



ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN KEMBAR PENGELAK AIR NANJUNG BERDASARKAN PENGUKURAN KONVERGEN

Stability Analysis of the Nanjung Water Diversion Twin Tunnels based on Convergence Measurement

Simon Heru Prassetyo^{1*}, Ganda Marihot Simangunsong¹, Ridho Kresna Wattimena¹, Made Astawa Rai¹, Irwandy Arif¹, Nuhindro Priagung Widodo¹, Dhika Noor Pradhana², dan Dimas Agung Saputra²

¹ Kelompok Keahlian Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132

² PT. Wijaya Karya (Persero) Tbk, Proyek Pembangunan Terowongan Nanjung, Kabupaten Bandung

Artikel masuk : September 2019 , Artikel diterima : Oktober 2019, Artikel terbit : November 2019

ABSTRAK

Kata kunci:

Kestabilan terowongan,
Terowongan kembar, Terowongan
pengelak air, Terowongan
Nanjung, Konvergen.

Keywords:

Tunnel stability, Twin tunnels,
Water diversion tunnel, Nanjung
Tunnel, Convergence.

Penelitian ini berfokus pada analisis kestabilan terowongan kembar pengalih air Nanjung berdasarkan hasil pengukuran konvergen. Terowongan Nanjung merupakan terowongan kembar berpenampang tapal kuda dengan masing-masing terowongan berdimensi 10,2 m x 9,2 m, dan memiliki panjang 230 meter. Lokasi terowongan berada di sekitar Curug Jompong, Kecamatan Margaasih, Kabupaten Bandung. Pengukuran konvergen dilakukan selama kurang lebih 5 bulan (21 minggu), yaitu dari tanggal 18 Februari–11 Juli 2019 (144 hari). Hasil pengukuran konvergen dicatat dan digambarkan ke dalam kurva konvergen vs. waktu dan kurva konvergen vs. jarak dari muka terowongan. Dari plot tersebut, kemenerusan nilai konvergen dan laju konvergen dinding terowongan terhadap jarak dan waktu dianalisis. Besaran laju konvergen dari masing-masing terowongan juga dibandingkan dengan beberapa indeks empiris untuk menentukan tingkat kestabilan terowongan. Secara umum, tren laju konvergen Terowongan Nanjung tidak menunjukkan adanya potensi ketidakstabilan. Walaupun terjadi lonjakan laju konvergen di beberapa STA, laju tersebut tidaklah seragam di ketiga titik pengukuran di setiap penampangnya dan tidak kontinu. Stabilitasnya terowongan berdasarkan hasil pengukuran konvergen juga diperkuat dengan hasil analisis regangan kritis di mana mayoritas STA yang diukur memiliki besar regangan di bawah garis regangan kritis dan bernilai kurang dari 1%.

*Penulis Koresponden: simon@mining.itb.ac.id

Doi :

ABSTRACT

This paper focuses on the stability analysis of the Nanjung Water Diversion Twin Tunnels using convergence measurement. The Nanjung Tunnel is horseshoe-shaped in cross-section, 10.2 m x 9.2 m in dimension, and 230 m in length. The location of the tunnel is in Curug Jompong, Margaasih Subdistrict, Bandung. Convergence monitoring was done for 144 days between February 18 and July 11, 2019. The results of the convergence measurement were recorded and plotted into the curves of convergence vs. day and convergence vs. distance from tunnel face. From these plots, the continuity of the convergence and the convergence rate in the tunnel roof and wall were then analyzed. The convergence rates from each tunnel were also compared to empirical values to determine the level of tunnel stability. In general, the trend of convergence rate shows that the Nanjung Tunnel is stable without any indication of instability. Although there was a spike in the convergence rate at several STA in the measured span, that spike was not replicated by the convergence rate in the other measured spans and it was not continuous. The stability of the Nanjung Tunnel is also confirmed from the critical strain analysis, in which most of the STA measured have strain magnitudes located below the critical strain line and are less than 1%.

PENDAHULUAN

PT. Wijaya Karya (Persero), Tbk dan PT. Adhi Karya (Persero), Tbk atau WIKADHI (KSO) saat ini sedang mengerjakan proyek pembangunan Terowongan Kembar Pengelak Air Nanjung yang berada di sekitar Curug Jompong, Kecamatan Margaasih, Kabupaten Bandung. Pembangunan terowongan ini berada di bawah pengelolaan SNVT Pelaksanaan Jaringan Sumber Air Balai Besar Wilayah Sungai (BWWS) Citarum, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Proyek ini meliputi pembangunan dua buah terowongan kembar pengelak air yang masing-masing berpenampang tapal kuda, berdimensi 10,2 m x 9,2 m, dan memiliki panjang 230 m. Pekerjaan penggalian terowongan diawasi oleh konsultan supervisi dari PT. Virama Karya-Suprharmonia (KSO).

Penggalian terowongan dilakukan dari dua sisi, yaitu dari sisi *outlet* dan dari sisi *inlet*. Dari sisi *outlet*, karena material yang dihadapi adalah material lunak (kombinasi dari *silty clay* dan *tuffaceous sandstone* ($RQD = 0-100$, $UCS = 2-8$ MPa) penggalian dilakukan secara mekanis menggunakan *twin-header / rotary cutter* yang di-*attach*-kan ke *excavator*. Penggalian mekanis ini dilakukan sepanjang ± 190 meter dari sisi *outlet*. Sedangkan dari sisi *inlet*, karena material yang dihadapi adalah material dasit masif-keras dengan $RQD > 70$ dan $UCS = 30-90$ MPa, penggalian terowongan dilakukan menggunakan metode pemboran dan peledakan. Penggalian dengan metode

peledakan ini dilakukan sepanjang ± 40 meter dari sisi *inlet*.

Salah satu metode penting yang digunakan oleh praktisi terowongan untuk mengevaluasi desain dan kestabilan sebuah terowongan adalah pengukuran konvergen. Laju konvergen yang besar dan terus-menerus, apabila tidak dimonitor dan diintervensi, dapat berpotensi menyebabkan kelongsoran terowongan yang dapat membahayakan keselamatan pekerja, menunda pekerjaan penggalian, dan mengakibatkan tertundanya penyelesaian pembangunan terowongan secara keseluruhan.

