitriana³⁾
^{1,2,3)}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, 55164
 Email: puji.utomo@staff.uty.ac.id¹⁾, nanda.putri@staff.uty.ac.id²⁾,
yandhikafitriana@gmail.com³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.387>

(Received: September 2020 / Revised: December 2020 / Accepted: January 2021)

Abstrak

Sedimentasi waduk merupakan permasalahan yang sangat penting dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan waduk. Perkembangan sedimentasi waduk dapat dilihat dari hubungan antara kapasitas tampungan dan elevasi atau sering disebut kurva H-V. Kurva ini dapat dibuat dengan melakukan pengukuran *echosounding* secara periodik. Namun, dalam beberapa kasus banyak waduk tidak melakukan ini karena pertimbangan biaya, oleh karena itu, perlu digunakan pendekatan model seperti *Empirical Area Reduction Method* (EARM). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi model distribusi sedimen EARM agar dapat digunakan untuk memprediksi kurva H-V. Lokasi penelitian inidi Waduk Mrica yang berada di Kecamatan Bawang, Kabupaten Banjarnegara. Tahapan analisis meliputi menganalisis kondisi sedimentasi waduk, menganalisis prediksi kurva H-V dengan model EARM, dan mengevaluasi kesesuaian model untuk mengetahui tingkat akurasi berdasarkan nilai korelasi (R) dan *Relative Mean Error* (RME). Waduk Mrica mengalami tingkat sedimentasi yang sangat tinggi dengan laju sedimentasi waduk rerata sebesar 3,951 juta m³/tahun. Laju sedimentasi berangsur mengalami penurunan akibat mulai adanya pengelolaan sedimentasi di Waduk Mrica. Pendekatan dengan model *Empirical Area Reduction Method* (EARM) untuk memprediksi kurva H-V sangat ideal digunakan di Waduk Mrica. Hasil evaluasi dari prediksi model terlihat nilai korelasi mendekati kondisi ideal ($R^2 = 1$) dan nilai RME hanya berkisar antara 0 – 11%, artinya prediksi kurva H-V dengan model EARM menunjukkan korelasi yang sangat kuat dengan data lapangan dari pengukuran *echosounding*.

Kata kunci: *Distribusi Sedimen, Empirical Area Reduction Method (EARM), Kurva H-V, Sedimentasi Waduk, Waduk Mrica*

Abstract

Reservoir sedimentation is a very important issue in reservoir operation and maintenance activities. The development of reservoir sedimentation can be seen from the relationship between the reservoir capacity and elevation or often is called H-V curve. This curve can be made with periodic echosounding measurements. However, in some cases many reservoirs don't perform due to cost considerations, therefore, it requires a modeling approach such as *Empirical Area Reduction Method* (EARM). This study aims to determine the level of accuracy of EARM sediment distribution model so that it can be used to predict the H-V curve. The location of this research was in Mrica Reservoir, Bawang District, Banjarnegara Regency. The stages of analysis include: analyzing the sedimentation conditions of reservoir, analyzing the H-

V curve prediction with EARM model, and evaluating the suitability of the model to determine the level of accuracy based on the correlation value (R) and Relative Mean Error (RME). As results, Mrica Reservoir experienced a very high sedimentation rate with an average reservoir sedimentation rate of 3,951 million m³/year. The sedimentation rate has gradually decreased due to sedimentation management in the Mrica Reservoir. The Empirical Area Reduction Method (EARM) approach to predict the H-V curve is ideal for used in Mrica Reservoir. The evaluation results of prediction model show that correlation value approach ideal conditions ($R^2 = 1$) and RME value is only in the range of 0 - 11%, It meaning that H-V curve prediction with the EARM model shows a very strong correlation with field data from echosounding measurements.

