

Kesan Ketidakteragaman Sedimen Dasar ke Atas Kerokan Tempatan di Sekitar Tiang Bersilinder

(The Effect of Non-Homogeneous Sediment Bed on Local Scour Around Cylindrical Pier)

Wan Hanna Melini Wan Mohtar*, Muhd Aminullah Amin & Mohamad Rafi Abdul Shukor

ABSTRAK

Kajian mengenai kerokan setempat di sekitar tiang jambatan selalunya menggunakan sedimen seragam dan tidak jelekit sebagai parameter sedimen yang dipermudahkan. Namun begitu, sedimen yang didapati di saluran sebenar ialah sedimen tidak seragam dengan taburan saiz partikel yang pelbagai. Kajian ini melihat kepada kelakuan kerokan setempat bagi dua jenis sedimen tidak seragam, tidak jelekit dengan parameter gradasi ialah 1.5 dan 2.25. Ujikaji makmal dijalankan dengan menggunakan tiang bersilinder berdiameter 2.5, 3.5, 5 dan 6 cm. Pengukuran kedalaman kerokan maksima, panjang mendatar dan membujur kerokan diukur menggunakan skala Vernier bagi setiap ujikaji. Kedalaman dan panjang kerokan didapati meningkat secara konsisten apabila saiz tiang meningkat bagi kedua-dua jenis sedimen. Peningkatan panjang kerokan membujur dan mendatar meningkat secara eksponensial apabila saiz tiang meningkat dari 3.5 cm ke 5 cm. Kesan ketidakteragaman sedimen jelas memberikan kesan kepada kelakuan kerokan setempat di mana kedalaman dan panjang kerokan bagi sedimen dengan nilai parameter gradasi lebih tinggi adalah lebih rendah. Tambahan pula, ciri-ciri kerokan setempat yang diperolehi jauh lebih rendah dari nilai yang dikira melalui persamaan empirikal, di mana perbezaan boleh mencapai sehingga 200%. Ini menunjukkan kesan pemerisaaian wujud di mana sedimen lebih kasar melindungi sedimen yang lebih halus dari bergerak. Oleh sedemikian, aras kerokan adalah lebih kecil dari apa yang dijangka dan ini memberikan kebarangkalian jambatan direkabentuk terlebih.

Kata Kunci: Kerokan setempat; sedimen tidak seragam; tiang bersilinder

ABSTRACT

Studies of local scour around bridge commonly employed homogenous non-cohesive sediment as their simplified sediment parameters. However, sediment in real water stream is non-homogeneous with varying grain size distribution. This study investigates the local scour behaviour for two non-homogeneous, non-cohesive sediment with gradation parameter 1.5 and 2.25. Laboratory experiments were conducted using cylindrical piers with varying sizes of 2.5, 3.5, 5 and 6 cm. Measurement of maximum scour depth, transverse and longitudinal scour lengths were measured using Vernier scale after each test. The scour depth and lengths were consistently increased as the pier size increased for both types of sediment. Increment of the longitudinal and transverse scour lengths were found to be exponential when the pier size was increased from 3.5 cm to 5 cm. The effect of non-homogeneity of sediment characteristics were clearly affected the local scour behaviour where the scour depth and lengths for sediment with higher gradation parameter were much lower. Furthermore, the obtained scour characteristics were significantly underestimated when compared with values predicted with the empirical equation. This indicate that the armouring effect has taken place, where the coarser sediment protects the finer sediment from being entrained. Consequently, the level of scouring is much less than what is anticipated and posed a possibility of bridge overdesign.

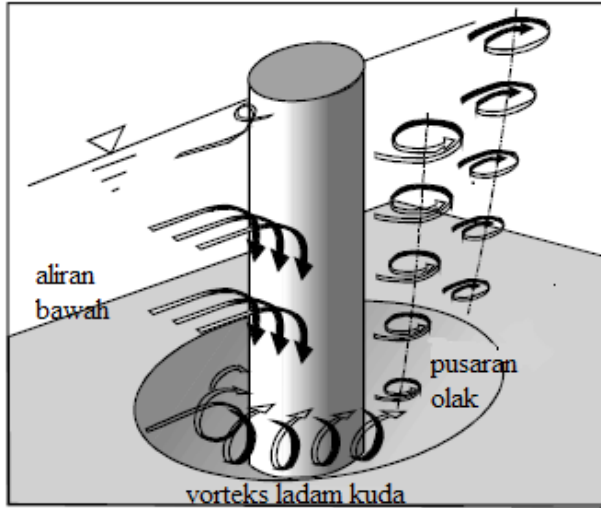
Keywords: Local scour; non-homogeneous sediment; cylindrical piers