Oleh karena itu, pengukuran konvergen terowongan merupakan hal yang penting untuk dilakukan. Pada saat inilah kondisi massa batuan yang tidak diprediksi sebelumnya (*unforeseen rock mass condition*) dapat diketahui, sehingga kontraktor dapat dengan cepat menyesuaikan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan apabila diperlukan.

Penelitian pada makalah ini berfokus pada interpretasi hasil pengukuran konvergen Terowongan Nanjung yang telah dilakukan selama kurang lebih 5 bulan (21 minggu), yaitu dari tanggal 18 Februari-11 Juli 2019 (144 hari). Selama periode tersebut, jumlah pengukuran konvergen dilakukan sebanyak 54 kali pengukuran di 31 *station* pengukuran (STA), yaitu 14 STA di Terowongan 1 (T1) dan 17 STA di Terowongan 2 (T2). Rencana pembangunan Terowongan Nanjung, penampang memanjang di T1, dan contoh foto *core box* dapat dilihat di Gambar 1, sedangkan dokumentasi kondisi *outlet* dan *inlet* Terowongan Nanjung dapat dilihat di Gambar 2.

METODE

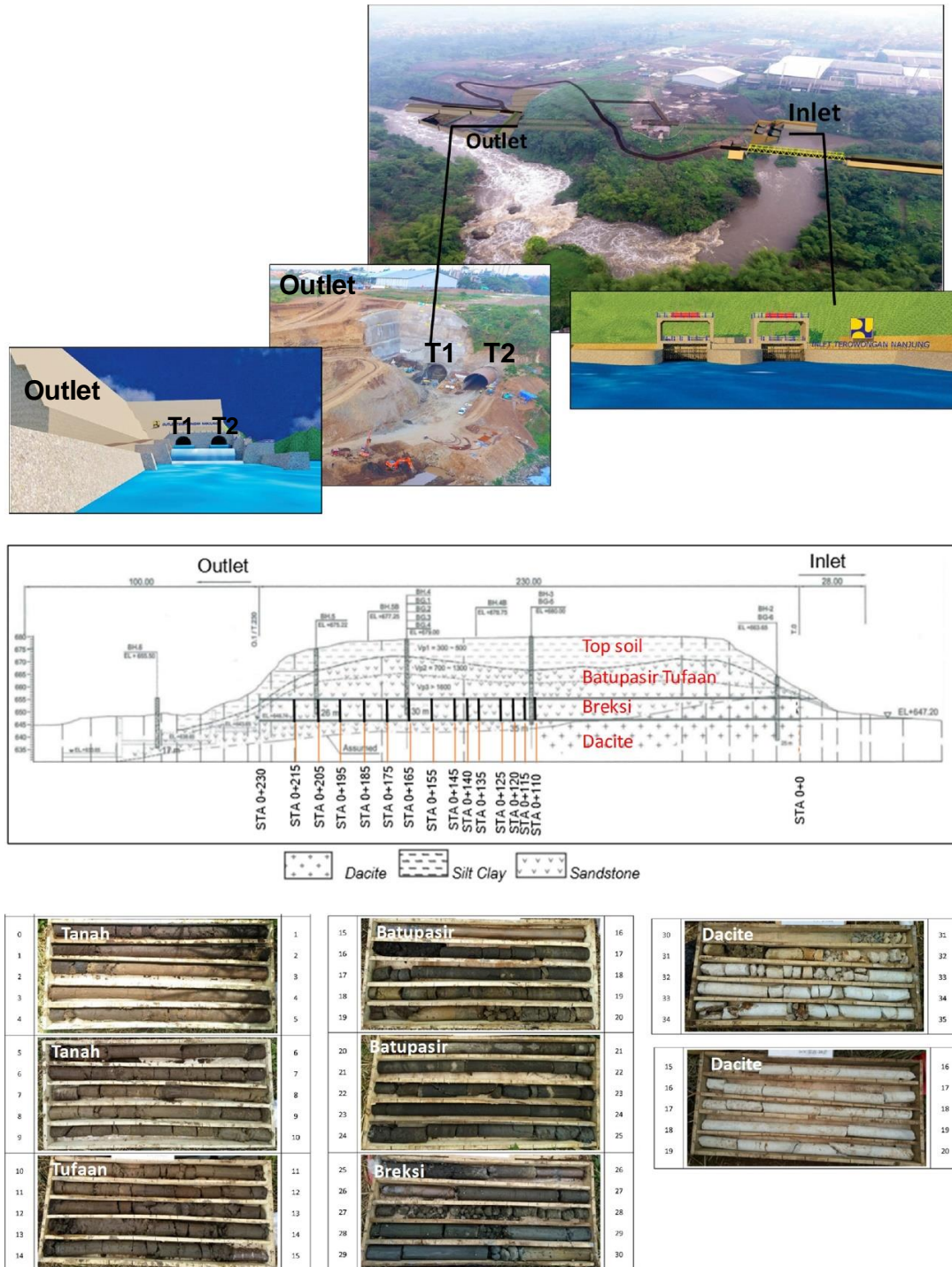
Pengukuran konvergen dilakukan menggunakan alat *digital tape extensometer* buatan Interfels yang memiliki ketelitian $\pm 0,01$ milimeter dan pengulangan $\pm 0,1$ milimeter (Gambar 3). Pengukuran konvergen dilakukan di 31 STA dengan interval jarak antar STA yang bervariasi, yaitu setiap 5 - 10 meter dari sisi *outlet* terowongan.

Di setiap STA-nya, terdapat tiga bentangan yang diukur nilai konvergennya, yaitu horizontal, diagonal kiri, dan diagonal kanan (Gambar 4). Untuk masing-masing terowongan, hasil pengukuran konvergen dicatat dan digambarkan kedalam kurva konvergen vs. waktu dan kurva konvergen vs. jarak dari muka terowongan. Dari plot tersebut, kemenerusan nilai konvergen dan laju konvergen dinding dan atap terowongan terhadap jarak dan waktu dianalisis.

