

KAJIAN PENGANGKUTAN SEDIMEN DI PENDIAT, SUNGAI PERAK

Norsyafina Anita Binti Zaulkifli, Nuridah Sabtu*, Abdul Hakim Salleh
Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Universiti Sains Malaysia, MALAYSIA.

*Corresponding author: nsabtu@usm.my

Abstrak

Perlombongan pasir sungai telah menyebabkan hakisan tebing, degradasi dasar, dan kemerosotan kualiti air. Penyingkiran pasir berlebihan mengganggu keseimbangan semula jadi sungai, sekali gus memerlukan kajian pengurusan jangka panjang yang komprehensif. Kajian ini menyiasat pengangkutan sedimen yang mempengaruhi morfologi di Pendiati, Sungai Perak menggunakan simulasi 1D menerusi perisian HEC-RAS. Sebanyak tujuh keratan rentas (L1-L7) disimulasikan dari 5 hingga 24 Oktober 2021 berdasarkan data geometri, aliran, dan sedimen dengan mengaplikasikan persamaan Yang. Hasil simulasi menunjukkan proses hakisan berlaku di enam keratan rentas, manakala pemendapan hanya dikesan pada keratan L5. Dapatan ini membuktikan implikasi fizikal yang signifikan terhadap kestabilan sungai. Penyelidikan ini turut membincangkan beberapa penyelesaian pengurusan sedimen yang kritikal bagi mengelakkan kemerosotan sungai pada masa hadapan.

Keywords: degradasi dasar sungai, hakisan tebing, pemodelan sungai

Article history:

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

PENGENALAN

Sungai merupakan sistem yang dinamik. Ia dikawal oleh proses hidraulik dan pengangkutan sedimen. Perubahan pada keratan rentas, hakisan dan pemendapan di sepanjang saluran sungai, serta peningkatan atau penurunan kapasiti membawa sedimen yang menjejaskan kestabilan tebing dan akhirnya menyebabkan perubahan morfologi. Pembangunan pesat dan tidak terkawal di kawasan tadahan sungai akan menyebabkan peningkatan air larian permukaan dan mengakibatkan pemendapan sedimen yang lebih tinggi. Semua ini bukan sahaja menjejaskan morfologi sungai tetapi juga menyebabkan ketidakstabilan pada saluran sungai. Akibatnya, ia akan mendatangkan kerosakan serius kepada struktur hidraulik seperti empangan dan alur limpah, pintu air, bendung, dan flum di sepanjang sungai. Oleh itu, adalah penting untuk menilai kestabilan saluran sungai bagi tujuan pemulihan sungai. Ramalan kadar pengangkutan sedimen adalah penting untuk reka bentuk asas struktur hidraulik, mengurus masalah hakisan dasar (*scour*), reka bentuk saluran, dan tujuan penyelenggaraan.

Pembangunan yang pesat telah menyebabkan pasir mendapat permintaan yang lebih tinggi bagi industri pembinaan terutamanya di kawasan bandar. Dasar sungai merupakan sumber utama pasir. Aktiviti utama untuk mengekstrak pasir adalah melalui aktiviti perlombongan pasir (Arbogast et al., 2010). Perkara ini telah mengakibatkan pertumbuhan pesat aktiviti perlombongan pasir sungai yang telah menimbulkan pelbagai masalah yang memerlukan tindakan segera oleh pihak berkuasa (Ismail et al., 2019). Perlombongan pasir yang pesat dan tidak cekap boleh memberikan pengaruh negatif kepada ekologi dan ekosistem. Masalah alam sekitar berlaku apabila kadar pengekstrakan pasir, kerikil, dan bahan-bahan lain melebihi kadar di mana proses semula jadi menghasilkan bahan-bahan tersebut. Penyingkiran pasir yang berlebihan boleh mengganggu keseimbangan semula jadi saluran sungai secara signifikan (Teo et al., 2017). Selain itu, pengekstrakan pasir yang berlebihan dan perlombongan pasir secara tidak berlesen boleh menyebabkan peningkatan kekeruhan air dan hakisan tebing sungai yang teruk di bahagian hilir sungai.

