

# Analisis Numerik Perilaku Geser Sistem Sambungan pada Blok Batu Bangunan Bersejarah

## Shear Behavior of Heritage Building's Stone Block Interconnection System using Three-Dimensional Numerical Analysis

Amalia Ula Hazhiyah<sup>1,a)</sup>, Adhitya Yoga Purnama<sup>1,b)</sup> & Devi Oktaviana Latif<sup>1,c)</sup>

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Koresponden : <sup>a)</sup>amaliaula04@ugm.ac.id, <sup>b)</sup>adhitya.yoga.p@mail.ugm.ac.id & <sup>c)</sup>dv.oktaviana@ugm.ac.id

### ABSTRAK

Candi Borobudur merupakan salah satu Situs Warisan Dunia yang ditetapkan oleh UNESCO. Struktur candi yang terdiri dari batuan berundak disusun di atas bukit membentuk bangunan bertingkat yang menyerupai struktur dinding penahan tanah. Struktur batuan ini disusun dengan sistem sambungan unik antar blok batuan yang mampu menopang beban struktur di atasnya selama ratusan tahun. Berdasarkan keuntungan ini, teknologi serupa akan diterapkan untuk sistem sambungan pada dinding penahan tanah modular. Akan tetapi, belum banyak penelitian mengenai perilaku geser pada sistem sambungan blok batu ini. Metode penelitian untuk sistem sambungan blok batu ini adalah simulasi numerik perilaku geser menggunakan analisis elemen hingga tiga dimensi. Empat model yang disimulasikan meliputi blok batu tanpa sistem sambungan, blok batu dengan satu jenis sambungan, blok batu dengan dua jenis sambungan, dan blok batu dengan empat jenis sambungan untuk kemudian dibebani gaya geser satu arah yang menentukan tegangan dan regangan geser. Berdasarkan hasil analisis, sistem sambungan di blok batu secara signifikan meningkatkan ketahanan geser dibandingkan dengan blok tanpa sistem sambungan. Setiap jenis sambungan menunjukkan perilaku dan keuntungan yang berbeda saat menahan tegangan geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem sambungan blok batu dapat digunakan sebagai pengganti struktur sambungan pada dinding penahan tanah modular.

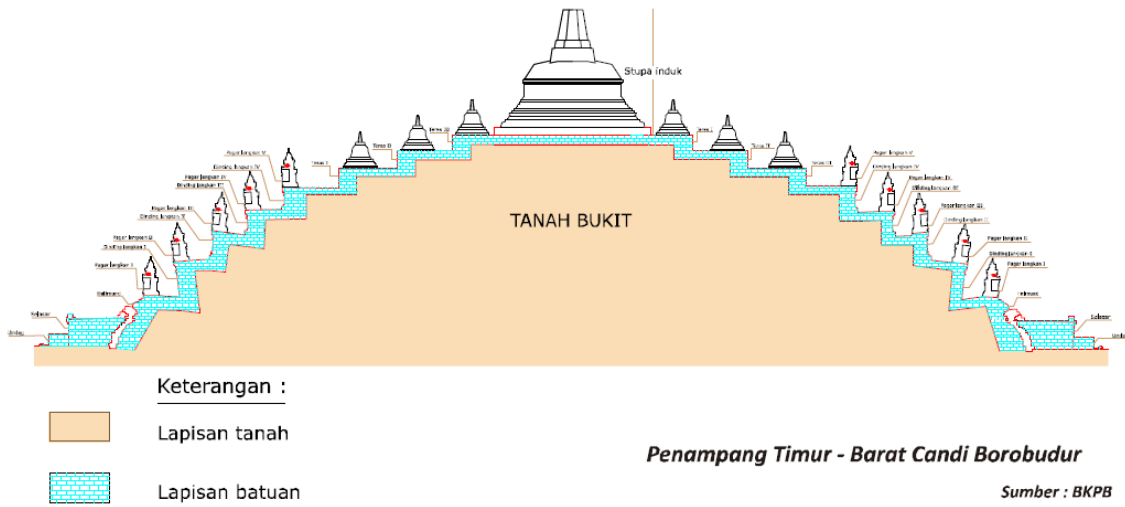
**Kata Kunci:** sistem sambungan blok batu, analisis numerik, perilaku geser

