

Identifikasi Morfologi Sungai Masa Lampau dan Kaitannya dengan Banjir Masa Lampau Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) di Daerah Aliran Sungai Citarum, Bandung, Jawa Barat

Praditya Ardi Putranto¹, Iskandarsyah²

¹Jurusan Geofisika, Universitas Indonesia, Depok 16424
E-mail : praditya.ardi@ui.ac.id

²Jurusan Geofisika, Universitas Indonesia, Depok 16424
E-mail : iskandarsyah@sci.ui.ac.id

ABSTRAK

Banjir merupakan bencana alam berupa luapan air sungai yang menggenangi wilayah sekitarnya. Peristiwa banjir di masa lampau penting untuk diketahui untuk mengantisipasi dampak resiko banjir di masa yang akan datang. Salah satu jejak banjir masa lampau yaitu adanya bukti perpindahan *meandering* sungai secara tiba-tiba. Perpindahan *meandering* sungai secara tiba-tiba merupakan akibat dari erosi tikungan luar *meander* sungai secara spontan karena suplai air berlebih dari peristiwa banjir. Struktur *meandering* masa lampau di bawah permukaan dapat dideteksi menggunakan metode Ground Penetrating Radar (GPR). GPR merupakan metode geofisika menggunakan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke bawah permukaan tanah, kemudian mengukur perubahan karakteristik elektromagnetik (kontras dielektrik material). Dengan metode GPR didapati citra bawah permukaan berupa bentukan badan sungai pada kedalaman 7 meter hingga 22 meter yang mengindikasikan morfologi badan sungai masa lampau. Jejak banjir masa lampau terindikasi dari perpindahan *meandering* sungai secara masif dan tiba-tiba, seperti tercitra pada penampang GPR *Line-2g*. Perpindahan *meandering* sungai Citarum sebesar 24 meter dan perpindahan kedua sebesar 16 meter dari lokasi jejak badan sungai sebelumnya. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat dijadikan sebagai tolak ukur pada lokasi lain yang sering terjadi banjir terutama daerah tikungan aliran sungai untuk dibuatkan peraturan maupun sosialisasi mengenai dampak banjir pada lokasi terkait guna mitigasi bencana banjir.

Kata Kunci

banjir, masa lampau, meandering sungai, badan sungai masa lampau, erosi, GPR

1. PENDAHULUAN

Banjir adalah salah satu bencana alam yang terjadi akibat adanya air sungai yang mengalir melampaui daya tampung sungai, sehingga aliran air sungai tersebut melewati tebing sungai dan menggenangi daerah di sekitarnya [17]. Salah satu kawasan di Pulau Jawa yang sering terjadi banjir adalah di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum terutama di bagian hulu. Peristiwa banjir Sungai Citarum terjadi sejak masa lampau, yaitu pada tahun 1931, 1984, 1986, 2005, 2007, 2010 dan tahun 2012 [15]. Beberapa kawasan permukiman di Bandung Selatan berada di wilayah cekungan terendah, kondisi geografis tersebut yang menyebabkan kawasan Bandung Selatan memiliki dampak bahaya banjir yang paling tinggi [8].

Peristiwa banjir besar di masa lampau perlu diketahui untuk memperkirakan resiko dampak banjir di masa yang akan datang. Peristiwa banjir besar di masa lampau dapat dideteksi dengan mencari bukti endapan banjir ataupun deformasi sungai di masa lampau. Untuk menentukan jejak banjir di masa lampau dapat digunakan metode geofisika GPR. GPR merupakan teknik eksplorasi geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke bawah

permukaan tanah kemudian mengukur perubahan karakteristik elektromagnetik hasil pantulan gelombang tersebut dan memiliki resolusi yang tinggi pada formasi geologi yang relatif dangkal [13]. Data yang diperoleh berupa profil 2-D yang kemudian diinterpretasikan dari pola-pola refleksi profil tersebut untuk menentukan geologi bawah permukaan [12]. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan menentukan kondisi struktur bawah permukaan berupa morfologi Sungai Citarum masa lampau, mengetahui dampak banjir masa lampau terhadap struktur sungai dengan mendeteksi jejak banjir masa lampau di sekitar Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum, dan mengetahui seberapa jauh deformasi Sungai Citarum dari masa lampau hingga masa sekarang. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat dijadikan sebagai tolak ukur pada lokasi lain yang sering terjadi banjir terutama daerah tikungan aliran sungai untuk dibuatkan peraturan maupun sosialisasi mengenai dampak banjir pada lokasi terkait untuk mitigasi bencana banjir.