Keywords: *Sediment Distribution, Empirical Area Reduction Method (EARM), H-V Curve, Reservoir Sedimentation, Mrica Reservoir.*

1. Latar Belakang

Waduk merupakan infrastruktur di bidang Sumber Daya Air (SDA) yang memiliki banyak manfaat, diantaranya: untuk keperluan irigasi pertanian, pengendalian banjir, perikanan, kebutuhan air minum, obyek wisata, dan sebagai tanggul penampung air limpasan dari sungai ke waduk. Sedimentasi waduk merupakan permasalahan yang sangat penting dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan waduk. Sedimentasi waduk yang tidak terkendali akan sangat mempengaruhi unjuk kerja waduk, karena menyebabkan usia layanan waduk tidak sesuai dengan umur perencanaan. Banyak waduk di Indonesia khususnya di Pulau Jawa, yang mengalami sedimentasi akibat sedimen yang berasal dari erosi lahan. Kondisi ini disebabkan karena kerusakan hutan (*deforestasi*) serta alih guna lahan di daerah hulu DAS, intensitas curah hujan yang tinggi, sifat agregat tanah yang mudah lepas, dan banyak daerah di Pulau Jawa yang memiliki topografi berupa lereng yang curam. Waduk Mrica merupakan salah satu waduk di Pulau Jawa yang saat ini mengalami tingkat sedimentasi yang sangat tinggi. Produksi sedimen tahunan dari lahan mencapai 7,358 juta m³/tahun (Legono, 2006). Laju endapan sedimen di Waduk Mrica mencapai 4,097 juta m³/tahun (Utomo, 2017), sementara menurut Widarto (2017) laju endapan sedimen di Waduk Mrica rata-rata mencapai 4,2 juta m³/tahun. Penelitian sejenis Febrian dan Utomo (2018) menunjukkan volume sedimen yang mengendap sebesar 3,956 juta m³/tahun. Dalam aspek keberlanjutan fungsi waduk, perlu dilakukan program *monitoring* dan evaluasi untuk mengetahui perkembangan sedimentasi waduk yang terjadi. Salah satu indikator yang digunakan melalui perubahan kurva karakteristik tampungan (kurva H-V) akibat adanya sedimen yang masuk ke waduk. Kurva ini selanjutnya digunakan untuk pengambilan kebijakan pengelola waduk untuk menentukan pola operasi waduk, sebagaimana fungsi waduk baik sebagai pengendali banjir maupun dari aspek pemanfaatan air untuk irigasi, air baku, maupun PLTA.

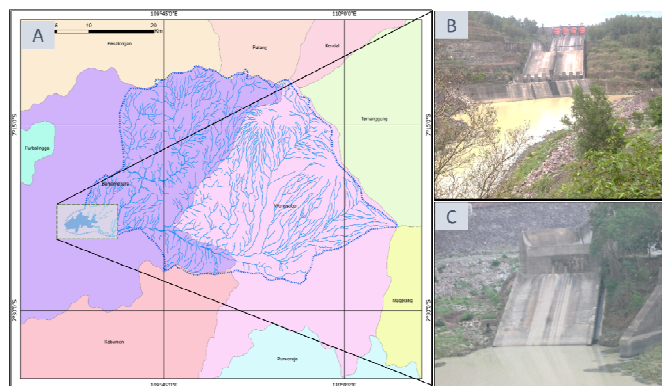
Sedimentasi yang tidak terkendali akan mengakibatkan perubahan kurva H-V yang drastis, sehingga mengurangi efisiensi dan efektivitas waduk dalam mengendalikan banjir dan memenuhi kebutuhan air irigasi, air baku, maupun PLTA.

Kurva H-V biasanya didapatkan dari hasil analisis data pengukuran pemeruman (*echosounding*) di waduk. Biasanya pengukuran *echosounding* akan menghasilkan data kontur waduk, kurva H-V, kapasitas tampungan, dan laju endapan sedimen per tahun.

