

# Teknik Sensor Cahaya Untuk Menentukan Laju Erosi Tebing Sungai

Tommy Ekamitra Sutarto✉

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda

✉tommysutarto@polnes.ac.id

**Abstrak:** Erosi tebing sungai terjadi dalam dua model utama, yakni erosi gerusan dan longsor tebing. Erosi gerusan ditandai dengan tergerusnya butiran atau bongkahan tanah dari permukaan tebing akibat daya gerus air sungai. Meskipun erosi gerusan memiliki peran yang penting sebagai pemicu longsor tebing, pengetahuan tentang erosi gerusan masih tertinggal di belakang dan belum ada metode terpercaya untuk mengukur kedalaman atau panjang erosi gerusan. Hal ini disebabkan karena erosi gerusan berlangsung di bawah muka air dan magnitudo erosi sangat kecil dalam skala millimeter hingga centimeter saja. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan teknik pengukuran erosi gerusan dengan menanam sensor cahaya (*Photo Electronic Erosion Pin*) ke dalam tebing sungai. Panjang erosi gerusan berbanding lurus dengan panjang sensor yang tersingkap dan terkena cahaya matahari. Empat buah sensor ditanam dalam suatu tebing sungai, masing-masing di puncak, tengah atas, tengah bawah, dan dasar tebing. Keempat sensor berhasil merekam secara kontinu erosi gerusan yang terjadi bersamaan dengan 6 kejadian banjir. Total panjang erosi yang terukur adalah 18,7 cm, 18,5 cm, 22,6 cm, and 6,7 cm berturut-turut di puncak, tengah atas, tengah bawah, dan dasar tebing sungai.

**Kata kunci:** erosi butiran, erosi bongkahan, sensor PEEP, photo-resistant, photo-voltaic, exposure length.

**Abstract:** Bank erosion manifests in two main modes, namely fluvial erosion and mass failure. Fluvial erosion is a quasi-continuous entrainment of individual soil grains or grain flocs or chunks from the bank face due to the hydrodynamic shear flow action. Despite its importance as a trigger to mass failure, so far, fluvial erosion is very difficult to measure and there is no reliably technique to do so as it occurs under water with retreat lengths in millimeter or centimeter scale. The overarching goal of this study was to develop a methodology for quantifying in-situ mass (chunk) fluvial erosion using a novel approach that could adequately capture retreat length and timing information in response to changes in water stage. Four Photo Electronic Erosion Pin (PEEP) sensors, which their operational principle is based on sunlight exposure and intensity, were employed on a stream bank face to provide localized quasi-continuous recordings of mass fluvial erosion. Total bank retreats associated with 6 flood events were 18.7, 18.5, 22.6, and 6.7 cm at the crest, upper midbank, lower midbank, and toe of the bank, respectively.

**Keywords:** grain fluvial erosion, mass fluvial erosion, PEEP sensor, photo-resistant, photo-voltaic, exposure length.

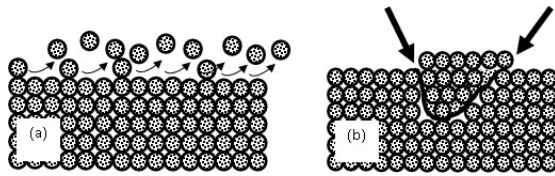
## I. PENDAHULUAN

Erosi tebing sungai tidak jarang mengancam infrastruktur di sekitarnya, seperti abutment dan pilar jembatan, turap, pondasi jalur pipa PDAM, jalan raya dan bahkan kehilangan rumah dan lahan pertanian. Selain itu, erosi tebing sungai tidak jarang memberikan kontribusi sedimen dalam jumlah yang signifikan ke dalam sungai dan waduk, mengakibatkan turunnya kualitas air baku, mengganggu kualitas hidup ekosistem air dan mempercepat pendangkalan waduk [1], [2]. Sedimen yang dihasilkan dari gerusan tebing sungai dapat mengubah topografi dasar sungai dan mengurangi kadar oksigen terlarut di dalam air sehingga mengancam keragaman spesies dalam sungai.