2. TINJAUAN TEORITIS

2.1 Geologi Regional

Secara fisiografi, Kota Bandung termasuk dalam Zona Bandung [20]. Menurut referensi [18], wilayah Bandung dikelilingi oleh pegunungan vulkanik di bagian utara. Pada bagian selatan dan timur wilayah ini merupakan daerah pedataran dan berbatasan dengan perbukitan karst di bagian barat. Wilayah yang menjadi target lokasi penelitian adalah di sekitar wilayah DAS Citarum di kawasan Cekungan Bandung. Bila musim penghujan tiba, fenomena banjir biasa terjadi di kawasan tersebut. Hal ini karena pendangkalan sungai akibat tingkat erosi yang tidak terkendali di kawasan hulu [18].

2.2 Sedimentasi

Referensi [16] menjelaskan bahwa sedimentasi adalah pengendapan materi padat dalam cairan. Sedimentasi diawali oleh proses erosi dan transportasi. Proses alami aliran arus sungai yang terjadi secara perlahan mengakibatkan terjadinya erosi pada bagian dinding sungai. Proses erosi dan pengendapan terjadi secara kontinyu, sehingga membentuk alur sungai seperti huruf "S" yang dikenal sebagai sungai bermeander [3]. Erosi yang terjadi pada bagian meander sungai terjadi di tikungan luar dari meander tersebut. Sedangkan di tikungan dalam, karena kurangnya energi untuk membawa seluruh aliran air bersama-sama dengan angkutan sedimen yang tersuspensi, maka sebagian akan mengendap di daerah tersebut [10]

2.3 Paleoflood

Referensi [4] menjelaskan bahwa *paleoflood* adalah banjir masa lampau atau purba yang terjadi dan tidak tercatat baik oleh pengukuran hidrologi, observasi dan/atau dokumentasi non-hidrologi, maupun rekaman sejarah banjir. Referensi [5] menjelaskan bahwa identifikasi *paleoflood* bertujuan untuk memperpanjang catatan banjir jangka panjang. Terdapat dua indikator yang dapat mengindikasikan adanya *paleoflood*, yaitu indikator sedimentologi dan botani. Sedimentasi pada peristiwa banjir ini disebabkan oleh perubahan tajam kondisi energi aliran antara aliran utama di saluran dan pinggiran. Pada daerah pinggiran ini dan selama terjadinya banjir dan genangan air, secara signifikan mengurangi kecepatan aliran air dan mendukung pengendapan tanah liat, lumpur, dan pasir. Selain itu juga, deposit batu besar adalah bukti yang ditinggalkan oleh banjir di lingkungan berenergi tinggi dan / atau aliran dengan lereng tinggi. Indikator *paleoflood* yang kedua adalah indikator botani, yaitu indikator berupa tumbuhan yang menunjukkan seberapa besar peristiwa banjir di masa lampau.

2.4 Ground Penetrating Radar (GPR)

2.4.1 Prinsip GPR

Berdasarkan referensi [1] dan [6], GPR merupakan metode geofisika yang dapat digunakan untuk mendeteksi fitur bawah permukaan dengan resolusi

yang tinggi pada kedalaman yang dangkal. Prinsip GPR yaitu menggunakan gelombang elektromagnetik berupa gelombang radio dengan frekuensi tinggi (10-1000 Mhz) yang dibangkitkan oleh antena *transmitter* yang kemudian ditransmisikan ke bawah permukaan lalu terefleksikan dan diterima kembali oleh *receiver* dalam orde nanosekon. Gelombang tersebut terpantulkan kembali ke permukaan karena adanya perbedaan sifat elektromagnetik seperti konstanta dielektrik dan konduktivitas terhadap lingkungan sekitar [19].