PENGENALAN

Kerokan tempatan di sekitar tiang jambatan telah dikaji dengan mendalam sejak kajian yang dipelopori oleh Melville (1975). Kajian klasik ini dilanjutkan kepada struktur jambatan padu dan separa-padu dan kumpulan tiang kompleks (Akib et al. 2011; Akib et al. 2014). Dewasa ini, kajian kerokan setempat menjadi lebih matang dengan kajian mengaplikasi teknik kecerdasan tiruan seperti

Rangkaian Jaringan Neural (ANN), Adoptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) untuk meramal kedalaman kerokan, kebiasannya dilakukan kerana kekurangan data lapangan (Akib et al. 2014). Pembentukan vorteks di dasar samada pusaran ladam kuda (horseshoe vortex) ataupun pusaran olak (wake vortices) akibat daripada gangguan tiang ke atas aliran mengalihkan bahan dasar, seperti yang ditunjukkan di Rajah 1. Peralihan berterusan bahan

dasar terutamanya apabila kadar pengangkutan sedimen masuk adalah lebih rendah dari kadar pengangkutan luar mengakibatkan kerokan setempat berlaku. Kedalaman kerokan meningkat sehingga mencapai keseimbangan di mana ketika ini pembentukan pusaran ladam kuda tidak lagi memberikan impak besar ke atas bahan dasar.



RAJAH 1. Mekanisma pembentukan kerokan setempat oleh aliran bawah, vorteks ladam kuda dan pusaran olak

Magnitud kerokan setempat di tiang jambatan bergantung kepada tiga parameter saling hubung-kait iaitu saiz tiang, ciri-ciri aliran dan sedimen dasar. Saiz tiang termasuk lebar, panjang, manakala ciri-ciri aliran iaitu kadar alir, kedalaman, halaju masuk, arah aliran ke atas struktur dan ciri-ciri sedimen merangkumi saiz dan pemeringkatan bahan, pembentukan dasar (Melville 2008).

Saiz dan pemeringkatan bahan dasar memainkan peranan penting di dalam kedalaman kerokan setempat, di mana jenis sedimen samada pasir (yakni bersaiz besar) ataupun sedimen halus (iaitu silt dan tanah liat) mengubah kedalaman kerokan setempat (Chiew 1984). Tidak hanya bergantung kepada jenis sedimen, kehomogenan campuran sedimen juga memberi kesan kepada kedalaman kerokan. Ketidakteraturan sedimen memberikan julat saiz yang besar, di mana kesan pemerisaian (*armouring effect*) boleh menghambat proses kerokan. Saiz sedimen besar melindungi saiz sedimen halus dari teriring bersama aliran (Chiew 1984).

Agihan saiz sedimen dasar dan halaju aliran menentukan jenis pembentukan dasar samada riak, gumuk, dasar mendatar atau anti-gumuk (van Rijn 1993). Pembentukan dasar secara langsung boleh merubah ciri-ciri aliran dan sekaligus memberi kesan kepada lubang kerokan melalui perubahan kadar angkutan sedimen dasar.

Kedalaman kerokan maksimum bagi tiang bersilinder dapat dikira secara empirikal melalui persamaan yang dibangunkan oleh Oliveto dan Hager (2002) iaitu

$$\frac{y_s}{L_r} = 0.068\sigma_g^{-0.5}F_d^{1.5}\log T_d, \quad (1)$$

Dimana, $L_r = b^{2/3}y^{1/3}$, b dan y masing-masing mewakili lebar tiang dan kedalaman aliran hilir, $F_d = u/\sqrt{gd}$ ialah nombor Froude partikel dan $T_d = t/t_r$ ialah parameter masa tidak berdimensi. Simbol t menunjukkan masa aliran dan $t_r = L_r/\sqrt{gd}$.

Persamaan (1) adalah mudah diaplikasi, tidak bersandar kepada parameter keseimbangan kerokan dan mencakupi parameter yang cukup untuk mendapatkan anggaran kedalaman kerokan bagi jenis sedimen dan aliran berbeza (Yanmaz 2006).