Pengelola Waduk Mrica sudah cukup baik, karena rutin melakukan pengukuran *echosounding* secara periodik. Namun karena pertimbangan biaya pelaksanaan yang cukup mahal, waktu yang lama, dan masih dilakukan manual, sehingga diharapkan perlu adanya riset untuk memprediksi kurva H-V tanpa melakukan pengukuran *echosounding*. Prediksi kurva H-V dapat dilakukan dengan pendekatan model distribusi sedimen yang telah dikembangkan di luar negeri, salah satunya model *Emperical Area Reduction Method* (EARM). Model EARM dikembangkan oleh Borland and Miller (1953) mengembangkan metode baru yang sering disebut dengan *Area Reduction Method*. Metode ini diusulkan berdasarkan data sedimentasi di 30 waduk di Amerika Serikat, yang selanjutnya diadopsi oleh U.S. Bureau of Reclamation, Morris and Fan (1998). Metode ini selanjutnya dimodifikasi Lara (1965), bahwa total akumulasi dan distribusi sedimen pada berbagai ketinggian memiliki hubungan tertentu dengan bentuk waduk. Dalam perkembangannya, dilakukan berbagai evaluasi dan modifikasi persamaan model yang dikembangkan sebelumnya oleh para peneliti, seperti Strand and Pemberton (1982), Szechowycz and Qureshi (1973), melakukan penelitian dengan studi kasus waduk dengan kapasitas medium dan besar. Borland (1970), Garde, et. al, (1978), Croley, et. al (1978), mengembangkan model persamaan pada tipe waduk delta. Model seperti *Emperical Area Reduction Method* (EARM) apabila diimplementasikan pada waduk di Pulau Jawa yang berbeda, harus dilakukan "beberapa penyesuaian dikarenakan berbedanya kondisi antara wilayah satu dengan yang lain serta perbedaan karakteristik waduk itu sendiri. (Michalec, 2015) menunjukkan bahwa kebanyakan metode empirik tidak mendapatkan hasil yang optimal ketika diaplikasikan untuk menentukan distribusi sedimen di waduk-waduk kecil. Peluang ini yang dilihat dalam melakukan penelitian ini, untuk mengetahui tingkat akurasi model distribusi sedimen yang sudah pernah dikembangkan, agar dapat digunakan untuk memprediksi kurva H-V tanpa melakukan pengukuran *echosounding*.

2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian ini di Waduk Mrica yang terletak di Kecamatan Bawang, Kabupaten Banjarnegara (Gambar 1). Waduk ini dibangun pada tahun 1984 dan selesai pada tahun 1898 dengan umur rencana waduk 50 tahun.



Gambar 1 Lokasi penelitian di Waduk Mrica (Utomo, 2018)
(a) Daerah Aliran Sungai (b) Bangunan Spillway (c) Drawdown Culvert

Secara geografis Waduk Mrica terletak antara $109^{\circ} 6' 00'' - 07^{\circ} 49' 00''$ BT dan $7^{\circ} 17' 04'' - 7^{\circ} 47' 07''$ LS.

Daerah tangkapan air Waduk Mrica luasnya mencapai 957 km^2 dan kapasitas tampungan sebesar $193,5 \text{ juta m}^3$. Waduk Mrica memiliki 3 turbin untuk PLTA yang mampu menghasilkan listrik sebesar 580.000 MWH per tahun. Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari berbagai instansi, seperti: data pengukuran *echosounding*, data analisa butiran sedimen dasar waduk, data teknis waduk, dan data dokumen/laporan terdahulu. Setelah dilakukan studi kajian terdahulu dan pengumpulan data, maka selanjutnya dilakukan analisis data. Tahapan analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.1.1 Menganalisis kondisi sedimentasi waduk

Analisis kondisi sedimentasi waduk berdasarkan data sekunder dari hasil pengukuran *echosounding*. Pengukuran dengan pemeruman akan menghasilkan gambaran profil melintang dan memanjang dasar waduk, selanjutnya dapat pula dihitung kapasitas tampungan waduk. Pemeruman dilakukan dengan menggunakan alat *echosounder*. Hasil analisis yang didapatkan berupa volume sedimen yang mengendap per tahun di waduk, prosentase kapasitas tampungan waduk, dan kurva H-V pada kondisi eksisting.