2.4.2 Perambatan Gelombang GPR

Kecepatan gelombang radar dipengaruhi oleh konstanta dielektrik medium yang dilalui oleh gelombang tersebut [11]. Kecepatan gelombang radar dijelaskan dengan persamaan berikut.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Di mana :

$$\epsilon_r = \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2)$$

Kemudian, untuk menentukan kedalaman dapat digunakan konversi waktu tempuh gelombang menggunakan v_{rms} , yaitu kecepatan yang mewakili semua kecepatan di setiap lapisan yang dilewati gelombang radar [14], dengan persamaan sebagai berikut.

$$v_{rms} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \right)^2 \quad (3)$$

Gelombang yang merambat di bawah permukaan akan terpantulkan pada batas permukaan karena adanya kontras konstanta dielektrik dengan koefisien refleksi [11]:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (4)$$

Hukum Snellius dalam penjalaran gelombang [7], kaitannya dengan konstanta dielektrik yaitu adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} n_2 \sin \theta_2 &= n_1 \sin \theta_1 \\ \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} &= \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \\ R &= \frac{(v_1 - v_2)}{(v_1 + v_2)} = \frac{(\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1})}{(\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1})} \end{aligned} \quad (5)$$

Frekuensi gelombang radar akan mempengaruhi resolusi hasil rekaman data. Dalam GPR terdapat resolusi vertikal dan horizontal, di mana resolusi vertikal dirumuskan sebagai [9]:

$$\Delta r = \frac{\lambda_c}{4} \quad (6)$$

Sedangkan resolusi lateral dirumuskan sebagai [2]:

$$\Delta L = \sqrt{\frac{\lambda_c d}{2}} \quad (7)$$

2.4.3 Parameter Pengukuran GPR

Desain survei dalam pengukuran GPR dimulai dengan menentukan target eksplorasi, kemudian menentukan alat dengan frekuensi yang sesuai dengan target kedalaman, estimasi *time window*, menentukan *sampling interval*, lintasan dan koordinat lokasi pengukuran. Frekuensi yang digunakan berpengaruh pada kedalaman yang mampu dicapai oleh gelombang elektromagnetik dan juga resolusi pengukuran. Semakin tinggi frekuensinya, semakin dangkal penetrasi sinyal, namun resolusi semakin tinggi [19]. Pemilihan frekuensi dapat dilakukan dengan panduan cepat menggunakan Tabel 2.3 dengan asumsi bahwa resolusi spasial yang dibutuhkan adalah sekitar 25% dari kedalaman target [2].

Tabel 1. Panduan Cepat Jendela Waktu
Sumber : [2]

Depth (m)	Center Frequency (MHz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

Jendela waktu yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan [2]:

$$W = 1.3 \frac{2 \times \text{Depth}}{\text{Velocity}} \quad (8)$$

Di mana digunakan kedalaman maksimum dan kecepatan minimum. Kedalaman maksimum besarnya dapat diperkirakan dengan frekuensi antena yang digunakan, sedangkan kecepatan minimum material berdasarkan litologi daerah survei [19].

Referensi [19] menjelaskan bahwa *sampling interval* bertujuan untuk menentukan panjang rekaman yang akan diambil dengan rentang waktu tertentu. Hubungan antara *sampling interval* dengan frekuensi tengah ditunjukkan oleh persamaan berikut [2]:

$$t = \frac{1000}{6fc} \quad (9)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan studi literatur yang dilakukan dengan mencari sumber-sumber terkait penelitian. Kemudian membuat desain survei untuk menentukan lokasi atau lintasan pengukuran agar mendapatkan data yang interpretatif. Kemudian melakukan pengambilan

data di lapangan menggunakan Python 3 GPR Radar System, yang memiliki interval frekuensi 25 Mhz -100 Mhz dengan target kedalaman objek diperkirakan hingga 20 meter sehingga digunakan frekuensi tengah sebesar 25 Mhz - 50 Mhz. Lintasan pengukuran dibentangkan tegak lurus terhadap terduga struktur badan sungai berupa meandering masa lampau. Akuisisi data GPR menghasilkan penampang gambaran bawah permukaan yang kemudian akan diproses sehingga dapat menghasilkan penampang yang mendekati bentuk fitur geologi sesungguhnya di bawah permukaan. Pengolahan data GPR pada penelitian ini menggunakan software Prism2 hingga mendapatkan hasil berupa penampang 2D yang dapat diinterpretasi.