Kajian ini memberi tumpuan kepada pengangkutan sedimen dan sedimen yang mendap akibat operasi perlombongan pasir di sepanjang Sungai Perak di Pendiati. Selain itu, kajian ini bertujuan untuk mengkaji impak perlombongan pasir yang berlebihan di Sungai Perak di Pendiati. Salah satu impaknya ialah hakisan dan pengkisan tebing sungai. Dasar Sungai Perak di Pendiati akan disimulasikan menggunakan perisian HEC-RAS.

PENGANGKUTAN SEDIMEN

Hakisan permukaan dalam lembangan sungai dan proses hakisan di sepanjang alur sungai merupakan salah satu faktor angkutan sedimen, iaitu pergerakan zarah pepejal organik atau bukan organik yang disebabkan oleh tindakan graviti ke atas sedimen dan/atau pergerakan bendalir di mana sedimen tersebut terperangkap (UNESCO-ISI, 2021). Sungai dianggap stabil apabila ia menerima kesemua air dan sedimen tanpa mengubah bentuk atau coraknya. Perkara ini boleh dikaitkan dengan Hukum Lane (1955) mengenai fenomena keseimbangan dinamik. Luahan yang lebih tinggi dan cerun yang lebih curam kedua-duanya meningkatkan kuasa aliran. Walau bagaimanapun, disebabkan cerun berkurangan di bahagian hilir manakala luahan meningkat, aliran pergunungan semasa banjir menjana kuasa yang jauh lebih besar berbanding sungai besar di kawasan tanah pamah. Sebaliknya, sungai yang melimpahi tebingnya ke kawasan dataran banjir menjana kuasa yang jauh lebih kecil berbanding sungai yang kekal di dalam tebingnya (Doty, 2022).

Mod Pengangkutan Sedimen

Mod pengangkutan sedimen bergantung pada ciri-ciri sedimen seperti saiz dan bentuk, ketumpatan, serta parameter kebolehalihan (Ashraf et al., 2011). Sesetengah zarah sedimen bergolek atau meluncur di dasar secara rawak, manakala zarah yang lain melakukan saltasi (melompat atau melantun di sepanjang dasar). Apabila ciri-ciri aliran (halaju, purata tegasan ricih, dan lain-lain) dalam alur aluvium melebihi keadaan ambang bagi bahan dasar, zarah-zarah akan bergerak dalam pelbagai mod mengikut arah aliran. Sedimen dibawa di dalam sungai sebagai beban dasar, beban terampai, atau beban hanyut. Bahan yang paling kasar bergolek atau melantun di sepanjang dasar sebagai beban dasar, manakala bahan yang lebih halus terampai oleh gelora air dan zarah yang paling halus dibawa sebagai beban hanyut. Beban hanyut tersebar secara sama rata di seluruh kedalaman air dan bergerak dengan berkesan pada kelajuan yang sama dengan air (Komar, 1980). Beban dasar boleh merangkumi daripada beberapa peratus jumlah beban di sungai tanah pamah sehingga mencecah 15% di sungai pergunungan, dan sehingga 60% di sesetengah kawasan tadahan gersang. Kadar pemindahan sedimen biasanya meningkat sebagai fungsi kuasa aliran; iaitu, menggandakan aliran lazimnya mengakibatkan kadar angkutan sedimen meningkat lebih daripada dua kali ganda, dan kebanyakan angkutan sedimen berlaku semasa kejadian banjir (Kondolf, 1997). Jumlah keseluruhan bagi beban dasar, beban terampai, dan beban hanyut dikenali sebagai jumlah beban (*total load*).