Erosi tebing sungai disebabkan oleh interaksi antara tiga jenis proses erosi [3], yakni longsor tebing (*mass failure*), gerusan butiran (*grain fluvial erosion*), dan gerusan bongkahan (*mass fluvial erosion*). Longsor tebing adalah jenis erosi yang paling mudah diamati karenanya pengetahuan dan metode perhitungannya sudah lebih matang dibanding kedua jenis erosi yang lain. Sebaliknya, erosi butiran dan erosi bongkahan tidak mudah diamati. Kedua jenis erosi ini terjadi di bawah muka air (umumnya

di tumit tebing sungai) secara *quasi-continuous* dalam bentuk tergerusnya butiran tanah (dalam ukuran millimeter, Gambar 1a) atau bongkahan tanah (dalam ukuran centimeter, Gambar 1b) dari permukaan tebing sungai akibat tegangan gesek hidrodinamis,  $\tau_w$ , aliran sungai [3], [4]. Erosi butiran berubah menjadi erosi bongkahan sejalan dengan meningkatnya gaya gesek hidrodinamis aliran [5], [6]. Erosi butiran dan erosi bongkahan umumnya terjadi di tumit tebing sungai mengakibatkan terbentuknya lubang di sekitar tumit tebing dan kemudian memicu longsor tebing.

Di samping sebagai pemicu longsor, erosi gerusan ternyata memberi kontribusi sedimen yang signifikan dalam sungai [3], [7] karena sifatnya yang *quasi-continuous* selama tegangan gesek hidrodinamik,  $\tau_w$ , (di permukaan tanah tebing sungai) lebih besar dari kuat gesek kritis (*critical shear strength*) tanah,  $\tau_c$ . Angka  $\tau_c$  mewakili kekuatan tanah menahan gaya gerus air [4], [8] dan angka ini menentukan waktu (*timing*) terjadinya erosi gerusan. Nilai ini sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara variabel fisik, biologis, dan kimiawi tanah [6].



**Gambar 1.** (a) Gerusan Butiran (*grain fluvial erosion*). (b) Gerusan Bongkahan (*mass fluvial erosion*).

Namun erosi gerusan (baik gerusan butiran maupun bongkahan) belum begitu dipahami dan metode pengukurannya belum berkembang [9], [10] sehingga penelitian di bidang ini masih perlu terus dilakukan. Metode konvensional yang ada, seperti survei luas penampang sungai, *terrestrial photogrammetry* dan pengukuran panjang erosi dengan *erosion pin* (yang sifatnya manual dan *discrete in time*), tidak dapat merekam sifat *quasi-continuous* erosi butiran dan erosi bongkahan. Metode tersebut di atas juga tidak dapat menentukan *timing*, durasi dan besarnya kontribusi sedimen dari masing-masing jenis erosi dalam suatu siklus hidrograf sungai [11], [12]. Sangat jelas, bahwa erosi gerusan dapat diukur dengan akurat bila menggunakan suatu teknik yang memiliki keunggulan yakni mampu mendeteksi seluruh episode (*full episodicity*) perubahan bentuk tebing akibat gerusan, termasuk waktu mulainya erosi (*event timing*) serta mampu merekam secara otomatis (*automated observations*) waktu dan panjang gerusan (*retreat length*) yang diakibatkan oleh setiap kejadian erosi (*specific erosion events*). Informasi ini berguna untuk mengetahui hubungan antara panjang gerusan dan gaya gesek hidrodinamik yang menyebabkannya [13].

Tujuan dari studi ini adalah mengembangkan suatu metodologi untuk menghitung erosi gerusan khususnya gerusan bongkahan langsung di lapangan (*in-situ*) dengan menggunakan alat sensor cahaya *Photo Electronic Erosion Pin* (PEEP) (lihat Gambar 2). Alat yang sering digunakan untuk penelitian morfodinamika pantai kali ini diterapkan di tebing sungai untuk memberikan informasi yang sifatnya *automated*, *localized*, *quasi-continuous* tentang *timing*, durasi, dan panjang erosi bongkahan yang dipengaruhi oleh perubahan tinggi muka air dan debit di dalam sungai.

## II. METODE PENELITIAN

Terdapat dua tipe sensor PEEP, yakni *photo-resistant* dan *photo-voltaic*. Sensor *photo-resistant* terdiri dari rangkaian seri *photo-diode* atau *photo-resistant cells* (Gambar 2) yang dibungkus dalam *acrylic tube* yang transparan dan kedap air [13].