Prosesing Data GPR pada penelitian ini meliputi proses horizontal filters, gain function, dan stacking. Horizontal filter merupakan tahap prosesing data GPR yang berfungsi untuk menghapus noise berupa garis horizontal pada penampang GPR. Setelah dilakukan horizontal filter, dilakukan proses gain function yang berfungsi untuk memperkuat sinyal yang diterima dan ditampilkan pada profil radar. Penguatan ini perlu dilakukan karena semakin dalam penetrasi gelombang semakin lemah sinyal yang merambat. Setelah itu dilakukan proses stacking yang berfungsi untuk memperkuat Signal to Noise Ratio dengan menjumlahkan trace dalam satu gather data. Proses ini memperkuat sinyal refleksi dan mengurangi noise berupa bercak pada profil GPR.

Setelah melakukan prosesing data GPR, diterapkan juga teknik penginderaan jauh yang dilakukan dengan menggunakan software Google Earth yang dikombinasikan dengan penampang GPR hasil prosesing. Google Earth berperan dalam penentuan elevasi sungai guna memperkirakan arah aliran untuk memperkirakan deformasi meandering channel di masa lampau, sehingga dapat diketahui deformasi DAS Citarum dari masa lampau hingga masa sekarang beserta kemungkinan faktor yang mempengaruhi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

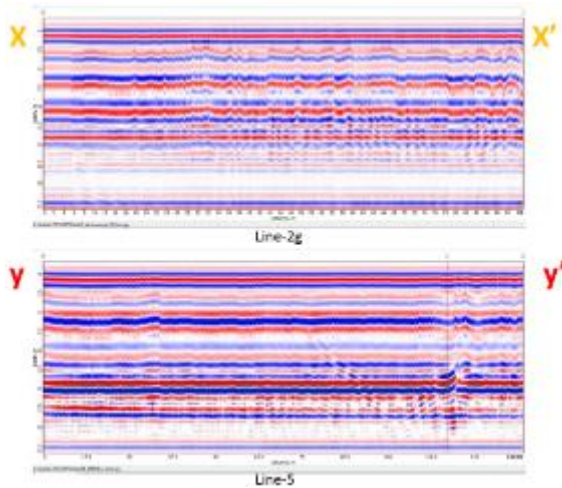
4.1 Data Lapangan

Data GPR yang digunakan terdiri dari enam (6) lintasan, dengan dua (2) lintasan yang dapat merepresentasikan gambaran keberadaan perpindahan lintasan sungai masa lampau. Dua (2) lintasan yang digunakan tersebut yaitu *Line – 2* dan *Line – 5* seperti yang terlihat pada Gambar 1. *Line – 2* berarah Timur – Barat dan *Line – 5* berarah Utara – Selatan. Setiap lintasan diukur dua kali dengan arah yang berlawanan untuk mengkonfirmasi kebenaran adanya struktur di bawah permukaan. Gambar 1 berikut adalah peta lintasan pengukuran GPR di daerah penelitian yang menghasilkan data penampang seperti pada Gambar 2.



Gambar 1. Lintasan Pengukuran GPR di Lokasi Penelitian

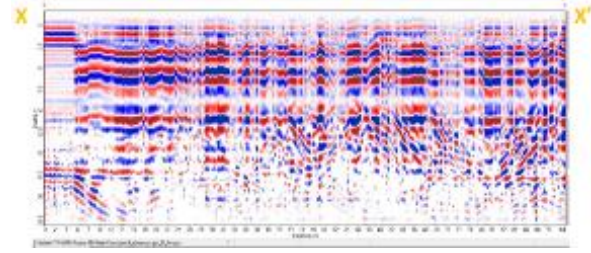
Sumber: *Google Earth* (Termofifikasi)