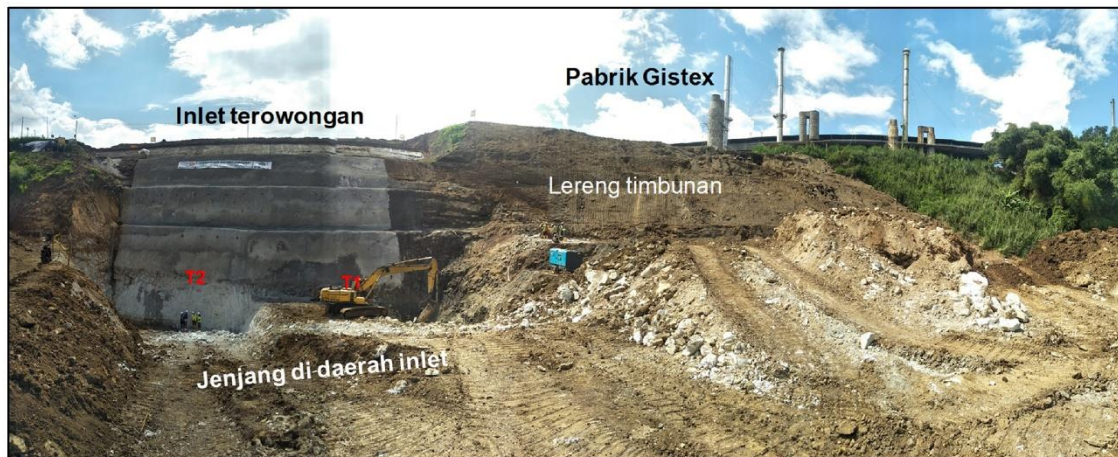
Besaran konvergen dari masing-masing terowongan juga dibandingkan dengan beberapa indeks empiris untuk menentukan tingkat kestabilan terowongan. Beberapa indeks empiris yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 - Tabel 3. Walaupun demikian, pada praktiknya, kriteria ketidakstabilan yang digunakan untuk menganalisis laju konvergen Terowongan Nanjung

hanya mengacu pada kriteria ketidakstabilan PT. Freeport Indonesia (PTFI) tahun 2000 (FTTM, 2017), seperti yang tertera pada Tabel 3. Kriteria ini berdasarkan hasil pengukuran konvergen yang dilakukan oleh Tim *Underground Geotechnics* PTFI di area penambangan bawah tanah *Deep Ore Zone* yang berada di kedalaman 1200 meter di bawah permukaan tanah dengan massa batuan yang berstruktur kompleks. Kriteria ini didapat setelah PTFI melakukan pengukuran

konvergen secara kontinyu selama operasi penambangan dalam waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, kriteria PTFI dinilai lebih cocok untuk dapat digunakan sebagai kriteria ketidakstabilan Terowongan Nanjung. Kriteria ketidakstabilan berdasarkan laju konvergen menurut Cording (1974) dan Zhenxiang (1984) lebih cocok untuk diaplikasikan pada terowongan yang menembus massa batuan keras.



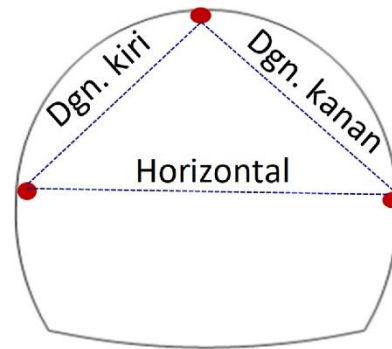
Gambar 1. Rencana pembangunan Terowongan Nanjung, penampang memanjang di Terowongan 1, dan foto core box



Gambar 2. Dokumentasi outlet dan inlet Terowongan Nanjung



Gambar 3. Digital tape extensometer buatan Interfels



Tabel 1. Parameter kestabilan lubang bukaan menurut Cording (1974)

No	Laju konvergen (mm/hari)	Kriteria kestabilan
1	0,001	Stabil
2	0,001-0,5	Relatif stabil
3	≥ 1	Tidak stabil

Tabel 2. Parameter kestabilan lubang bukaan menurut Zhenxiang (1984)

No	Laju konvergen (mm/hari)	Kriteria kestabilan
1	≤ 0,2	Stabil
2	0,2-3	Relatif stabil
3	≥ 3	Tidak stabil

Tabel 3. Parameter ketidakstabilan lubang bukaan menurut UG Geotech PTFI tahun 2000 yang digunakan oleh FTTM (2017)

No	Laju konvergen (mm/hari)	Kriteria ketidakstabilan
1	< 1	Negligible
2	1-2	Moderate
3	2-3	Severe
4	3-5	Very severe
5	> 5	Extremely severe

ANALISIS HASIL PENGUKURAN KONVERGEN

Hasil pengukuran konvergen di hari terakhir pengukuran diberikan pada Tabel 4 untuk T1 dan Tabel 5 untuk T2. Nilai konvergen yang bertanda positif menandakan dinding terowongan mengalami penekanan (*compression*) ke arah pusat terowongan, sedangkan nilai konvergen dan laju konvergen yang bertanda negatif menandakan dinding terowongan mengalami tarikan (*extension*) ke dalam massa batuan di sekitar terowongan.

Berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5 dan hasil observasi di lapangan, analisis hasil pengukuran konvergen Terowongan Nanjung adalah sebagai berikut:

1. Secara umum, tren laju konvergen Terowongan Nanjung tidak menunjukkan adanya potensi ketidakstabilan. Tipikal kurva hasil pengukuran



Gambar 4. Dokumentasi kegiatan pengukuran konvergen Terowongan Nanjung

konvergen dapat dilihat pada Gambar 5 untuk STA 0+195 di T1 dan Gambar 6 untuk STA 0+195 di T2.

