Analisis Stabilitas dan Efisiensi Biaya *Corrugated Concrete Sheet Pile* Pada Perencanaan Turap Desa Sepakat

Dody Bimantara Daksa[1]
[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda
E-mail: dodaxa1@gmail.com
Hence Michael Wuaten[1]
[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda
E-mail: hmw.wuaten@gmail.com
Maraden Panjaitan[1]
[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda
E-mail: maradenpanjaitan27@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis stabilitas dan efisiensi biaya Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) pada perencanaan turap di Desa Sepakat, Kecamatan Loa Kulu. Penelitian ini bertujuan menganalisis stabilitas dan efisiensi konstruksi Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) pada empat formasi perkuatan melalui pemodelan numerik serta perbandingan biaya dan waktu untuk menentukan alternatif desain paling optimal. Empat formasi perkuatan diuji: (1) 1 line, (2) 2 line dengan Tie-Rod, (3) 1 line dengan angkur single pile, dan (4) 1 line dengan pilecap. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga berbasis PLAXIS 2D dengan input parameter tanah hasil uji sondir, bor log, dan laboratorium. Hasil menunjukkan Formasi 1 memiliki faktor keamanan rendah (SF 1,15) dan deformasi besar, sedangkan Formasi 2 lebih baik (SF 1,30) namun biaya tinggi. Formasi 3 memberikan stabilitas optimal (SF 2,04) dengan deformasi lateral minimum serta biaya moderat Rp 4,403 miliar. Formasi 4 tidak signifikan meningkatkan stabilitas (SF 1,13) dan menghasilkan deformasi besar. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa formasi dengan angkur single pile merupakan alternatif paling efektif dan efisien untuk turap CCSP di lokasi penelitian.
Kata kunci: *Efisiensi Biaya, Corrugated Concrete Sheet Pile, Stabilitas Turap*

Abstract

This study evaluates the stability and cost efficiency of Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) in riverbank wall planning at Sepakat Village, Loa Kulu District. This study aims to analyze the stability and construction efficiency of Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) across four reinforcement formations through numerical modeling and comparative assessment of cost and duration to determine the most optimal design alternative. Four reinforcement formations were analyzed: (1) single line, (2) double line with Tie-Rod, (3) single line with single pile anchor, and (4) single line with pilecap. Numerical analysis was conducted using PLAXIS 2D finite element method with soil parameters obtained from field and laboratory tests. Results indicate that Formation 1 shows low Safety factor (SF 1.15) and large deformation, while Formation 2 improves stability (SF 1.30) but requires the highest cost. Formation 3 demonstrates optimal performance (SF 2.04) with minimal lateral displacement and moderate cost of Rp 4.403 billion. Formation 4 provides no significant improvement (SF 1.13) and produces large deformation. The findings conclude that the single pile anchor formation is the most effective and cost-efficient alternative for CCSP riverbank wall design at the study site.
Keywords: *Corrugated Concrete Sheet Pile, Cost Efficiency, Retaining Wall Stability*

1. PENDAHULUAN

Struktur penahan tanah di kawasan tepi sungai memiliki peran strategis dalam menjaga stabilitas lereng, mengendalikan erosi, serta melindungi infrastruktur di sekitarnya. Tekanan tanah lateral, fluktuasi muka air, dan kondisi tanah jenuh air dapat meningkatkan risiko kelongsoran apabila tidak ditangani dengan sistem perkuatan yang memadai [1]. Oleh karena itu, pemilihan tipe dan konfigurasi struktur penahan tanah harus mempertimbangkan stabilitas global serta interaksi tanah–struktur.

Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) merupakan salah satu sistem turap yang banyak digunakan karena memiliki kekakuan lentur tinggi dan ketahanan terhadap lingkungan agresif dibandingkan material baja [2]. Kinerja CCSP dipengaruhi oleh kedalaman penetrasi, konfigurasi penanaman, serta sistem perkuatan tambahan seperti *Tie-Rod* atau angkur [3]. Variasi konfigurasi tersebut menghasilkan respons stabilitas yang berbeda terhadap faktor keamanan dan deformasi lateral.

Lokasi penelitian berada di Desa Sepakat, Kecamatan Loa Kulu, pada koridor tepi sungai yang berbatasan dengan Jalan S. Parman. Kawasan ini strategis namun rentan terhadap gerusan dan longsoran akibat fluktuasi debit sungai. Penataan turap yang aman tidak hanya penting secara teknis, tetapi juga mendukung pengembangan ruang terbuka publik berbasis waterfront. Dengan demikian, keandalan struktur penahan tanah menjadi prasyarat bagi keberhasilan pengembangan Kawasan. Dalam praktik perencanaan, satu konfigurasi perkuatan belum tentu paling efektif. Evaluasi beberapa alternatif formasi diperlukan untuk memastikan struktur memenuhi [4]. Selain itu, keterbatasan anggaran dan waktu pada proyek skala desa menuntut adanya analisis efisiensi biaya dan durasi pekerjaan [5]. Beberapa penelitian membahas mengenai penggunaan CCSP dan dianalisis menggunakan analisis numerik [1], [2], [3], [6], [7]. Astuti dan Prativi (2029) [3] juga mengevaluasi stabilitas CCSP sebagai abutmen jembatan dan menentukan kedalaman penanaman optimum. Irawan, et al. (2025) [6] menganalisis stabilitas CCSP, CSP, dan *Tie-Rod* pada dermaga dengan hasil nilai SF, defleksi, dan *bending moment*. Parwita dan Yudistria (2025) [7] menyatakan bahwa terjadi peningkatan faktor keamanan dari 1.493 menjadi 1.922 dengan adanya penggunaan CCSP pada stabilitas lereng. Penelitian-penelitian terdahulu ini cenderung berfokus pada stabilitas atau material, sementara kajian komprehensif yang membandingkan formasi CCSP dari sisi teknis dan manajemen konstruksi masih terbatas

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menganalisis empat formasi perkuatan CCSP: formasi 1 *line*, 2 *line* dengan *Tie-Rod*, 1 *line* dengan angkur *single pile*, dan 1 *line* dengan *pilecap*. Analisis dilakukan untuk menilai stabilitas, efisiensi biaya, serta waktu pelaksanaan. Pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga menggunakan PLAXIS 2D dipilih untuk mengevaluasi interaksi tanah–struktur secara lebih realistis dibandingkan metode analitik konvensional. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan rekomendasi formasi perkuatan yang optimal dari sisi teknis dan manajerial.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di Desa Sepakat, yang memiliki karakteristik tanah aluvial dan rawan erosi. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kebutuhan pembangunan infrastruktur desa berupa dinding penahan tanah (turap) untuk melindungi pemukiman dan fasilitas umum dari risiko longsor dan banjir.