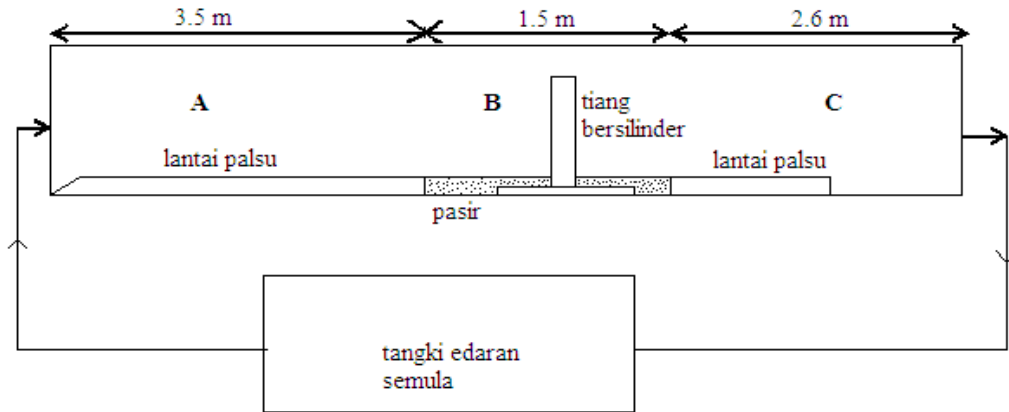
Ketidakteraturan sedimen mempunyai kesan besar kepada kedalaman kerokan di mana kedalaman berkurangan apabila sedimen dasar mempunyai nilai diantara $1 \leq \sigma_g \leq 5$ (Yanmaz 2002). Partikel bersaiz besar memberi kesan (*armouring*) ke atas partikel bersaiz halus menyebabkan partikel-partikel tidak dibawa aliran. Kedalaman kerokan dilihat lebih rendah dari sedimen seragam tertakluk aliran masuk adalah berkeadaan air-jernih (*clear-water*) (Raudkivi & Ettema 1983; Yanmaz 2002). Apabila halaju aliran meningkat lebih tinggi dari halaju kritikal partikel, transisi ke aliran dasar hidup (*live-bed*) memberikan kesan ketidakteraturan menurun (Ettema et al. 2011). Kedalaman kerokan bagi sedimen seragam dan tidak seragam ketika ini boleh dikatakan relatif sama.

Kajian ini mencuba untuk melihat kesan perubahan kedalaman kerokan bagi dua jenis sedimen tidak seragam. Analisis ditekankan kepada pengurangan relatif kedalaman kerokan dan dibandingkan dengan ramalan kedalaman kerokan dikira menggunakan persamaan empirikal.

KAEDAH UJIKAJI

Ujikaji dilakukan di dalam flum boleh condong berdimensi $7.8 \times 0.9 \times 0.45 \text{ m}^3$ di makmal Hidraulik dan Kejuruteraan Pantai, Universiti Kebangsaan Malaysia. Rajah 2 menunjukkan rekabentuk skema flum dan eksperimen. Ruang kerja terletak pada 3.2 meter dari ruang masuk aliran di mana sedimen setinggi 20 cm dan 1 m panjang telah diletakkan. Aliran air jernih (*clear water*), di mana tiada pengangkutan sedimen di hiliran di masukkan melalui tangki edaran semula dan kadar alir ditetapkan pada $1.69 \text{ m}^3/\text{s}$. Kedalaman aliran dimalarkan pada ketinggian 10 cm untuk melihat kesan air cetek ke atas kelakuan kerokan setempat. Halaju aliran diukur dengan menggunakan Acoustic Doppler Velocimetry (Nortek AS) yang diletakkan di atas satu platform boleh gerak. Satu perangkap sedimen dengan saiz jaring 300 μm diletakkan di hujung flum untuk meminimumkan kemasukan sedimen ke dalam tangki edaran semula.

Tiang bersilinder diperbuat daripada PVC berbeza saiz diameter iaitu 2.5, 3.5, 5 dan 6 cm telah digunakan di dalam ujikaji ini. Sedimen dimasukkan secara berperingkat di mana bagi setiap lapisan 5-6 cm, sedimen di hentakkan dengan menggunakan pemberat. Ini memberikan keseragaman sedimen yang sekata di setiap lapisan sedimen. Setelah sedimen mencapai ketinggian 20 cm, permukaan sedimen



RAJAH 2. Gambarajah skematik pemasangan eksperimen. Ruang A, B dan C masing-masing mewakili aliran masuk, ruang kerja dan aliran keluar. Panjang 3.2 m bagi aliran masuk adalah mencukupi untuk memastikan aliran air yang seragam dan mantap

diratakan dengan menggunakan perata untuk mencapai permukaan sekata. Sebelum aliran air dimasukkan secara perlahan-lahan, satu lembaran plastik diletakkan di atas ruang kerja untuk memastikan sedimen tidak terganggu dan diangkut oleh aliran air. Setelah mencapai kedalaman

yang ditetapkan, kadar alir ditingkatkan dan plastik tersebut diangkat untuk memulakan ujikaji. Dua jenis sedimen semulajadi telah digunakan dimana ciri-ciri sedimen adalah seperti yang ditunjukkan di Jadual 1.

