

BAB. 2

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1 Sungai dan Ekosistem

Sungai didefinisikan sebagai alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan dibatasi kanan dan kiri oleh garis sempadan (Kementrian PUPR, 2015). Sungai merupakan komponen dari sumber daya air alami, yang terbentuk akibat erosi air yang mengalir dari hulu ke hilir secara gravitasi. Pengaliran air dari hulu ke hilir bersifat dinamis menyesuaikan ruang dan waktu. Elevasi dasar sungai bagian hulu umumnya selalu lebih tinggi dari pada hilir dan muara sungai, kecuali bila terjadi endapan pada dasar sungai. Pergerakan aliran air di sungai dipengaruhi oleh siklus hidrologi, kondisi geologi, kondisi wilayah dan kehidupan yang ada, baik itu hewan, tumbuhan dan aktivitas manusia (Kodoatie and Sjarief, 2010).

Manfaat sungai adalah guna atau faedah bagi manusia dan lingkungannya. Sosrodarsono and Tominaga (1989); Maryono (2003); Kementrian PUPR (2015): menyatakan ada berbagai jenis manfaat sungai secara umum yaitu: (1) penampungan air, (2) mengalirkan air ke hilir, (3) pembangkit listrik, (4) pusat dari ekosistem, (5) mencari nafkah, (6) sumber bahan makanan, (7) tempat rekreasi dan transportasi, (8) lokasi mencari ketenangan dan relaksasi, (9) memenuhi kebutuhan sehari-hari, dan (10) Mengalirkan banjir. Manfaat sungai yang beragam tersebut umumnya didominasi sebagai media pengaliran yang mengalirkan air dari hulu ke arah hilir. Manfaat sungai yang utama adalah sebagai sumber air bagi masyarakatm antara lain: kebutuhan rumah tangga, pertanian, industri, sumber mineral, dan pemanfaatan lainnya. Kegiatan-kegiatan tersebut bila tidak dikelola dengan baik akan berdampak negatif terhadap sumberdaya air, diantaranya adalah menurunnya kualitas air (Soewarno, 1991).

Ekosistem sungai merupakan habitat bagi biota air yang keberadaannya sangat dipengaruhi oleh lingkungan sekitarnya. Biota akuatik tersebut diantaranya adalah tumbuhan air, *plankton*, *perifiton*, *bentos*, dan ikan. Konsep ekosistem yang diterapkan pada sungai merujuk pada ekosistem air mengalir. Energi yang mengalir di dalam sungai terutama diperoleh dari daratan di sekitar sungai, bukan hanya dari dalam sungai sendiri. Energi yang diperoleh ekosistem sungai merupakan materi organik berasal dari material sedimen dari daratan yang masuk ke air dan digunakan oleh organisme akuatik. Pada tipe

sungai mengalir terdapat permasalahan siklus komponen material. Substansi material organik dan *non*-organik yang dihasilkan dari proses dekomposisi menjadi tidak tersedia untuk organisme produsen karena mengalir ke hilir.

Ekosistem air sungai berinteraksi dengan ekosistem daratan. Bonan et al. (2002) menyatakan bahwa ekosistem daratan (*terrestrial ecosystem*) adalah sejumlah organisme individu yang berinteraksi dengan organisme disekitar mereka. Hubungan interaksi antar organisme bertujuan untuk mendapatkan sumber daya yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan. Organisme tersebut juga melakukan interaksi dengan lingkungan fisik mereka untuk mengubah ketersediaan sumber daya dan karakteristik lingkungan sekitar mereka. Ekosistem sungai menggabungkan semua makhluk hidup (tumbuhan, hewan dan mikroba) dan lingkungan fisik mereka melalui beraneka ragam proses biologi, kimia dan fisika. Proses tersebut juga memasukkan faktor iklim, material lapuk, tanah dan sirkulasi energi dan material yang menghubungkan mereka.

Ekosistem permukaan air di daratan dibedakan menjadi ekosistem *lotic* dan ekosistem *lentic*. Ekosistem *lotic* adalah ekosistem air yang mengalir searah pada suatu kemiringan akibat dari gravitasi. Yang termasuk di dalam ekosistem *lotic* adalah ekosistem sungai, saluran air, dan sebagainya. Sedangkan ekosistem *lentic* adalah ekosistem air yang tenang, dan mengalami laju perbaruan air yang lambat. Ekosistem danau dan genangan air pada umumnya masuk di dalam ekosistem *lentic* (Wetzel, 2001). Perbedaan antara ekosistem sungai, estuari, dan danau dijelaskan pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1. Perbedaan Karakteristik Sungai, Estuari dan Danau (Bukaveckas, 2009)

No	Karakteristik	Sungai	Estuari	Danau
1	Pergerakan air	Satu arah, horizontal	Dua arah, horisontal	Vertikal
2	Kekuatan air	Gravitasi	Tidal	Angin
3	Fluktuasi ketinggian air	Besar (musiman)	Variatif (banjir)	Kecil (musiman)
4	Waktu tinggal air	Harian – mingguan	Mingguan-bulanan	Bulanan – tahunan
5	Asal air	Aliran	Aliran, <i>backwater</i> , hujan	Aliran, air tanah, hujan
6	Stratifikasi/pelapisan	Jarang	Sering (akibat salinitas)	Sering (akibat suhu)
7	Transparansi	Rendah (partikel <i>non-alga</i>)	Variatif (partikel terurai)	Tinggi (alga, warna yang terlarut)

Pada Tabel 2.1 yang dimaksud dengan kekuatan air adalah gaya yang menyebabkan air mampu mengalir atau bergerak. Sedangkan transparansi yang tinggi pada danau disebabkan karena adanya pengendapan pada partikel *non-alga* seperti lumpur, sedimen dan sebagainya, sehingga air pada danau lebih jernih. Ekosistem sungai yang alirannya searah ke hilir dan terjadi fluktuasi kedalaman serta debit yang tinggi didominasi oleh partikel *non-alga*. Jenis flora dan fauna yang ada dalam ekosistem sungai didominasi oleh kondisi aliran. Pada musim hujan dan kemarau ekosistemnya bisa bersifat sementara.

2.2 Restorasi Sungai

Restorasi sungai pada umumnya dilaksanakan di suatu ruas restorasi sungai. Ruas restorasi adalah suatu bagian dari sungai yang secara khusus direstorasi. Ruas sungai yang direstorasi dilakukan untuk mengembalikan sungai ke kondisi alami, yaitu keadaan lingkungan sungai alami yang direncanakan sebagai kondisi yang ingin dicapai (Hsieh and Shen, 1994). Prioritas utama dari restorasi sungai adalah mencegah kerusakan berlanjut pada ruas sungai tertentu dan direncanakan agar menjadi ruas sungai yang lebih alamiah kembali (Liao, 2014). Sungai yang baik dan alamiah tercermin dari berkembangnya kehidupan berbagai jenis flora dan fauna di sungai tersebut.