### PENDAHULUAN

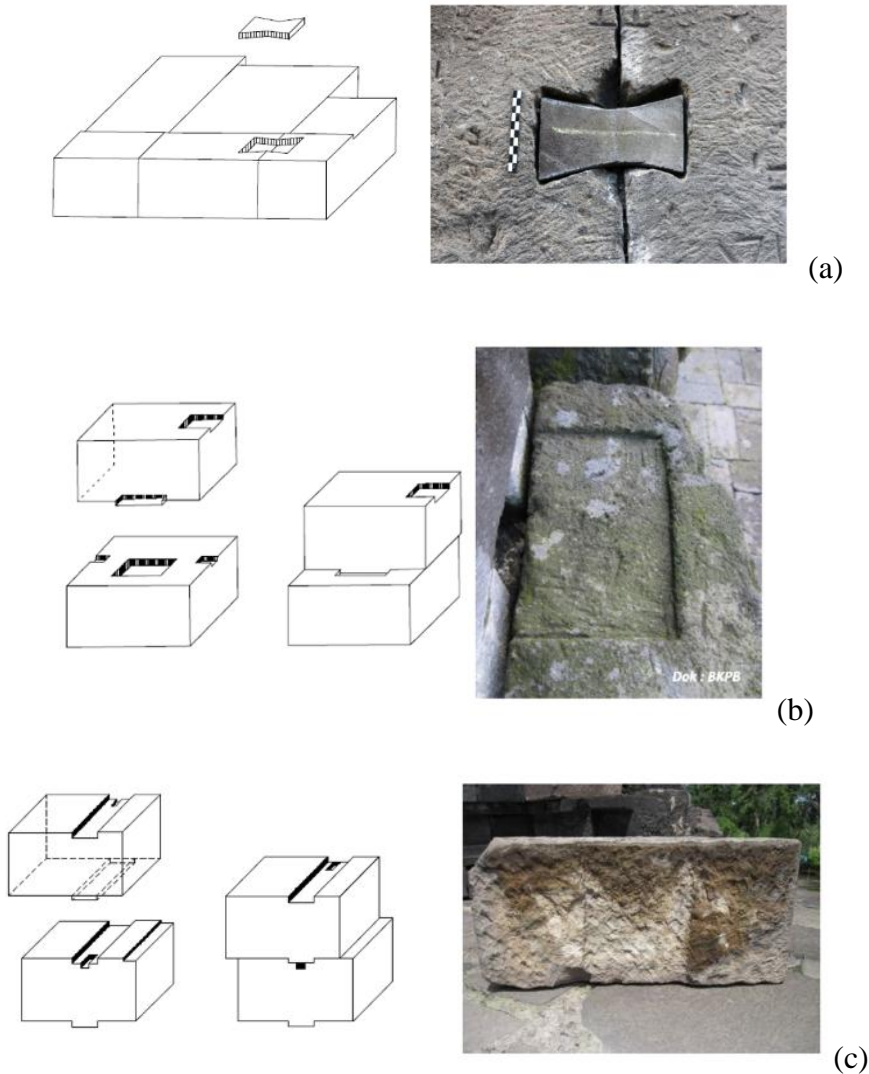
Candi Borobudur adalah salah satu Situs Warisan Dunia yang ditetapkan oleh UNESCO. Struktur Candi Borobudur dibangun dengan menggunakan blok-blok batu yang disusun di atas bukit dengan struktur berundak yang menyerupai dinding penahan tanah, seperti pada Gambar 1. Bangunan candi yang stabil, juga tercermin pada blok-blok batu pada struktur candi yang tersusun relatif stabil hingga saat ini. Blok batu pada Candi Borobudur disusun dengan tipe takikan dan pengunci yang khas dimana pola inilah yang membuat struktur candi stabil (Puspitasari, et al., 2010).

Mekanisme sambungan antar blok batu yang digunakan adalah tanpa perekat atau biasa disebut sebagai *dry masonry building*, dimana stabilitas struktur candi ditentukan oleh berat blok batu itu sendiri (Brahmantara, 2008). Candi Borobudur tersusun atas batuan andesit dan memiliki pola susun horisontal dan vertikal. Ukuran blok batuan Panjang 40-50 cm, tebal 30-40 cm, dan tinggi 20-25 cm. Beberapa contoh jenis sambungan batuan yang ditemukan di

Candi Borobudur adalah tipe ekor burung (Gambar 2a), tipe takik (Gambar 2b), serta tipe alur dan lidah (Gambar 2c).