JADUAL 1. Ciri-ciri sedimen yang digunakan

Sedimen	Saiz median d_{50} (μm)	Parameter	Nilai ambang Shields
S1	400	1.53	0.034
S2	700	2.25	0.032

Kedua-dua jenis sedimen mempunyai $\sigma_g > 1.4$, menunjukkan sedimen termasuk di dalam kategori tidak seragam. Parameter σ_g dikira melalui persamaan $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$, di mana d_{84} dan d_{16} masing-masing adalah saiz sedimen yang melepasi peratus kumulatif 84% dan 16%. Aliran air dibiarkan selama satu jam sebelum pengukuran kerokan setempat di tiang bersilinder di ambil. Parameter kedalaman kerokan di hulu, kelebaran dan kepanjangan kerokan di tiang bersilinder di ukur dengan menggunakan skala Vernier yang diletakkan di atas pelantar boleh gerak. Rujuk Rajah 3 untuk ilustrasi lebih baik bagi pengukuran parameter yang di ambil. Bacaan untuk setiap parameter adalah bacaan purata yang diambil dari tiga bacaan. Sebelum pengukuran dijalankan, air dialir keluar secara perlahan-lahan untuk tidak mengganggu kerokan yang terhasil.

Nilai ambang Shields bagi kedua-dua jenis sedimen diperolehi dengan menggunakan persamaan Brownlie (1982);

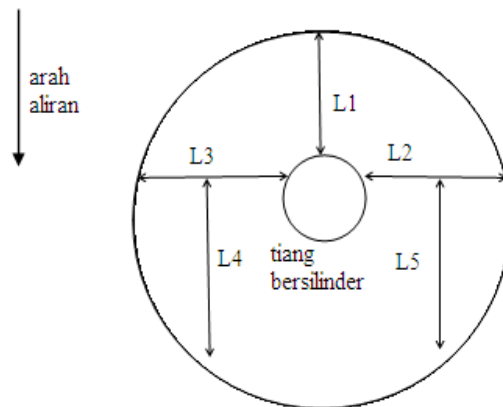
$$\theta_c = 0.22Re^{-0.6} + 0.06e^{-17.77Re^{-0.6}} \quad (2)$$

Di mana adalah nombor partikel Reynolds dan dikira melalui persamaan

$$Re = \frac{\sqrt{(\gamma-1)gd^3}}{\nu} \quad (3)$$

Simbol γ menandakan ketumpatan relatif, d ialah saiz median sedimen dan ν ialah kelikatan kinematik air. Untuk kajian ini nilai diambil sebagai saiz median sedimen d_{50} . Kesemua kes yang dibincangkan di sini mempunyai nilai $\frac{\theta}{\theta_c} \gg 1$, di mana simbol θ merujuk kepada parameter Shields dan diperolehi melalui persamaan

$$\theta = \frac{u^2}{(s-1)gd}$$



RAJAH 3. Label ukuran jarak panjang kerokan yang diukur bagi setiap model tiang bersilinder. Panjang membujur L1, L4 dan L5 serta panjang mendatar dari tiang L2 dan L3 diambil

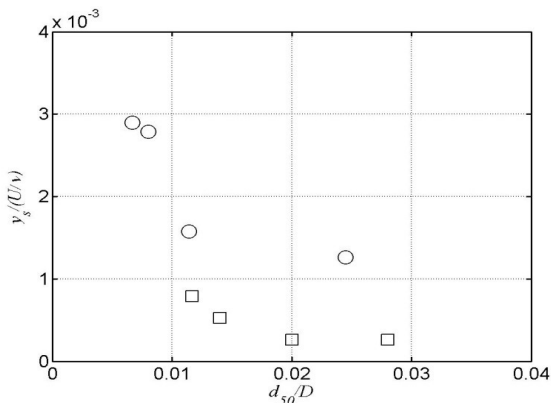
Selain daripada kedalaman kerokan maksimum, dimensi ukuran panjang kerokan diukur dengan membahagikan jarak ukuran kepada lima bahagian dan setiap satu bahagian dilabel dengan label yang berbeza iaitu $L1, L2, L3, L4$ dan $L5$ bagi setiap penggunaan model jeti jambatan. Lihat Rajah 3 untuk gambaran yang lebih jelas. Perbandingan ukuran pada setiap bahagian dilakukan untuk mengetahui ciri-ciri hasil kerokan yang diperoleh dan kesimpulan ringkas dapat diterbitkan dengan memperincikan hasil kerokan kepada sifat simetri atau tidak simetri.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 4 memberikan wakilan gambaran fizikal lingkungan setempat tiang bersilinder setelah masa $T=60$ minit. Bulatan berwarna hitam menunjukkan ruang kerokan yang terhasil, manakala bulatan berwarna putih jelas menunjukkan pempadapan sedimen di hilir tiang bersilinder. Fenomena ini adalah konsisten bagi setiap eksperimen yang dijalankan, kecuali ruang kerokan dan tinggi pempadapan dilihat menurun apabila saiz tiang mengecil. Hal ini akan dibincangkan dengan lebih terperinci kemudian.