Persamaan bagi Jumlah Beban Sedimen

Persamaan angkutan sedimen telah diterbitkan secara empirik dan melalui pengukuran makmal, dan persamaan ini kebanyakannya sesuai untuk kepekatan dan keadaan makmal (Ariffin et al., 2002). Jumlah angkutan sedimen dalam aliran dikelaskan kepada angkutan beban dasar dan angkutan beban terampai berdasarkan dua corak gerakan yang berbeza, di mana hasil tambah beban dasar dan beban terampai adalah bersamaan dengan jumlah beban (Avgeris et al., 2020). Beberapa peramal kadar angkutan bahan beban dasar telah dibangunkan oleh beberapa penyelidik seperti Sinnakaudan et al. (2006); Ariffin (2004); Molinas dan Wu (2001); Karim (1998); Yang (1973, 1984, 1996); Ghani (1993); Raudkivi (1990); Karim dan Kennedy (1983); Brownlie (1981); Yalin (1977); Ackers dan White (1973); Graf (1968), Engelund dan Hansen (1967); Garde et al. (1963) dan Laursen (1958).

Dalam kajian ini, persamaan Yang, Engelund-Hansen dan Ariffin dipilih kerana persamaan-persamaan ini disyorkan oleh JPS (Jabatan Pengairan dan Saliran). Memandangkan pengiraan dalam HEC-RAS hanya boleh dilakukan menggunakan persamaan Yang, maka persamaan Yang merupakan persamaan yang paling utama dipilih untuk digunakan dalam kajian ini.

Yang (1973) merumuskan satu persamaan jumlah angkutan beban berdasarkan kuasa aliran, iaitu hasil darab antara halaju aliran dan tegasan ricih. Fungsi ini dibina dan dinilai menggunakan pelbagai data saluran air (flume) dan data lapangan. Persamaan ini terdiri daripada tiga perkaitan angkutan, merangkumi sungai dasar pasir, sungai dasar pasir dan kelodak, serta sungai dasar kelikir. Walau bagaimanapun, dalam kajian ini, hanya persamaan sungai dasar pasir yang digunakan. Dalam garis panduan angkutan sedimen Malaysia, JPS (2009) mengesyorkan persamaan ini untuk menilai kapasiti sedimen. Terdapat syor daripada kajian terdahulu bahawa persamaan Yang dicadangkan untuk sungai semula jadi (Teo et al., 2017) tanpa mengambil kira beban hanyut.

KAWASAN KAJIAN

Kajian ini menumpukan kepada Sungai Perak di kawasan Kg. Pendiati, Bota, Perak. Sungai Perak merupakan sungai kedua terpanjang di Semenanjung Malaysia yang mengalir dari Banjaran Titiwangsa dan Banjaran Bintang di bahagian hulu, dengan keluasan kawasan tadahan sebanyak 14,908 km². Selain berfungsi sebagai sumber bekalan air utama kepada masyarakat setempat, Sungai Perak turut digunakan untuk tujuan rekreasi, perikanan, perlombongan, pengairan kawasan pertanian, serta pelbagai aktiviti manusia yang lain. Pada Disember 2014, Sungai Perak telah dilanda banjir besar (Berita Harian Online, 2014). Menurut laporan, banjir terburuk dalam sejarah kawasan kajian tersebut telah berlaku pada penghujung tahun 2014 dan awal tahun 2015. Bagi tujuan kajian ini, kawasan kajian telah dibataskan kepada jajaran sepanjang 3.16 kilometer di Sungai Perak yang merentasi Kg. Pendiati. Rajah 1 menunjukkan lokasi kawasan kajian di Sungai Perak, Pendiati, Perak.