2.1.2 Menganalisis prediksi kurva H-V dengan model EARM

Dalam studi ini, digunakan metode distribusi sedimen dengan model *Empirical Area Reduction Method* yang dikembangkan oleh Borland-Miller (1953) untuk memprediksi kurva karakteristik tampungan (kurva H-V). Distribusi endapan sedimen dalam waduk dipengaruhi oleh bentuk waduk. Bentuk waduk dapat diklasifikasikan berdasarkan nilai m , seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Nilai m adalah gradien garis hubungan antara kapasitas waduk dengan elevasi. *The Empirical Area Reduction Method* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S = \int_0^H A dy + \int_0^H K a dy \quad (1)$$

di mana S adalah volume sedimen total yang diendapkan di dalam waduk (m^3), A adalah luas waduk pada kedalaman y (m^2), dan K adalah konstanta untuk mengkonversikan luas sedimen relatif (a) ke dalam luas sedimen sebenarnya, 0 adalah elevasi dasar (asli) waduk, y_0 adalah elevasi dasar waduk setelah T tahun, H adalah kedalaman total waduk (m), dan a adalah luas sedimen relatif.

Tabel 1 Klasifikasi waduk berdasarkan nilai m

Tipe Waduk	Klasifikasi	Nilai m
1	<i>Lake</i>	3,5 – 4,5
2	<i>Flood plain foot hill</i>	2,5 – 3,5
3	<i>Hill</i>	1,5 – 2,5
4	<i>Normally empty</i>	1,0 – 1,5

Sumber: Borland dan Miller, 1953 dalam USBR, 1973

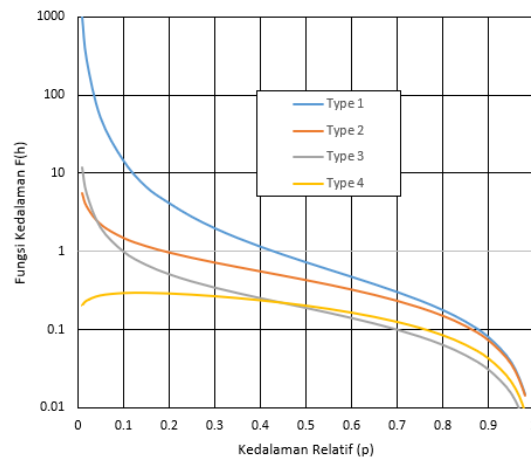
Untuk menentukan distribusi luas tampungan waduk dan volume sedimen, Lara (1965) dalam USBR (1973) mengusulkan beberapa hubungan perbandingan antara luas sedimen relatif (a) dengan menggunakan kedalaman relatif waduk diukur dari dasar (p) bagi masing-masing tipe waduk seperti pada Tabel 2. sebagai berikut.

Tabel 2 Persamaan hubungan nilai a dan p

Tipe Waduk	Persamaan
1	$5,074 p^{1,85} (1 - p)^{0,35}$
2	$2,487 p^{0,57} (1 - p)^{0,41}$
3	$16,967 p^{1,15} (1 - p)^{2,32}$
4	$1,486 p^{0,25} (1 - p)^{1,34}$

Sumber: Lara, 1965 dalam USBR, 1973

Elevasi dasar waduk setelah T tahun (setelah terjadi pengendapan selama T tahun) dapat ditentukan dengan menggunakan tabel dan grafik hubungan antara kedalaman relatif (p) dan nilai F(h) seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik hubungan kedalaman relatif (p) dan nilai F(h)
sumber: dimodifikasi dari Lara, 1965

Elevasi dasar waduk setelah T tahun (setelah terjadi pengendapan selama T tahun) dapat ditentukan dengan menggunakan tabel dan grafik hubungan antara kedalaman relatif (p) dan nilai F(h) seperti pada Gambar 2.

2.1.3 Mengevaluasi tingkat akurasi model empirik yang dipilih

Dari hasil perhitungan kurva H-V terukur dengan kurva H-V dari persamaan empirik, selanjutnya dilakukan evaluasi kesesuaian model untuk mengetahui tingkat akurasi model dengan menggunakan kriteria statistik, seperti: korelasi (R) dan *Relative Mean Error* (RME), sebagaimana disajikan pada persamaan berikut.