**Gambar 1.** Penampang melintang struktur Candi Borobudur (Sumber: Puspitasari, et al., 2010)



**Gambar 2.** Jenis sambungan pada struktur blok batu Candi Borobudur (a) tipe ekor burung; (b) tipe takik; (c) tipe alur dan lidah (Sumber: Puspitasari, et al., 2010)

Sampai saat ini, sistem susunan blok batu dengan sambungan tanpa perekat ini telah mendukung stabilitas yang kuat untuk bangunan struktur candi. Menurut Jeslin dan Padmanaban (2020) blok yang saling mengunci memiliki kekuatan melebihi batu bata sekitar 15-30%. Sistem ini perlu dikembangkan lebih lanjut untuk mengetahui dampak kekakuan bangunan jika digunakan sistem sambungan perekat. Dimana sistem dengan perekat ini rentan terhadap gaya horisontal atau vertikal ketika terkena beban gempa.

Sejumlah penelitian tentang sambungan antar blok telah dilakukan. Namun, seiring dengan banyaknya penggunaan blok *interlocking* sebagai pengganti dinding bata, penelitian menunjukkan bahwa bata *interlocking* beton modular tidak memerlukan perekat dan lebih terjangkau dibanding dinding bata (Rahmawati dan Sumarni, 2014). Inovasi blok *interlocking* ini menyisihkan kebutuhan mortar dalam pembangunan dinding, sekaligus mengurangi dampak beban gempa pada kemampuan dinding menahan gaya lateral (Kumar dan Vigneshvar, 2014). Perilaku unit blok yang saling mengunci (*interlocking*) untuk pasangan dinding telah dianalisis secara numerik dan eksperimen di laboratorium (Hidayat dan Teguh, 2018).

Menurut Hidayat dan Teguh (2018), hasil analisis perilaku geser dari simulasi numerik blok *interlocking* ini sebanding dengan eksperimen di laboratorium. Sampai saat ini, susunan blok modular dari beton pracetak telah digunakan sebagai dinding penahan tanah karena kemudahan pemasangan dan kekuatan sambungannya, seperti yang telah dilaksanakan oleh para industri (Redi-Rock International, 2016). Oleh karena itu, penelitian ini akan fokus pada sambungan tanpa perekat dari struktur dinding penahan tanah modular. Kelebihan dan kekurangan penggunaan sistem sambungan blok batu pada struktur bangunan ini belum terperinci. Sistem sambungan blok batuan yang disimulasikan dalam penelitian ini menggunakan metode elemen hingga tiga-dimensi (3D) untuk mengamati perilaku geser sambungan blok batu, sehingga diperoleh desain dan bentuk sambungan yang optimum.