Rajah 1: Lokasi kawasan kajian di Sungai Perak, Pendiati, Perak. (Google Earth, 2022)

METODOLOGI

Kajian ini dimulakan dengan kerja lapangan di kawasan Pendiati di Sungai Perak bagi mengumpul data keratan rentas sungai. Dalam kajian ini, ADCP RiverSurveyor M9 telah digunakan untuk mengukur kerataan rentas Sungai Perak yang luas. Data pengukuran aliran, seperti luahan dan halaju bagi setiap keratan rentas, diperolehi dengan menggunakan alat tersebut. ADCP didapati sesuai digunakan kerana Sungai Perak mempunyai ciri fizikal yang lebar serta kedalaman yang tinggi. Instrumen ini mempunyai keupayaan teknikal untuk menentukan kedalaman sungai sehingga mencecah 5 meter menjadikannya alat ini efektif bagi keadaan lapangan di tapak kajian tersebut.

Sebanyak 12 keratan rentas telah disampel dalam kajian ini, dengan tujuh daripadanya tertumpu di kawasan Pendiati. Jumlah persampelan yang terhad ini disebabkan oleh kekangan masa dan peruntukan sepanjang tempoh Perintah Kawalan Pergerakan (PKP). Data luahan dan kedalaman bagi tujuh keratan rentas tersebut, yang direkodkan menggunakan alat RiverSurveyor M9, diperincikan dalam Jadual 1. Panjang sungai diukur dari pusat garisan tersebut. Keratan rentas ini bermula dari Garisan 1 hingga Garisan 7. Garisan 7 terletak di bahagian hulu sungai, manakala Garisan 1 merupakan keratan rentas terakhir yang diambil di Kg. Pendiati, iaitu di bahagian hilir sungai.

Jadual 1: Lokasi garisan persampelan bagi persampelan sedimen dan pengukuran aliran				
Garisan	Koordinat Tebing Kiri		Koordinat Tebing Kanan	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
L7	4° 23' 10.968"N	100° 53' 55.104"E	4° 23' 5.928"N	100° 53' 48.516"E
L6	4° 22' 52.068"N	100° 54' 5.22"E	4° 22' 53.688"N	100° 53' 55.932"E
L5	4° 22' 37.272"N	100° 54' 3.6"E	4° 22' 41.664"N	100° 53' 54.528"E
L4	4° 22' 28.128"N	100° 54' 0.432"E	4° 22' 32.196"N	100° 53' 52.332"E
L3	4° 22' 4.8"N	100° 53' 47.58"E	4° 22' 9.732"N	100° 53' 43.764"E
L2	4° 21' 59.076"N	100° 53' 41.712"E	4° 22' 7.608"N	100° 53' 34.296"E

L1	4° 21' 45.072"N	100° 53' 18.312"E	4° 21' 54.108"N	100° 53' 11.94"E
----	-----------------	-------------------	-----------------	------------------

Rajah 2 menunjukkan kawasan kajian di sepanjang jajaran sungai di Kg. Pendiati beserta koordinat tebing kanan dan tebing kiri.



Rajah 2: Peta lokasi pensampelan sedimen dan pengukuran aliran

Seterusnya, semua data dari lapangan diimport masuk ke dalam program HEC-RAS dan tahap ini melibatkan integrasi tiga komponen utama secara serentak, iaitu data geometri, data aliran (flow data), dan data sedimen. Setiap set data tersebut disunting dengan teliti bagi memastikan perwakilan fizikal alur sungai dan ciri-ciri hidrodinamikanya adalah tepat dan selaras dengan keadaan sebenar sebelum simulasi dijalankan. Analisis HEC-RAS kemudian dijalankan berdasarkan parameter yang telah diinput.