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (V_{m_i} - \bar{V}_{m_i})(V_{o_i} - \bar{V}_{o_i}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (V_{m_i} - \bar{V}_{m_i})^2 \sum_{i=1}^n (V_{o_i} - \bar{V}_{o_i})^2} \tag{2}$$

$$RME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(V_{o_i} - V_{m_i})}{V_{o_i}} \quad (3)$$

di mana V_o adalah nilai volume terukur dari data lapangan dan V_m adalah nilai volume dari prediksi model EARM. Tingkat akurasi dari model dapat diketahui berdasarkan dari nilai korelasi (R^2) dan tingkat kesalahan (RME) dengan digolongkan berdasarkan Tabel 3.

Tabel 3 Kriteria tingkat akurasi dari model

No.	Korelasi (R^2)	RME (%)	Keterangan
1	0,00 – 0,19	80-100	Sangat Lemah
2	0,2 – 0,39	60-79	Lemah
3	0,4 – 0,59	40-59	Sedang
4	0,6 – 0,79	20-39	Kuat
5	0,8 – 1,0	0-19	Sangat Kuat

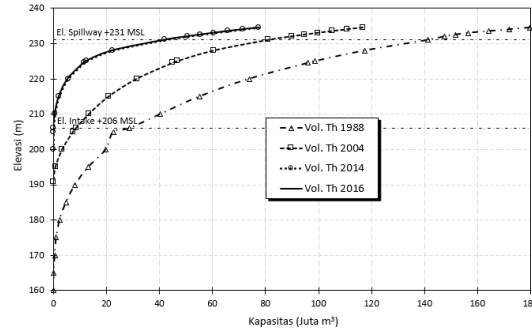
Sumber: Sugiyono, 2017

3. Hasil dan Pembahasan

Perkembangan kondisi sedimentasi di Waduk Mrica diolah dari data pemeruman (*echosounding*) yang dilakukan oleh PT. Indonesia Power. Lokasi pengukurun *echosounding* adalah di daerah genangan/waduk Mrica yang dibagi menjadi beberapa penampang, yaitu: 33 penampang pada sungai utama Serayu, 6 penampang pada anak sungai Kandangwangi, dan 5 penampang pada anak sungai Lumajang. Penempatan penampang-penampang ini dibuat sedemikian rupa sehingga efektif ditinjau dari segi biaya maupun waktu untu pelaksanaan, di samping dapat dianggap mewakili untuk perhitungan volumenya.

Perkembangan sedimentasi waduk dapat dilihat dari hubungan antara kapasitas tampungan dan elevasi atau sering disebut kurva H-V. Dalam penelitian ini, diambil data pengukuran *echosounding* pada awal tahun, tahun 2004, tahun 2014, dan tahun 2016. Hasil pengukuran *echosounding* tahun 2004 menyebutkan bahwa elevasi dasar waduk berada pada elevasi +190,72 MSL atau naik 30,72 m dari elevasi tahun 1988. Kenaikan elevasi dasar waduk bisa mencapai 1,92 m/tahun. Sementara hasil pengukuran *echosounding* tahun 2014 menyebutkan bahwa elevasi dasar waduk berada pada elevasi +200 MSL atau naik 40 m dari elevasi tahun 1988 dan naik 9,28 m dari elevasi tahun 2004. Sementara interval tahun 2014 ke 2016 cenderung tetap elevasi dasar waduknya. Kenaikan elevasi dasar waduk dari tahun 1988 s/d 2014 mencapai 1,5385 m/tahun, tetapi jika ditinjau dari tahun 2004 s/d 2016 kenaikan elevasi dasarmencapai 0,928 m.