Gambar 1. Lokasi Penelitian
Sumber: Google maps, 2026

Prosedur penelitian yang pertama adalah pengumpulan data primer dan sekunder. Data primer diambil langsung dari hasil investigasi lapangan dan uji laboratorium pada lokasi penelitian. Data ini digunakan sebagai parameter input dalam pemodelan menggunakan Plaxis 2D. Data sekunder terdiri dari spesifikasi struktur turap (CCSP, *Tie-Rod*, angkur, *pile cap*), gambar rencana, RAB dan waktu pelaksanaan masing-masing formasi, juga detail teknis.

Kemudian, analisis stabilitas / aspek teknis (faktor keamanan, deformasi lateral maksimum, momen lentur maksimum) dari variabel bebas (*independent variables*) terdiri dari formasi perkuatan *Corrugated Concrete Sheet Pile*(CCSP): (1) 1 *line* CCSP tanpa tambahan, (2) 2 *line* CCSP dengan *Tie-Rod*, (3) 1 *line* CCSP dengan angkur *single pile*, dan (4) 1 *line* CCSP dengan *pilecap* menggunakan program bantu Plaxis 2D.

Setelah itu, analisis efisiensi biaya dan waktu / aspek manajemen konstruksi beurpa total RAB, selisih dan presentase efisiensi biaya, durasi total pelaksanaan dan efisiensi durasi. Sehingga, hasil akhir didapat penentuan alternatif perkuatan optimal dari segi stabilitas (aspek teknis) dan efisiensi (aspek manajemen konstruksi).

Perbedaan formasi pada variable bebas berdasarkan parameter desain yang secara empiris terbukti mempengaruhi stabilitas dan deformasi seperti kedalaman penetrasi, panjang serta sudut angkur, konfigurasi *Tie-Rod*, dan dimensi *pilecap*. Batasan tiap formasi ditetapkan mengacu pada hasil penelitian terdahulu [3], [6], [7] serta standar geoteknik nasional [4]. Namun literatur yang ada belum banyak membandingkan variasi konfigurasi perkuatan secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas masing-masing formasi tidak hanya dari segi teknis (stabilitas, faktor keamanan, deformasi), tetapi juga dari segi manajemen konstruksi (efisiensi biaya dan durasi).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

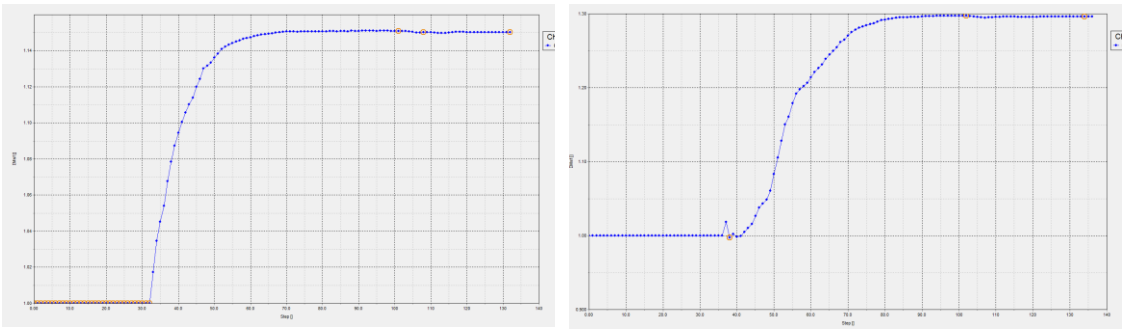
3.1. ANALISA STABILITAS

3.1.1. ANALISA *SAFETY FACTOR*

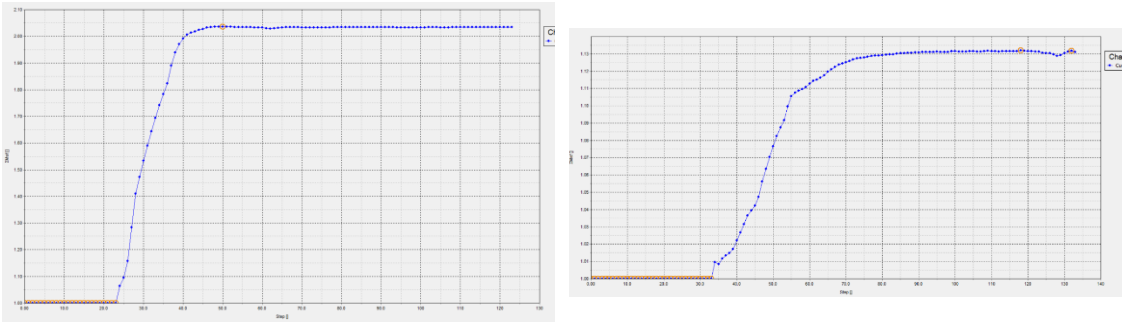
Hasil analisa *safety factor* untuk setiap formasi terlihat pada Gambar 2. Formasi 1 menghasilkan SF = 1,15, di bawah ambang batas kelayakan (≥ 1,5 untuk geser dan ≥ 2 untuk guling). Hal ini menunjukkan bahwa turap tunggal tanpa perkuatan tambahan tidak mampu menahan tekanan lateral tanah jenuh dan fluktuasi muka air. Sebaliknya, Formasi 2 dengan dua baris CCSP dan *Tie-Rod* menunjukkan peningkatan SF = 1,30. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh kontribusi *Tie-Rod* dalam menyalurkan gaya tarik ke baris belakang, sehingga mengurangi momen guling pada baris depan. Namun, meskipun lebih stabil dibanding Formasi 1, nilai SF Formasi 2 masih belum memenuhi standar minimum, menandakan bahwa konfigurasi ini hanya memberikan perbaikan parsial terhadap stabilitas global.