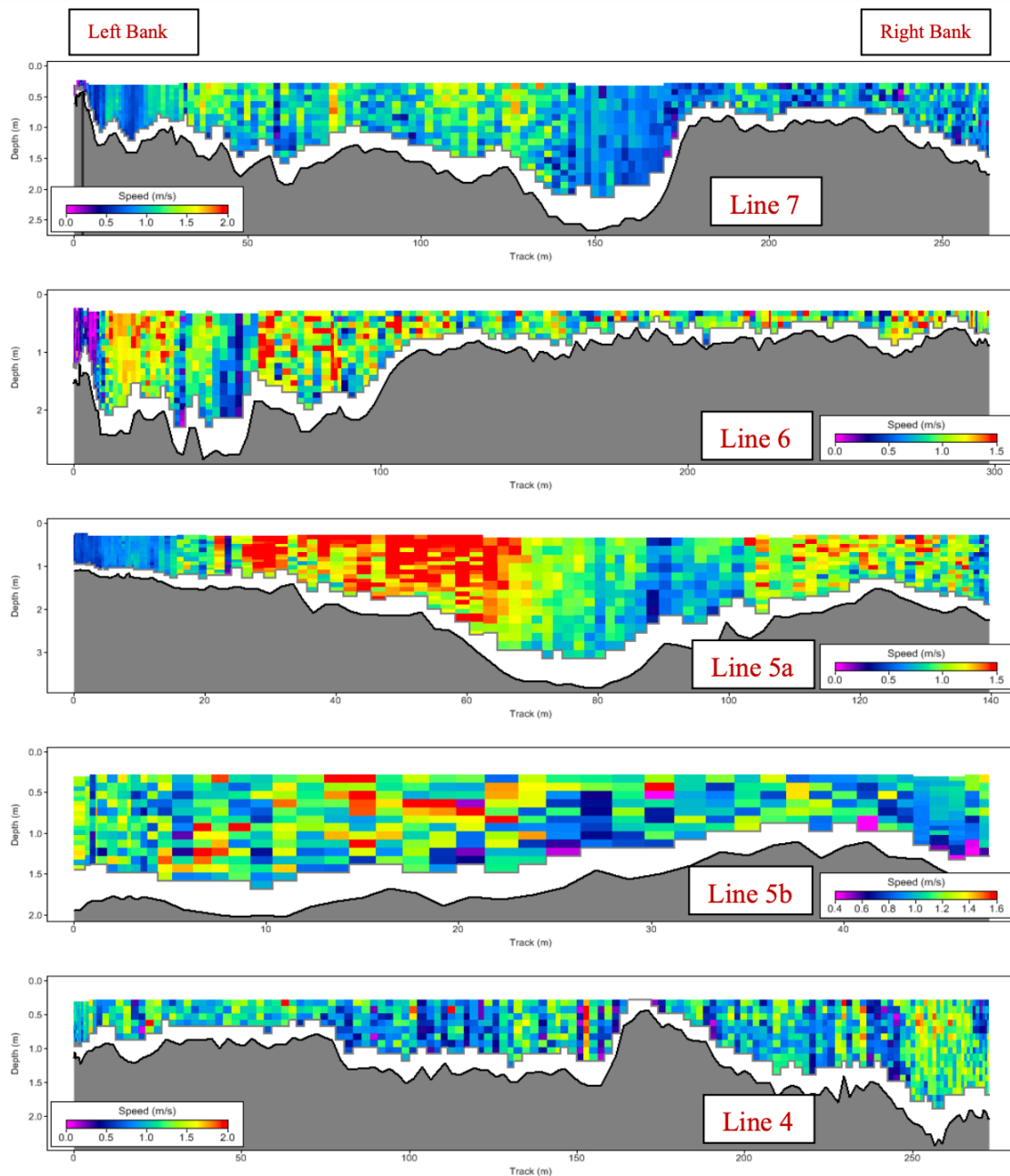
KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