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat kita ketahui bahwa dari tahun 1988 s/d tahun 2004 belum dilakukan pengelolaan sedimentasi secara signifikan, sehingga menyebabkan laju endapan sedimen besar. Kondisi ini sedikit mulai berubah setelah dilakukan pengelolaan sedimentasi cukup baik antara kurun waktu tahun 2004 s/d tahun 2016, seperti: kegiatan penghijauan, penggelontoran sedimen (*flushing*), dan pembangunan *check dam* di alur sungai yang masuk ke waduk. Adapun kurva H-V hasil analisis data pengukuran *echosounding* tahun 1988, 2004, 2014, dan 2016 dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Perkembangan Kurva H-V di Waduk Mrica 1988 – 2016

Dari hasil analisis data pengukuran *echosounding*, juga didapatkan besarnya laju sedimentasi waduk rerata per tahun. Hasil analisis menunjukkan bahwa laju sedimentasi waduk rerata pada periode 1988 – 2004 sebesar 4,194 juta m^3 /tahun. Laju sedimentasi rerata pada periode 2004 – 2014 sebesar 3,916 juta m^3 /tahun dan mengalami penurunan pada periode 2014 – 2016 yang laju sedimentasi rerata tahunan sebesar 3,744 juta m^3 /tahun. Laju sedimentasi mengalami penurunan akibat adanya pengelolaan sedimentasi di Waduk Mrica. Adapun hasil analisis laju sedimentasi waduk disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Laju sedimentasi rerata per tahun

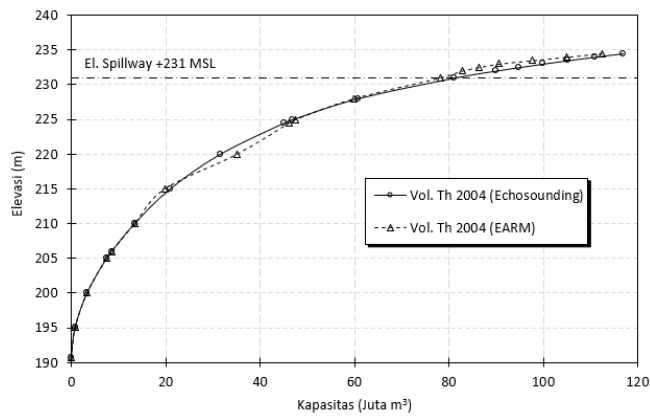
Tahun	Kapasitas Total (Juta m^3)	Total Endapan (Juta m^3)	Laju Sedimentasi (Juta m^3 /tahun)
1988	148,290	-	-
1988 - 2004	81,190	67,100	4,194
2004 - 2014	42,030	39,160	3,916
2014 - 2016	34,542	7,488	3,744
Laju sedimentasi rerata (Juta m^3 /tahun)			3,951

Kapasitas tampungan total Waduk Mrica sampai dengan tahun 2016 tersisa 23,29% dari kapasitas awal sebesar 148,290 juta m^3 . Penurunan kapasitas tampungan Waduk Mrica diakibatkan oleh sedimen yang mengendap sudah mencapai 76,71 % dari kapasitas tampungan total awal. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan kapasitas tampungan akibat sedimentasi relatif besar, sehingga menyebabkan umur layanan Waduk Mrica tidak sesuai lagi dengan umur perencanaan selama 60 tahun. Pengelola Waduk Mrica sebenarnya sudah cukup baik, karena rutin melakukan pengukuran *echosounding* secara periodik. Dalam beberapa kasus banyak waduk lain tidak melakukan ini karena pertimbangan biaya pelaksanaan yang cukup mahal, waktu yang lama, dan masih dilakukan manual, oleh karena itu, perlu pendekatan model untuk memprediksi kurva H-V tanpa melakukan pengukuran *echosounding*, salah satunya dengan model *Empirical Area Reduction Method* (EARM). Model ini akan dievaluasi dengan kriteria statistik untuk mengetahui tingkat akurasi model dengan cara membandingkan antara data hasil pengukuran *echosounding* dengan hasil prediksi dari model di tahun yang sama. Hasil evaluasi dengan kriteria statistik antaramodel dengan data *echosounding* tahun 2004, 2014, dan 2016 disajikan pada Tabel 4.