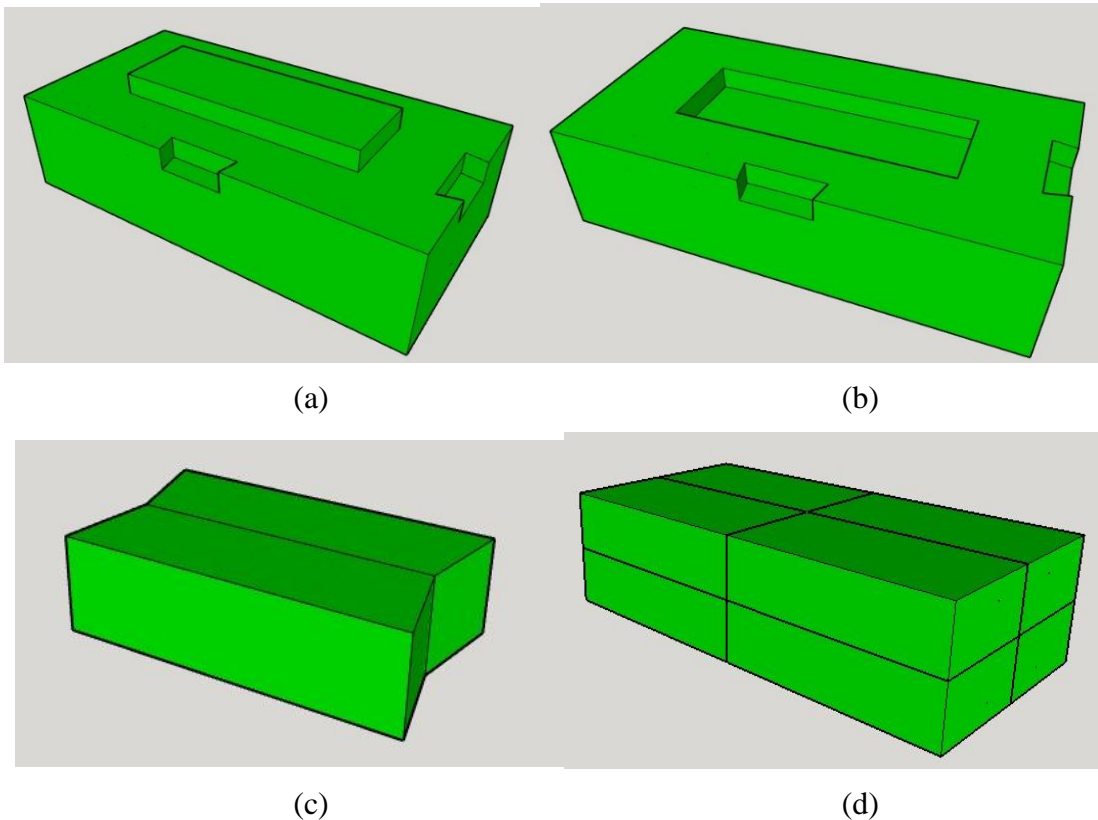
## METODA PENELITIAN

Sistem sambungan (*interlocking*) struktur blok batu diteliti dengan simulasi perilaku geser dari sambungan blok batu menggunakan metode numerik berbasis elemen hingga tiga-dimensi. Empat model yang digunakan dalam simulasi antara lain blok batu tanpa sambungan, blok batu dengan satu jenis sambungan, blok batu dengan dua jenis sambungan, dan blok batu dengan tiga jenis sambungan yang dibebani gaya geser satu arah untuk mengaplikasikan tegangan dan regangan geser pada blok batu.

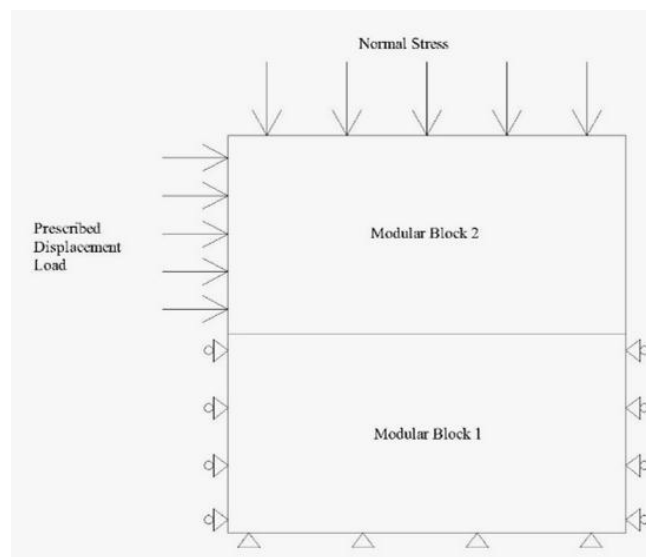
Analisis numerik blok batu ini dilakukan dengan menggunakan program ABAQUS 3D untuk simulasi sistem struktur. Program ABAQUS digunakan untuk simulasi deformasi struktur yang menentukan tegangan, regangan, dan deformasi struktur blok batu untuk setiap jenis model sambungan. ABAQUS adalah program analisis elemen hingga yang sering digunakan di industri otomotif, dirgantara, dan manufaktur (ABAQUS CAE, 2017). Akademisi dan para peneliti biasanya menggunakan ABAQUS untuk pemodelan elemen hingga, karena mampu memodelkan material yang kompleks dan dapat disesuaikan dengan kondisi alam. Banyak peneliti menggunakan program ABAQUS untuk simulasi perilaku struktur. Pemodelan struktur sering dilakukan melalui penggunaan elemen solid tiga dimensi (Khennane, 2013). Analisis numerik perilaku blok *interlocking* menggunakan program ABAQUS diperoleh hasil yang mendekati dengan yang diperoleh dari eksperimen di laboratorium (Ayed, et al., 2016).