**Gambar 2.** *Photo Electronic Erosion Pin* (PEEP).

Sedangkan sensor *photo-voltaic* terdiri dari barisan *photo-voltaic cell* yang mampu menghasilkan tegangan listrik jika terkena cahaya. Tidak seperti sensor *photo-resistant* yang memerlukan sumber energi (seperti panel surya), sensor *photo-voltaic* dapat membangkitkan listrik sendiri dengan mengubah radiasi surya menjadi arus listrik. Meskipun demikian, kedua tipe sensor ini bekerja dengan prinsip yang sama, yakni membangkitkan output tegangan (*voltage output*) berbanding lurus dengan panjang sensor yang terpapar cahaya matahari [13]. Pada awalnya, sensor ditanam ke dalam tebing sungai. Sejalan dengan tergerusnya tebing, semakin banyak dioda atau *photo-cells* yang tersingkap cahaya matahari dan semakin besar pula output tegangan yang dihasilkan oleh sensor. Informasi ini kemudian disandingkan dengan informasi tegangan gesek hidrodinamik yang menyebabkan gerusan pada saat itu. Dengan demikian, akan diketahui hubungan antara besarnya erosi dan tegangan gesek hidrodinamik yang menyebabkan erosi di dinding sungai, dan juga akan diperoleh informasi tegangan gesek kritis  $\tau_c$  yang menentukan waktu mulainya erosi.

Dalam studi ini, *photo-resistant PEEPs* (Gambar 2) digunakan di Clear Creek, Iowa, Amerika Serikat yang tebing sungainya dominan tanah loess kohesif. Sensor PEEP ditanamkan ke dalam tebing sungai di bagian puncak (*crest*), tengah atas (*upper-midbank*), tengah bawah (*lower midbank*) dan tumit (*toe*) untuk mengukur secara simultan dan kontinu episode erosi bongkahan yang mungkin terjadi di puncak hingga tumit tebing. Sifat tanah tebing, termasuk kepadatannya, berbeda dari puncak ke arah tumit. Dengan memasang sensor di lokasi yang berbeda akan diperoleh informasi tambahan yang juga bersifat penting, yakni pengaruh heterogenitas tanah tebing terhadap kekuatannya menahan erosi bongkahan. Pentingnya mengikutsertakan aspek heterogenitas tanah dalam pemodelan evolusi tebing sungai telah ditunjukkan dalam studi terdahulu [10], [14].

Data *time series* output tegangan dari sensor yang terekam dalam *data logger* diolah melalui suatu *data processing routine* (terdiri dari *filtering*, *correcting*, dan *smoothing*) [5], [15] yang dikembangkan untuk menyingkirkan *data noise* akibat pengaruh perubahan orientasi cahaya matahari dan turunnya intensitas cahaya akibat turbiditas air sungai, serta faktor lainnya [13]. Data output tegangan yang sudah dibersihkan kemudian dikonversi menjadi data panjang singkapan sensor (*exposure length*),  $L$ , yang tidak lain adalah panjang erosi tebing sungai. Dengan teknik statistik *moving-averaged*, serial data  $L$  dibuat lebih halus sehingga akhirnya dapat memperlihatkan dengan jelas *timing*, magnitudo dan frekuensi kejadian erosi.

### A. Komponen PEEP

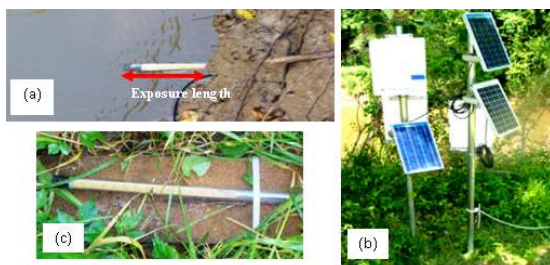
Setiap instalasi pengukuran erosi terdiri dari satu atau beberapa sensor PEEP, data logger, panel surya, dan satu sensor acuan (*reference PEEP*). Studi ini menggunakan *photo-resistant PEEPs* (Gambar 2). Sensor ini terdiri dari satu barisan 13 dioda *photo-resistant* berjarak 1,65 cm

antara satu dengan lainnya di atas *motherboard* di dalam *acrylic tube* yang transparan dan tahan air. Panjang efektif sensor adalah 21,45 cm sama dengan panjang total barisan dioda yang terletak di bagian depan *acrylic tube*.

