

Pada titik B, besarnya tegangan efektif adalah $\sigma_B' = H_2 \cdot \gamma' - h \cdot \gamma_w$, dan pada titik C dengan tegangan efektif sebesar: $\sigma_C' = \sigma_C - u_C = z(\gamma_{sat} - \gamma_w) - \{(h/H_2)z\} \cdot \gamma_w = z \cdot \gamma' - \{(h/H_2)z\} \cdot \gamma_w$, sedangkan h/H_2 adalah gradien hidrolis (i) yang disebabkan aliran ke atas, sehingga

$$\sigma_C' = z \cdot \gamma' - i \cdot z \cdot \gamma_w \quad (1)$$

Jika debit per satuan luas rembesan air (aliran ke atas) bertambah, maka gradien hidrolis bertambah sesuai hukum Darcy, ini berarti kondisi batas akan tercapai di titik C, bila

$$\sigma_C' = z \cdot \gamma' - i_{crit} \cdot z \cdot \gamma_w = 0 \quad (2)$$

dengan i_{crit} : gradien hidrolis kritis.

Pada kondisi ini, stabilitas butiran tanah akan hilang, umumnya disebut *boiling* atau *quick condition*. Dari persamaan tersebut diperoleh

$$i_{crit} = \gamma' / \gamma_w \quad (3)$$

dengan

- i_{crit} : gradien hidrolis kritis,
- γ' : berat volume tanah terendam (gr/cm^3),
- γ_w : berat volume air (gr/cm^3).

Apabila aliran air terjadi di sekitar konstruksi turap, maka gaya rembesan per unit volume tanah dapat dihitung untuk kontrol kemungkinan keruntuhan konstruksi turap akibat rembesan melalui tanah dasar fondasi yang dapat menyebabkan terjadinya tanah menyembul (*heaving*) di sebelah hilir konstruksi turap. Pada jenis tanah berbutir lepas (pasir) kejadian ini akan menimbulkan terjadinya *sand boiling*. Terzaghi (1922) dalam Das (1994) merekomendasikan bahwa *heaving* umumnya terjadi pada jarak $D/2$ dari sisi turap di bagian hilir dengan D adalah kedalaman turap yang dipancang pada tanah lurus air (pasir) (Gambar 2).

Dalam analisis ini dilakukan tinjauan 1 m tegak lurus bidang gambar. Angka aman (SF) untuk melawan terjadinya *heave* : $SF = W'/U$ dengan W' : berat prisma tanah terendam air, dan U : gaya ke atas disebabkan rembesan pada volume prisma tanah yang sama dengan berat prisma tanah terendam.

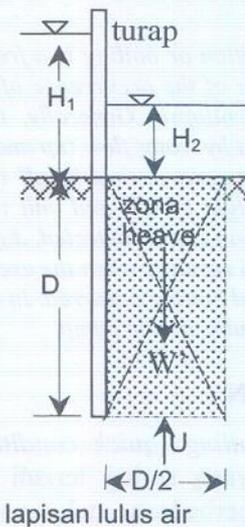
$$W' = D \cdot (D/2) \cdot 1 \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \frac{1}{2} \cdot D^2 \cdot \gamma' \quad (4)$$

$$U = (\text{volume prisma tanah terendam}) \cdot (i_{rerata} \cdot \gamma_w) = \frac{1}{2} \cdot D^2 \cdot i_{rerata} \cdot \gamma_w$$

dengan i_{rerata} : gradien hidrolis rerata di dasar prisma tanah, maka dapat dicari besarnya angka aman

$$SF = W'/U = \gamma' / (i_{rerata} \cdot \gamma_w) \quad (5)$$

Kondisi kritis bilamana angka aman (SF): 1, diperoleh $i_{kritis} = \gamma' / \gamma_w$.



Gambar 2. Turap dipancang pada tanah lurus air (pasir).