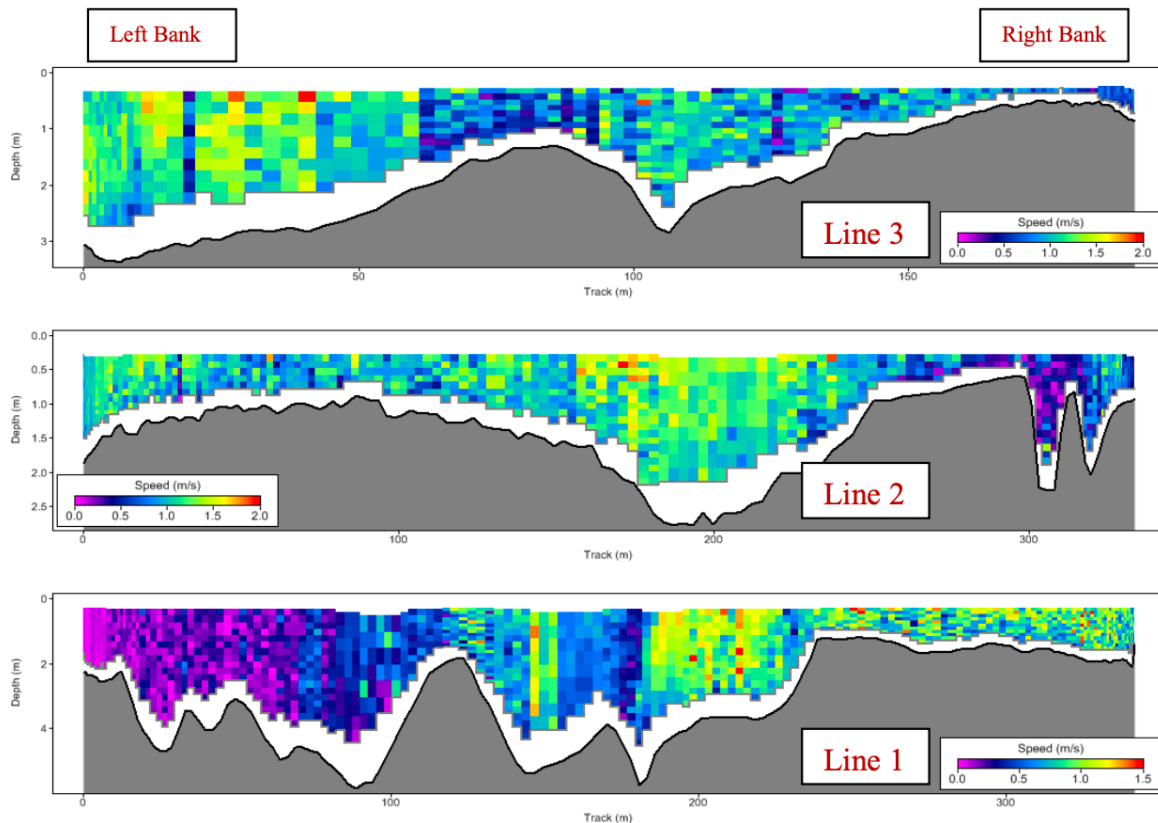
ADCP telah digunakan untuk mengukur profil keratan rentas di Pendiati, Sungai Perak. Sebanyak tujuh keratan rentas telah dipilih bagi tujuan pengumpulan data hidraulik dan sedimen. Bagi kesemua tujuh keratan rentas tersebut, lebar Sungai Perak di kawasan Pendiati mencatatkan variasi antara 210 hingga 350 meter. Selain itu, jajaran Sungai Perak di Pendiati bagi ketujuh-tujuh garisan tersebut mencatatkan kedalaman purata sebanyak 1.814 meter. Halaju purata bagi kesemua tujuh garisan tersebut pula adalah 0.77 meter sesaat (m/s). Jadual 2 menunjukkan perincian mengenai keputusan purata dan luahan bagi setiap garisan.