Formasi 3 dengan sistem angkur *single pile* menunjukkan SF = 2,04, melampaui kriteria minimum stabilitas. Angkur berfungsi sebagai elemen penahan tambahan yang "mengunci" kepala turap, sehingga bidang gelincir potensial lebih sulit terbentuk. Peningkatan signifikan dibanding Formasi 1 (= 1,15) dan Formasi 2 (= 1,30) membuktikan bahwa mekanisme angkur lebih efektif daripada sekadar menambah baris CCSP. Secara teknis, panjang dan sudut angkur menentukan kapasitas tarik yang mampu menahan gaya lateral, sehingga konfigurasi ini memberikan kestabilan yang lebih tinggi dan memenuhi persyaratan geoteknik nasional [4].

Formasi 4 dengan *pilecap* menghasilkan SF ≈ 1,13, hampir sama dengan Formasi 1 dan lebih rendah dibanding Formasi 2 maupun 3. Hal ini menunjukkan bahwa *pilecap* hanya menambah kekakuan di bagian atas turap, tetapi tidak meningkatkan tahanan pasif dalam tanah. Redistribusi tegangan yang terjadi membuat SF stagnan di sekitar 1,13, sehingga dari sisi stabilitas global *pilecap* tidak memberi kontribusi signifikan. Perbedaan ini menegaskan bahwa peningkatan stabilitas lebih bergantung pada elemen perkuatan yang menambah kapasitas tahanan lateral (*Tie-Rod* atau angkur), bukan sekadar memperkuat kepala turap.



(a) (b)



(c) (d)

Gambar 2. Grafik *Safety factor* (*Phi-c Reduction*) (a) Formasi 1, (b) Formasi 2, (c) Formasi 3, (d) Formasi 4
Sumber: Penulis, 2026

Maka, formasi 3 dengan angkur *single pile* terbukti paling efektif memenuhi standar stabilitas lereng, sementara Formasi 1, 2, dan 4 belum layak dijadikan alternatif utama tanpa perkuatan tambahan (Tabel 1).

Tabel 1. Rekapitulasi Nilai *Safety factor*

Formasi	Deskripsi	Nilai SF	Analisis Utama
Formasi 1	1 *Line* CCSP	1,15	< 1.5
Formasi 2	2 *Line* CCSP + *Tie-Rod*	1,30	< 1.5
Formasi 3	1 *Line* CCSP + Angkur *Single pile*	2,04	>1.5 SF terbesar
Formasi 4	1 *Line* CCSP + *Pilecap*	1,13	< 1.5

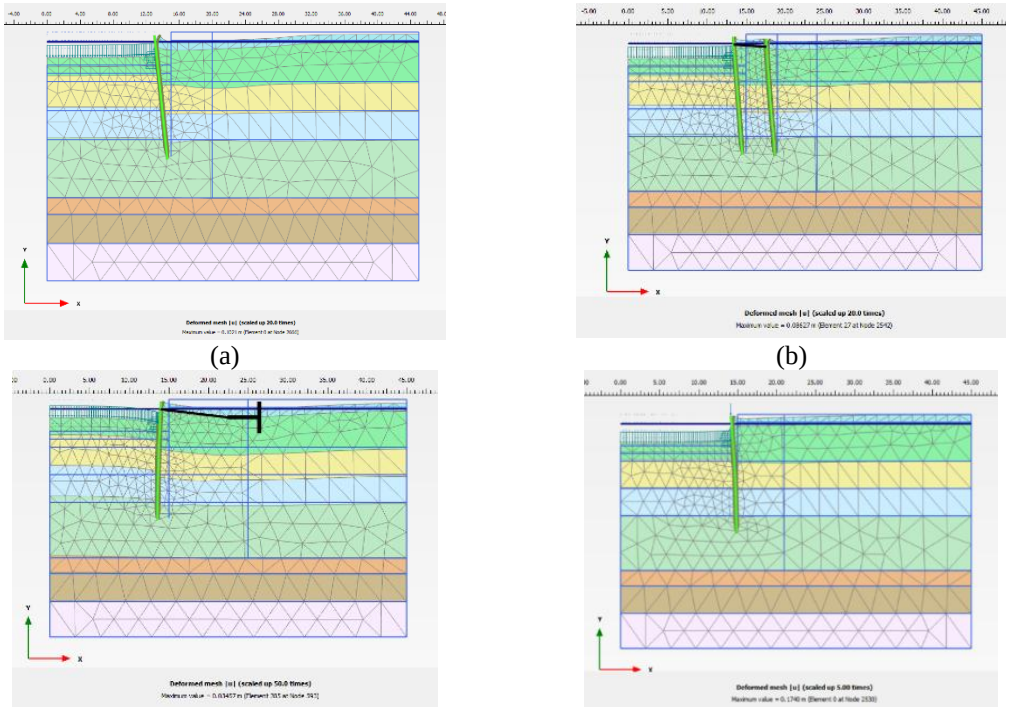
3.1.2. ANALISA DEFORMASI TOTAL

Hasil analisa deformasi total |U| untuk setiap formasi terlihat pada Gambar 3. Formasi 1 menunjukkan deformasi maksimum sebesar 0,1021 m, dengan pola pergerakan dominan pada kepala turap dan massa tanah belakang. Mekanisme kantilever menyebabkan dinding cenderung “membuka” ke arah sungai, sehingga pelepasan tegangan di tanah belakang mendorong deformasi lateral yang besar. Sebaliknya, Formasi 2 mencatat deformasi lebih kecil, yaitu 0,08627 m, atau turun sekitar 15–20% dibanding Formasi 1. Penurunan ini terjadi karena sistem dua baris CCSP dengan *Tie-Rod* mampu menyalurkan sebagian gaya tarik ke baris belakang, sehingga rotasi dinding lebih terkendali. Dengan demikian, Formasi 2 lebih efektif dalam mengurangi pergerakan global meskipun belum sepenuhnya optimal.