Untuk menentukan batas-batas blok, struktur batu dimodelkan sebagai bahan elastis linier. Interaksi antara dua permukaan dapat ditentukan dengan menggunakan modul interaksi sesuai dengan kondisi eksisting. Perilaku geser sistem sambungan blok batu disimulasikan menggunakan pemodelan elemen hingga dengan elemen solid tiga-dimensi.

Material blok dimodelkan dengan metode uji geser langsung, berdasarkan metode uji standar untuk geser langsung (ASTM D 3080-03) dan Standar Nasional Indonesia untuk pengujian kuat geser langsung tanah (SNI 3420:2016). Program pengujian didesain untuk menentukan kapasitas perpindahan maksimum dan kegagalannya (Leiva, et al., 2016). Parameter pengujian yang digunakan adalah berat jenis beton  $24 \text{ kN/m}^3$ , modulus Young  $23500 \text{ MPa}$ , dan rasio Poisson  $0.2$ . Delapan buah blok dengan dimensi  $1 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  disusun dengan dua jenis beban pada bagian atas, yaitu beban-perpindahan dan tekanan beban lateral satu arah.



**Gambar 3.** Pemodelan sistem sambungan interlocking pada analisis numerik tiga dimensi (a) blok atas; (b) blok bawah; (c) blok sambungan ekor burung; (d) susunan blok



**Gambar 4.** Skema pemodelan blok modular dengan analisis numerik tiga dimensi

Beban-perpindahan (*displacement load*) sebesar 1 cm diaplikasikan pada sistem *prescribed displacement load*, sedangkan tekanan 5 kg/cm<sup>2</sup> diaplikasikan pada sistem *prescribed pressure loading*. Selain itu, beban normal sebesar 1 kg/cm<sup>2</sup> diaplikasikan pada simulasi tahanan geser blok batu untuk mengevaluasi perilaku geser sistem sambungan seperti terlihat pada Gambar 4. Keempat model yakni, blok batu tanpa sambungan, blok batu dengan satu sambungan, blok batu dengan dua sambungan, dan blok batu dengan tiga sambungan dibebani gaya lateral satu arah untuk menentukan tegangan dan regangan geser pada blok batu.

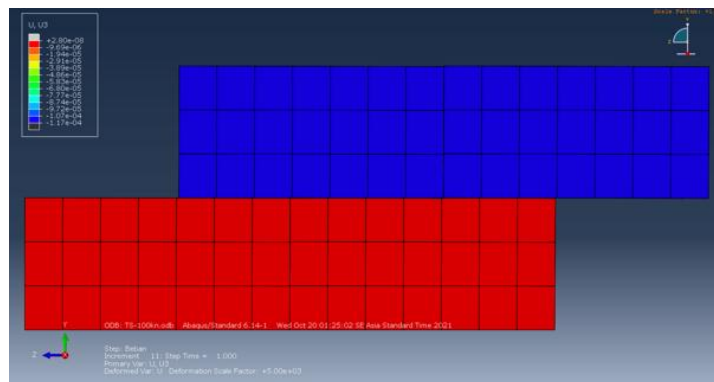
### ANALISIS PENELITIAN

Tabel 1 merangkum hasil analisis *displacement* dan tegangan geser dari hasil simulasi numerik. Hasil analisis pada sistem blok tanpa sambungan menunjukkan perpindahan sebesar 0.1170 mm. Ketika beban yang sama diterapkan pada blok dengan sambungan, nilai perpindahan berkurang drastis menjadi 0.0058 mm untuk blok dengan satu jenis sambungan, 0.0057 mm untuk blok dengan dua jenis sambungan, dan 0.0054 mm untuk blok dengan tiga jenis sambungan. Sistem sambungan dapat menahan gerakan blok yang disebabkan oleh beban *displacement* dengan menggunakan satu, dua, atau tiga jenis sambungan yang berbeda secara bersamaan. Selain itu, tegangan geser sistem blok batu dengan sambungan *interlocking* meningkat, terutama pada sambungan tanpa perekat, seperti terlihat pada Gambar 6.