Data	Kedalaman (m)	Lebar (m)	Halaju Purata (m/s)	Luahan Purata (m ³ /s)
Garisan L7	1.33041	270	0.79984	147.9277
Garisan L6	1.29076	290	0.76787	158.1092
Garisan L5	1.85993	140	0.76853	87.51145
Garisan L5	1.79939	60	1.05067	17.74383
Garisan L4	1.34425	290	0.85064	101.2462
Garisan L3	1.80699	200	0.7941	163.0451
Garisan L2	1.21578	340	0.70477	168.1881
Garisan L1	2.78975	350	0.43778	119.1105

Berbanding dengan garisan lain, Garisan 1 mempunyai lebar yang paling besar serta kedalaman yang paling tinggi dan halaju yang paling perlahan. Buat masa ini, Garisan 5 mencatatkan halaju tertinggi serta jumlah luahan yang paling banyak. Daripada keratan rentas yang diunjurkan oleh ADCP, ia menggambarkan kontras yang ketara antara tebing kanan dan tebing kiri di Garisan 1. Tebing kiri Garisan 1 mempunyai halaju yang sangat rendah, manakala tebing kanannya mencatatkan halaju yang tinggi. Sebaliknya, Garisan 2 dan Garisan 5 menunjukkan halaju yang kuat di tebing kiri tetapi halaju yang rendah di tebing kanan.

Rajah 3 memaparkan keratan rentas tipikal bagi Sungai Perak di Pendiat. Ia menggambarkan jarak dan kedalaman sungai berserta halaju air sungai bagi keratan rentas tersebut. Nilai halaju bagi tebing kanan dan kiri sungai di kesemua garisan yang telah diperolehi daripada data ADCP. Nilai halaju tersebut diwakili oleh julat warna bermula daripada warna ungu bagi halaju rendah hingga warna merah bagi halaju tinggi.





Rajah 3: Keratan rentas bagi Sungai Perak di Pendiati.

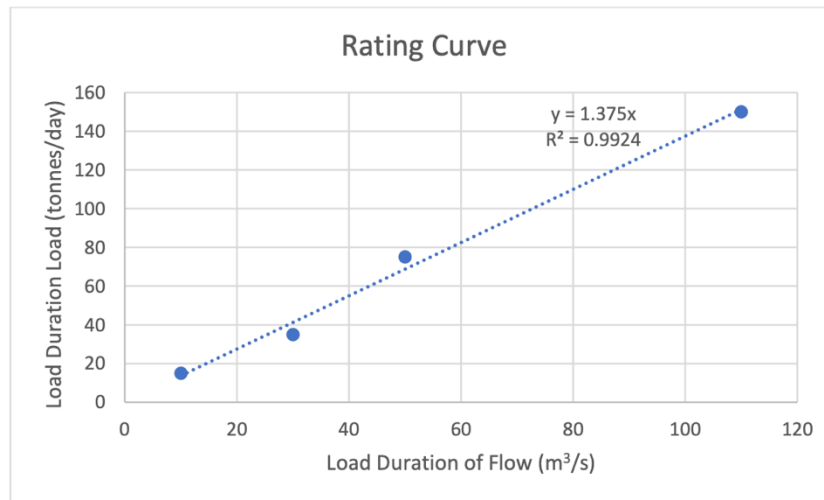
Pengumpulan sampel sedimen bersama-sama dengan data luahan sungai dan luahan sedimen adalah perlu bagi menentukan korelasi antara kedua-duanya. Keluk kadaran sedimen digunakan untuk menilai beban sedimen di dalam sungai dan boleh juga digunakan untuk menghitung kadar imbuh tambah sedimen. Kadar imbuh tambah ditakrifkan sebagai bekalan sedimen beban dasar tahunan dari bahagian hulu; pengehadan pengestrakan tahunan kepada kuantiti ini atau peratusan tertentu dianggap sebagai hasil selamat (Kondolf, 2007). Keluk kadaran dalam HEC-RAS menghitung beban sempadan sedimen berdasarkan aliran sempadan yang ditetapkan.