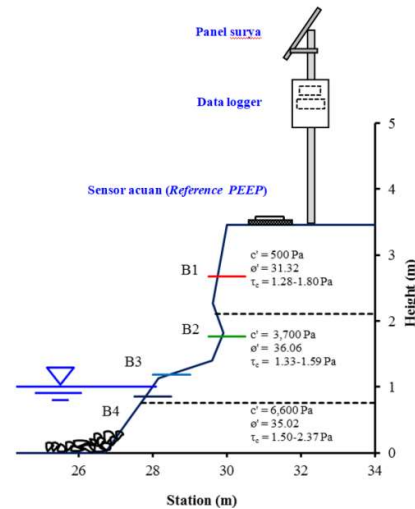
Saat tebing sungai tergerus erosi, sensor PEEP dan barisan dioda di dalamnya perlahan-lahan tersingkap dan terkena cahaya matahari (Gambar 3a). Semakin panjang singkapan sensor, semakin bertambah jumlah dioda yang terpapar cahaya dan semakin besar output tegangan sensor,  $V_{CS}$ , yang dikirim melalui kabel ke *data logger*. Dalam studi ini, data logger serta panel surya ditaruh pada tiang yang ditanamkan di atas tebing di belakang sensor (Gambar 3b).

Sensor dioperasikan antara tanggal 4 Juni dan 1 Desember 2009. Tiga panel surya digunakan untuk menjamin tersedianya suplai arus listrik (Gambar 3b) untuk keempat sensor yang sedang dioperasikan. Pada malam hari tidak ada *output* tegangan dari sensor karena kerja dioda tergantung pada cahaya. Satu unit sensor acuan diletakkan di atas blok beton yang ditaruh di bantaran sungai di atas tebing yang sedang dimonitor (Gambar 3c). Sensor ini akan memberi informasi *output* tegangan acuan yang tidak terganggu,  $V_{RP}$ , yang mewakili *output* maksimum jika sensor tersingkap seluruhnya (*fully exposed*) [16]. Data  $V_{RP}$  diperlukan untuk dua hal. Pertama, untuk mendeteksi kapan sensor tersingkap seluruhnya ( $V_{CS} \approx V_{RP}$ ) sehingga perlu di *reset*. Informasi waktu reset (*reset time*) sensor sangat penting saat mengolah data. Kedua, nilai  $V_{RP}$  digunakan sebagai nilai acuan untuk mengoreksi *output* tegangan  $V_{CS}$  sensor tebing yang terganggu oleh fluktuasi intensitas cahaya matahari misalnya karena cuaca dan pergerakan awan. Melalui suatu proses kalibrasi, akan ditemukan persamaan yang menghubungkan rasio  $\frac{V_{CS}}{V_{RP}}$  dan panjang singkapan sensor,  $L$ . Persamaan kalibrasi ini kemudian digunakan untuk mengkonversi data *output* tegangan,  $V_{CS}$ , menjadi data panjang singkapan sensor,  $L$ .

Pada akhirnya, semua data *output* dari sensor acuan dan keempat sensor yang ditanam dalam tebing disimpan dalam suatu data logger. Dalam studi ini, data logger di-*set* untuk mencatat data per 15 detik dan menyimpan nilai rerata per 15 menit mengikuti metode yang dipakai dalam studi terdahulu tentang erosi tebing sungai [16], [17], [18].



**Gambar 3.** (a). Panjang singkapan (*exposure length*) PEEP setelah kejadian banjir. (b) Data logger dan panel surya diikat di tiang yang ditanamkan di atas tebing di belakang sensor. (c) Sensor acuan (*reference PEEP*).