2.2.1 Pengertian Restorasi Sungai

Pengelolaan sungai dengan pendekatan restorasi sungai sudah dilaksanakan di banyak negara dengan berbagai tujuan dan perbedaan pengertian. Pengertian restorasi sungai sangat beragam sesuai dengan kepentingannya. Beberapa definisi restorasi sungai disajikan sebagai berikut:

- 1) Shields et al. (2003), mengartikan restorasi sungai adalah kegiatan pengembalian ekosistem aliran sungai yang telah terdegradasi, kearah yang mendekati potensi alamiah sungai kembali.
- 2) Maryono (2003) mendefinisikan secara umum kegiatan restorasi adalah upaya pengembalian atau pemulihan pada keadaan awal sebelum ada gangguan atau kegiatan mengembalikan fungsi alami/*renaturalisasi* sungai yang telah terdegradasi oleh intervensi manusia.
- 3) Dangerfield (1999); Klingeman et al. (2004) dan Darus et al. (2004) mendefinisikan restorasi alur sungai adalah kegiatan perlindungan dan pengembalian sistim kawasan sungai menjadi kondisi yang berproses natural, yang menciptakan peningkatan nilai ekosistem dan keanekaragaman hayati yang berkelanjutan.

- 4) Pagliara and Chiavaccini (2006), secara umum mendefinisikan restorasi berarti “kembali ke” dengan demikian restorasi sungai adalah suatu kegiatan yang mengembalikan sistem sungai kepada kondisi awal yang lebih alamiah yaitu dengan melindungi lingkungan dan melestarikan sesuatu yang meningkatkan nilai ekosistem keanekaragaman hayati.
- 5) Parkyn et al. (2010) menyatakan pengertian restorasi dari sisi ekologi bermakna mengembalikan ekosistem sungai menuju kondisi yang lebih alamiah. Kegiatan restorasi termasuk meningkatkan kualitas air, habitat fisik sungai, hubungan dan proses ekologi yang penting guna memelihara kehidupan flora fauna yang alamiah.
- 6) Khatami (2012) menyatakan bahwa dari berbagai definisi restorasi yang paling universal adalah kegiatan menyeluruh struktural maupun fungsional untuk mengembalikan ke situasi sebelum ada gangguan.

Pemahaman restorasi diatas secara umum adalah mengembalikan kondisi dan fungsi sungai ke situasi sebelum terjadi gangguan/perubahan. Keberhasilan proses restorasi dapat diukur sesuai dengan maksud dan tujuan restorasi. Palmer et al. (2005) mendeskripsikan keberhasilan suatu proses restorasi dapat merupakan salah satu atau gabungan kombinasi dari 3 (tiga) keberhasilan yaitu:

- 1) Keberhasilan ekologi yaitu peningkatan kondisi ekologi menjadi lebih mandiri tidak merusak lingkungan yang terukur.
- 2) Keberhasilan *stakeholder* yaitu kepuasan seluruh stakeholder terhadap hasil dari proses restorasi.
- 3) Keberhasilan pembelajaran proses restorasi yaitu peningkatan ilmu pengetahuan dan pelaksanaan pengelolaan sungai yang bermanfaat untuk kegiatan restorasi yang akan datang.

Palmer et al. (2005) mendeskripsikan keberhasilan proses restorasi berdasarkan pendekatan ekologi dapat diukur dengan menggunakan 5 (lima) buah kriteria yaitu:

- 1) Desain dari restorasi sungai harus berdasarkan gambaran kondisi sungai yang lebih dinamis dan sehat di daerah tersebut.
- 2) Kondisi ekologi sungai harus ditingkatkan secara terukur.
- 3) Sistem sungai harus lebih mandiri dan tahan terhadap gangguan eksternal sehingga hanya sedikit upaya pemeliharaan yang dibutuhkan.
- 4) Selama masa konstruksi tidak ada kerugian atau kerusakan pada ekosistem.

- 5) Sebelum dan sesudah penilaian keberhasilan restorasi data harus lengkap dan tersedia untuk umum.

Keberhasilan restorasi berdasarkan *stakeholder* berkaitan dengan kriteria sosial yang diinginkan oleh *stakeholder*. Keberhasilan restorasi ini dapat berhubungan dengan pengadaan infrastruktur penunjang yang dibangun, termasuk didalamnya pengaruh skala besaran daerah aliran sungai (DAS) dan hambatan dalam pelaksanaan proses restorasi. Keberhasilan berdasarkan kepuasan *stakeholder* suatu proses restorasi ruas sungai yang berskala besar menjadi lebih susah diukur dibandingkan dengan keberhasilan kepuasan *stakeholder* dari proses restorasi satu ruas sungai yang kecil.

Keberhasilan proses restorasi dari konteks proses pembelajaran dapat diukur dari kontribusi ilmu pengetahuan, pengalaman pelaksanaan dan peningkatan metode proses restorasi. Restorasi sungai dari konteks proses pembelajaran selalu harus menjawab seberapa banyak pengaruh restorasi sungai terhadap peningkatan ilmu pengetahuan. Keberhasilan proses pembelajaran restorasi sungai adalah *intersection* dari peningkatan ekologi sungai dan kepuasan stakeholder sesuai tujuan restorasi yang akan dicapai. Hasil akhir proses keberhasilan restorasi adalah terciptanya pemulihan kondisi hidrologi, geomorfologi dan ekologi sungai secara mandiri.

2.2.2 Tujuan Kegiatan Restorasi Sungai

Tujuan proses restorasi sungai yang dilaksanakan bisa sangat beragam tergantung dari perspektifnya. Tujuan dari aspek ekologi akan berbeda dengan tujuan restorasi sungai dari aspek sosial budaya. Tujuan ekologi bisa berkebalikan dengan restorasi sungai dari aspek rekayasa sungai. Salah satu contoh tujuan restorasi sungai di Indonesia adalah bertujuan mengembalikan fungsi alami sungai guna memperoleh manfaat tertentu agar sungai dapat dinikmati keasriannya dan kemanfaatannya oleh masyarakat (DSDA_PUPR, 2016).

Motif melaksanakan restorasi sungai dapat bermacam macam, pada umumnya pelaksanaan restorasi sungai didasarkan enam motif (DSDA_PUPR, 2016) :

- 1) Memperoleh lingkungan sungai yang lebih asri dan berkualitas.
- 2) Memperoleh kemanfaatan sosial dan ekonomis dari sungai.
- 3) Membentuk kembali lingkungan sungai senatural mungkin.
- 4) Meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap banjir.
- 5) Meningkatkan ketahanan terhadap dampak perubahan iklim.

6) Menjaga keanekaragaman hayati.

Pengertian motif restorasi di atas adalah alasan, sebab, atau gagasan yang paling dominan dalam melaksanakan restorasi sungai. Berdasarkan motif melaksanakan restorasi sungai dapat tercermin dari arah merestorasi sungai. Motif yang dominan adalah ke peningkatan kualitas ekosistem secara mandiri, berkualitas, menuju kondisi senatural mungkin dengan tetap menjaga keanekaragaman hayati. Untuk mengetahui keberhasilan motif tersebut maka harus bisa terukur sebelum dilaksanakan dan setelah proses restorasi sungai.