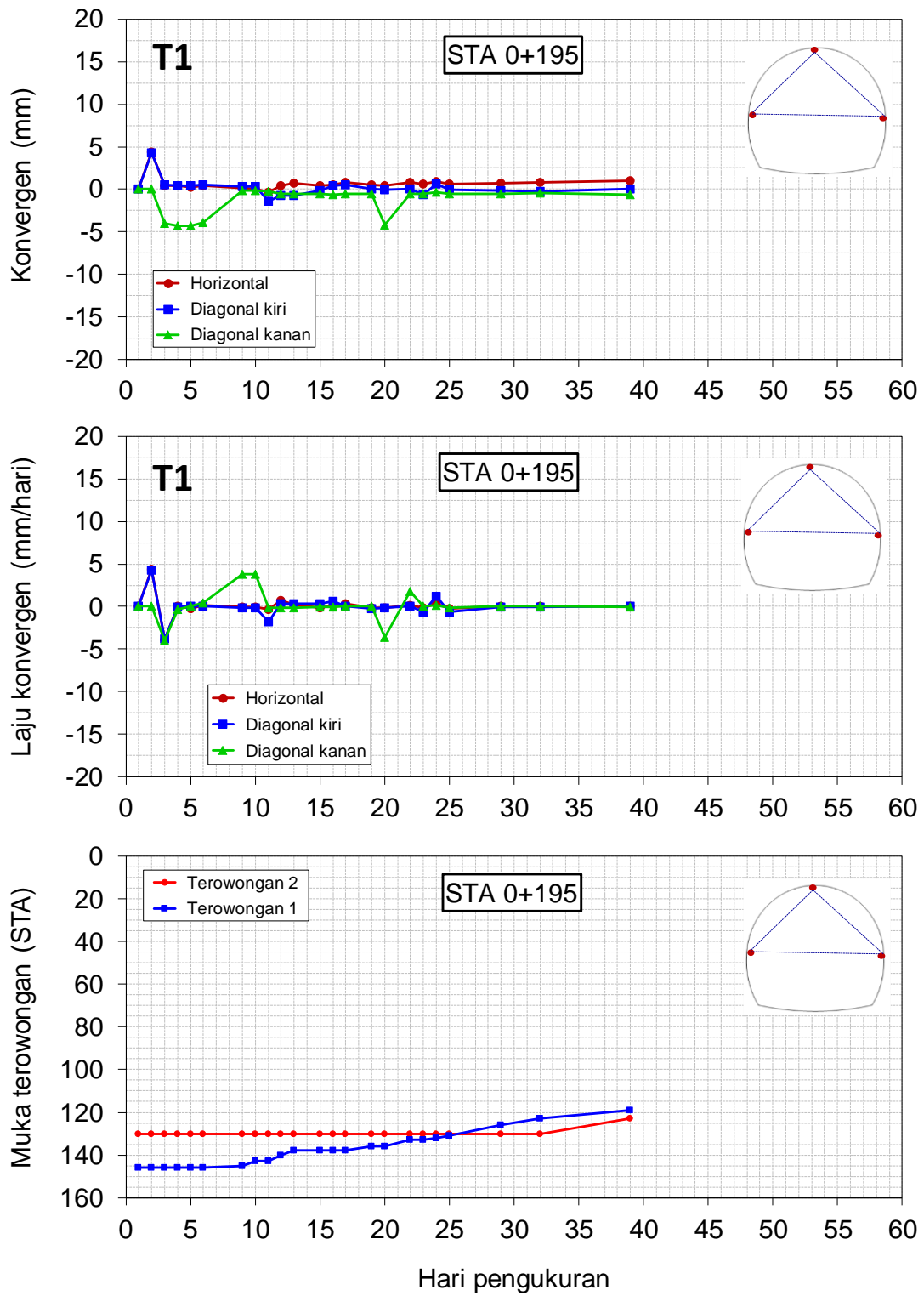
Tabel 4. Rangkuman pengukuran konvergen Terowongan 1 sampai dengan minggu ke-21 hari ke-144 tanggal 11 Juli 2019

No.	STA	Pengukuran terakhir	Konvergen (mm)			Laju konvergen (mm/hari)			Ketidakstabilan (kriteria ketidakstabilan PTFI)
			Hor.	Diag. kiri	Diag. Kanan	Hor.	Diag. kiri	Diag. Kanan	
1	215	28/03/2019	0,41	0,93	-0,27	-0,02	0,06	-0,07	<i>Negligible</i>
2	205	28/03/2019	0,37	-0,55	0,70	-0,05	0,01	-0,09	<i>Negligible</i>
3	195	28/03/2019	1,01	0,03	-0,65	0,02	0,04	-0,04	<i>Negligible</i>
4	185	28/03/2019	0,53	3,19	-0,43	-0,09	-0,07	-0,06	<i>Negligible</i>
5	175	04/07/2020	-0,84	-2,41	-0,48	-0,21	-0,07	-0,20	<i>Negligible</i>
6	165	01/04/2019	0,23	-0,38	-0,60	0,00	-0,05	0,00	<i>Negligible</i>
7	155	04/07/2019	-0,07	-1,61	-20,78	-0,01	-0,01	0,02	<i>Negligible</i>
8	145	04/07/2019	-0,81	0,75	-0,36	-0,05	-0,19	-0,18	<i>Negligible</i>
9	140	04/07/2019	-1,78	-9,99	0,00	-0,07	-0,18	-0,18	<i>Negligible</i>
10	135	13/05/2019	-3,82	-9,02	3,06	-0,01	-0,51	0,44	<i>Negligible</i>
11	125	27/05/2019	-2,99	-3,79	-0,86	-0,11	-1,22	0,56	<i>Negligible to Moderate</i>
12	125	27/05/2019	-2,99	-3,79	-0,86	-0,11	-1,22	0,56	<i>Negligible to Moderate</i>
13	120	09/05/2019	54,56	0,52	130,54	3,82	0,00	9,28	<i>Negligible to Extremely severe</i>
14	115	09/05/2019	52,05	2,46	16,84	2,51	0,10	0,79	<i>Negligible to Severe</i>