**Gambar 4.** Instalasi sensor di tebing sungai.

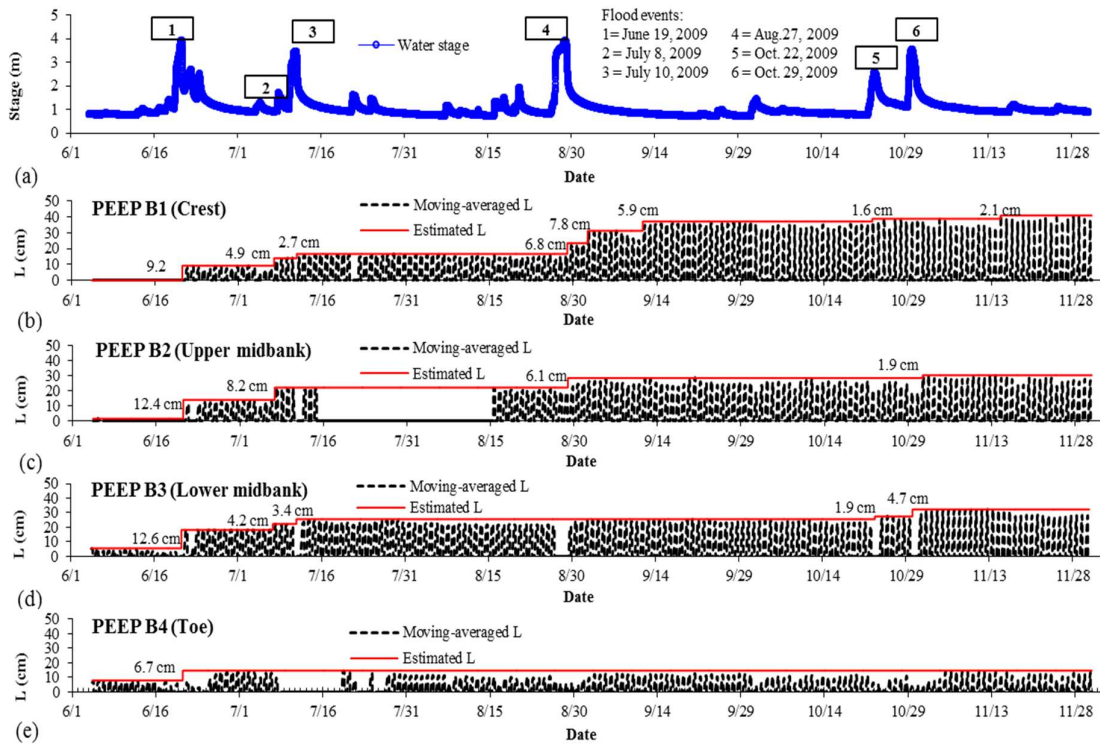
### B. Pemasangan PEEP

Sensor pada awalnya dimasukkan hingga terbenam ke dalam tebing sungai secara horizontal melalui lubang (70 cm x 1.6 cm) yang terlebih dahulu disediakan dengan mengebor tanah tebing sungai. Empat buah sensor dibenamkan ke dalam tebing sungai, yakni sensor B1, B2, B3, dan B4 berturut-turut di bagian puncak, tengah atas, tengah bawah, dan tumit tebing (Gambar 4). Satu buah sensor yang berfungsi sebagai sensor acuan diletakkan di bantaran sungai dekat dari sensor. Sensor tersebut dioperasikan antara tanggal 4 Juni hingga 1 Desember 2009.

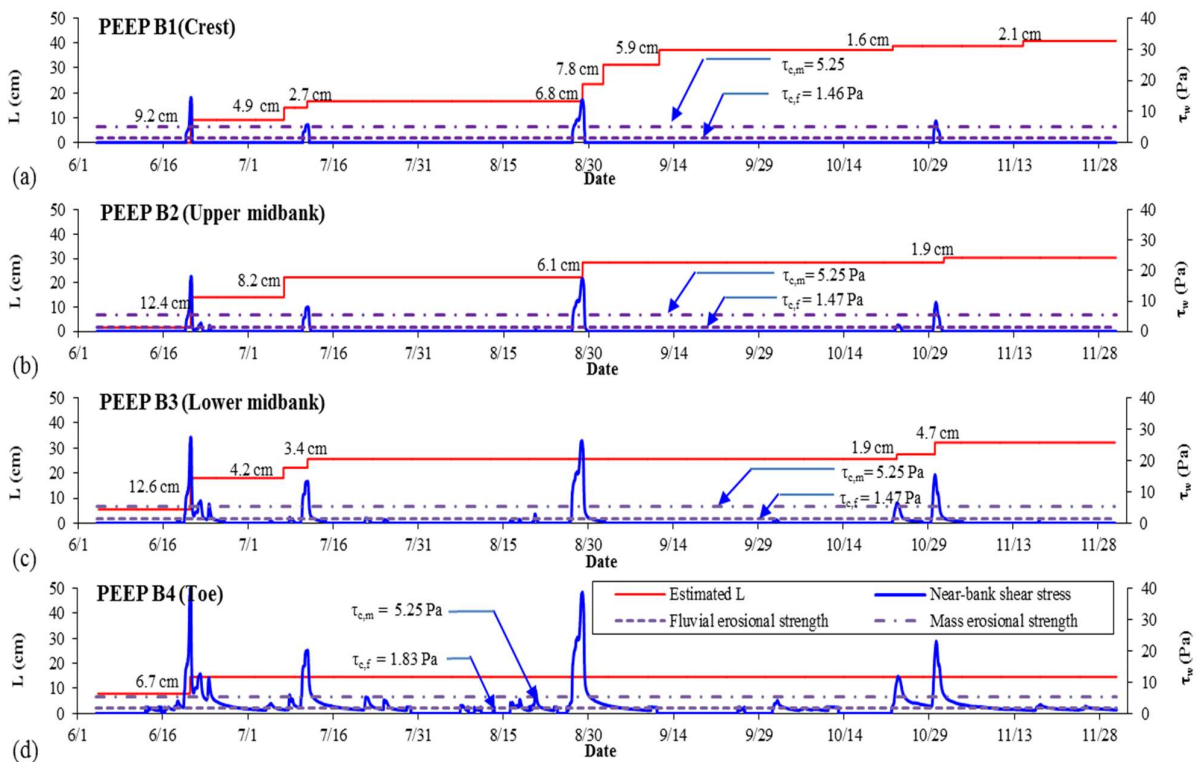
## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 5 menampilkan plot serial data elevasi muka air (*water stage*, Gambar 5a) dan hubungannya dengan panjang singkapan  $L$  sensor B1 (Gambar 5b), B2 (Gambar 5c), B3 (Gambar 5d), dan B4 (Gambar 5e). *Moving averaged L* adalah panjang singkapan sensor yang telah diolah dengan teknik statistik *moving averaged*. Sedangkan *Estimated L* adalah perkiraan panjang singkapan sensor setelah menghilangkan pengaruh siklus harian perubahan intensitas cahaya akibat perubahan orientasi cahaya matahari dari pagi hingga sore.