2.2.3 Tipe Kegiatan Restorasi Sungai

Restorasi sungai di negara Eropa dikenalkan sejak dimulai di Denmark tahun 1970 (Dangerfield, 1999) dan di Amerika sudah mulai dilaksanakan sebelum tahun 1990 (Parkyn et al., 2010). Kegiatan restorasi di negara-negara di belahan dunia yang lain menyusul setelah periode tersebut. Kegiatan restorasi ini sangat beragam dengan tujuan yang paling utama adalah mengembalikan sungai menjadi lebih alamiah. Salah satu contoh restorasi sungai di Indonesia adalah restorasi Sungai Cikapundung. Konsep restorasi Sungai Cikapundung adalah tersedianya ruang terbuka publik di sepanjang sungai Cikapundung untuk edukasi, rekreasi, olahraga dan membuka peluang pemberdayaan ekonomi masyarakat sekitar. Bentuk lain konsep restorasi sungai di Indonesia adalah Sungai-sungai Cidem Winongo, Tambak Bayan, Kuning dan Gajah Wong yang mengarah mengembalikan sungai seperti sedia kala sebelum ada gangguan.

Tipe kegiatan restorasi sungai sangat beragam sesuai dengan tujuan yang akan dicapai. Jenis kegiatan yang dilaksanakan pada restorasi sungai menurut Pagliara and Chiavaccini (2006); Wheaton (2005); Palmer et al. (2005); Kondolf et al. (2007) dapat berupa salah satu atau kombinasi dari kegiatan-kegiatan sebagai berikut:

- 1) Pengelolaan kawasan sungai.
- 2) Mengembalikan ekosistem sungai.
- 3) Mengembalikan habitat sungai.
- 4) Pengelolaan kualitas air.
- 5) Perlindungan tebing/lereng.
- 6) Pembuatan kawasan banjir.
- 7) Pengelolaan/pengendalian banjir.
- 8) Pengembalian dataran banjir.
- 9) Penyelarasan dan pembongkaran bangunan bendung.

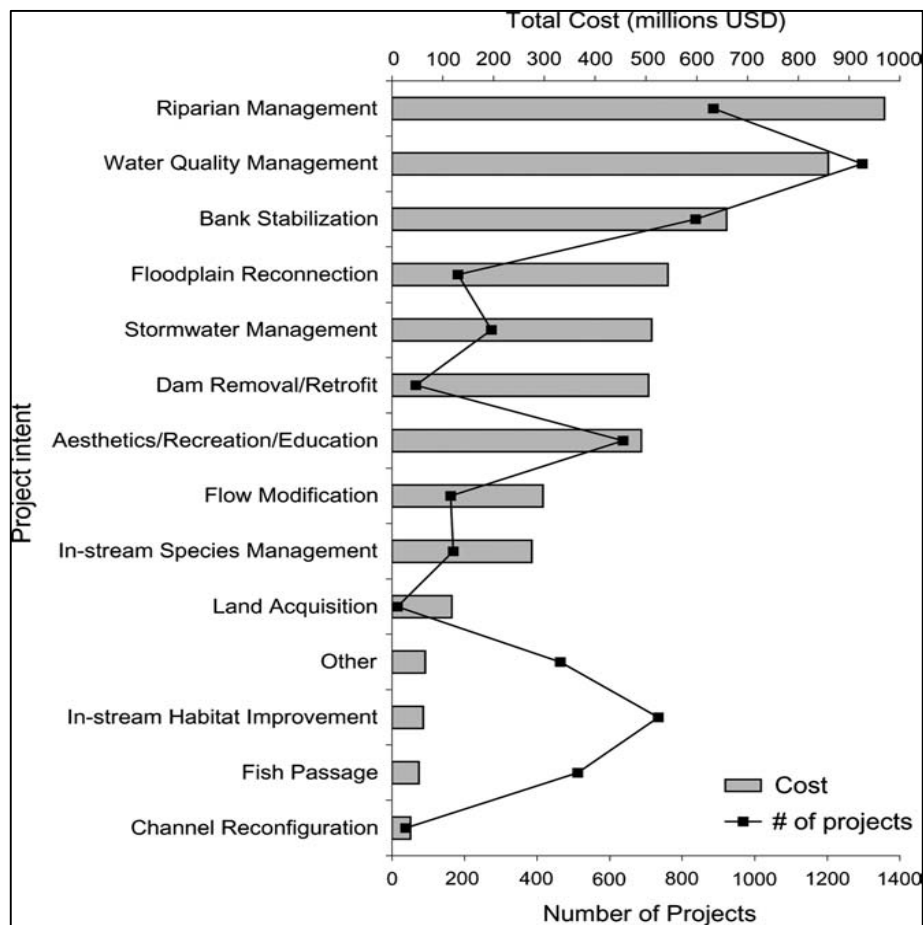
- 10) Pengelolaan sedimen.
- 11) Penataan kawasan rekreasi.
- 12) Pengaturan sistim operasi.
- 13) Pembangunan tanga ikan.
- 14) Peningkatan habitat dalam sungai.
- 15) Estetika.
- 16) Rekreasi.

Kondolf et al. (2007) menyatakan bahwa di Amerika jumlah kegiatan yang berkaitan dengan penataan kawasan sungai cukup besar dan memerlukan biaya yang paling banyak dibandingkan dengan kegiatan pengelolaan sungai yang lainnya. Sebagai salah satu contoh investasi dibidang pengelolaan sungai adalah kegiatan pengelolaan sungai di California. Jumlah biaya investasi yang dikeluarkan untuk biaya restorasi sungai yang terbesar adalah pada kegiatan pengelolaan kawasan riparian sungai. Biaya terbesar kedua adalah pengelolaan kualitas air. Hal tersebut dapat dipahami karena kawasan sungai dan pengelolaan kualitas air merupakan dua indikator utama pada upaya restorasi sungai. Jumlah dan biaya per kegiatan restorasi Sungai-sungai di California disajikan pada Gambar 2-1.

Pan et al. (2016) mendeskripsikan terdapat dua kelompok lokasi restorasi sungai yaitu (1) restorasi kawasan sungai atau ruang sungai dan (2) restorasi alur sungai. Pada saat ini kebutuhan dana restorasi di negara maju lebih banyak digunakan untuk kegiatan merestorasi kawasan sungai. Kegiatan restorasi pada alur sungai sudah mulai di tinggalkan. Jumlah penyempurnaan infrastruktur di dalam alur sungai justru tidak mendominasi anggaran pengelolaan sungai (Kondolf et al., 2007). Kebutuhan biaya untuk stabilisasi tebing/tanggul sungai menjadi prioritas ke tiga yang menggunakan anggaran sampai 12% dibawah kegiatan restorasi ruang sungai dan pengelolaan kualitas air sungai.

2.3 Pelindung Tebing Sungai

Tebing sungai merupakan bagian terluar dari tepi sungai yang terjadi karena proses erosi (Wikipedia.org., 2019). Tebing sungai merupakan bagian yang berhubungan dengan aliran air sungai dengan demikian tebing sungai sering terjadi permasalahan erosi dan longsor. Perlindungan tebing sungai adalah rekayasa yang dilakukan untuk melindungi tebing sungai agar memiliki kondisi dan fungsi sebagaimana direncanakan.



Gambar 2-1. Jumlah kegiatan dan Biaya Pengelolaan Sungai di California- Amerika Serikat Sampai Tahun 2007 (Kondolf et al., 2007)

2.3.1 Bangunan Pelindung Tebing Sungai

Bangunan pelindung tebing adalah konstruksi yang dibangun untuk mengembalikan kestabilan lereng dengan menggunakan perlindungan material yang tahan terhadap erosi (Long et al., 2006). Pelindung tebing berfungsi untuk memproteksi kemiringan lereng terhadap erosi oleh aliran dan gelombang serta melindungi longsor. Berbagai tipe pelindung dibuat untuk beberapa tujuan yang berbeda.