METODE PENELITIAN

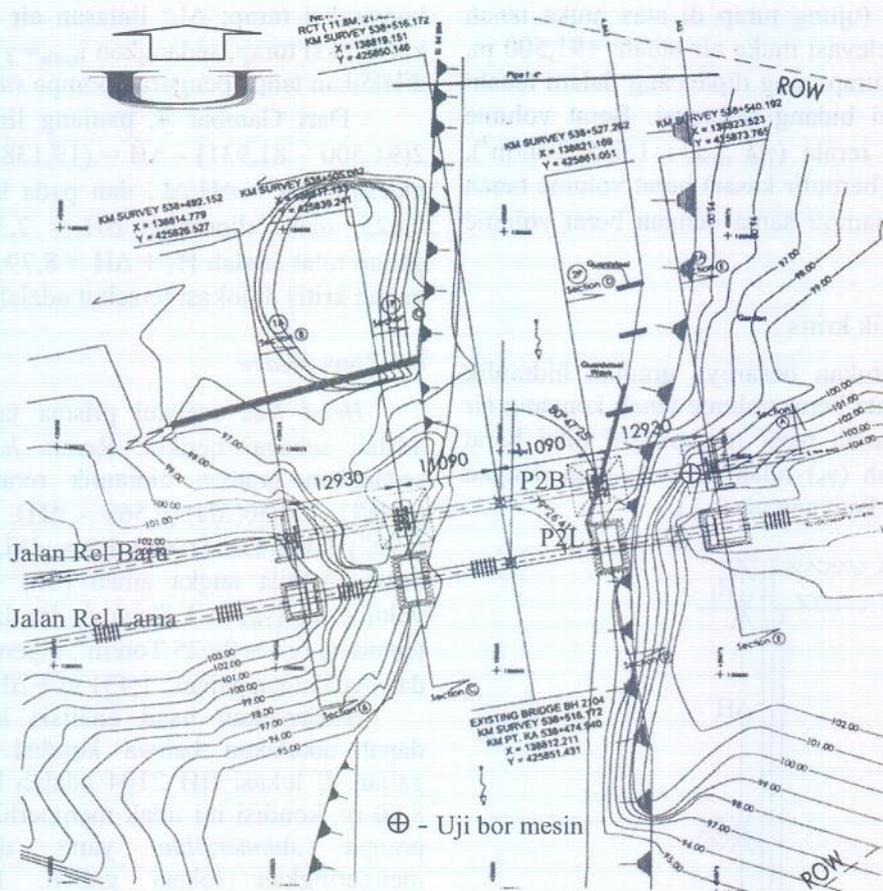
Lokasi

Lokasi penelitian berada di lokasi pekerjaan galian fondasi pilar *Bridge 2104* lintasan kereta api *double track*, di atas sungai Bedog, Gamping, Yogyakarta seperti dalam Gambar 3. Letak jembatan baru berada di sebelah utara jembatan lama, berjarak 7 m dari as jembatan lama.

Konstruksi fondasi jembatan baru menggunakan tipe fondasi langsung, artinya dasar fondasi langsung menumpang pada tanah yang mampu mendukung beban fondasi pilar. Fenomena *boiling* terjadi pada saat dilakukan penggalian untuk fondasi pilar jembatan baru (P2B) yang berada di sisi barat sungai Bedog dan di sisi utara pilar jembatan lama (P2L). Pada pelaksanaan galian ini digunakan konstruksi turap baja guna mencegah runtuhnya lereng galian. Kondisi muka air sungai pada +91,500 m.

Data

Data yang tersedia merupakan hasil uji bor mesin, dan SPT (*Standard Penetration Test*) dari JFE Civil - Wika Joint Operation. Data ini digunakan untuk mengetahui sifat fisis dan mekanis tanah. (Lampiran 1).



Gambar 3. Lokasi Jembatan jalan rel lama dan baru di atas Sungai Bedog.