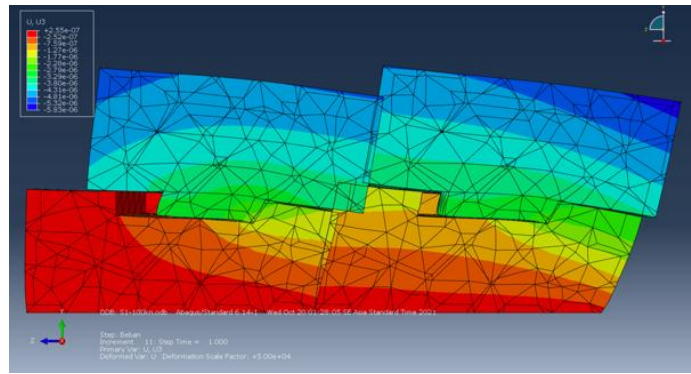
Berdasarkan hasil analisis tegangan geser, pada bagian tepi setiap sambungan memiliki tumpuan tegangan geser paling besar. Gambar 7 menggambarkan tumpuan tegangan di area sambungan, terutama di tepi sambungan tipe takik. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa sistem sambungan berperan penting dalam menahan beban lateral yang diberikan pada sistem blok.

**Tabel 1.** Rangkuman hasil analisis numerik

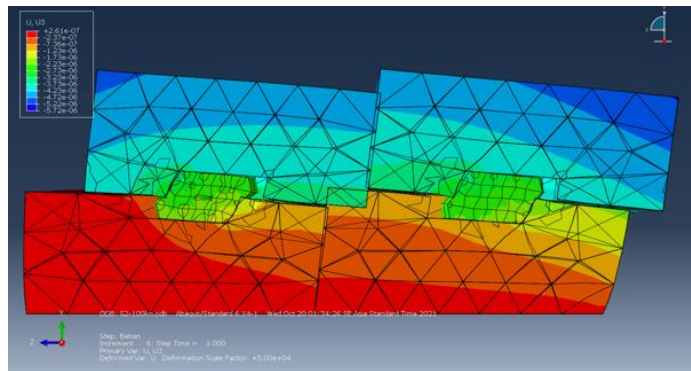
Jumlah sambungan	Displacement (mm)	Tegangan geser (kPa)
0	0,117	1,46E+02
1	0,0058	1,23E+02
2	0,0057	1,16E+02
3	0,0054	1,09E+02



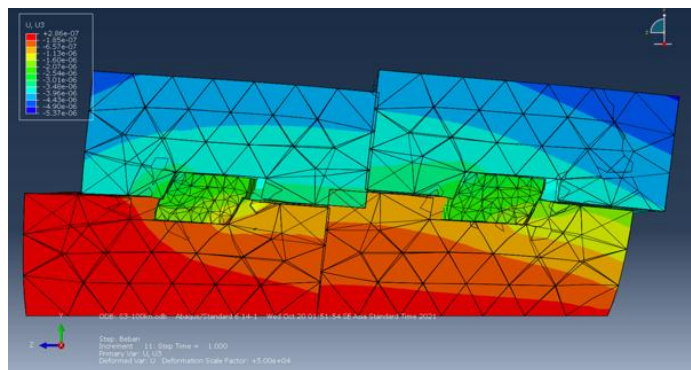
(a)



(b)

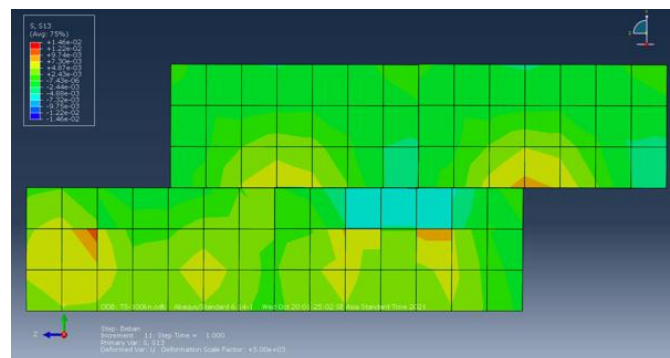


(c)

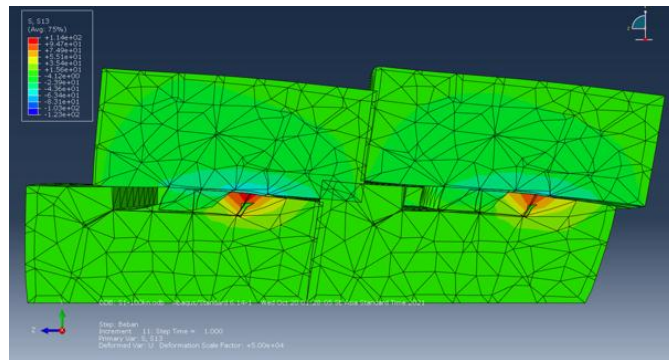


(d)