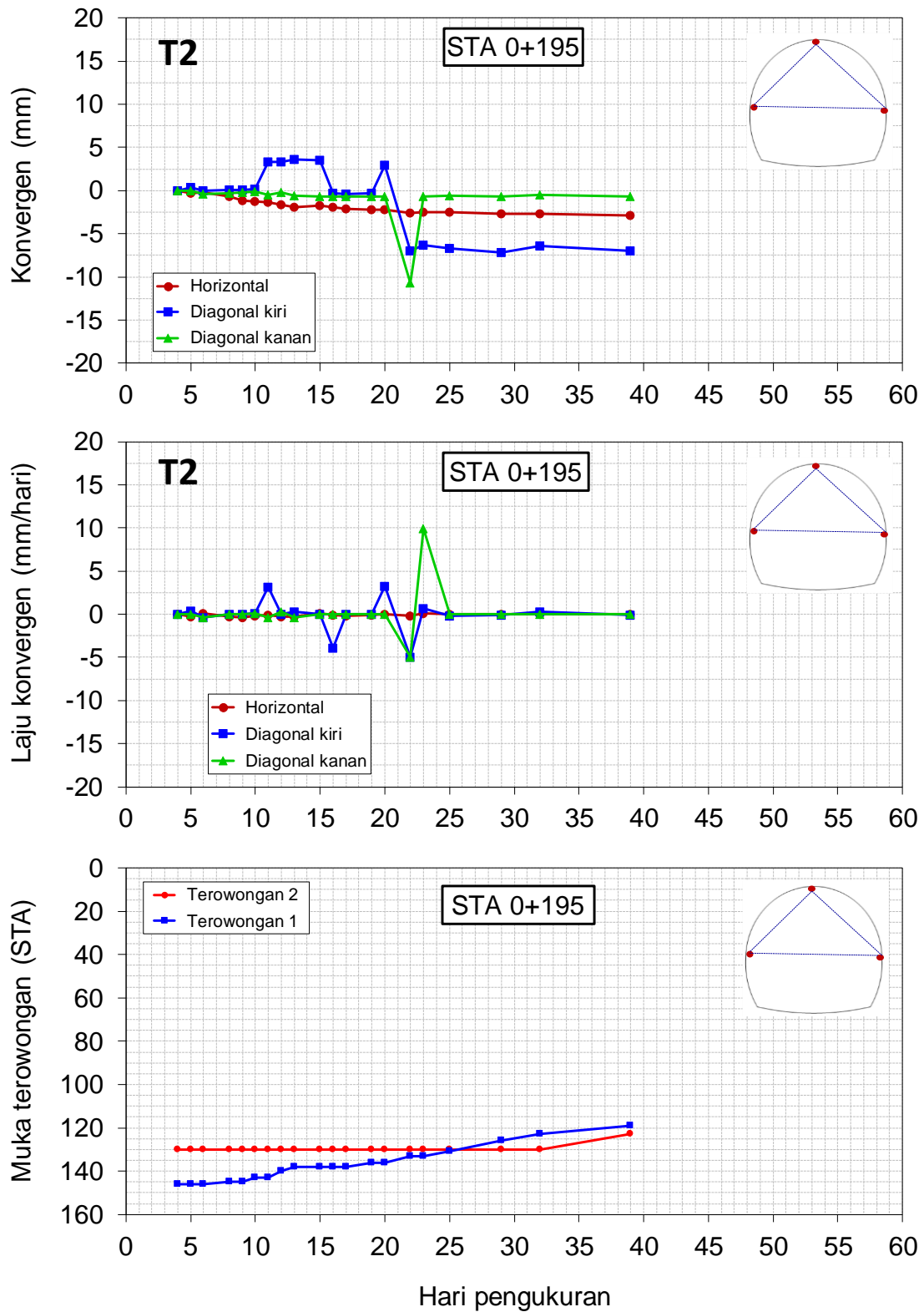
Tabel 5. Rangkuman pengukuran konvergen Terowongan 2 sampai dengan minggu ke-21 hari ke-144 tanggal 11 Juli 2019

No.	STA	Pengukuran terakhir	Konvergen (mm)			Laju konvergen (mm/hari)			Ketidakstabilan (kriteria ketidakstabilan PTFI)
			Hor.	Diag. kiri	Diag. Kanan	Hor.	Diag. kiri	Diag. Kanan	
1	205	28/03/2019	-1,11	-0,46	-0,44	-0,06	-0,03	-0,03	<i>Negligible</i>
2	195	28/03/2019	-2,91	-6,96	-0,71	-0,02	-0,08	-0,03	<i>Negligible</i>
3	185	28/03/2019	9,19	38,80	-0,73	0,03	-0,07	-0,03	<i>Negligible</i>
4	175	22/04/2019	-1,51	-5,90	-0,24	-0,02	0,09	0,05	<i>Negligible</i>
5	165	22/04/2019	-3,66	-1,04	-2,77	0,13	0,76	0,66	<i>Negligible</i>
6	155	11/04/2019	-0,52	-3,20	-0,62	0,01	-0,69	-0,05	<i>Negligible</i>
7	145	23/05/2019	-8,01	-5,41	-5,90	-0,02	0,08	-0,54	<i>Negligible</i>
8	135	23/05/2019	-4,81	-1,28	-9,94	-0,11	0,04	0,04	<i>Negligible</i>
9	130	23/05/2019	-0,38	0,26	1,90	-0,08	-0,03	0,77	<i>Negligible</i>
10	125	16/05/2019	-0,65	-0,12	-0,27	-0,06	-0,01	-0,03	<i>Negligible</i>
11	120	23/05/2019	-0,72	-0,74	-1,29	0,11	-0,16	-0,15	<i>Negligible</i>
12	115	23/05/2019	-1,63	0,30	0,01	-0,17	-0,04	-0,14	<i>Negligible</i>
13	110	20/05/2019	5,38	8,79	-13,02	-0,06	0,35	0,06	<i>Negligible</i>
14	105	16/05/2019	-0,19	-0,41	-0,49	-0,02	-0,04	-0,05	<i>Negligible</i>
15	100	16/05/2019	-0,51	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	<i>Negligible</i>
16	95	16/05/2019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<i>Negligible</i>
17	90	16/05/2019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<i>Negligible</i>