Kegiatan monitoring ini berhasil merekam setidaknya enam kejadian banjir selama pengoperasian sensor (Gambar 5a). Demikian pula, terekam frekuensi dan panjang erosi antara tanggal 4 Juni dan 1 Desember 2009 (garis merah pada Gambar 5b, 5c, 5d, dan 5e). Erosi terjadi sebanyak 8, 4, 5, dan 1 kali berturut-turut di bagian puncak, tengah atas, tengah bawah, dan tumit tebing selama masa pemantauan. Plot serial data yang menampilkan bentuk seperti tangga pada Gambar 5b menunjukkan bahwa erosi, dalam hal ini erosi bongkahan, lebih sering terjadi di bagian puncak tebing. Jika diperhatikan dari puncak menuju ke tumit tebing, frekuensi erosi cenderung menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tanah tebing sungai semakin besar jika ditinjau ke arah bawah tebing.



**Gambar 5.** (a) Serial data elevasi muka air (*water stage*) dalam sungai. (b) Panjang singkapan  $L$  (*exposure length*) sensor PEEP B1. (c) PEEP B2. (d) PEEP B3. (e) PEEP B4



**Gambar 6.** Data panjang singkapan sensor dan data tegangan gesek hidrodinamik di permukaan tanah tebing di sekitar sensor: (a) PEEP B1. (b) PEEP B2. (c) PEEP B3. (d) PEEP B4.

Kecenderungan ini mendukung fakta bahwa tanah yang menyusun bagian puncak tebing kepadatannya lebih rendah dan mengandung deposit pasir [19], karena itu lebih mudah tergerus erosi dibanding bagian tengah dan tumit tebing.

Serial data  $L$  diplot bersama tegangan gesek hidrolik,  $\tau_w$ , yang dihitung dengan bantuan *software* CONCEPT untuk masing-masing lokasi dimana sensor dipasang (Gambar 6a, 6b, 6c, dan 6d). Plot ini tidak hanya memberikan informasi penting tentang frekuensi dan panjang erosi yang terjadi di masing-masing lokasi, namun yang lebih penting lagi besarnya tegangan gesek hidrodinamis,  $\tau_w$ , yang korespon dengan masing-masing kejadian erosi (*erosion event*).

Berdasarkan Gambar 6, erosi bongkahan cenderung meningkat pasca-puncak banjir atau pada bagian menurun dari kurva hidrograf banjir. Dengan demikian, diyakini dalam studi ini, magnitudo erosi adalah dampak kumulatif besarnya gaya gesek hidrodinamis,  $\tau_w$ , dan terganggunya stabilitas tanah akibat menurunnya muka air dengan cepat (*rapid drawdown*) pasca puncak banjir. Hasil pengamatan yang sama dilaporkan oleh [20] di sungai di Inggris dan [7] di Sungai Sieve, Italia.

Plot  $L$  dan gaya gesek hidrodinamis (*shear stress*),  $\tau_w$ , (Gambar 6) memperlihatkan dengan jelas adanya proses erosi yang tidak disebabkan oleh gaya gesek hidrodinamis aliran sungai atau disebut juga erosi non-hidrolis. Sebagai contoh, pada Gambar 6a, kejadian erosi yang ke-2, 5, 6, 7, dan 8, yang terekam oleh sensor PEEP B1, terjadi pada kondisi normal dimana  $\tau_w$  tidak meningkat bahkan posisi muka air tidak mencapai lokasi PEEP BEE1 pada saat erosi tersebut terekam.