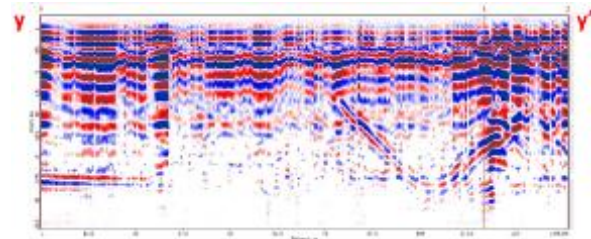
Gambar 2. Raw Data Hasil Pengukuran GPR

4.2 Hasil Pengolahan Data

Data GPR hasil akuisisi pada Gambar 2 masih menunjukkan adanya *noise* berupa garis horizontal yang dapat menutupi sinyal refleksi yang sebenarnya. Untuk menghilangkan *noise* tersebut perlu dilakukan proses *horizontal filter*. Proses *horizontal filter* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah *Background Removal* yang berfungsi untuk menghilangkan sinyal yang terekam berupa garis horizontal pada profil GPR yang memiliki intensitas dan posisi waktu konstan. Setelah dilakukan *horizontal filter*, sinyal refleksi yang sebenarnya mulai terlihat. Namun, sinyal refleksi yang dihasilkan terlihat lemah. Untuk memperkuat atau mempertajam sinyal refleksi diperlukan fungsi penguatan agar sinyal refleksi yang dihasilkan lebih baik dan dapat diinterpretasi lebih lanjut. Fungsi penguatan yang diterapkan menghasilkan sinyal refleksi yang lebih kuat dan terlihat jelas adanya terduga bentukan badan sungai di bawah permukaan. Hasil fungsi penguatan pada profil GPR membuat data penampang menjadi lebih interpretatif. Untuk meningkatkan *signal to noise ratio*, dapat dilakukan proses *stacking* di mana proses ini menjumlahkan *trace* dalam satu *gather* data. Hasil prosesing data GPR yang telah dilakukan menghasilkan gambaran bawah permukaan yang lebih jelas seperti terlihat pada Gambar 3 yang merupakan penampang *Line-2g* dan Gambar 4 yang merupakan penampang *Line-5* sebagai berikut.



Gambar 3. Hasil Prosesing Data *Line-2g*



Gambar 4. Hasil Prosesing Data *Line-5*

4.3 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh melalui *Google Earth* menghasilkan penampang elevasi sungai dari titik A ke titik A', sehingga dapat ditentukan arah aliran sungai yaitu dari titik yang lebih tinggi ke titik yang lebih rendah seperti yang terlihat pada Gambar 5. Arah aliran penting untuk diketahui untuk memperkirakan deformasi sungai dari waktu ke waktu.



Gambar 5. Garis Pengukuran Elevasi dan Penampang Elevasi pada Peta Sungai Citarum Normalisasi

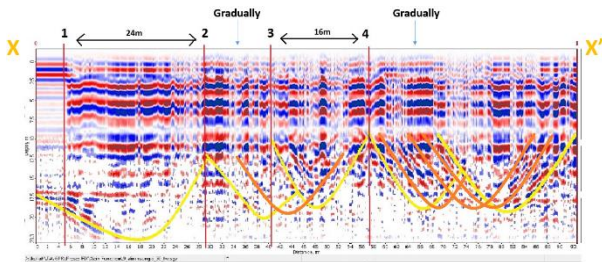
Sumber: *Googel Earth* (Termofifikasi)

Berdasarkan Gambar 5, dapat diketahui bahwa aliran Sungai Citarum pada lokasi penelitian memiliki arah aliran Barat Laut – Tenggara. Informasi arah aliran sungai berguna untuk interpretasi selanjutnya mengenai deformasi morfologi sungai pada lokasi penelitian. Untuk Interpretasi lebih lanjut, maka perlu dibuat model konseptual melalui profil GPR yang kemudian diplot pada peta lokasi penelitian.

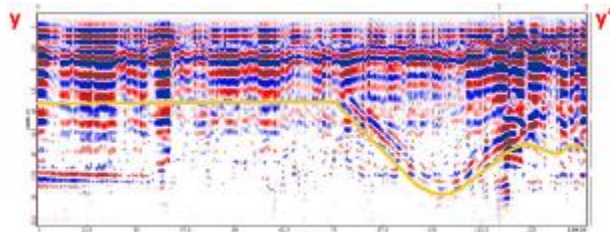
4.4 Interpretasi Data

Pada tahap interpretasi, data yang akan digunakan yaitu data GPR yang telah melalui hasil prosesing. Data GPR yang akan digunakan untuk interpretasi yaitu data GPR *Line-2g* dan *Line-5*. Data tersebut dipilih karena

dianggap cukup interpretatif dan keduanya saling berpotongan, hal ini diharapkan agar hasil interpretasi dapat mendekati keadaan geologi yang sebenarnya di bawah permukaan. Tahap awal interpretasi yaitu melakukan *picking* pada *horizon* terduga bentuk badan sungai di bawah permukaan dengan cara membuat garis untuk mempermudah interpretasi. Hasil *picking horizon* pada profil GPR lokasi penelitian adalah sebagai berikut, yaitu seperti pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. *Picking Horizon* Bentuk Badan Sungai pada Data *Line-2g*