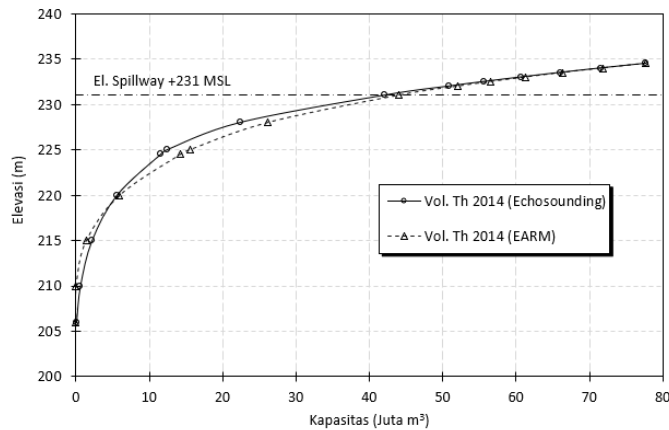
Tabel 4 Evaluasi dari model EARM dengan kriteria statistik

No.	Tahun	Korelasi (R^2)	RME (%)	Keterangan
1.	2004	0,997	3,763	Sangat Kuat
2.	2014	0,998	11,054	Sangat Kuat
3.	2016	0,999	0,584	Sangat Kuat

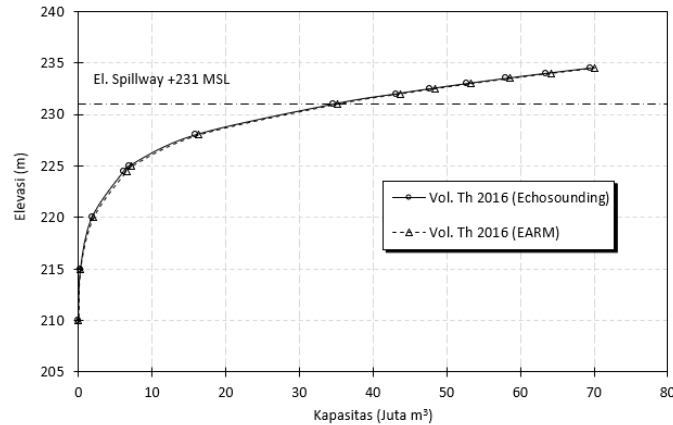
Nilai korelasi (R^2) yang berada pada rentang 0 sampai 1 menunjukkan bahwa model dapat diterima, tetapi perlu dilihat seberapa kuat hubungannya. Sementara hasil evaluasi menggunakan RME bahwa semakin kecil nilai RME, maka model tersebut akan semakin baik. Dari hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai korelasi mendekati kondisi ideal ($R^2 = 1$) dan nilai RME bekisar antara 0 – 11%. Prediksi model tahun 2016 menunjukkan hasil yang paling ideal, sementara tingkat kesalahan RME terbesar terjadi pada prediksi model pada tahun 2014. Namun secara keseluruhan hasil analisis menunjukkan bahwa prediksi kurva H-V dengan model EARM sangat ideal digunakan di Waduk Mrica. Evaluasi juga dapat dilakukan menggunakan grafik perbandingan data lapangan dengan hasil prediksi dengan model EARM, seperti disajikan pada Gambar 5.



(a) Tahun 2004



(b) Tahun 2014



(c) Tahun 2016

Gambar 5 Grafik perbandingan prediksi model EARM dengan data lapangan

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Waduk Mrica mengalami tingkat sedimentasi yang sangat tinggi dengan laju sedimentasi waduk rerata sebesar 3,951 juta m³/tahun. Laju sedimentasi terbesar terjadi pada periode 1988 – 2004 sebesar 4,194 juta m³/tahun. Selanjutnya laju sedimentasi berangsur mengalami penurunan signifikan akibat mulai adanya pengelolaan sedimentasi di Waduk Mrica. Perkembangan sedimentasi waduk dapat dilihat dari hubungan antara kapasitas tampungan dan elevasi atau sering disebut kurva H-V dengan melakukan pengukuran *echosounding* secara periodik. Namun, dalam beberapa kasus banyak waduk tidak melakukan ini karena pertimbangan biaya. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa pendekatan dengan model *Empirical Area Reduction Method* (EARM) untuk memprediksi kurva H-V sangat ideal digunakan dengan data di Waduk Mrica. Hasil evaluasi dari prediksi model terlihat nilai korelasi mendekati kondisi ideal ($R^2 = 1$) dan nilai RME hanya berkisar antara 0 – 11%, artinya prediksi kurva H-V dengan model EARM menunjukkan korelasi yang sangat kuat dengan data lapangan dari pengukuran *echosounding*.