Selain itu, dalam beberapa kejadian, sensor tidak mendeteksi erosi meskipun gaya gesek hidrodinamik,  $\tau_w$ , cukup besar untuk menyebabkan erosi bongkahan. Salah satu contoh, selama banjir tanggal 24 Juli 2009, sensor B3 dan B4 tidak mendeteksi erosi meskipun gesek hidrodinamik,  $\tau_w$ , lebih dari 25 Pa (Gambar 6c dan 6d). Mayoritas fenomena ini (8 dari 12) terjadi di bagian tengah bawah dan tumit tebing. Hal ini kemungkinan disebabkan karena sensor B3 dan B4 terlindungi oleh ranting kayu, rumput atau material tanah yang longsor dari bagian atas tebing. Keruhnya air sungai di bagian bawah dapat juga menjadi penyebab kesalahan pembacaan sensor.

Tabel 1 menampilkan rekapitulasi panjang erosi bongkahan dan erosi non-hidrolis. Berdasarkan Tabel 1, erosi gerusan bongkahan lebih besar dari erosi non-hidrolis (misalnya longsor tebing) terutama di bagian bawah tebing yang tidak mudah terlihat.

**Tabel 1.** Rekapitulasi panjang erosi (cm) tebing sungai.

| Lokasi di tebing sungai | Gerusan bongkahan | Erosi non-hidrolis | Total |
|-------------------------|-------------------|--------------------|-------|
| Top                     | 18,7              | 22,3               | 41,0  |
| Tengah atas             | 18,5              | 10,1               | 28,6  |
| Tengah bawah            | 22,6              | 4,2                | 26,8  |
| Tumit                   | 6,7               | 0,0                | 6,7   |

Hasil studi ini menantang pendapat umum yang menyatakan bahwa erosi gerusan, baik gerusan butir maupun gerusan bongkahan kontribusinya kecil terhadap pergerakan mundur tebing sungai dan total sedimen yang mengalir dalam sungai.

#### IV. KESIMPULAN

Studi ini berhasil mengembangkan suatu metode untuk menghitung erosi gerusan khususnya gerusan bongkahan langsung di lapangan (*in-situ*) dengan menggunakan alat sensor cahaya *Photo Electronic Erosion Pin* (PEEP). Alat yang lebih sering dipakai untuk penelitian morfodinamika pantai kini diterapkan di tebing sungai untuk memberikan informasi yang sifatnya *automated, localized, quasi-continuous* tentang *timing*, durasi, dan panjang erosi bongkahan yang dipengaruhi oleh perubahan tinggi muka air dan debit di dalam sungai.

Dalam studi ini, teknik sensor cahaya yang diterapkan di Clear Creek, Iowa, Amerika Serikat dari tanggal 4 Juni hingga 1 Desember 2009 berhasil mendeteksi frekuensi dan panjang erosi bongkahan dan erosi non-hidrolis (misalnya longsor) yang terjadi di tebing sungai. Panjang erosi bongkahan tersebut adalah 18,7 cm, 18,5 cm, 22,6 cm, dan 6,7 cm berturut-turut di bagian puncak, tengah atas, tengah bawah, dan tumit tebing sungai. Sedangkan panjang erosi non-hidrolis adalah 22,3 cm, 10,1 cm, 4,2 cm, dan 0 cm berturut-turut di bagian puncak, tengah atas, tengah bawah, dan tumit tebing sungai.

Erosi gerusan dalam hal ini erosi bongkahan cenderung lebih sering terjadi di bagian puncak tebing yang kepadatan tanahnya umumnya lebih rendah dibanding bagian bawah tebing. Dengan demikian, sangat perlu memperhitungkan heterogenitas tanah tebing sungai pada saat melakukan analisis stabilitas tebing sungai.

Di samping itu, hasil studi ini menunjukkan panjang erosi bongkahan lebih besar dari erosi non-hidrolis (misalnya longsor tebing) terutama di bagian bawah tebing yang lebih sering terpapar gaya gesek aliran sungai. Hal ini menantang pendapat umum yang menyatakan bahwa erosi gerusan, baik erosi butir maupun erosi bongkahan kontribusinya tidak kecil terhadap pergerakan mundur tebing sungai (*bank retreat*) dan total sedimen yang mengalir dalam sungai..