Gambar 7. *Picking Horizon* Bentuk Badan Sungai pada Data *Line-5*

Berdasarkan hasil *picking horizon* pada Gambar 6 dan Gambar 7, dapat diinterpretasikan bahwa pada *horizon* yang ditandai oleh garis oranye dan kuning merupakan citra bawah permukaan yang membentuk bentuk badan sungai masa lampau. Berdasarkan hasil interpretasi data GPR, keberadaan sungai tersebut terlihat berada pada kedalaman 7 meter hingga 22 meter. Kemudian dari Gambar 6, *horizon* yang ditandai dengan garis merah dan angka 1 hingga 4 merupakan peristiwa di mana terjadinya perpindahan *meandering* sungai secara tiba-tiba, yaitu perpindahan tikungan dalam *meandering* sungai dari 1 ke 2 dan dari 3 ke 4. Hal tersebut dapat diyakinkan dengan tidak adanya gradasi tebing sungai. Apabila perpindahan *meandering* sungai terjadi secara tidak tiba-tiba dan alami maka akan membentuk gradasi perpindahan tebing sungai seperti yang diinterpretasi pada titik 2 ke 3 pada Gambar 6, sedangkan *cross section* sebagai pendukung adanya badan sungai dibawah permukaan dijelaskan oleh Gambar 7.

Perpindahan *meandering* sungai secara tiba-tiba merupakan salah satu indikasi terjadinya banjir di masa lampau. Hal ini karena kecepatan aliran air sungai pada bagian dalam *meandering* sungai sangat rendah selama terjadinya banjir dan genangan air, sehingga mendukung pengendapan tanah liat, lumpur, dan pasir

pada bagian dalam *meandering* sungai. Kemudian kecepatan aliran sungai pada bagian luar *meandering* sungai meningkat selama banjir, sehingga tikungan luar *meandering* sungai tergerus. Dari profil GPR yang telah diinterpretasi, dapat dibuat model konseptual perpindahan *meandering* sungai dari waktu ke waktu. Model konseptual ini mempermudah pemahaman keterjadian perpindahan *meandering channel* secara alami maupun akibat peristiwa banjir. Model konseptual dibuat berdasarkan data GPR hasil interpretasi *Line-2g* dan *Line-5* yang diintegrasikan dengan penginderaan jauh melalui Google Earth seperti yang dihasilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Model Konseptual Berdasarkan Data *Line-5* dan *2g*

Sumber: *Google Erath* (Termodifikasi)

Berdasarkan Gambar 8, dapat dilihat bahwa *meandering* sungai berpindah dari timur ke barat. Perpindahan *meandering* sungai secara tiba-tiba pada model konseptual ditandai dengan perpindahan badan sungai, yaitu perpindahan antara garis *meandering* sungai bagian dalam terhadap titik-titik kuning pada Gambar 8. Pada tikungan pertama bagian *meandering* sungai terlihat membelok ke arah luar karena pada titik tersebut paling besar menerima energi dari aliran air sungai. Hal ini dapat terjadi karena aliran air sungai mengalir dari utara ke selatan, sehingga tikungan bagian utara paling banyak menerima energi aliran air sungai, akibatnya pada bagian utara *meandering* sungai tersebut mengalami pembelokan. Perpindahan *meandering* sungai di lokasi penelitian sejauh 24 dan perpindahan kedua sejauh 16 meter dari jejak *meandering* sungai sebelumnya pada model konseptual. Besarnya jarak perpindahan *meandering* sungai dipengaruhi oleh besarnya debit banjir dan muatan sedimen yang terbawa oleh banjir tersebut.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data, interpretasi, dan analisis data GPR hasil akuisisi, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

- Kondisi struktur bawah permukaan menunjukkan adanya bentuk cekungan pada penampang GPR, yang mengindikasikan struktur morfologi badan sungai masa lampau.

- b. Jejak banjir masa lampau terindikasi dari perpindahan *meandering* sungai secara masif dan tiba-tiba, seperti yang terlihat pada penampang GPR Line-2g.
- c. Deformasi Sungai Citarum terjadi berupa perpindahan *meandering* sungai sejauh 16 meter dan perpindahan kedua sejauh 24 meter dari jejak badan sungai sebelumnya pada model konseptual.