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Kondisi Geoteknik di Lokasi BH 2104

Berdasarkan hasil uji bor mesin dan uji penetrasi standar (SPT – *Standard Penetration Test*) diperoleh hasil sebagai berikut ini. Lokasi titik bor berada pada elevasi +102,00 m (Gambar 3) dan data SPT pada Lampiran 1.

Kondisi tanah berlapis-lapis yang merupakan ciri khas dari endapan material dari Gunung Merapi yang turun ke arah hilir. Adapun dari hasil bor dapat dikatakan dari elevasi 102,00 m, setebal ± 4,00 m merupakan tanah lapis atas terdiri dari tanah lempung tercampur kerikil berwarna coklat, tampaknya merupakan tanah timbunan. Di bawah lapisan ini barulah dijumpai tanah asli berasal dari hasil endapan material letusan Gunung Merapi. Umumnya merupakan tanah pasir sedikit tercampur dengan lempung atau pasir kasar tercampur kerikil, kerakal. Kondisi ini menunjukkan sesuai dengan terbentuknya lapisan ini di waktu lampau, endapan dengan butiran kasar tercampur kerikil pada umumnya terjadi di waktu musim hujan sedangkan endapan material dari Gunung Merapi dengan butiran halus dan bahkan tercampur dengan butiran lempung menunjukkan terjadi di musim hujan. Secara umum pelapisan yang berasal dari

endapan material Gunung Merapi cukup tebal dan merupakan material pasir dengan butiran halus, kasar maupun tercampur kerikil, kerakal. Hasil uji SPT memperlihatkan sampai kedalaman 30,00 m dari elevasi +102,00 m sebagian besar adalah < 30. Menurut Kriteria Peck, dkk. 1974, hubungan antara nilai SPT dan kepadatan relatif adalah sebagai berikut ini.

Nilai SPT	kepadatan relatif
< 4	sangat tidak padat
4 – 10	tidak padat
10 – 30	kepadatan sedang
30 – 50	padat
≥ 50	sangat padat (batuan keras)

Tampak bahwa tanah di lokasi BH 2104 mempunyai kepadatan sedang, dan jenis tanah adalah pasir lepas. Muka air berada pada 9,00 m dari elevasi +102,00 m atau pada elevasi +93,00 m.

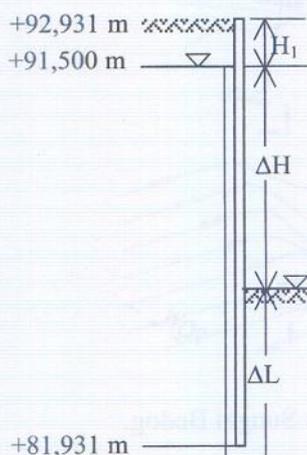
Analisis kedalaman galian

Analisis kedalaman galian didasarkan tinjauan gradien hidrolik kritis, keseimbangan tegangan efektif atau *zona heave*. Berdasarkan data yang ada dalam analisis digunakan elevasi muka tanah pada pilar

(P2B): +92,931 m (ujung turap di atas muka tanah pada +93,931 m), elevasi muka air tanah: +91,500 m, dan elevasi ujung turap yang dipancang dalam tanah: +81,931 m sebagai bidang referensi. Berat volume tanah kenyang air rerata ($\gamma_{sat\ rerata}$: 1,625 Ton/m³). Untuk tanah pasir (berbutir kasar) berat volume tanah kenyang air (γ_{sat}) hampir sama dengan berat volume tanah basah (γ_b).

b.1 Gradien hidraulik kritis

Untuk menentukan besarnya gradien hidraulik kritis diperlukan data berat volume tanah kenyang air (γ_{sat}). Umumnya tanah pasir mempunyai nilai berat volume tanah basah (γ_b) tidak berbeda jauh dengan berat volume tanah kenyang air (γ_{sat}).



Gambar 4. Lintasan air di sekeliling konstruksi turap.