RAJAH 4. Proses-proses yang berlaku selepas masa $T=60$ minit bagi model tiang bersilinder bersaiz 3.5 cm. Bulatan hitam dan putih masing-masing mewakili lingkungan kerokan dan pempadapan sedimen. Arah aliran air ditunjukkan melalui anak panah



RAJAH 5. Kedalaman kerokan tidak berdimensi melawan diameter tiang bagi sedimen S1 (○) dan S2 (□)

Nilai kedalaman kerokan maksimum yang diperoleh bagi setiap ujikaji ditunjukkan di dalam Jadual 2. Data menunjukkan kedalaman kerokan setempat y_s meningkat seiring dengan peningkatan lebar tiang bagi kedua-dua jenis sedimen S1 dan S2. Keputusan ini adalah sejajar dengan dapatan penyelidikan terdahulu (Raikar 2005). Bagi melihat kesan ketidakseragaman campuran sedimen ke atas kedalaman kerokan, data di dalam Jadual 2 dibuat secara tidak berdimensi seperti yang ditunjukkan di Rajah 5. Taburan saiz sedimen jelas membawa peranan penting di dalam pembentukan kerokan setempat. Bagi setiap kes, ujikaji yang menggunakan sedimen S2 memperoleh nilai y_s yang lebih rendah dari y_s sedimen S1. Keputusan ujikaji bagi sedimen S1 akan dibincangkan terlebih dahulu. Kedalaman kerokan meningkat dengan lebih dalam apabila saiz tiang semakin besar.

JADUAL 2. Keputusan ujikaji bagi kedalaman kerokan setempat untuk dua jenis sedimen S1 dan S2

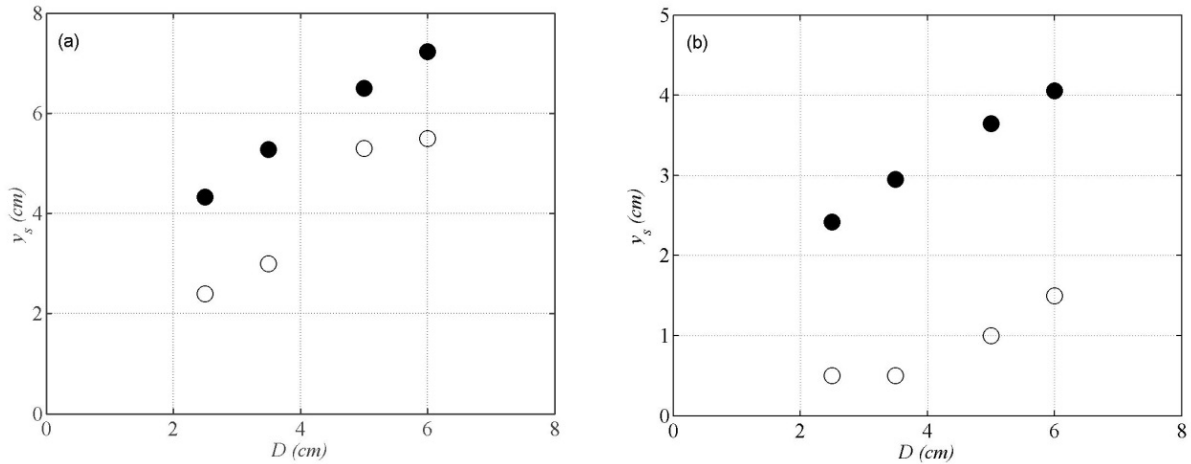
Diameter tiang (cm)	Kedalaman kerokan (cm)	
	S1	S2
2.5	2.4	0.5
3.5	3.0	0.8
5	5.3	1
6	5.5	1.5

Walaupun keputusan ujikaji bagi sedimen S2 menunjukkan kedalaman kerokan meningkat apabila saiz tiang dibesarkan, iaitu, kedalaman kerokan akhir dilihat hampir sama dari diameter tiang = 5 ke 6 cm (yakni 5.3 dan 5.5 cm) dan tidak meningkat secara eksponential sepertimana yang berlaku pada diameter tiang lebih kecil. Taburan sedimen jelas mempunyai kesan besar ke atas kedalaman kerokan setempat di sekitar tiang. Perbezaan kedalaman kerokan bagi kedua-dua jenis sedimen berada di dalam julat 50-80%.