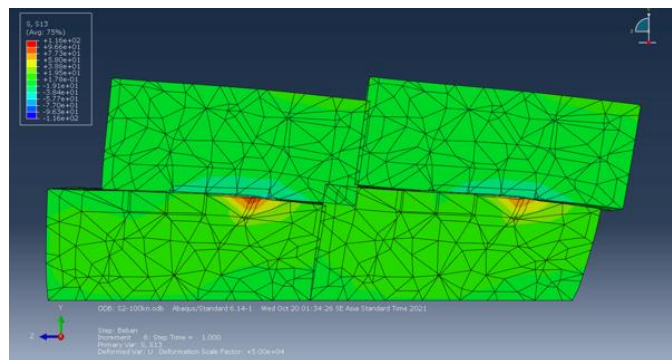
**Gambar 5.** Displacement yang terjadi pada model setelah pembebanan (a) sistem blok tanpa sambungan; (b) sistem blok dengan 1 sambungan; (c) sistem blok dengan 2 sambungan; (d) sistem blok dengan 3 sambungan



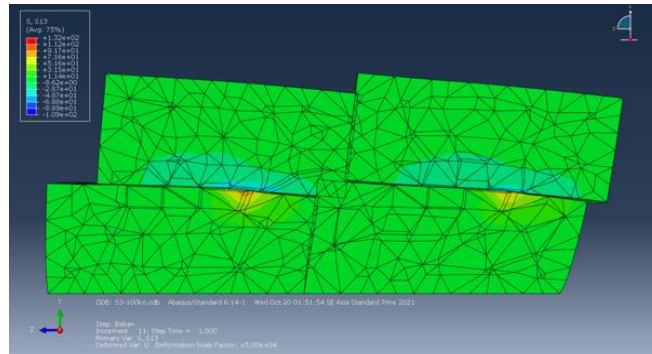
(a)



(b)



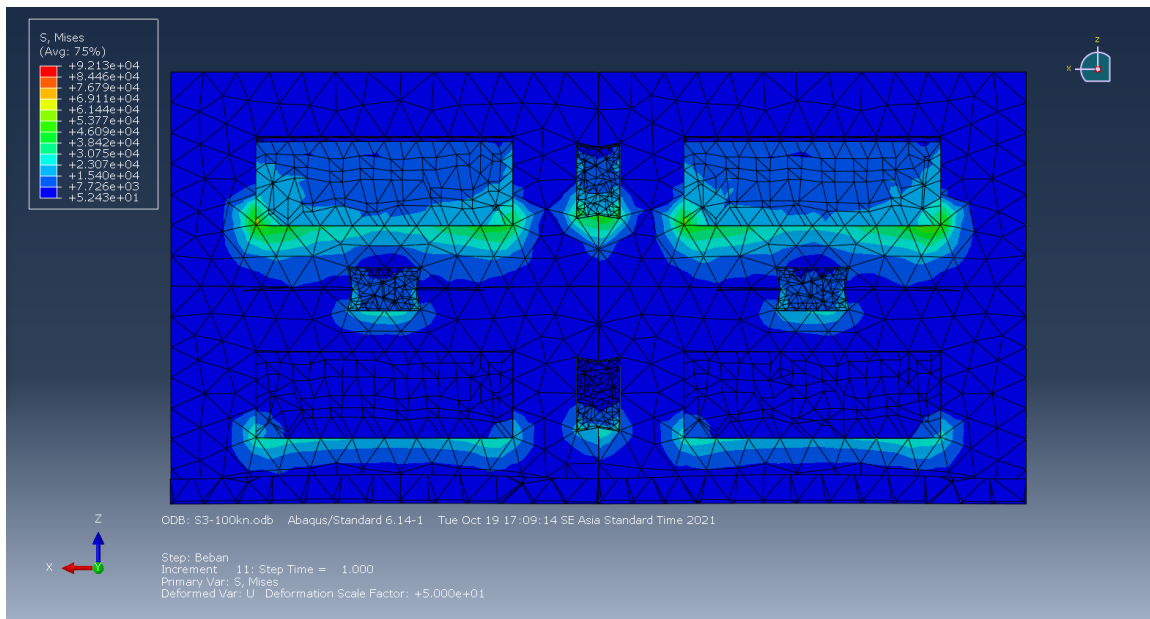
(c)



(d)