Formasi 3 menghasilkan deformasi maksimum hanya 0,03457 m, jauh lebih kecil dibanding Formasi 1 (0,1021 m) dan Formasi 2 (0,08627 m). Penurunan sekitar 66% dari Formasi 1 dan 60% dari Formasi 2 menegaskan bahwa sistem angkur *single pile* tidak hanya meningkatkan faktor keamanan, tetapi juga memberikan kontrol deformasi yang sangat baik. Angkur berfungsi “mengunci” kepala turap, sehingga momen guling berkurang dan bidang gelincir potensial lebih sulit terbentuk. Pola deformasi juga lebih terbatas, dengan konsentrasi pergerakan menyempit di zona dekat

struktur tanpa meluas ke massa tanah belakang. Hal ini menunjukkan bahwa Formasi 3 paling unggul dari sisi serviceability karena mampu meminimalkan risiko kerusakan elemen pendukung di sekitar turap.

Formasi 4 dengan *pilecap* justru menunjukkan deformasi maksimum terbesar, yaitu 0,1740 m. Nilai ini lebih tinggi dibanding Formasi 1 maupun 2, menandakan bahwa *pilecap* tidak efektif dalam mengendalikan pergerakan global. Pola deformasi memperlihatkan konsentrasi pergerakan di kepala turap dan tanah belakang, sehingga meskipun *pilecap* menambah kekakuan bagian atas, ia tidak meningkatkan tahanan pasif dalam tanah. Perbedaan ini menegaskan bahwa peningkatan stabilitas dan pengendalian deformasi lebih bergantung pada elemen perkuatan lateral (*Tie-Rod* atau angkur), bukan sekadar memperkuat kepala turap.



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 3. *Deformed Mesh* dan Kontur Total *Displacement* (|u|) (a) Formasi 1, (b) Formasi 2, (c) Formasi 3, (d) Formasi 4
Sumber: Penulis, 2026

Menurut Eurocode 7 (2004) [8], nilai deformasi total turap sebesar ≤ 10% dari tinggi dinding untuk turap bebas sedangkan untuk *anchored/strutted sheet pile* deformasi ijin sebesar ≤ 0,5 meter. Dengan tinggi turap pada penelitian ini adalah 15 meter, sehingga 10% dari tinggi tersebut setara dengan 1,5 meter untuk turap bebas, dan ≤0,5 meter untuk turap berangkur/berpenyangga. Berdasarkan Tabel 2, seluruh nilai deformasi yang terjadi untuk setiap formasi masih berada di bawah batas deformasi total yang diizinkan. Dengan demikian, formasi dengan nilai deformasi terkecil dapat dianggap sebagai konfigurasi yang paling efisien. Oleh karena itu, Formasi 3 dengan angkur *single pile* terbukti paling efektif dalam mengendalikan deformasi total.

Tabel 2. Rekapitulasi Deformasi Total

Formasi	**Deskripsi**	**Nilai |U|max (m)**	**Analisis Utama**
Formasi 1	1 *Line* CCSP	0,1021	≤ 1,5 m
Formasi 2	2 *Line* CCSP + *Tie-Rod*	0,08627	≤ 0,5 m
Formasi 3	1 *Line* CCSP + Angkur *Single pile*	0,03457	≤ 0,5 m |U| terkecil
Formasi 4	1 *Line* CCSP + *Pilecap*	0,1740	≤ 0,5 m