Berat volume tanah terendam (γ') = (γ_{sat}) - (γ_w), dengan γ_w adalah berat volume air. Untuk mendapatkan kedalaman galian digunakan hubungan $i = \Delta H/\Delta L$ dengan i : gradien hidraulik; ΔH : beda tinggi tekanan antara muka sisi sebelah hulu dan hilir

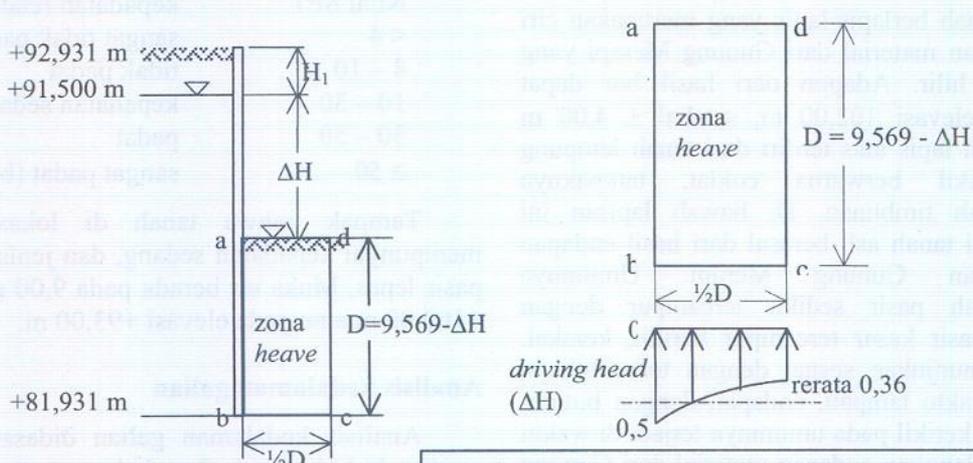
konstruksi turap; ΔL : lintasan air dari hulu ke hilir konstruksi turap, sedangkan $i_{kritis} = \gamma'/\gamma_w$. Hasil analisis dilakukan tanpa pengaruh pompa *submersible*.

Dari Gambar 4, panjang lintasan air : $\Delta L = 2(91,500 - 81,931) - \Delta H = (19,138 - \Delta H)$ m. Gradien hidraulik (i) = $\Delta H/\Delta L$, dan pada kondisi kritis (i) = 0,625, maka diperoleh $\Delta H = 7,36$ m. Kedalaman galian total adalah $H_1 + \Delta H = 8,79$ m atau kedalaman galian kritis di lokasi tersebut adalah 8,80 m.