Permasalahan tebing sungai umumnya dapat dikelompokkan menjadi 2 yaitu erosi tebing dan longsoran tebing. Erosi adalah proses lepasnya material atau sebagian material dari lokasi semula oleh media pengangkut seperti air, angin maupun media pengangkut lainnya. Longsoran adalah berpindahnya material atau sebagian material akibat gaya grafitasi atau gaya tarik atau dorong dari luar. Permasalahan tebing sungai karena erosi maupun longsoran dikarenakan daya penahan lebih kecil dibandingkan gaya tarik/dorong. Permasalahan tebing yang pertama yaitu erosi pada tebing sungai. Erosi tebing

adalah erosi yang disebabkan oleh aliran air sungai dan aliran lateral dari arah samping yang mengenai permukaan tebing. Permasalahan tebing yang ke dua yaitu longsoran disebabkan oleh kecilnya daya dukung tanah dalam menahan gravitasi dan daya dari luar yang menyebabkan longsor. Permasalahan erosi dapat memicu permasalahan longsor demikian juga sebaliknya. Permasalahan erosi dapat terjadi bersama sama dengan longsor dan dapat terjadi secara terpisah.

Rekayasa untuk menangani permasalahan tebing dibidang teknik sipil dapat dilakukan dengan berbagai upaya. Upaya tersebut dapat dikelompokkan ke dalam upaya struktur dan upaya vegetasi/biologi. Jenis penanganan permasalahan tebing sungai ditentukan oleh tipe permasalahan yang dihadapi. Upaya penanganan masalah erosi tebing sungai dapat menggunakan: (1) rekayasa pembelokan/pengaturan arah aliran menggunakan bangunan pengarah atau (2) bangunan/tanaman pelindung erosi. Upaya penanganan masalah longsoran dapat menggunakan rekayasa bangunan perkuatan tebing.

Penanganan erosi dengan bangunan pengarah aliran bertujuan untuk membelokkan/mengarahkan arah aliran agar tidak mengerosi tebing sungai. Tujuan dari pembelokan/pengaturan arah aliran juga dapat mengurangi kecepatan aliran sungai yang mencapai di tebing sungai. Pengaturan arah aliran dan pengurangan kecepatan aliran dapat mengurangi erosi tebing sungai. Pelindung tebing sungai dengan perkerasan dapat melindungi material tebing sungai yang lemah atau lunak menjadi kuat atau keras sehingga aman dari bahaya erosi. Pelapisan atau perkerasan permukaan tebing sungai rawan erosi tidak hanya dilakukan secara struktur bangunan akan tetapi dapat dilakukan dengan menggunakan cara vegetasi. Perkuatan tebing sungai dengan menanam berbagai tumbuhan dapat meningkatkan tebing menjadi lebih tahan terhadap erosi.

Permasalah tebing sungai yang lainnya adalah tebing longsor. Tebing longsor adalah kejadian runtuhnya tebing yang diakibatkan momen/gaya material penahan tebing lebih kecil dibandingkan dengan momen/gaya yang membuat longsor. Perlindungan tebing longsor dilakukan dengan membangun struktur bangunan pelindung tebing. Jenis struktur bangunan pelindung tebing longsor bisa beragam sesuai dengan material yang digunakan. Jenis bangunan pelindung tebing yang dikelompokkan berdasarkan material, tipe bangunan, maupun penyebab munculnya permasalahan di tebing sungai disajikan pada Tabel 2-2.

Tabel 2-2. Permasalahan dan Solusi Tebing Sungai (Litbang Sungai, 2018 ; Sosrodarsono and Tominaga, 1989).

No	Masalah	Solusi	Jenis Perlindungan	Bahan Perlindungan			
1	Erosi	Pengaruh aliran	1. Bangunan Krib Tembus (<i>permeable krib</i>)	1. Tiang pancang 2. Bronjong 3. Tanaman bambu 4. Kayu/dolken			
			2. Bangunan Krib Kedap (<i>non permeable krib</i>)	1. Beton bertulang 2. Pasangan batu kali			
			3. Bangunan Sirip tenggelam	1. Blok beton (cetak diluar) 2. Rangka baja 3. Rangkaian balok kayu			
			4. Tumpukan blok material	1. Blok beton pracetak (<i>tetrapot</i>)			
		Perlindungan langsung	1. Bangunan revetment	1. Pasangan batu kali 2. Beton bertulang 3. Blok beton terkunci 4. Bronjong batu 5. <i>Rip-rap/ dump stones</i> 6. Rangka/frame beton 7. <i>Geocell</i> 8. <i>Geogrid</i>			
				2. Vegetasi	1. Pohon hidup 2. Batang tunjang hidup 3. Ranting menjalar 4. Bibit tanaman 5. Penyemprotan benih 6. Tanaman rerumputan		
			2	Longsor	Bangunan Penahan	1. Dinding: a. Grafitasi	1. Beton bertulang 2. Pasangan batu kali
						b. Kantilever	1. Beton bertulang 2. Pasangan batu kali
c. <i>Counterford</i>	1. Beton bertulang 2. Pasangan batu kali						
2. Turap	1. Kayu/bambu 2. Baja 3. Beton bertulang 4. Plastik/karet						
3. Angkur/Ikatan	1. Jangkar (<i>anchored</i>) 2. Ikatan dipaku (<i>nailing</i>)						
4. Tumpukan blok material/pelapisan	1. Blok beton pracetak 2. <i>Shortcrate</i>						
	Perlakuan Material Tanah		1. <i>Grouting</i> 2. <i>Burning</i>				

Permasalahan dan solusi tebing sungai pada Tabel 2-2 mendeskripsikan kelompok penanganan tergantung dari jenis permasalahan. Penanganan dengan satu jenis solusi

bangunan bisa untuk menyelesaikan lebih dari satu macam permasalahan. Atau sebaliknya satu permasalahan dapat ditangani dengan beberapa macam solusi alternatif bangunan. Pemilihan metode penanganan bisa berdasarkan beberapa kriteria yang dikelompokkan kepada kriteria teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial budaya masyarakat setempat. Bangunan pelindung tebing sungai bersifat spesifik karena suatu solusi alternatif terbaik di suatu tempat belum tentu dapat diterapkan secara umum di tempat yang lain.

2.3.2 Batu Bata Sebagai Material Pelindung Tebing Sungai

Batu bata merah atau batu bata bakar adalah material konstruksi yang umum digunakan sebagai material bangunan dinding. Sesuai dengan perkembangan teknologi batu bata maka bentuk dan ukurannya menjadi bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Beberapa macam batu bata yang diproduksi dan dijual di pasar pada umumnya dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu: (1) batu bata polos dan (2) batu bata bertautan/berkait (*interlocking brick*). Batu bata polos berupa batu bata merah, batako, bata ringan yang umumnya digunakan untuk dinding dengan permukaan diplester. Batu bata *interlock* digunakan sebagai material dinding batu bata *ter-expose* atau dapat juga diplester permukaannya seperti batu bata polos. Visualisasi batu bata bakar polos atau konvensional disajikan pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2. Batu Bata Polos (“<http://specindo.com/wp-content/uploads/2015/11/Info-harga-Batu-Bata.jpg>,” n.d.)