Untuk melihat perilaku kerokan, kedalaman kerokan maksimum yang diperoleh melalui ujikaji dibandingkan dengan kedalaman kerokan yang dikira dan dipersembahkan di sini di dalam Jadual 3. Data menunjukkan bahawa untuk sedimen jenis S1, kedalaman kerokan diperoleh daripada ujikaji secara keseluruhannya adalah lebih rendah dari nilai terhitung menggunakan Persamaan 1. Julat perbezaan adalah di antara 18.5 – 44.5% bagi sedimen jenis S1, manakala julat lebih besar di antara 63-83% dapat dilihat bagi sedimen S2. Data dengan jelas menunjukkan kesan pemerisaian bagi sedimen S2 menghalang dari proses kerokan terbina dengan baik. Sedimen bersaiz besar menghalang dari sedimen halus dari teriring ke lapisan sempadan luar dan bergerak mengikut pergolakan aliran. Penggunaan persamaan (1) adalah dibolehkan dan mengikut pengehadan dan anggapan apabila persamaan tersebut dibangunkan.

JADUAL 3. Perbandingan kedalaman kerokan yang diperoleh daripada ujikaji y_s (exp) dan kedalaman y_s (calc) dihitug menggunakan Persamaan 1

(cm)	S1		S2	
	y_s (exp)	y_s (calc)	y_s (exp)	y_s (calc)
2.5	2.4	4.3	0.5	2.4
3.5	3	5.3	0.5	3.0
5	5.3	6.5	1	3.6
6	5.5	7.2	1.5	4.1



RAJAH 6. Perbandingan kedalaman kerokan bagi data eksperimen (o) dan nilai ramalan (●) untuk sedimen campuran (a) S1 dan (b) S2

Rajah 6 menunjukkan perbandingan kedalaman kerokan mengikut data kajian dan nilai ramalan yang diperoleh dengan menggunakan Persamaan 1. Data menunjukkan nilai ramalan kedalaman kerokan secara konsisten sentiasa melebihi dari nilai yang diukur dari kajian makmal. Peratusan perbezaan lebih ketara bagi sedimen S2 di mana perbezaan berada di dalam julat 170-500%. Perbezaan besar sebegini menunjukkan anggaran kedalaman kerokan maksima menggunakan persamaan empirikal bagi sedimen tidak seragam adalah tidak tepat. Kami ambil maklum bahawa penyataan tersebut hanya teraplikasi kepada julat σ_g yang dikaji, namun begitu kami percaya kesan pemerisaian dengan peningkatan nilai σ_g akan mengurangkan kedalaman kerokan setempat jauh dari yang dikira menggunakan persamaan empirikal.

DIMENSI UKURAN LINGKUNGAN KEROKAN SETEMPAT

Kerokan setempat terjadi di sekeliling tiang bersilinder, di mana kerokan terjadi di hulu, sisi kebiasaannya secara simetri dan sedimen terhakis akan termendap di bahagian hilir tiang. Lingkungan kerokan setempat membolehkan analisa keluasan kerokan dan melihat bagaimanakah dasar morfologi berubah. Jadual 4 memberikan nilai panjang kerokan mendatar dan membujur seperti yang telah ditakrifkan di dalam Rajah 3 sebelum ini.

Secara amnya, kelakuan kerokan bersimetri dapat dilihat di dalam kajian ini di mana panjang $L2 \approx L3$ dan $L4 \approx L5$ bagi kedua-dua jenis sedimen tidak seragam. Kerokan yang terhasil adalah hampir sama bagi kedua-dua panjang mendatar dan panjang membujur. Bagi memudahkan