**Gambar 6.** Tegangan geser yang terjadi pada model setelah pembebanan (a) sistem blok tanpa sambungan; (b) sistem blok dengan 1 sambungan; (c) sistem blok dengan 2 sambungan; (d) sistem blok dengan 3 sambungan

Karena tumpuan tegangan yang dominan di area sambungan ini tidak diimbangi dengan kekuatan material blok yang tinggi, maka kekuatan sistem blok menjadi berkurang. Terlebih jika dipercepat dengan terjadinya pelapukan batuan, sehingga akan mengurangi kekuatan material blok. Sehingga ketika menggunakan sistem *dry masonry* ini, penggunaan bahan perlu dipertimbangkan dengan baik, terutama pada sambungan dan bentuk sistem sambungannya. Bentuk sambungan yang tidak memiliki sudut dapat meminimalkan tumpuan tegangan geser pada sambungan. Namun, perlu analisis lebih lanjut untuk menentukan material dan jenis sambungan yang paling efektif untuk digunakan sebagai sistem struktural atau sistem perkuatan dinding penahan tanah.



**Gambar 7.** Tumpuan tegangan yang terjadi pada sambungan blok

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik, penerapan sistem sambungan (*joint*) pada blok batu dapat meningkatkan kuat geser di sistem blok yang tidak menggunakan sistem perekat seperti semen atau material lainnya. Penerapan sistem sambungan ini juga sangat mudah untuk diterapkan, seperti pada sistem Candi Borobudur. Dimana sistem yang digunakan di Candi Borobudur dapat menahan beban layanan, serta beban gempa hingga ratusan tahun lebih. Namun, dari penelitian ini ditemukan bahwa terdapat tumpuan atau konsentrasi tegangan geser di area sambungan, yang memerlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan material dan jenis sambungan yang paling efektif untuk diadaptasi sebagai sistem struktural ataupun perkuatan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] ABAQUS CAE. (2017). *Abaqus 6.14 Abaqus/Cae User's Guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA
- [2] Ayed, H.B., Limam, O., Aidi, M., Jelidi, A. (2016). "Experimental and Numerical Study of Interlocking Stabilized Earth Blocks Mechanical Behavior". *Journal of Building Engineering*. Vol. 7. Hlm: 207-216.
- [3] ASTM D 3080-03. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- [4] Brahmantara (2008). "Pengaruh Gaya Gempa terhadap Kestabilan Struktur Pola Susun Batu Candi". *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*. Vol. 2, No. 1, Desember 2008, Hlm: 37-39.
- [5] Habsya, C., Rahmawati, A., Sumarni, S. (2014). "Lockbrick Modular Beton untuk Alternatif Bahan Dinding yang Memenuhi Mutu SNI dengan Biaya Murah". *Jurnal Arsitektur Sinektika*. Vol. 14, No. 2, Juli 2014, Hlm: 234-242.
- [6] Hidalgo-Leiva, D.A., Barbat, A.H., Pulades, L.G., Garcia, D. (2016). "Experimental analysis of in-plane shear strength of reinforced concrete masonry walls and its seismic behavior". *Brick and Block Masonry: Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference*, Hlm: 2295-2302.



- [7] Hidayat, V.S. (2018). Analisis Numerik Perilaku Dinding Batako-Kait dengan Metode Elemen Hingga. *Tugas Akhir Sarjana Teknik Sipil*. Universitas Islam Indonesia.
- [8] Jeslin, Jeba A., Padmanaban, I. (2020). “Experimental Studies on Interlocking Block as Wall Panels”. *Materials Today: Proceedings*. 21. Hlm: 1-6.
- [9] Khennane, A. (2013). *Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus*. CRC Press. Boca Raton.
- [10] Kumar, P.T., Vigneshvar, R. (2014). “Development of an Innovative Interlock Blocks”. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, Vol. 1, No. 5, Hlm. 114-118.
- [11] Puspitasari, Dian E., Setyawan, H., Rini, Winda D.P. (2010). *Kearsitekturan Candi Borobudur*. Balai Konservasi Peninggalan Borobudur. Magelang.
- [12] Redi-Rock International. (2016). “Positive Connection System Design Guide”. [www.redi-rock.com](http://www.redi-rock.com)
- [13] SNI 3420-2016. *Metode Uji Kuat Geser Langsung tidak Terkonsolidasi dan tidak Terdrainase*.