Batu bata bakar adalah bata yang terbuat dari tanah lempung yang dicetak kemudian dibakar pada suhu tinggi sehingga menjadi benar-benar kering, mengeras dan berwarna kemerah-merahan. Tanah yang digunakan adalah lempung yang liat sehingga dapat menyatu saat proses pencetakan. Dimensi bata merah pada umumnya memiliki

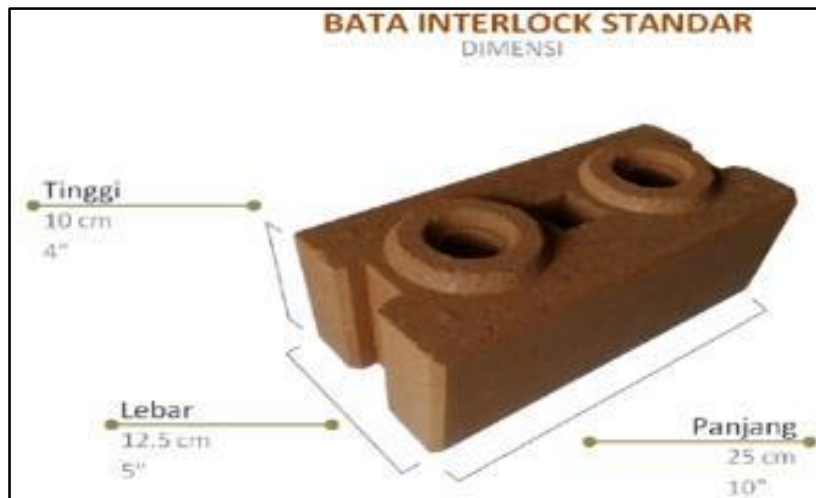
panjang antar 17-23 cm, lebar antara 7-11 cm, dan tebal antara 3-5 cm. Dimensi batu bata yang relatif kecil memberikan kemudahan dalam hal pengangkutan, mudah digunakan untuk membentuk bidang kecil, harga murah dan bata merah mudah diperoleh.

Batu bata bakar memiliki spesifikasi teknis yang sangat bervariasi sesuai dengan karakteristik produsennya. Batu bata yang dijual di pasaran memiliki nilai masa jenis kering yang berkisar 1.500 kg/m^3 , masa jenis normal/basah setelah direncam 2000 kg/m^3 dan kuat tekan yang bervariasi antara $2,5 - 25 \text{ N/cm}^2$ (BSN, 2000). Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata rata kuat tekan batu bata polos/konvensional cetak basah hasil pengujian di laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil UNS adalah 78 N/mm^2 .

Batu bata bakar sudah digunakan secara tradisional karena memiliki sifat yang menguntungkan dan beberapa sifat kekurangan. Kelebihan batu bata bakar antara lain mudah diperoleh, memiliki bentuk kecil, mudah diangkut dan dibentuk tanpa perekat khusus. Batu bata juga memiliki sifat yang tahan api dan jika lapuk menjadi material tanah yang ramah lingkungan. Batu bata bakar memiliki beberapa kekurangan jika dibandingkan dengan material konstruksi sejenis yang lain. Kekurangan batu bata antara lain karena ukurannya kecil sehingga memerlukan material perekat yang lebih banyak dan memerlukan waktu pemasangan yang lebih lama. Kualitas batu bata bakar cenderung tidak seragam dan sering mengalami rusak atau patah dalam proses pemasangan. Batu bata bakar juga memiliki kelemahan yaitu memiliki beban yang relatif berat.

Bata berkait/bertautan atau disebut *interlock brick* adalah batu bata yang dapat saling mengunci dan dapat menahan pergerakan gaya geser. Bata *interlock* telah dikembangkan dan banyak digunakan di negara maju. Bata berkait/bertautan berbentuk mirip seperti mainan bongkar pasang (*lego*). Bata ini tidak dirancang sebagai tanpa perekat (*material mortarless*) dengan demikian tetap diperlukan perekat. Dimensi bata ini umumnya memiliki panjang bata 2 kali dari lebar bata. Batu bata *interlock* umumnya dicetak dengan ukuran $25 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ atau $10 \text{ inci} \times 5 \text{ inci} \times 4 \text{ inci}$.

Bata *interlock* dibuat dari bahan pasir-semen yang dicetak dengan tekanan. Bata *interlock* di pasaran memiliki berbagai bentuk yang sejenis dengan *paving block*. Bata ini dibuat dengan perbandingan komponen pasir : semen yang sangat beragam antara 10:1 sampai 4:1. Keragaman perbandingan komponen material pasir - semen menjadikan bata *interlock* memiliki ragam spesifikasi dan harga. Bentuk batu bata *interlock* pasir-semen yang standart di pasaran disajikan pada Gambar 2-3.



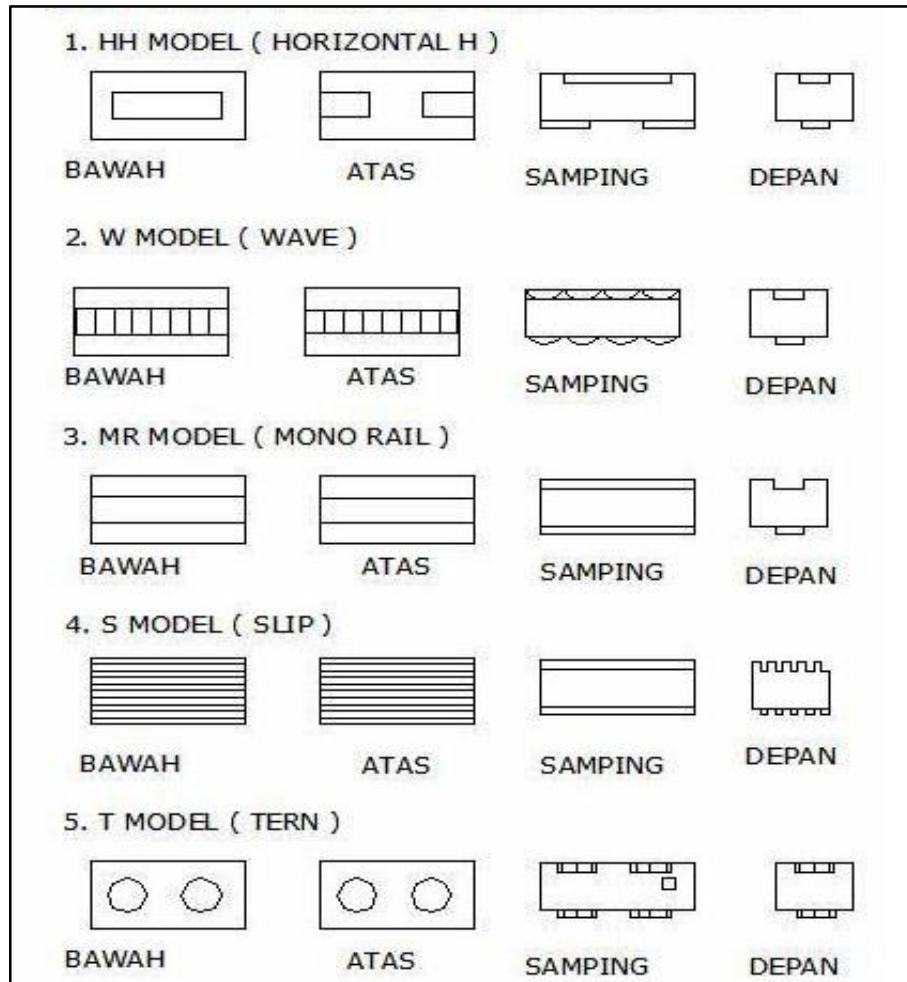
Gambar 2-3. Batu Bata *interlock* (“http://www.batatumpuk.com/images/bata_interlock_WEB2.jpg,” n.d.)