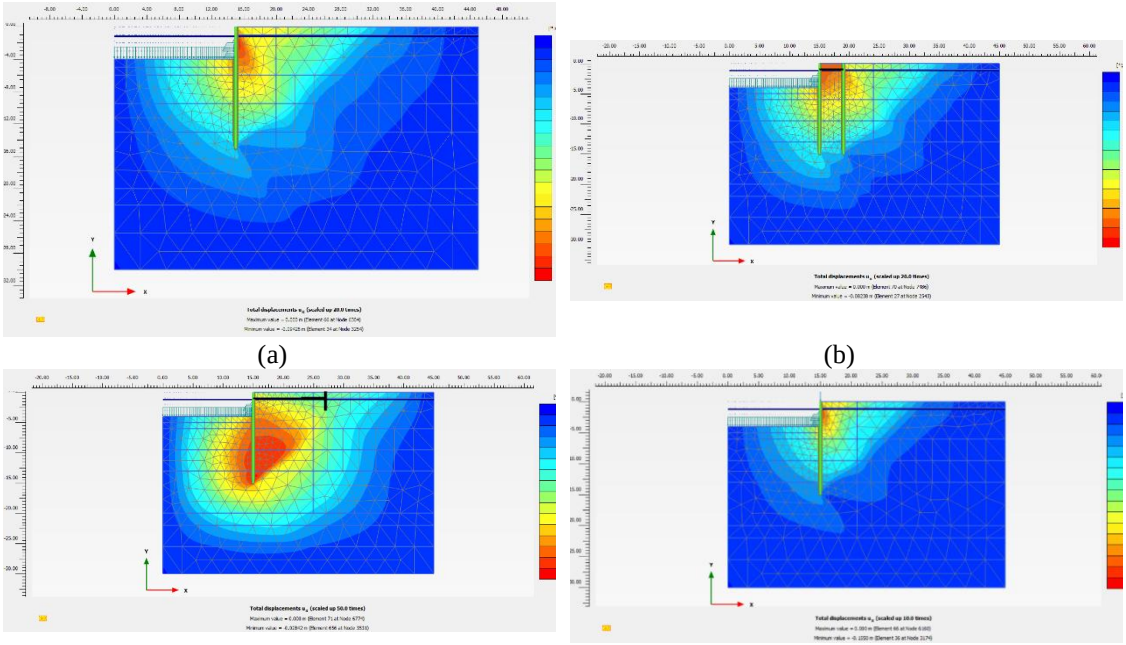
3.1.3. ANALISA DEFORMASI LATERAL

Hasil analisa deformasi lateral Ux untuk setiap formasi terlihat pada Gambar 4. Formasi 1 menunjukkan deformasi lateral ekstrem sebesar −0,09426 m, menegaskan dominasi defleksi dinding pada konfigurasi kantilever. Kondisi ini berimplikasi pada meningkatnya momen lentur yang harus ditahan penampang CCSP serta risiko serviceability berupa retak pada elemen tepi. Sebaliknya, Formasi 2 mencatat deformasi lateral lebih kecil, yaitu −0,08238 m, atau turun sekitar 12–13% dibanding Formasi 1. Penurunan ini terjadi karena sistem *Tie-Rod* mampu menyalurkan gaya tarik ke baris belakang, sehingga bukaan antar turap lebih terkendali dan distribusi deformasi tidak lagi terpusat pada satu elemen. Dengan demikian, Formasi 2 lebih efektif dalam mengurangi pergerakan lateral meskipun belum sepenuhnya optimal.

Formasi 3 dengan angkur *single pile* menunjukkan deformasi lateral minimum −0,02842 m, jauh lebih kecil dibanding Formasi 1 (−0,09426 m) dan Formasi 2 (−0,08238 m). Penurunan sekitar 70% dari Formasi 1 dan 65% dari Formasi 2 menegaskan efektivitas sistem angkur dalam membatasi pergerakan horizontal. Pola kontur Ux tampak lebih "terkunci" di sekitar kepala turap, karena titik penahan angkur mengurangi rotasi struktur. Hal ini menurunkan mobilisasi tekanan tanah aktif akibat pergerakan dinding, sehingga sistem menjadi jauh lebih stabil dan aman dari sisi serviceability maupun kapasitas struktur.

Formasi 4 dengan *pilecap* justru menunjukkan deformasi lateral terbesar, yaitu −0,1550 m. Nilai ini lebih besar dibanding Formasi 1 maupun 2, menandakan bahwa *pilecap* tidak efektif dalam mengendalikan pergerakan horizontal. Peningkatan kekakuan kepala akibat *pilecap* tidak cukup menahan gaya lateral tanah, sehingga deformasi tetap besar dan menyebar ke massa tanah belakang. Perilaku ini menyerupai kantilever murni, sehingga *pilecap* tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap pengendalian deformasi lateral.

P-ISSN :1698-8259
E-ISSN : 2721-978X



(a) (b) (c) (d)

Gambar 4. Kontur Lateral *Displacement Ux* (a) Formasi 1, (b) Formasi 2, (c) Formasi 3, (d) Formasi 4
Sumber: Penulis, 2026

Menurut British Standard BS 8002:2015 [9], deformasi lateral (Ux) pada turap diizinkan sebesar ≤ 1–2% dari tinggi dinding penahan (H). Tinggi turap pada penelitian ini adalah 15 meter, sehingga 1-2% dari tinggi tersebut setara dengan 0,15 – 0,3 meter. Berdasarkan Tabel 3, semua formasi memenuhi persyaratan Ux ijin. Oleh karena itu, Formasi yang dianggap paling efektif dalam mengendalikan deformasi lateral adalah Formasi 3 karena memiliki nilai Ux terkecil sekaligus memenuhi batas izin deformasi.

Tabel 3. Rekapitulasi Deformasi Lateral

Formasi	Deskripsi	Nilai Ux,min (m)	Analisis Utama
Formasi 1	1 *Line* CCSP	−0,09426	≤ 0,15 – 0,3 m
Formasi 2	2 *Line* CCSP + *Tie-Rod*	−0,08238	≤ 0,15 – 0,3 m
Formasi 3	1 *Line* CCSP + Angkur *Single pile*	−0,02842	≤ 0,15 – 0,3 m Ux terkecil
Formasi 4	1 *Line* CCSP + *Pilecap*	−0,1550	≤ 0,15 – 0,3 m

3.1.4. ANALISA MOMEN LENTUR

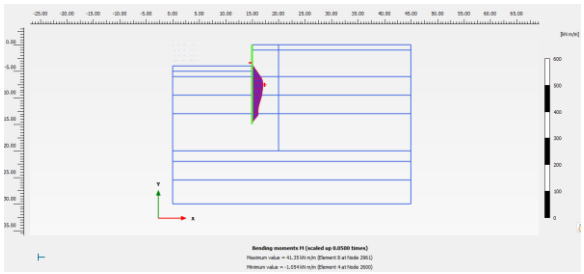
Hasil analisa Momen Lentur untuk setiap formasi terlihat pada Gambar 5. Formasi 1 menunjukkan momen lentur maksimum sebesar 41,35 kNm/m dan minimum −1,054 kNm/m, dengan konsentrasi momen kritis di sekitar elevasi muka tanah. Nilai ini menjadi *baseline* penting untuk pembandingan, namun jelas menegaskan keterbatasan sistem kantilever murni karena faktor keamanan rendah dan deformasi lateral signifikan. Sebaliknya, Formasi 2 memperlihatkan redistribusi momen akibat

P-ISSN :1698-8259
E-ISSN : 2721-978X

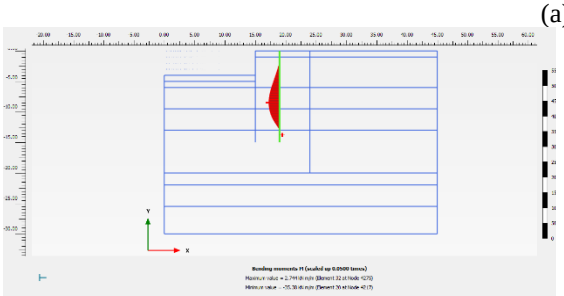
sistem *Tie-Rod*. Pada turap sisi daratan, nilai Mmin mencapai −35,38 kNm/m, menandakan dominasi momen negatif akibat gaya tarik *Tie-Rod,* sedangkan turap sisi sungai mencatat Mmax = 20,88 kNm/m dengan distribusi lebih seimbang. Perbedaan ini menunjukkan mekanisme kolaboratif, di mana dua turap berbagi beban lateral tanah secara lebih proporsional sehingga meningkatkan stabilitas sistem.