4.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan menambah data pengukuran *echosounding* Waduk Mrica untuk mengevaluasi tingkat akurasi dari model EARM. Selain itu, disarankan untuk menggunakan pendekatan model lain selain EARM serta studi kasus dengan beberapa waduk lain khususnya yang ada di Pulau Jawa.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Hidrolika Program Studi Teknik Sipil Universitas Teknologi Yogyakarta sehingga penelitian dapat diselesaikan dengan baik. Selain itu, penelitian ini mendapat dukungan dari Hibah Penelitian Dosen Pemula tahun 2019.

Daftar Kepustakaan

- Borland, W. M., and Miller, C. R. (1953) 'Distribution of Sediment in Large Reservoirs', *J. Hydraul. Eng. Div. ASCE*, 84, pp. 1–18.
- Borland, W. M. (1970) 'Reservoir Sedimentation', *River Mechanics. Water Resource*, 29, pp. 1–38.
- Croley, T. E., Raja Roa, K. N., Karim, F. (1978) *Reservoir Sedimentation Model with Continuing Distribution, Compaction and Slump*. Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) Report No. 198, The University of Iowa: Iowa City, IA, USA.
- Febriani, P. dan Utomo, P. (2018) *Kajian Tingkat Akurasi Model Efisiensi Tampungan (Trap Efficiency) Sedimen Di Waduk Mrica Jawa Tengah*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Sipil. Universitas Teknologi Yogyakarta. Yogyakarta.
- Garde, R. J., Swamee, P. K., Dalvi, M. E. (1978) 'Estimation of Progressive Deposition in Reservoirs', in *Proceeding of the 47th Research Session of the CBIP, Hubli-Dharwar, Karnataka*, pp. 1–50.
- Lara, J. M. (1965) *Revision of Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs*. U. S. Bureau Reclamation: Denver, Colorado, USA.
- Legono, D. (2006) 'Sedimentasi Waduk (Sedimentation Reservoir)', in *Diktat kuliah*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Michalec, B. (2015) 'Evaluation of An Empirical Reservoir Shape Function to Define Sediment Distributions in Small Reservoirs', *Water (Switzerland)*, 7(8), pp. 4409–4426. doi: 10.3390/w7084409.
- Morris, G. L., and Fan, J. 1998 (1998) *Reservoir Sedimentation Handbook*, New York: McGraw Hill.
- Strand, R. I. and Pemberton, E. L. (1982) *Reservoir Sedimentation Technical Guidelines for Bureau of Reclamation*, US Bureau of Reclamation.
- Sugiyono (2017) *Statistik untuk Penelitian*. Bandung: Alfabeta.
- Szechowycz, R. W. and Qureshi, M. M. (1973) *Reservoir Sedimentation Technical Guidelines for Bureau of Reclamation*. U. S. Bureau Reclamation: Denver, Colorado, USA.
- Utomo, P. (2017) 'Mrica Reservoir Sedimentation: Current Situation and Future Necessary Management', *Journal of the Civil Engineering Forum*, 3(2), p. 365. doi: 10.22146/jcef.26640.
- Utomo, P. (2018) 'Prediksi Kurva Karakteristik Tampungan Waduk (Kurva H-V) Akibat Pengelolaan Sedimentasi di Waduk Mrica', in *Prosiding Seminar Nasional IV Teknik Sipil*, Malang, 13 September 2018.
- Widarto, O. L. (2017) *Kajian Erosi Lahan Di Daerah Tangkapan Waduk Panglima Besar Soedirman Dan Analisis Sedimentasi*. Tugas Akhir. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.