Bata *interlock* pasir-semen memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan batu bata polos. Keunggulan yang utama adalah ada tautan antara bata satu dengan yang lain sehingga dalam penyusunan bata terdapat ikatan antar bata tanpa menggunakan material perekat (*construction joint*). Kelebihan yang lain adalah dimensi yang lebih tebal, proses produksi yang lebih cepat. Kuat tekan standar menurut Standart Nasional Indonesia sekitar 8 Mpa 80 kg/cm^2 (BSN, 1989). Bata *interlock* bisa dibongkar dan kemudian bisa dipasang kembali dengan utuh secara cepat, menghemat material perekat, dan pengerjaan pemasangan mudah dan cepat. Kekurangan material bata *interlock* yang utama adalah pada saat terjadi kerusakan di bagian bawah maka proses perbaikan harus dilakukan pembongkaran komponen susunan bata di bagian atasnya. Bata *interlock* memiliki kelemahan pada dimensi yang harus presisi karena kaitan antar bata akan lemah jika tidak berdimensi seragam.

Bentuk batu bata *interlock* yang dijual di pasaran memiliki berbagai tipe. Keragaman bentuk bata dapat dikelompokkan dalam 6 bentuk standart. Batu bata *interlock* yang umum digunakan untuk dinding rumah dapat sebagai alternatif bahan yang bisa digunakan sebagai material penyusun pelindung tebing. Pelindung tebing bata *interlock* memiliki keunggulan susunan tautannya yang mampu menahan gaya geser yang lebih besar dibandingkan bata polos.

Batu bata *interlock* yang diproduksi umum belum banyak yang berbahan dasar material tanah lempung yang dibakar. Batu bata *interlock* berbahan material tanah yang dibakar memiliki kelebihan lebih ramah lingkungan, menyatu dan melekat dengan tanah

dan dapat sebagai media tanaman untuk tumbuh. Material tanah dapat mendukung proses pertumbuhan akar tanaman karena memiliki moisture yang relatif sama dengan tanah di sekitarnya. Tipe bentuk bata *interlock* yaitu tipe-tipe :*Horisontal, Wave, Monorail, Slip* dan *Tern* disajikan pada Gambar 2-4.



Gambar 2-4. Skematisasi Bentuk Batu Bata Bertautan (Laksono, 2012)

2.3.3 Tanaman Pelindung Tebing Sungai

Tanaman tertentu dapat diterapkan sebagai bahan pelindung tebing yang menunjang proses merestorasi sungai (Bentrup and Hoag, 1998) dan Darus et al. (2004). Tanaman dapat digunakan melindungi tebing dengan mengarahkan atau membelokkan arah aliran. Pelindung tebing dengan tanaman lebih banyak dimanfaatkan untuk mengedalikan erosi di lereng akibat aliran air (Tardío and Mickovski, 2015). Fungsi tanaman sebagai media untuk melindungi tebing yang tererosi dilakukan untuk melindungi tanah terhadap gaya

angkut oleh air pada kecepatan yang tinggi. Pelindung tebing dengan tanaman dapat berupa : (1) pohon hidup, (2) batang tunjang hidup, (3) ranting menjalar, (4) bibit tanaman, (5) penyemprotan benih, (6) tanaman rerumputan. Gambar 2-5 menyajikan salah satu jenis tanaman rerumputan yang digunakan untuk pelindung erosi.



Gambar 2-5. (kiri) Pelindung Tebing Dengan Tanaman Pada saat Ditanam dan (kanan) Tanaman pada Usia Satu Tahun (Luderitz, 2012).

Tanaman pelindung tebing di Indonesia jumlahnya sangat beragam. Salah satu contoh penggunaan beberapa jenis tanaman pelindung adalah yang di tanam di tebing Sungai Siak. Pelindung tebing sungai di salah tepi Sungai Siak dapat dipisahkan dalam 3 kelompok (Sittadewi, 2016), yaitu :

- 1) Jenis rumput antara lain: Rumput Teki (*Cyperus rotundus*); Rumput Kumpai (*Hymenachne acutigluma*); Rumput Akar Wangi (*Vetiveria zianioides*); Alang - alang (*Imperata cylindrica*).
- 2) Jenis Bambu, kangkung dan pandan yang antara lain adalah: Bambu Kuning (*Bambusa, sp*); Bambu Kasap (*Pogonatherium*); Pandan (*Pandanus, sp*); Karangkunan (*Ipomea carnea*); Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*); Rumbia (*Nypha fruticans*).
- 3) Jenis pohon - pohonan antara lain: Akasia (*Acasia,sp*); Asam Payau (*Acanthus ilicifolium, L*); Binjai (*Mangifera caesia*); Bintaro (*Cerbera manghas*); Berembang (*Sonneratia, sp*); Jawi – jawi (*Ficus, sp*); Keduduh (*Melastoma candidum*); Kempas (*Koompassia malaccensis*); Meranti (*Shorea, sp*); Putat (*Barringtonia spicata*); Rengas (*Gluta renghas*); Waru (*Hibiscus tiliaceus L*).

Sittadewi (2016) menyatakan bahwa tanaman pelindung tebing yang diteliti adalah pada lokasi yang tidak dilengkapi dengan turap dengan demikian tanamannya langsung bersinggungan dengan aliran. Berdasarkan kecepatan aliran sungainya maka untuk kecepatan yang rendah jenis pelindung tebing dapat menggunakan tanaman bambu, pandan dan pohon-pohonan, sedangkan untuk pelindung tebing sungai dengan kecepatan tinggi dapat menggunakan jenis rumput teki, kumpai dan akar wangi. Berdasarkan struktur tanamannya maka tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) memiliki keunggulan pada akar tanaman yang dapat mencapai 2-4 meter (Rahardjo et al., 2014 dan Tardío and Mickovski, 2015).

Tanaman penahan erosi yang dikembangkan oleh Balai DAS Bengawan Solo terdiri dari tanaman rerumputan yang ditanam berjajar. Penelitian yang dilakukan oleh Wardoyo and Priyono (1996) di DAS Bengawan Solo mengkaji 6 (enam) macam jenis rumput. Hasil penelitian membuktikan masing masing jenis rumput yang diteliti memiliki keunggulan yang berbeda sesuai dengan kondisi lokasi dan keperluannya. Adapun beberapa jenis rumput yang dikenal sebagai tanaman konservasi tanah antara lain:

- 1) Rumput Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides*).
- 2) Rumput Bebe (*Brachiaria brizantha*).
- 3) Rumput Bahia (*Paspalum notatum*).
- 4) Rumput Setaria (*Setaria sphacelata*).
- 5) Rumput Raja (*Pennisetum purpureoides*).
- 6) Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*).