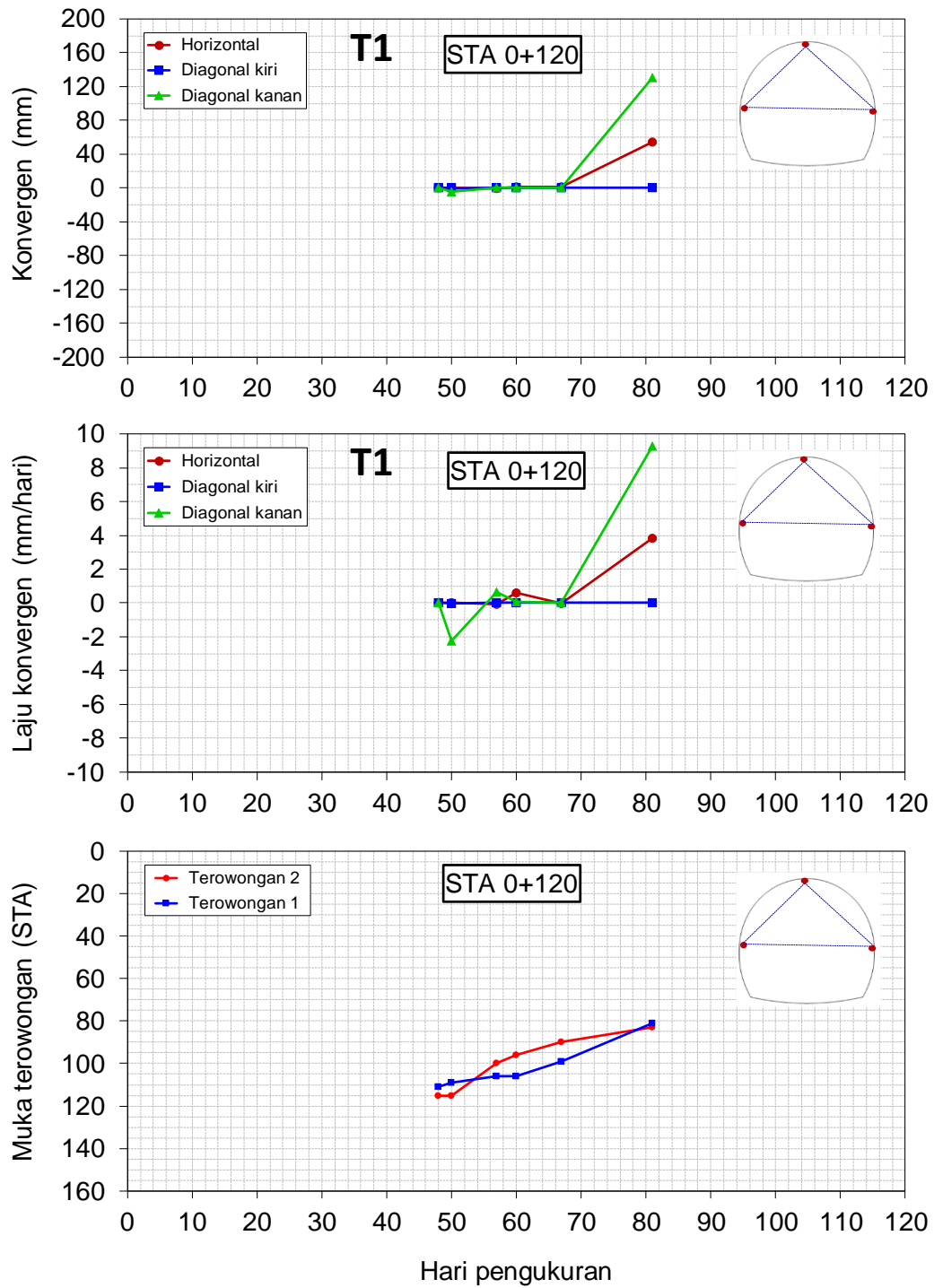
- Walaupun terjadi lonjakan laju konvergen di beberapa STA, berdasarkan observasi di lapangan diketahui bahwa baut konvergen di STA tersebut kendor dan dapat dengan mudah digoyang. Contoh STA yang dimaksud adalah STA 0+115, STA 0+120, dan STA 0+125 di T1. Gambar 7 menunjukkan kurva laju konvergen di STA 0+120 di T1.
- Walaupun terdapat STA yang menunjukkan laju dengan kriteria "*Extremely severe*", yaitu STA 0+120 di T1, laju tersebut tidaklah seragam di ketiga bentangan yang diukur (horizontal, diagonal kiri, dan diagonal kanan). Artinya, di sebuah penampang STA yang diukur, laju konvergen yang tinggi di suatu titik pengukuran tidak didukung oleh laju konvergen yang serupa di titik lainnya di penampang atau STA yang sama. Terlebih lagi, selain tidak ditemukannya potensi ketidakstabilan secara visual selama pengukuran, laju konvergen yang tinggi tersebut tidak terjadi secara kontinyu. Sehingga, berdasarkan laju konvergenya, suatu STA yang memiliki kriteria laju konvergen "*Extremely severe*" tidak serta-merta dapat dianggap tidak stabil apabila tren laju konvergen di hari pengukuran berikutnya tidak diketahui. Sebagai contoh, pengukuran konvergen di STA 0+120 di T1 dihentikan pada tanggal 9 Mei 2019 dikarenakan adanya kerusakan baut konvergen.



Gambar 5. Hasil pengukuran konvergen di STA 0+195 T1



Gambar 6. Hasil pengukuran konvergen di STA 0+195 T2



Gambar 7. Hasil pengukuran konvergen di STA 0+120 T1

4. Khusus di STA 0+120 di T1, kurva laju konvergen kemudian di-overlay dengan data intensitas curah hujan di Bandung berdasarkan data curah hujan yang diberikan oleh BMKG Bandung (Gambar 8). Dapat dilihat bahwa kenaikan laju konvergen di pengukuran sebelumnya sesuai dengan kenaikan intensitas curah hujan di sekitar terowongan pada hari pengukuran, yaitu sebesar 2 mm/jam. Intensitas ini termasuk dalam kategori hujan ringan, sehingga lapisan batuan pada terowongan berpotensi menjadi jenuh.

Sakurai (1983) dan Hoek dan Marinos (2000) mengajukan konsep regangan kritis (*critical strain*) terowongan, dimana terowongan dikategorikan akan memiliki permasalahan kestabilan apabila regangan yang dialami dinding dan atap terowongan melewati nilai regangan kritisnya. Dengan menggunakan konsep ini untuk melihat kestabilan Terowongan Nanjung, hasil pengukuran konvergen pada Tabel 4 dan Tabel 5 kemudian digambarkan ke dalam kurva regangan kritis yang diusulkan oleh Sakurai (1983) dan Hoek dan Marinos (2000) pada Gambar 9.