5.2 Saran

Sebagai studi dan penelitian lebih lanjut, agar memaksimalkan hasil penelitian maka penulis memberi saran sebagai berikut :

- a. Perlunya percobaan dengan berbagai frekuensi dan permeabilitas magnetik dalam satu garis pengukuran, agar fitur bawah permukaan saling terkonfirmasi.
- b. Memperbanyak garis pengukuran agar dapat dibuat model konseptual morfologi sungai masa lampau yang lebih akurat.
- c. Mempelajari kembali mengenai geologi sungai dan prinsip aliran sungai.
- d. Perlunya mengecek kembali kesiapan peneliti dan peralatan pengukuran agar penelitian di lapangan berjalan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. N. Anggi, "Deteksi keberadaan endapan bauksit laterit dengan pemanfaatan gelombang radar," Skripsi Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [2] A. P. Annan, *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures, & Application*, Canada: Sensors & Software Inc, 2003.
- [3] K. M. Arsyad, *Modul Morfologi Sungai Pelatihan Perencanaan Teknik Sungai*, Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.
- [4] V. R. Baker, "Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects," *Elsevier. Geomorphology*, Vol. 101, no.(1-2), pp. 1—13, April 2008, in press.
- [5] G. Benito & A. Díez-Herrero, "Palaeoflood Hydrology: Reconstructing Rare Events and Extreme Flood Discharges," *Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters*. USA: Elsevier, 2015, 65—104.
- [6] Elfarabi, A. Widodo dan F. Syaifudin, "Pengolahan data Ground Penetrating Radar (GPR) dengan menggunakan software MATGPR R-3.5," *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 6, no. 1, pp. 47—50, ISSN: 2337-3539, 2017, in press.
- [7] D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10th edition, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [8] M. F. Irawan, Y. Hidayat, dan B. Tjahjono, "Penilaian bahaya dan arahan mitigasi banjir di cekungan Bandung," *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, Vol. 20, no. 1, pp. 1—6, ISSN 1410-7333, April 2018, in press.
- [9] H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. UK: Elsevier, 2009.
- [10] S. Murniningsih, "Pengaruh pergerakan meander terhadap keseimbangan alur sungai," *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development*, Vol. 1, no. 2, pp. 45—52, E-ISSN : 2621-4164, Desember 2018, in press.
- [11] Mussett, A. E., & Khan, M. A, *Looking Into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics*. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [12] A. A. Nur, "Perubahan karakteristik elektromagnetik menggunakan metode ground penetrating radar hubungannya dengan karakteristik sedimen bawah permukaan," *Bulletin of Scientific Contribution*, Vol. 5, no. 1, pp. 1—10, Januari 2007, in press.
- [13] A. A. Putro, Supriyanto S. dan Aditya R, "Interpretasi bawah permukaan menggunakan metode GPR (Ground Penetrating Radar) di Amblesan Jalan Ring Road II Kota Samarinda," *Geosains Kutai Basin*, Vol. 2, no. 1, 2019, unpublished.
- [14] J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, UK: John Wiley & Sons, 2011.
- [15] A. Rosyidie, "Banjir: fakta dan dampaknya, serta pengaruh dari perubahan guna lahan," *Journal of Regional and City Planning*, Vol. 24, no. 3, pp. 241—249, Desember 2013, in press.
- [16] R. C. Selley, *Applied Sedimentology*, 2nd edition. London: Academic Press, 2000.
- [17] L. Somantri, "Pemanfaatan teknik penginderaan jauh untuk mengidentifikasi kerentanan dan risiko banjir," *Jurnal Geografi Gea*, Vol. 8, no. 2, 2008, in press.
- [18] E. Sukiyah dan M. F. Rosana, "Geografik, geopolitik, dan geostrategik Kota Bandung dalam perspektif geologi", *Seminar SPM Bidang Lingkungan Hidup Kota Bandung*, pp.1-9, 23 Desember, 2010, in press.
- [19] A. Syukur, "Pemetaan batuan dasar sungai dengan menggunakan metode ground penetrating radar," Skripsi Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia, Depok, 2009
- [20] R. W. Van Bemmelen, *The Geology of Indonesia*,. Vol. IA, The Hague: Government Printing Office, 1949.