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada kelompok riset yang dipimpin oleh Prof. A.N. Papanicolaou di IIHR-Hydroscience and Engineering University of Iowa yang menyediakan fasilitas PEEPs dan akses pada beberapa literatur. Penulis berkesempatan bergabung dengan kelompok riset tersebut melalui Fulbright Indonesia Presidential Scholarship Program.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. D. Willett, *et al.*, "Streambank erosion in two watersheds of the central claypan region of Missouri, United States," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 67, no. 4, pp. 249-263, 2012.
- [2] G.A. Fox, *et al.*, "Reservoir sedimentation and upstream sediment sources: Perspectives and future

- research needs on streambank and gully erosion,” *Environmental Management*, vol. 57, no. 5, pp. 945-955, 2016.
- [3] M. Rinaldi and S.E. Darby, “Modeling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: Progress towards fully coupled simulations,” in *Gravel-bed rivers VI: From process understanding to river restoration*, H. Habersack, H. Piegay and M. Rinaldi, Ed. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2008, pp. 213-239.
- [4] A. I. Akinola, *et al.*, “Influence of sample holding time on the fluvial erosion of remolded cohesive soils,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 144, no. 8, 2018.
- [5] A.N. Papanicolaou, *et al.*, “Understanding mass fluvial erosion along a bank profile: Using PEEP technology for quantifying retreat lengths and identifying the event timing,” *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 42, no. 11, pp. 1717-1732, 2017.
- [6] R.C. Grabowski, I. G. Droppo and G. Wharton, “Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties,” *Earth Science Reviews*, vol. 105, no. 3, pp. 101-120, 2011.
- [7] S.E. Darby, M. Rinaldi and S. Dapporto, “Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks,” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 112, 2007.
- [8] T.E. Sutarto, “A combined flume-imaging technique for measuring fluvial erosion of cohesive streambank soil,” *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 368-375, 2015.
- [9] A.N. Papanicolaou, *et al.*, “Bank Stability Analysis for Fluvial Erosion and Mass Failure,” in *Proc. of World Environmental and Water Resources Congress, Portland, Oregon, USA, 1-5 June 2014*, pp. 1497-1508, 2014.
- [10] T.E. Sutarto, *et al.*, “A stability analysis of semi-cohesive streambanks with concepts: Coupling field and laboratory investigations to quantify the onset of fluvial erosion and mass failure,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 140, no. 9, 2014.
- [11] J.P. Resop and W. C. Hession, “Terrestrial laser scanning for monitoring streambank retreat: comparison with traditional surveying techniques,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 136, no. 10, pp. 794-798, 2010.
- [12] S. Bird, D. Hogan, and J. Schwab, “Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, pp. 952-970, 2010.
- [13] D.J. Sherman, C. Houser, A.C.W. Baas, “Electronic measurement techniques for field experiments in process geomorphology,” in *Treatise on Geomorphology*, J. Shroder, *et al.*, Ed. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2013, vol. 14, pp. 195-221.
- [14] A. Khanal, *et al.*, “Comparison of linear and nonlinear models for cohesive sediment detachment: rill erosion, hole erosion test, and streambank erosion studies,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 142, no. 9, 2016.
- [15] T. E. Sutarto, “Bank erosion processes in streams in the U.S. Midwest. *PhD. Thesis*, Univ. of Iowa. Iowa City, USA, 2014.
- [16] J.P. McDermott and D. J. Sherman, “Using photo-electronic erosion pins for measuring bed elevation changes in the swash zone,” *Journal of Coastal Research*, vol. 25, no. 3, pp. 788-792, 2009.
- [17] D. M. Lawler, “Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system,” *Geomorphology*, vol. 93, pp. 17-39, 2008.
- [18] D.P. Horn and S.P.H. Lane, “Measurement of high-frequency bed level changes in the swash zone using Photo-Electronic Erosion Pins (PEEPs),” in *Proc. of the 30<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, San Diego, California*, 2006, pp. 2591-2603.
- [19] C. G. Wilson, A.N. Papanicolaou and K.D. Denn, “Quantifying and partitioning fine sediment loads in an intensively agricultural headwater system,” *Journal of Soils and Sediments*, 12(6), 966-981, 2012.
- [20] S.B. Mitchell, *et al.*, “Dynamics of erosion and deposition events on an intertidal mudbank at Burringham, River Trent, UK,” *Hydrological Processes*, vol. 13, no. 7, pp. 1155-1166, 1999.