Sifat umum pertumbuhan masing-masing jenis rumput yang ditemukan oleh Wardoyo and Priyono (1996) dapat diuraikan sebagai berikut:

- 1) Rumput Akar Wangi (*Veriveria zizanioides*).
 - a) Rumpun tinggi dan kuat.
 - b) Perakaran vertikal dan dalam.
 - c) Tidak tahan naungan.
 - d) Sesuai pada tanah yang lembab (drainase kurang baik).
 - e) Harus sering dipangkas untuk mempercepat perkembangan rumpun.
 - f) Akarnya mempunyai nilai ekonomi tinggi.
 - g) Hanya kuncup awal setelah pangkasan yang dapat digunakan sebagai pakan ternak.

- 2) Rumput Bebe (*Brachiaria brizantha*).
 - a) Pertumbuhannya menjalar dan rendah.
 - b) Tahan kering.
 - c) Cepat tumbuh.
 - d) Penjarangannya harus sering diarahkan pada arah tertentu bila tidak ingin mengganggu tanaman utama.
- 3) Rumput Bahia (*Paspalum notatum*)
 - a) Menjalar dengan *stolon*.
 - b) Berakar dalam.
 - c) Tinggi bisa mencapai 0.6 m atau lebih.
 - d) Tahan kering dan mudah berkembang.
- 4) Rumput Setaria (*Setaria spaelata*).
 - a) Pertumbuhannya merumpun.
 - b) Cocok untuk konsumsi ternak kecil.
 - c) Kurang tahan kering.
 - d) Sudah umum digunakan sehingga mudah memperoleh bibit.
- 5) Rumput Raja (*Pennisetum purpoides*).
 - a) Tumbuh merumpun dan tinggi.
 - b) Berpelepah besar sehingga hanya cocok untuk konsumsi ternak besar.
 - c) Kurang cocok untuk lahan tanaman pangan.
- 6) Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*).
 - a) Tumbuh merumpun dan meninggi.
 - b) Harus sering dipangkas untuk mempercepat perkembangan rumpun.
 - c) Sudah banyak digunakan dan cocok untuk konsumsi ternak besar.
 - d) Tahan terhadap kekeringan.

Wardojo and Priyono (1996) membuktikan bahwa tanaman rerumputan dapat berperan mengendalikan erosi permukaan. Berdasarkan pelaksanaan uji coba dapat diketahui pengaruh jarak tanam dan usia tanam. Jarak tanaman yang paling efektif berdasarkan pengujian adalah 20 x 30 cm. Jarak tanam tersebut ditanam bersilangan pada baris tanaman dibagian atas dan dibagian bawahnya, sedangkan usia tanaman yang berperan melindungi erosi adalah setelah berusia satu musim.

2.3.4 Tanaman Akar Wangi (*Vetivera zizanioides*)

Tanaman akar wangi adalah tanaman yang dibudidayakan oleh masyarakat sebagai bahan tanaman untuk kerajinan tangan dan bahan pengharum pakaian maupun penghasil minyak atsiri, tanaman akar wangi juga digunakan untuk tanaman penahan erosi permukaan. Pada awalnya budidaya tanaman akar wangi sudah dikenal masyarakat sebagai jenis tanaman yang diambil akarnya untuk kerajinan tangan. Kerajinan berbahan akar tanaman yang digunakan umumnya dibuat menjadi kipas, atau kerajinan berbentuk hiasan dinding. Akar tanaman akar wangi banyak yang disimpan di dalam almari pakaian dengan tujuan aroma akarnya untuk pengusir binatang seperti cicak dan kecoa. Budidaya tanaman akar wangi digunakan untuk pewangi karena mengandung *ester* yang didalamnya terdapat senyawa *sekuiterpenoid* seperti *vetivone*, *khumisol*, *cadanena*, *cedrena* dan β -*humulena* (Wikipedia.org., 2020).

Kadek (2012) ; Wardojo and Priyono (1996) menyatakan bahwa rumput akar wangi adalah tanaman tropis berukuran besar yang berfungsi baik menahan laju erosi. Berdasarkan klasifikasi ilmiah tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) maka dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- a) Kerajaan : *Plantae*.
- b) Divisi : *Magnoliophyta*.
- c) Kelas : *Liliopsida*.
- d) Ordo : *Poales*.
- e) Famili : *Poaceae*.
- f) Genus : *Chrysopogon*.
- g) Spesies : *Chrysopogon zizanioides syn.*
- h) Sinonim : *Vetiveria zizanioides*.

Tanaman akar wangi di beberapa daerah di Indonesia dikenal dengan berbagai nama nama daerah setempat. Menurut Kadek (2012) nama nama lokal tanaman akar wangi sebagai berikut: useur (Gayo), urek usa (Minang Kabau), hapias (Batak), narwasetu atau usar (Sunda), larasetu (Jawa), karabistu (Madura), nausina fuik (Roti), tahele (gorontalo), akadu (buol), sere ambong (Bugis), babuwamendi (Halmahera), garamakusu batawi (Ternate), dan baramakusu buta (Tidore).

Struktur tanaman akar wangi memiliki ciri ciri sebagai berikut (Kadek, 2012; Wardojo and Priyono, 1996):

- 1) Memiliki batang lebih keras dibandingkan tanaman rerumputan yang lain.
- 2) Akar dapat tumbuh sampai 2-4 m.
- 3) Tidak menghasilkan bunga dan biji yang bisa ditanam.
- 4) Tumbuh tegak sampai dengan 1,5 m.
- 5) Membentuk pagar jika ditanam berjajar.

Visualisasi morfologi tanaman akar wangi tersebut diatas disajikan pada Gambar 2-6.



Gambar 2-6. Tanaman Rumput Akar Wangi (Triastopo, 2016)

Keunggulan tanaman akar wangi telah banyak diteliti karena akar tanaman yang relatif kuat dan panjang yang berfungsi sebagai ankur (Eab et al., 2015) namun memiliki fungsi menyerap limbah logam berat (Banerjee et al., 2016). Raman & Gnansounou (2015) bahkan menyatakan bahwa daun tanaman akar wangi dapat menghasilkan kadar *bioetanol* yang baik. Keunggulan tanaman akar wangi antara lain adalah :

- 1) Batang dan daun 1-1,5 m agak kaku jika di tanam di lereng akan menghambat aliran.
- 2) Mempunyai akar yang panjang dan kuat dengan kemampuan menembus lapisan keras sampai 15 cm.
- 3) Tahan terhadap variasi cuaca dari -14° sampai 55° C dalam kemarau panjang dan banjir.
- 4) Tahan pada tanah dengan salinitas tinggi dan mengandung banyak natrium, menyerap polutan maupun biomass.
- 5) Tahan terhadap kondisi tanah yang mengandung logam berat seperti At, Cd, Co, Cr, Pb, Hg, Ni, Se dan Zn.
- 6) Tahan terhadap rentang pH tanah 3 sampai 10,5

Tanaman akar wangi sangat baik untuk tanaman pelindung erosi, akan tetapi tanaman ini memiliki beberapa kelemahan yaitu:

- 1) Akar tanaman cenderung vertikal terhadap tanah.
- 2) Daun menutup permukaan tanah pada satu rumpun yang rapat
- 3) Tanaman masih memerlukan waktu untuk melindungi erosi.
- 4) Pertumbuhan akar kearah bawah (seperti akar tunjang).
- 5) Pembiyakan tidak menggunakan biji.