Keluk kadaran sedimen bagi Pendiati, Sungai Perak ditunjukkan dalam Rajah 4, manakala Jadual 3 memaparkan data beban sedimen tersebut. Jadual data beban yang diperolehi daripada HEC-RAS adalah bergantung pada syarat sempadan dan titik aliran-beban (flow-load points) yang dimasukkan ke dalam perisian tersebut. Beban sedimen dalam unit tan sehari dan luahan sungai digunakan untuk memplot keluk ini. Keputusan menunjukkan bahawa keluk kadaran sedimen bagi Pendiati, Sungai Perak merupakan sebuah keluk yang curam.

Jadual 3: Data Beban Sedimen

No.	Luahan Tempoh Beban (m ³ /s)	Beban Tempoh Beban (tan/hari)
1	10.000	15.000
2	30.000	35.000
3	50.000	75.000
4	110.000	150.000

Sungai Perak dijangka mampu pulih dan melalui proses imbuh tambah dalam tempoh yang lebih singkat selepas aktiviti pengestrakan pasir dijalankan. Seiring dengan peningkatan luahan sedimen, jumlah beban juga akan turut meningkat. Nilai pekali penentuan (R^2) bagi hubungan antara luahan sedimen dengan beban adalah sebanyak 0.9924.



Rajah 3: Keluk Kadaran Sedimen

KESIMPULAN

Kesimpulannya, penyelidikan ini telah berjaya membuktikan keberkesanan integrasi teknologi ADCP dan pemodelan HEC-RAS sebagai wadah penting dalam pemerkasaan sistem pemantauan serta pengurusan perlombongan pasir di Sungai Perak. Dapatan kajian menunjukkan bahawa pulau sungai berupaya menjadi alternatif strategik yang signifikan bagi menggantikan sumber bekalan pasir daripada tebing sungai, sekali gus meminimumkan gangguan terhadap kestabilan morfologi alur. Secara khusus, analisis keratan rentas pada Garisan 5 telah mengenal pasti lokasi tersebut sebagai tapak pengekstrakan pasir yang berpotensi untuk diusahakan secara mampan berdasarkan profil luahan dan sedimennya. Oleh yang demikian, hasil penyelidikan ini bukan sahaja menyediakan data empirikal yang kritikal dalam membantu pihak kerajaan memitigasi impak negatif perlombongan pasir, malah ia turut berfungsi sebagai panduan saintifik yang kukuh bagi memastikan kelestarian pengurusan sumber sungai secara holistik di kawasan Pendiati.

RUJUKAN

- Avgeris, L., Kaffas, K. and Hrisanthou, V. (2020) "Comparison between Calculation and Measurement of Total Sediment Load: Application to Nestos River," p. 19. Available at: <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002019>.
- Doty, L. (2022, April 3). Fluvial Processes along the River Continuum – Ecology Structure. Ecology Center. <https://www.ecologycenter.us/ecologystructure/fluvial-processes-along-the-river-continuum.html>
- Ghani, N.A.A.A., Tholibon, D.A. and Ariffin, J. (2019) "Robustness analysis of model parameters for sediment transport equation development," *ASM Science Journal*, 12, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.32802/asmscj.2019.268>.
- Kondolf, G.M. (1997) "Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels," *Environmental Management*, 21(4), pp. 533–551. Available at: <https://doi.org/10.1007/s002679900048>.
- UNESCO-ISI Online Training Workshop on Sediment Transport Measurement and Monitoring. (2021). Available at: https://isiunesco.iahr.org/en/web/index/259_125029__
- Yenn Teo, F., Ab Ghani, A. and Kiat Chang, C. (2017) "River sand mining capacity in Malaysia project River maintenance View project," (August). Available at: <http://www.iahrworldcongress.org/View>.
- Yang, C. T. (1977). The movement of sediment in rivers. *Geophysical Surveys*, 3(1), 9–68. Available at: <https://doi.org/10.1007/bf01449182>