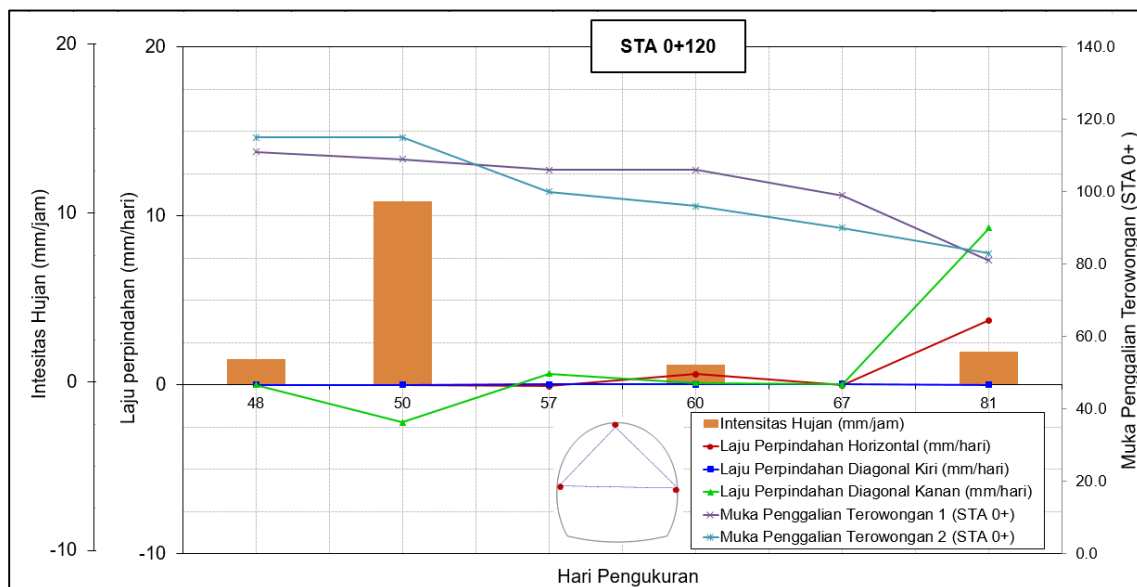
Nilai UCS massa batuan yang digali adalah 0,6 MPa, tegangan *in situ* adalah 0,4 MPa (kedalaman

terowongan sekitar 20 meter dari permukaan), panjang bentangan horizontal adalah 9,6 meter, sedangkan panjang bentangan diagonal kiri dan kanan adalah 6,8 meter.

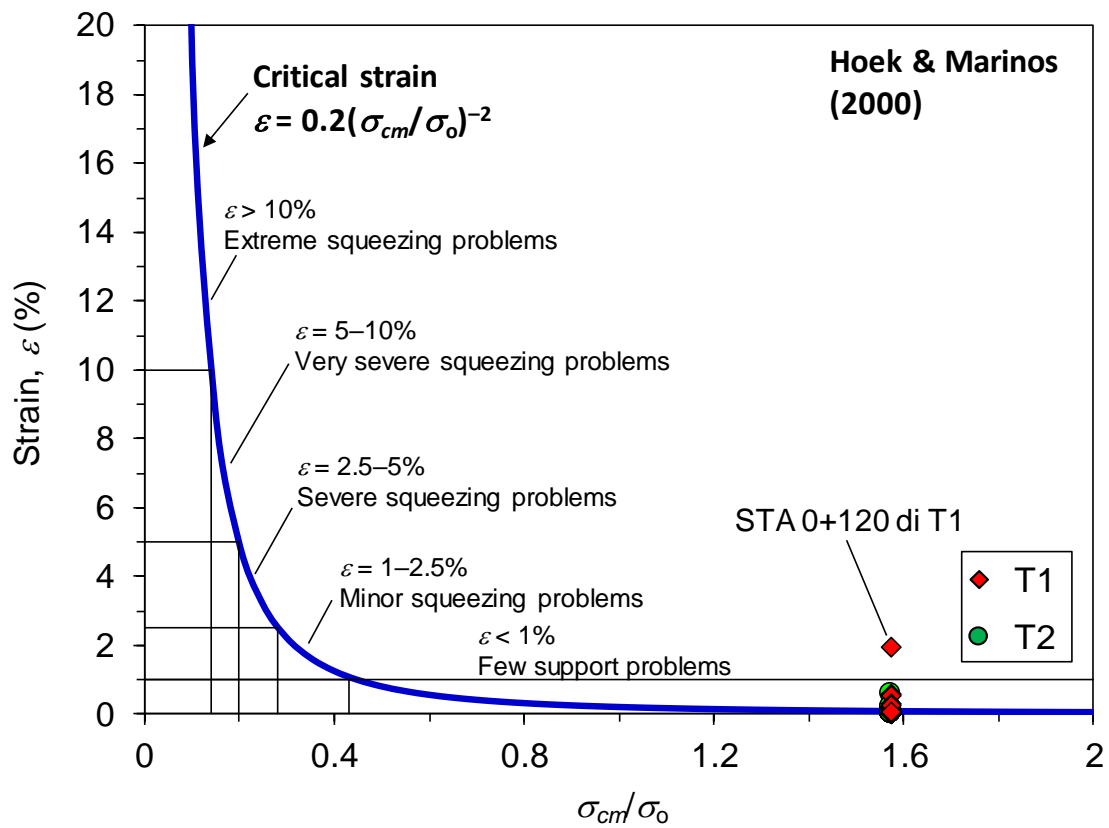
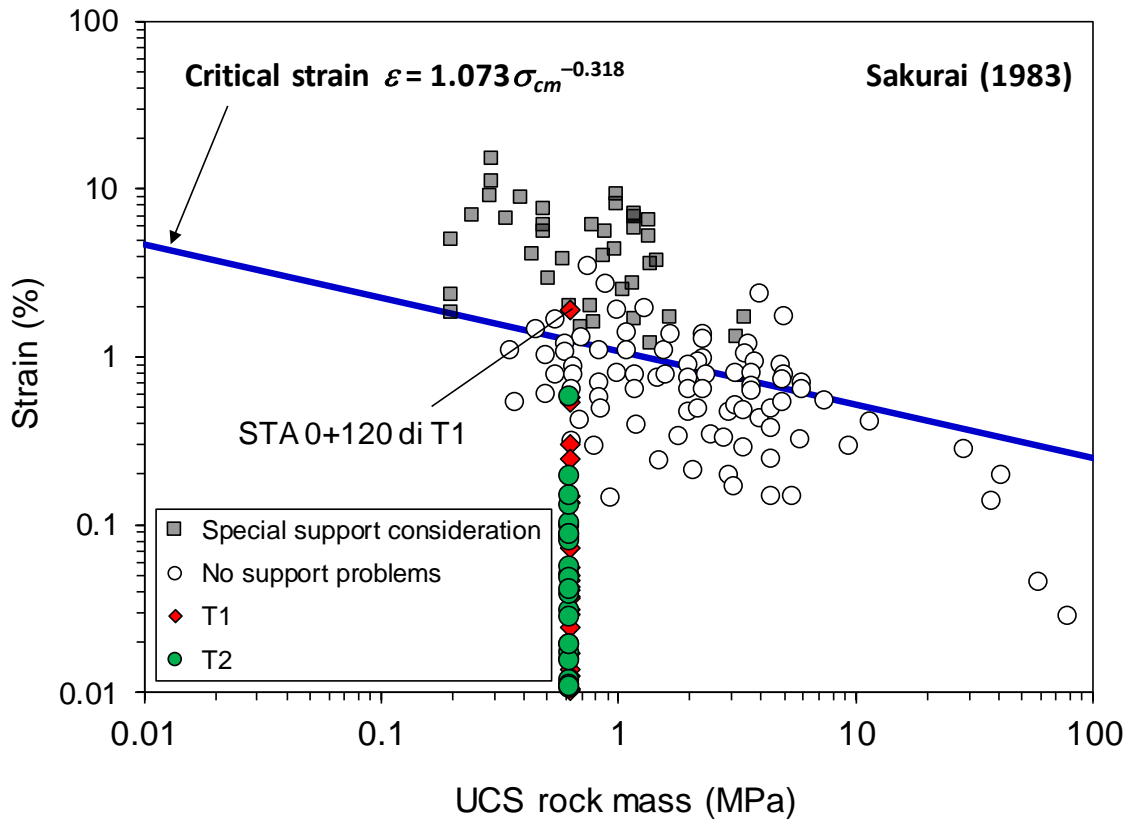
Berdasarkan kurva regangan kritis dari Sakurai (1983) dan Hoek dan Marinos (2000), Terowongan Nanjung berada dalam kondisi stabil. Hanya satu STA yang memiliki regangan di atas garis regangan kritis, yaitu STA 0+120 di T1 yang memiliki *strain* sebesar 1,9%.