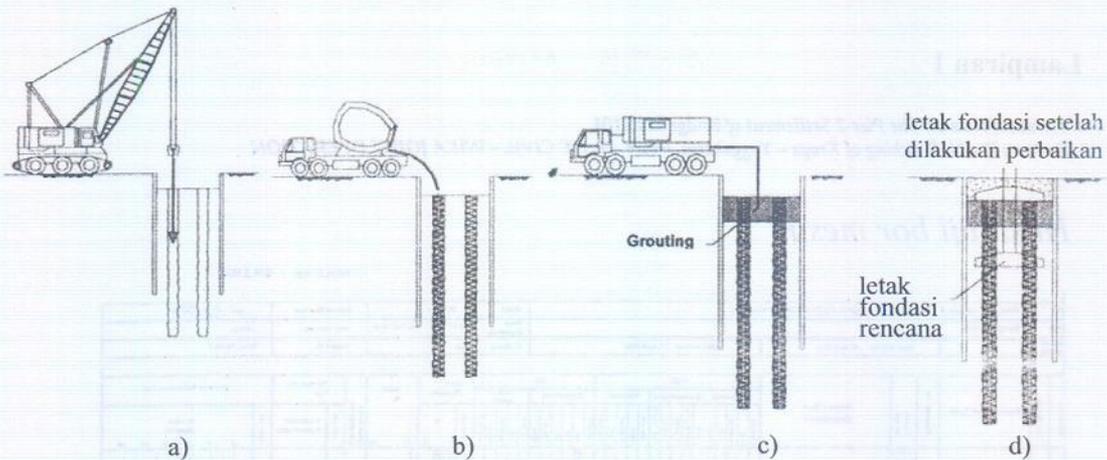
b.2 Zona Heave

Head loss melalui prisma tanah (*zona heave*) adalah sebagai berikut. Rerata *head* : 0,36 (ΔH), sedangkan gradien hidraulik rerata (i_{rerata}) = $0,36(\Delta H)/D = 0,36(\Delta H)/(9,569 - \Delta H)$. Menurut Terzaghi (1922) dalam Das (1994): $FS = \gamma'/(i_{rerata} \cdot \gamma_w)$ dan kondisi kritis, apabila angka aman (SF) = 1. Untuk berat volume air (γ_w) = 1 Ton/m³, dan berat volume tanah terendam (γ') = 0,625 Ton/m³, diperoleh $\Delta H = 6,072$ m dan kedalaman galian : $1,431$ m + $\Delta H = 7,50$ m.

Berdasarkan hasil analisis kedua metode ini dapat dikatakan bahwa kondisi kritis kedalaman galian di lokasi BH 2104 adalah berkisar 7,50 m – 8,80 m, kondisi ini tidak memperhitungkan pengaruh pompa *submersible* yang digunakan untuk mengeringkan lokasi galian. Pengaruh pompa memberikan efek aliran air rembesan dari sisi luar turap ke sisi dalam yang digali semakin cepat, artinya proses *boiling* semakin dipercepat, dan selanjutnya peristiwa erosi buluh akan terjadi. Apabila kondisi ini tidak segera diatasi, tanah di sebelah hulu konstruksi turap akan ikut terbawa oleh aliran air (pengaruh erosi buluh) yang berakibat tanah mengalami penurunan (*ambblas*), dan akibat lanjut gagalnya konstruksi turap.



Gambar 5. Analisis *boiling* berdasarkan *zona heave*.



Keterangan:

- a) pemboran dan penempatan casing; b) pencoran beton pada lubang tiang bor;
 c) pemadatan dengan metode grouting; d) penempatan poer (*pile cap*)

Gambar 6. Metode perbaikan pada galian fondasi pilar (P2B) *Bridge* 2104, setelah lubang galian ditimbun dan dipadatkan dengan *vibro compaction*.

Fenomena *boiling* perlu diperhitungkan dalam perancangan (*design*) fondasi, agar tidak memunculkan masalah dalam pelaksanaan galian untuk fondasi. Pemilihan tipe fondasi pada kondisi muka air tanah/air sungai tinggi, disarankan dengan tipe fondasi tiang baik tiang bor, pancang, tiang ulir, atau fondasi *caisson*. Pemilihan tipe fondasi tiang, akan memberikan galian untuk fondasi hanya digunakan untuk penempatan poer, sehingga tidak diperlukan galian dalam, juga perlu disesuaikan dengan kondisi di lokasi, bila banyak dijumpai pemukiman penduduk, tipe fondasi tiang bor merupakan tipe paling tepat. Selain itu, pengaruh erosi dasar sungai terhadap fondasi dapat dihindari, karena fondasi menumpang pada tiang. Untuk pilar P2B *Bridge* 2104, di atas sungai Bedog, fenomena *boiling* dapat diatasi dengan segera menimbun kembali galian fondasi, tanah timbunan dipadatkan dengan alat *vibro compaction* dan selanjutnya dilakukan pemboran dengan menempatkan pipa *casing* (pelindung) seperti dalam skema Gambar 6.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Fenomena *sand boiling* baik pada pekerjaan galian fondasi pilar *Bridge* 2104 di atas sungai Bedog, Yogyakarta, maupun pada pekerjaan-pekerjaan galian dalam dengan muka air tinggi (muka air tanah atau muka air sungai) dapat diprediksi sebelumnya.
- Pada jenis tanah pasir, fenomena *boiling* lebih mudah terjadi, karena sifatnya yang porus, butiran lepas dan adanya perbedaan tinggi muka air yang besar.
- Guna antisipasi fenomena *boiling* diperlukan pemilihan tipe fondasi pilar *Bridge* 2104 secara tepat antara lain tipe fondasi tiang atau *caisson*.