Formasi 3 menghasilkan Mmax = 9,471 kNm/m dan Mmin = −491,9 kNm/m. Nilai momen negatif yang sangat besar menandakan adanya konsentrasi gaya internal akibat kekangan tambahan dari angkur. Mekanisme ini memicu redistribusi gaya dan perubahan titik tumpuan efektif, sehingga menghasilkan momen balik ekstrem. Walaupun deformasi lateral terkendali dan stabilitas global meningkat, nilai momen negatif ekstrem menuntut verifikasi kapasitas lentur penampang CCSP. Pada product catalog BRM Pile (2024) [10] untuk CCSP kapasitas *bending moment* terbesar adalah 59.60 Ton-m atau senilai 596 kNm/m, sehingga Mmin -491,9 kNm/m masih memenuhi kapasitas *bending moment*.

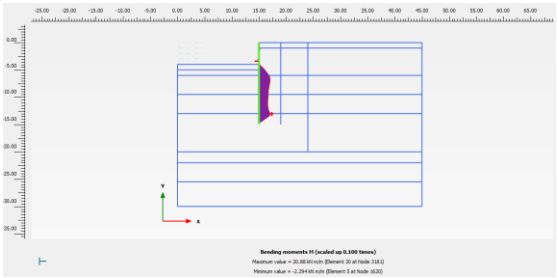
Formasi 4 dengan *pilecap* menunjukkan Mmax = 38,04 kNm/m dan Mmin = −2.026 kNm/m. Nilai momen negatif yang sangat besar menandakan redistribusi gaya akibat peningkatan kekakuan kepala turap. Walaupun *pilecap* menambah kekakuan lokal, deformasi global tidak banyak berkurang dan distribusi momen internal justru menunjukkan konsentrasi tegangan lentur di zona tertentu. Hal ini menegaskan bahwa *pilecap* lebih berpengaruh pada gaya dalam lokal dibanding pengendalian deformasi keseluruhan, sehingga kapasitas lentur penampang tetap perlu diperiksa secara detail untuk memastikan keamanan struktur.



(a)

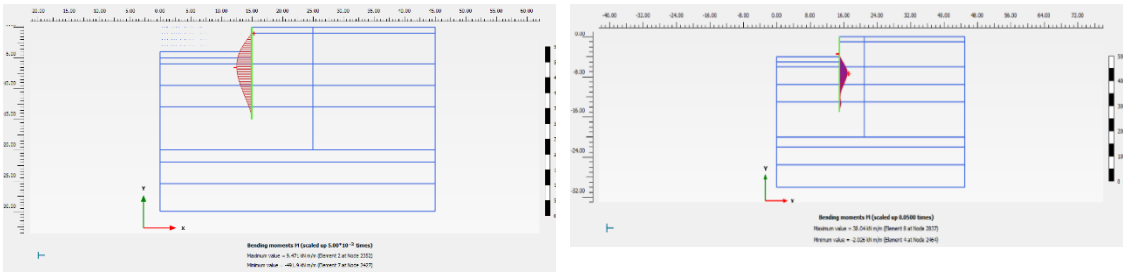


(b)



(c)

P-ISSN :1698-8259
E-ISSN : 2721-978X



(d) (e)

Gambar 4. Diagram *Bending moment* CCSP (a) Formasi 1, (b) Formasi 2 sisi daratan, (c) Formasi 2 sisi sungai, (d) Formasi 3 (e) Formasi 4
Sumber: Penulis, 2026

Nilai *bending moment* untuk semua formasi pada Tabel 4 lebih kecil dari nilai *bending moment* ijin berdasarkan spesifikasi bahan CCSP [10]. Sehingga, dari segi momen lentur yang terjadi, semua formasi secara kuat bahan memenuhi syarat dan tidak terjadi kerusakan.

Tabel 4. Rekapitulasi *Bending Moment*

Formasi	Deskripsi	Mmax (kNm/m)	Mmin (kNm/m)	Analisis Utama
Formasi 1	1 *Line* CCSP	41,35	−1,054	< 590 kNm/m
Formasi 2	2 *Line* CCSP + *Tie-Rod*	20,88 (sisi sungai)	−35,38 (sisi daratan)	< 590 kNm/m
Formasi 3	1 *Line* CCSP + Angkur *Single pile*	9,471	−491,9	< 590 kNm/m
Formasi 4	1 *Line* CCSP + *Pilecap*	38,04	−2.026	< 590 kNm/m

3.1.5. EVALUASI ANALISA STABILITAS / ASPEK TEKNIS

Analisis aspek teknis atau analisis stabilitas untuk Formasi 1–4 menunjukkan perbedaan signifikan. Formasi 1 berkarakter kantilever dengan SF rendah (1,15) dan deformasi besar. Formasi 2 lebih baik (SF 1,30) dengan sistem ganda yang menekan deformasi. Formasi 3 paling stabil (SF 2,04) dengan deformasi sangat kecil berkat angkur, menunjukkan kontrol lateral optimal. Formasi 4 (*pilecap*) justru memiliki SF rendah (1,13) dan deformasi besar, sehingga perilakunya tetap menyerupai kantilever. Secara keseluruhan, Formasi 3 merupakan formasi yang paling layak dari segi teknis.