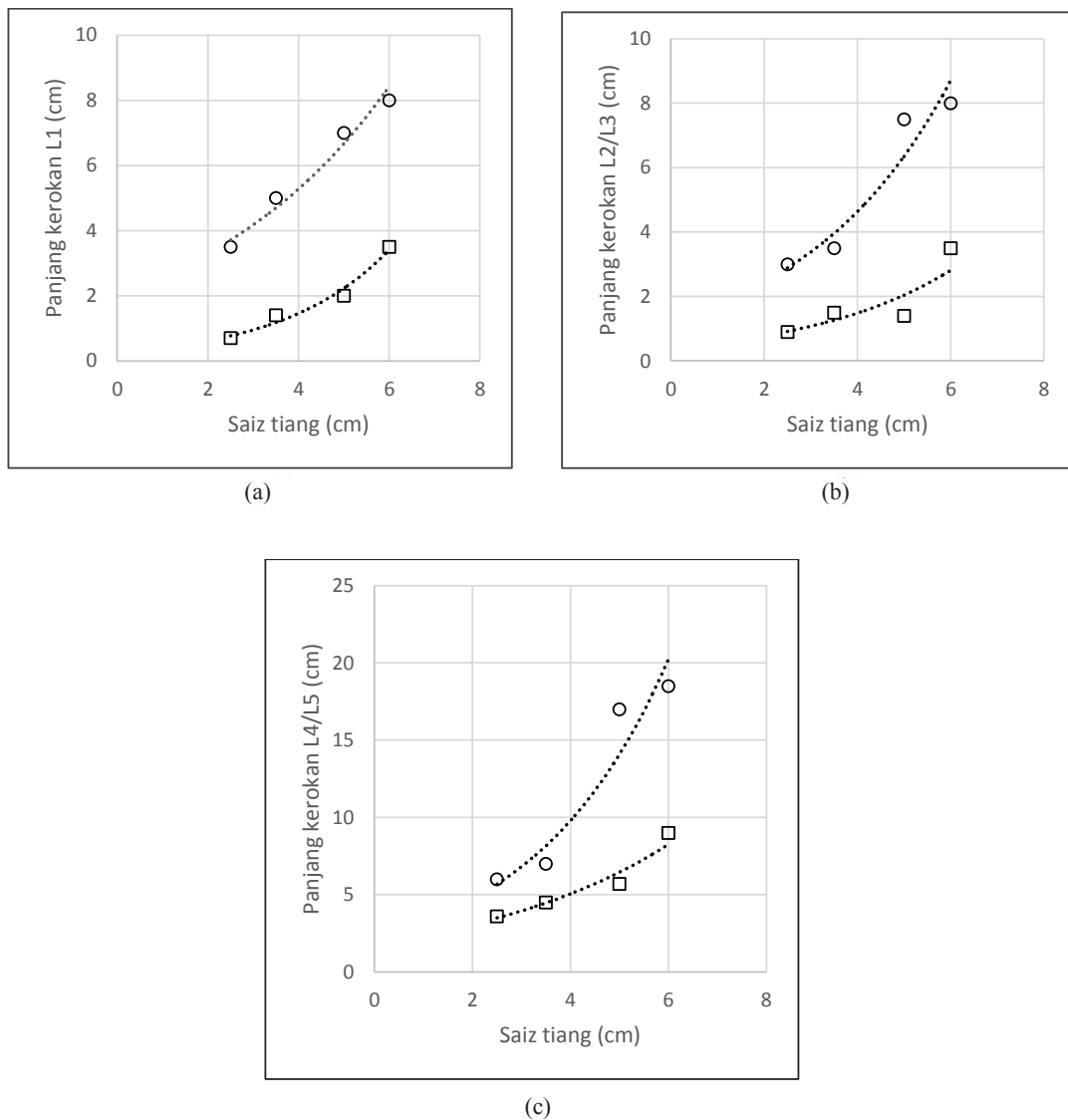
JADUAL 4. Nilai panjang kerokan mendatar dan membujur bagi kedua-dua jenis sedimen dan pelbagai diameter tiang bersilinder

Panjang Kerokan (cm)	Saiz Diameter Tiang (cm)							
	6		5		3.5		2.5	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
L1	8	2	7	3.5	5	1.4	3.5	0.7
L2	8	3.5	7.5	1.4	3.5	1.5	3	0.9
L3	7	3.5	6.5	1.4	3.5	1.5	3	0.9
L4	18.5	9	17	5.7	7	4.5	6	3.55
L5	18.5	9	17	5.7	7	4.5	6	3.55

analisis, Rajah 7 dilukis bagi memberikan gambaran yang lebih jelas perubahan panjang kerokan mengikut saiz tiang. Perbincangan perubahan panjang kerokan akan dimulai dengan sedimen S1. Panjang kerokan menurun secara konsisten apabila saiz diameter tiang menurun. Panjang kerokan L1 meningkat secara konsisten apabila diameter saiz meningkat. Namun begitu nilai panjang mendatar L2 dan L3 meningkat secara eksponensial apabila saiz diameter tiang meningkat dari 3.5 ke 5 cm. Profil yang sama juga diberikan oleh panjang membujur L4/L5. Ini dipercayai disebabkan oleh saiz tiang yang lebih kecil dan secara relatifnya tidak memberikan perubahan besar kepada kelakuan aliran gelora.

Kelakuan kerokan bagi sedimen S2 adalah hampir serupa dengan sedimen S1 di mana panjang kerokan meningkat apabila saiz jeti meningkat. Namun begitu, nilai panjang kerokan bagi S2 secara relatifnya adalah lebih rendah dari S1. Panjang mendatar dan membujur L4/L5 tidak meningkat secara eksponensial malah meningkat secara monotonik.