Saran

Untuk pemilihan perbaikan fondasi pilar P2B *Bridge* 2104, dilakukan penimbunan kembali, dipadatkan dan dilakukan pekerjaan tiang bor dengan pelindung tiang (*casing*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana berkat bantuan dari berbagai pihak antara lain proyek *double track* Yogyakarta – Kroya (PJKA) dan JFE CIVIL – WIKA *JOINT OPERATION* yang telah memberi ijin untuk melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- USBR, 1974, *Earth Manual*, Denver, Colorado, USA.
 Bowles, J. E., 1984, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, Mc. Graw Hill, Singapore.
 Cedergren, H. R., 1989, *Seepage, drainage, and flow nets*, John Wiley & Sons, New York, USA.
 Das, B. M., 1994, *Principle of geotechnical engineering*, PWS Publishing Company, Boston, USA.
 Holtz, R. D., dan Kovacs, W. D., 1981, *An Introduction to geotechnical engineering*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New York, USA.
 Jumikis, A. R., 1967, *Introduction to soil mechanics*, Van Nostrand Comp., New York, USA.
 Peck, R. B., Housen, W. F., dan Thornburn, T. H., 1974, *Foundation Engineering*, John Wiley & Sons, New York, USA.
 Suryolelono, K. B., 2000, *Candi Selogriyo: Penyebab keruntuhan dan konsep penanggulangannya*, Balai Studi dan Konservasi Borobudur, Magelang, Indonesia.

Lampiran 1

Technical Note on The Pier-2 Settlement of Bridge BH.2104
 Railway Double Tracking of Kroya - Yogyakarta, Phase - 1, JFE CIVIL - WIKA JOINT OPERATION

Hasil uji bor mesin

HOLE No. : BH 2104

RAILWAY DOUBLE TRACKING OF KROYA-YOGYAKARTA Phase 1		Over	20 Meter	Ground Station	UPT : 02.000						
Plan	Burung Bering	Scale	5.7 x 7.30 P	U 110 x 10 P	Workshop						
Date	12 April 2008	Date	23 April 2008	Operator	Julio						
Driller		Logger		Checked By	Kusum Sutopo						
Depth (m)	Rock / Soil Type	Number of Sounding	Rock / Soil Description	Soil		SPT	N ₆₀	Penetration	Pore Pressure	Borehole Pressure Test	
				Classification	Composition					Water Content	Shrinkage
0.00	Tanah liat	4.00	Tanah liat warna coklat, struktur lempung dan sedikit butiran lempung			10	10			10	10
3.00	Kerak	3.00	Kerak pasir kasar, memampat lempung warna hitam kecoklatan			15	15			15	15
6.50	Pasir	6.50	Pasir kasar sedang warna coklat memampat lempung terdapat material paku (Bubint)			20	20			20	20
10.00	Pasir lempung	4.00	Pasir lempung pasir sangat kasar dengan butiran lempung memampat lempung tidak lempat			25	25			25	25
14.00	Pasir berkerak	4.00	Pasir berkerak pasir kasar memampat lempung			30	30			30	30
18.00	Pasir	4.00	Pasir warna coklat pasir sedang-halus butiran lempung memampat lempung tidak lempat			35	35			35	35
22.00	Pasir berkerak	4.00	Lelembut (Gumpil) pasir halus memampat lempung butiran lempung tidak lempat			40	40			40	40
26.00	END OF HOLE										

Result of Additional Soil Investigation by PT. WIKA

Lampiran 2. Foto-fot Bridge 2104



Lokasi penelitian Jembatan BH 2104.



Pilar (P2B) jembatan baru sisi barat.



Pilar (P1B) jembatan baru sisi timur



Pelaksanaan timbunan pada pilar (P1B)