3.2. ANALISA EFISIENSI

3.2.1. ANALISA BIAYA

Rekapitulasi biaya menunjukkan variasi signifikan antar formasi (Tabel 5). Formasi 1 menjadi opsi paling ekonomis dengan total Rp 4,014 miliar, sedangkan Formasi 2 membutuhkan anggaran tertinggi Rp 7,653 miliar akibat penggunaan dua turap dan *Tie-Rod*. Formasi 3 dengan angkur *single pile* relatif moderat Rp 4,403 miliar, sementara Formasi 4 (*pilecap*) hampir setara dengan Formasi 1, yakni Rp 4,041 miliar. Analisis ini menegaskan bahwa meski Formasi 2 menawarkan peningkatan stabilitas,

biaya yang tinggi menjadi pertimbangan utama. Sebaliknya, Formasi 3 memberikan keseimbangan antara efektivitas teknis dan efisiensi biaya.

Tabel 5. Rekapitulasi RAB

Formasi	Total Biaya (Rp)
Formasi 1 – 1 *Line* CCSP	4.014.234.000
Formasi 2 – 2 *Line* + *Tie rod*	7.653.043.000
Formasi 3 – 1 *Line* + Angkur *Single pile*	4.403.300.000
Formasi 4 – 1 *Line* + *Pilecap*	4.041.889.000

Sumber: Penulis, 2026

Tabel 6 menunjukkan efisiensi biaya menunjukkan Formasi 1 sebagai acuan terendah. Formasi 2 mengalami kenaikan terbesar, Rp 3,64 miliar atau 90,7%, sehingga tidak efisien. Formasi 4 hampir sama dengan Formasi 1, hanya naik 0,7%, namun tidak meningkatkan stabilitas. Formasi 3 menjadi pilihan paling seimbang, dengan kenaikan biaya Rp 389 juta (9,7%) tetapi memberikan peningkatan stabilitas signifikan. Analisis ini menegaskan bahwa Formasi 3 menawarkan kombinasi terbaik antara efektivitas teknis dan efisiensi biaya dibanding alternatif lainnya.

Formasi 3 membutuhkan tambahan biaya sekitar 9,7% dibanding Formasi 1, namun menghasilkan peningkatan stabilitas yang sangat signifikan. Sebaliknya, Formasi 2 memerlukan kenaikan biaya hampir dua kali lipat tetapi masih belum memenuhi SF minimum.

Table 6. Effisiensi Biaya

Formasi	Selisih terhadap Formasi 1 (Rp)	Kenaikan (%)
Formasi 1	0	0%
Formasi 2	3.638.809.000	90,7%
Formasi 3	389.066.000	9,7%
Formasi 4	27.655.000	0,7%

Sumber: Penulis, 2026

3.2.2. ANALISA WAKTU

Perhitungan durasi pekerjaan menunjukkan total waktu efektif sekitar 37 hari. Pada Tabel 7, mobilisasi memerlukan 5 hari, pemancangan CCSP dan angkur masing-masing 20 hari dengan produktivitas 7–8 m/hari, *capping beam* 7 hari dengan produktivitas 20 m/hari, serta finishing 5 hari. Hasil ini menegaskan bahwa pekerjaan paling memakan waktu adalah pemancangan, sementara kegiatan lain relatif lebih singkat. Dengan demikian, pengendalian produktivitas alat pancang menjadi faktor kunci dalam efisiensi jadwal keseluruhan proyek.

Tabel 7. Volume dan Durasi Pekerjaan

Kegiatan	Volume	Produktivitas	Durasi (Hari)
Mobilisasi	-	-	5
Pemancangan CCSP	150 m	7–8 m/hari	20
Angkur *Single pile*	150 m	7–8 m/hari	20

Kegiatan	Volume	Produktivitas	Durasi (Hari)
Capping beam	150 m	20 m/hari	7
Finishing	-	-	5

Sumber: Penulis, 2026

Tabel 8 menunjukkan perbandingan durasi antar formasi menunjukkan variasi signifikan. Formasi 1 (1 *Line* CCSP) paling cepat, hanya 30–35 hari. Formasi 2 (2 *Line* + *Tie rod*) paling lama, 60–70 hari, karena volume pemancangan dua kali lipat dan pemasangan *Tie-Rod* bertahap. Formasi 4 (CCSP + *Pilecap*) memerlukan 40–45 hari akibat tambahan pekerjaan beton dan proses curing. Formasi 3 (CCSP + Angkur) relatif efisien, 35–40 hari, dengan keseimbangan antara stabilitas dan waktu. Analisis ini menegaskan bahwa Formasi 3 menjadi pilihan optimal dari sisi teknis dan durasi. Formasi 3 memiliki durasi lebih panjang dari Formasi 1, tetapi masih jauh lebih efisien dibanding Formasi 2, dan umumnya lebih terkendali dibanding Formasi 4. Pekerjaan angkur dapat diatur paralel setelah sebagian turap terpasang, sehingga tidak memperpanjang jalur kritis secara signifikan.

Tabel 8. Perbandingan Waktu Antar Formasi

Formasi	Sistem Struktur	Estimasi Durasi	Karakteristik Waktu
Formasi 1	1 *Line* CCSP	30–35 hari	Paling cepat
Formasi 2	2 *Line* + *Tie rod*	60–70 hari	Terlama
Formasi 3	CCSP + Angkur	35–40 hari	Efisien
Formasi 4	CCSP + *Pilecap*	40–45 hari	Ada waktu curing

Sumber: Penulis, 2026

3.3. PENENTUAN ALTERNATIF OPTIMAL

Untuk menyimpulkan pemilihan alternatif secara objektif, dilakukan matriks penentuan alternatif optimal evaluasi tiga aspek: stabilitas, biaya, dan waktu.