Peranan ketidakseragaman sedimen adalah signifikan di mana nilai panjang kerokan menurun sehingga 1/3 apabila nilai σ_g meningkat ke 2.25. Taburan saiz yang besar tidak menggalakkan pergerakan sedimen, di mana sedimen yang lebih halus dilindungi oleh sedimen bersaiz besar. Kesan pemerisaaian meninggikan nilai kritikal parameter Shields dan dipercayai halaju aliran yang telah ditetapkan adalah jauh lebih rendah daripada nilai kritikal pergerakan ambang bagi sedimen S2 tersebut.



RAJAH 7. Perbandingan panjang kerokan bagi (a) membujur L1, (b) mendatar L2/L3 dan (c) membujur L4/L5 bagi sedimen S1 (o) dan S2 (□). Analisis regresi bagi setiap data ditunjukkan dengan garis terputus

KESIMPULAN

Kelakuan kerokan setempat dua jenis sedimen tidak seragam dengan nilai parameter gradasi $\sigma_g = 1.53$ dan 2.25 bagi tiang bersilinder berdiameter 6, 5, 3.5 dan 2.5 cm telah dikaji. Kedalaman kerokan maksima dan panjang kerokan lingkungan setempat secara dasarnya meningkat apabila saiz tiang meningkat. Namun begitu, panjang membujur di hilir tiang meningkat secara eksponensial apabila saiz diameter tiang meningkat. Kedalaman kerokan bagi sedimen tidak seragam $\sigma_g = 1.53$ adalah lebih tinggi berbanding dengan $\sigma_g = 2.25$, di mana perbezaan lebih ketara apabila saiz tiang semakin mengecil. Kesan pemerisahan jelas meninggikan nilai kritikal Shields dan menghalang dari sedimen bergerak mengikut aliran seterusnya meminimumkan proses kerokan. Saiz tiang yang kecil tidak memberikan kesan signifikan kepada perubahan ciri-ciri gelora di sekitar tiang. Aliran air masih boleh dikatakan bergerak secara seragam dan dipercayai kesan vorteks ladam kuda dan aliran bawah adalah minimal.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi penghargaan kepada bantuan yang diberikan oleh juruteknik En. Zuraimi dan pelajar doktor falsafah Mojtaba Porhemmat di dalam penyediaan kerja-kerja makmal. Kajian ini dijalankan di bawah biaya geran universiti penyelidikan GGPM-2012-019 dan Kementerian Pelajaran Malaysia di bawah geran ERGS/1/2013/TK03/UKM/02/7.

RUJUKAN

- Akib, S., Mohammadhassani, M., & Jahangirzadeh, A. 2014. Application of ANFIS and LR in prediction of scour depth in bridges. *Computers & Fluids* 91: 77-86.
- Akib, S., Fayyadh, M. M., & Othman, I. 2011. Structural behaviour of a skewed integral bridge affected by different parameters. *J. Road Bridge Eng.* 6(2): 107-114.
- Akib, S., Jahangirzadeh, A., & Bassar, H. 2014. Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(2): 108-116.
- Brownlie, W. 1982. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Reports of the California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, Report No. NSF/CEE-82090., 73-154.
- Chiew, Y. M. 1984. Local scour at bridge piers. PhD thesis. Auckland University, New Zealand.
- Ettema, R., Constantinescu, G., and Melville, B. 2011. Evaluation of Bridge Scour Research: Pier Scour Processes and Predictions, Project 24-27(01), National Cooperative Highway Research Program Web-Only Document 175. Transportation Research Board of the National Academies.
- Melville, B.W. 1975. Local scour at bridge sites. Report No. 117, School of Engineering. University Of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Melville, B. W. 2008. The Physics of Local Scour at Bridge Piers. Fourth International Conference on Scour and Erosion. ISCE-4. 5-7th November, 2008. Tokyo, Japan.
- Oliveto, G., and Hager, W.H. 2002. Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *J. Hydr. Eng.* 128(9): 811-820.
- Raikar, R.V., Dey, S. 2005. Clear-water scour at bridge piers in fine and medium gravel beds. *Canadian Journal of Civil Engineering* 32(4): 775-781.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 109 (3): 338-350 [doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338)]
- Yanmaz, A.M. 2002. Köprü Hidroliği. METU Press, Ankara.
- Yanmaz, A. M. 2006. "Temporal variation of clear water scour at cylindrical bridge piers." *Can. J. Civ. Eng.* 33: 1098-1102.
- Van Rijn, L.C., 1993, 2012. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Wan Hanna Melini Wan Mohtar*, Muhammad Aminurlah Amin dan Muhammad Rafi Abdul Shukor
- Jabatan Kejuruteraan Awam & Struktur,
Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Malaysia
- *Penulis koresponden; email: hanna@ukm.edu.my
- Tarikh serahan: 6 Januari 2016
Tarikh terima: 25 Februari 2016