Walaupun demikian, hal ini tidak serta-merta menunjukkan bahwa STA tersebut membutuhkan penyangga tambahan karena tren laju konvergen di hari pengukuran berikutnya harus didapatkan terlebih dahulu (seperti yang dibahas di Poin 3 di atas).

Selain di STA 0+120 di T1, STA lainnya yang diukur memiliki besar regangan di bawah garis regangan kritis dan bernilai kurang dari 1%. Oleh karena itu, berdasarkan Sakurai (1983), Terowongan Nanjung dapat dikategorikan sebagai "*Tunnels with no significant support problems*", sedangkan berdasarkan Hoek dan Marinos (2000), Terowongan Nanjung dapat dikategorikan sebagai terowongan dengan "*Few support problems*".



Gambar 8. Kurva laju konvergen di STA 0+120 di T1 yang di-overlay dengan data intensitas curah hujan



Gambar 9. Distribusi regangan hasil pengukuran konvergen Terowongan Nanjung pada kurva Sakurai (1983) dan Hoek dan Marinos (2000)

KESIMPULAN

Hasil pengukuran konvergen dan analisis terhadap regangan kritis menunjukkan bahwa Terowongan Nanjung berada pada kondisi stabil. Tren laju konvergen Terowongan Nanjung tidak menunjukkan adanya potensi ketidakstabilan. Hal ini juga diperkuat dengan hasil observasi visual di seluruh STA yang diukur. Walaupun terdapat STA yang menunjukkan laju konvergen dengan kriteria "*Extremely severe*", yaitu STA 0+120 di T1, laju tersebut tidaklah seragam di ketiga bentangan yang diukur (horizontal, diagonal kiri, dan diagonal kanan) dan tidak terjadi secara kontinu. Oleh karena itu, STA tersebut tidak serta-merta dapat dikatakan tidak stabil.

Hasil pengukuran konvergen juga diperkuat dengan hasil analisis regangan kritis berdasarkan kurva Sakurai (1983) dan Hoek dan Marinos (2000). Selain di STA 0+120 di T1, STA lainnya yang diukur memiliki besar regangan di bawah garis regangan kritis dan bernilai kurang dari 1%. Oleh karena itu, berdasarkan Sakurai (1983), Terowongan Nanjung dapat dikategorikan sebagai "*Tunnels with no significant support problems*", sedangkan berdasarkan Hoek dan Marinos (2000), Terowongan Nanjung dapat dikategorikan sebagai terowongan dengan "*Few support problems*".

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Wijaya Karya (Persero), Tbk dan PT. Adhi Karya (Persero), Tbk atas kerjasama yang dibangun selama kegiatan pengukuran konvergen Terowongan Nanjung serta

atas bantuannya dalam menyediakan personel dan alat selama proses pengukuran konvergen.

Penelitian ini juga dibiayai oleh Program Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Inovasi (P3MI) ITB tahun anggaran 2019 kepada Kelompok Keahlian Teknik Pertambangan, Prodi Teknik Pertambangan ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- Cording, E.J., 1974. Measurement of displacement in tunnels, in: The Second International Congress of Engineering Geology, Sao Paulo, Brazil, August 18-24, 1974. International Association for Engineering Geology and the Environment, Sao Paulo.
- Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan (FTTM), 2017. Review design of primary support of Notog tunnel BH 1440, Patikraja Sub-district-Banyumas Regency, Central Java (in Indonesian). Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Hoek, E., Marinos, P., 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Part 1: Estimating rock mass strength (November, 2000) and Part 2: Estimating tunnelsqueezing problems (December, 2000). Tunnels Tunn. Int. Part 1: 45-51, Part II: 34-46.
- Sakurai, S., 1983. Displacement measurements associated with the design of underground openings, in: Proceedings of the International Symposium of Field Measurements in Geomechanics, Zurich, Switzerland. pp. 1163-1178.
- Zhenxiang, X., 1984. A tunnel design method using field measurement data, in: Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium - Cambridge, U.K., 3-6 September 1984. British Geotechnical Society, London, pp. 221-229.