Tabel 9. Matriks Penentuan Alternatif Optimal

Formasi	Stabilitas (SF ≥ 1,5)	Biaya	Waktu	Kesimpulan
1	Tidak memenuhi	Paling murah	Paling cepat	Gugur secara teknis
2	Tidak memenuhi	Paling mahal	Paling lama	Gugur teknis dan manajerial
3	Memenuhi	Moderat (+9,7%)	Moderat	Terpilih (optimal)
4	Tidak memenuhi	Hampir sama Formasi 1	Sedang	Gugur secara teknis

Sumber: Penulis, 2026

Tahap ini menegaskan bahwa penentuan alternatif optimal tidak hanya berbasis biaya terendah atau waktu tercepat, tetapi harus memenuhi syarat stabilitas terlebih dahulu. Setelah lolos syarat teknis, barulah efisiensi biaya dan waktu dinilai. Sehingga jika dilihat dari rekaputilasi matrix penentuan alternatif optimal, Formasi 3 (1 *Line CCSP*

+ Angkur *Single pile*) merupakan alternatif kombinasi perkuatan lereng dengan turap yang terbaik karena memenuhi aspek stabilitas dan juga aspek efisiensi biaya dan waktu.

4. KESIMPULAN

Analisis stabilitas formasi perkuatan CCSP dengan metode numerik menggunakan program bantu PLAXIS 2D terhadap empat formasi CCSP menunjukkan perbedaan kinerja stabilitas. Formasi 1 (1 *Line* CCSP) memiliki SF 1,15, Formasi 2 (2 *Line* CCSP + *Tie rod*) SF 1,30, dan Formasi 4 (1 *Line* CCSP + *Pilecap*) SF 1,14 semuanya di bawah batas aman 1,50 sehingga tidak layak. Sebaliknya, Formasi 3 (1 *Line CCSP* + Angkur *Single pile*) mencapai SF 2,04, melampaui syarat minimum SF 1,50. Selain itu, Formasi 3 juga menunjukkan deformasi total dan lateral paling kecil, menegaskan performa terbaik dalam mengendalikan tekanan tanah dan pergerakan dinding. Dengan demikian, Formasi 3 memenuhi kriteria stabilitas teknis sekaligus menawarkan efektivitas struktural paling optimal.

Analisis efisiensi biaya dan waktu dilakukan sebagai analisa lanjutan untuk penentuan alternatif optimal. Dari segi aspek biaya, Formasi 1 menunjukkan kebutuhan yang paling murah dan cepat, tetapi tidak memenuhi syarat keamanan. Formasi 2 justru paling mahal dan lama, serta tetap gagal mencapai SF minimum. Formasi 4 hampir setara biaya dengan Formasi 1, namun tidak memberi peningkatan stabilitas berarti. Sebaliknya, Formasi 3 membutuhkan tambahan biaya sekitar 9,7% dibanding Formasi 1, tetapi menghasilkan SF jauh lebih tinggi (2,04) dan deformasi paling kecil. Dari sisi waktu, Formasi 3 tetap efisien karena pekerjaan angkur dapat dijalankan paralel. Oleh karena itu, Formasi 3 ditetapkan sebagai alternatif optimal.

Saran utama penelitian ini menekankan bahwa Formasi 3 (1 *Line* CCSP + Angkur *Single pile*) layak dijadikan dasar desain lanjutan dengan verifikasi kapasitas penampang terhadap momen lentur maksimum, sementara tahap konstruksi perlu fokus pada pengendalian mutu pemasangan angkur dan monitoring deformasi. Integrasi penjadwalan detail dengan perangkat lunak manajemen proyek akan menjaga efisiensi biaya dan waktu, sedangkan penelitian berikutnya sebaiknya memperluas analisis pada kondisi dinamis, fluktuasi muka air, serta variasi jenis tanah untuk memperkaya pemahaman efektivitas sistem perkuatan.

5. REFERENSI

[1] Andri Kurniawan and Hayu Rahayu, “Kajian Stabilitas Tanah Dengan Steel Sheet Pile Dan Corugated Concrete Sheet Pile Pada Tikungan Luar Sungai Citanduy,” in *Science And Engineering National Seminar 7 (SENS 7)*, 2022.

[2] K. Jumadi, A. Dofir, A. Andreas, and N. Tinumbia, “Landfill Stability Analysis Using Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) With Plaxis 2D V22 Software,” *Jurnal Infrastruktur*, vol. 10, no. 1, pp. 25–34, Apr. 2024, doi: 10.35814/infrastruktur.v10i1.5992.

[3] S. W. Astuti and A. Prativi, “The stability of the Corrugated Concrete Sheet Pile (CCSP) of the Soil Retaining Wall at the Abutmen Bridge Bh 1751 in Lok Ulo

District, Kebumen," *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, vol. 3, no. 1, Nov. 2018, doi: 10.37367/jpi.v3i1.72.

[4] B. S. Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.

[5] Nani Tabrani, Ahmad Perwira Mulia, and Ridwan Anas, "Analisis Faktor Keterlambatan Pelaksanaan Proyek Jembatan di Provinsi Sumatera Utara," *Jurnal Syntax Transformation*, vol. 4, no. 1, pp. 119–133, Jan. 2023, doi: 10.46799/jst.v4i1.687.

[6] F. Irawan, Agus Sulaeman, and Xbal Meiprasetyo, "Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (Sheet Pile) Dermaga yang Tidak Sesuai Detail Engineering Design (DED)," *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, vol. 24, no. 1, pp. 10–23, Jun. 2025, doi: 10.55893/jt.vol24no1.527.

[7] Dewa Ngakan Putu Ananda Parwita and I Gede Ngurah Arya Yudistira, "Finite Element Analysis Of Slope Stability Reinforced With Corrugated Concrete Sheet Pile," *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 29, no. 2, pp. 127–138, Sep. 2025, doi: 10.24843/JITS.2025.v29.i02.p03.

[8] Eurocode 7, "EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical Design," 2004.

[9] British Standard, *BS 8002:2015 Code of practice for earth retaining structures*. London: BSI British Standards, 2015. doi: 10.3403/30301519.

[10] BRM Pile, "PRECAST CONCRETE SOLUTIONS Specializing in high quality Prestressed Precast Concrete," 2024, *Balikpapan Ready Mix Pile*.