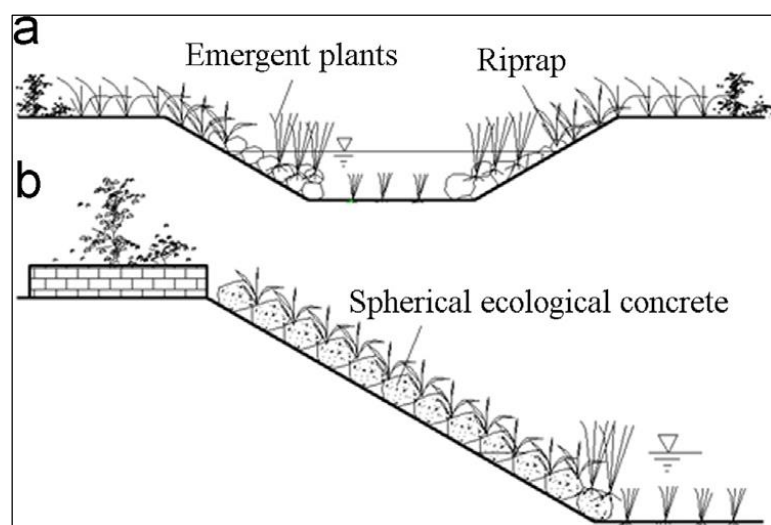
Tanaman akar wangi sebagai pelindung tebing sudah digunakan di beberapa ruas jalan tol dan tebing sungai. Salah satu contoh pada Gambar 2-7 adalah di lereng jalan Tol Solo-Kertosono ruas Colomadu-Karanganyar yang ditanam secara konvensional membentuk barisan sejajar. Akar tanaman yang panjang menembus ke dalam tanah memperkuat kestabilan lereng yang lama kelamaan akan membentuk terasering.



Gambar 2-7. Tanaman Akar Wangi di Tebing Jalan Solo Kertosono Ruas 1 Colomadu-Karanganyar (2017)

2.3.5 Pelindung Tebing Sungai Kombinasi Bangunan dan Tanaman

Infrastruktur yang dibangun sebagai pelindung tebing dapat mengatasi permasalahan erosi tebing, namun demikian perkembangan kebutuhan penanganan erosi telah berkembang dengan memperhatikan aspek ekologi (Pan et al., 2016). Salah satu penelitian yang menggunakan materia bahan bangunan dan tanaman yang uji coba adalah kombinasi bangunan tumpukan batu *rip-rap* dan balok beton yang dikombinasikan dengan tanaman rerumputan. Visualisasi sketsa perpaduan batu *rip-rap* atau blok beton dengan tanaman disajikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2-8. Bangunan Pelindung Tebing Kombinasi Tanaman dengan (a) *Rip-rap* dan Tanaman dan (b) Beton Bulat (Pan et al., 2016).

Bangunan pelindung tebing kombinasi bangunan batu *rip-rap* atau blok beton dengan tanaman yang disebut *ecotype* memberikan keuntungan ganda yaitu dapat cepat berfungsi melindungi tebing secara struktur dan kemudian setelah tanaman tumbuh dapat menunjang kestabilan konstruksi. Tanaman dan batu atau beton pada usia tertentu bersama sama meningkatkan kestabilan (Pan et al., 2016).

Chen and Ho (2013) melaksanakan penelitian yang mengkombinasikan penggunaan mortar mutu rendah pada pasangan batu kali. Pada usia tertentu mortar pengikat akan lapuk/terurai dan berfungsi sebagai media tumbuh bagi tanaman. Percobaan tersebut berhasil baik setelah tumbuh beberapa tahun. Visualisasi penelitian pelindung tebing pasangan batu dengan mortar mutu rendah disajikan pada Gambar 2.9.

Pelindung tebing pada umumnya dibuat dengan menggunakan konstruksi permanen dengan material berupa semen dan batu. Pan et al. (2016) menyatakan bahwa jenis konstruksi ini dari aspek lingkungan merubah ekologi sungai menjadi tidak alamiah. Pengembangan konstruksi yang memperhatikan pendekatan ekologi didalam penanganan masalah-masalah rekayasa bangunan disebut *green infrastructur*. Sebagai salah satu contoh adalah bangunan pelindung tebing kombinasi struktur dan tanaman yang ramah lingkungan yang telah dikembangkan dan di uji coba di beberapa negara. Rekayasa bangunan kombinasi tersebut menggunakan material batu kali (*rip-rap*), material bronjong batu dan blok beton yang di sela-selanya ditanami dengan berbagai tanaman. Visualisasi bangunan kombinasi disajikan pada Gambar 2-10.



Gambar 2-9. Pertumbuhan Tanaman Pada Pelindung Tebing Batu Kosong (Chen and Ho, 2013)



Gambar 2-10. Pelindung Tebing Bronjong dan Beton Dikombinasi dengan Tanaman (“<http://rootlok.co.uk/wp-content/uploads/2017/08/Green-retaining-wall.jpg>,” n.d.)

Penggunaan material yang ramah lingkungan dan penggunaan mortar mutu rendah dapat lebih mudah beradaptasi dengan lingkungan. Pemilihan material batu dan blok beton tanpa mortar, maupun mortar mutu rendah menghasilkan bangunan yang mengakomodasi tempat tumbuhnya tanaman perdu atau rerumputan. Jenis bangunan kombinasi ini semakin lama semakin banyak dikembangkan. Fungsi lain disamping penggunaan material yang lebih ramah lingkungan adalah untuk estetika bangunan. Bangunan sipil yang dikembangkan saat ini bukan hanya kuat dan rapi akan tetapi nilainya ditambah dengan menjadi lebih hijau dan alamiah.

2.4 Stabilitas Pelindung Tebing Sungai

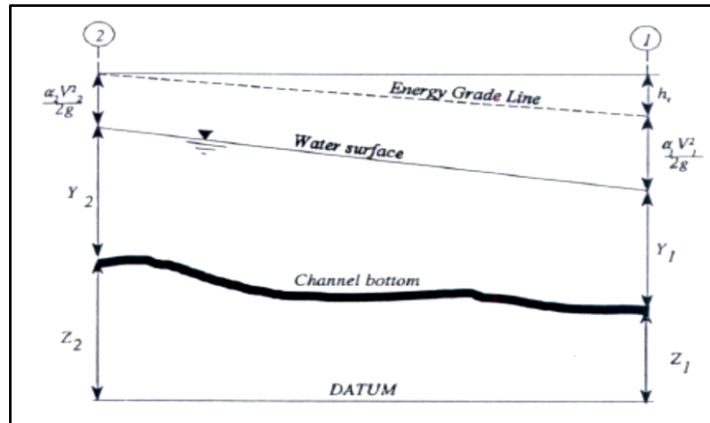
Stabilisasi pelindung tebing merupakan upaya untuk meningkatkan kemampuan tebing terhadap kejadian erosi dan longsor. Erosi disebabkan oleh aspek hidrolis sedangkan longsor lebih banyak pengaruh internal dan eksternal mekanika tanah.

2.4.1 Analisis Hidrolika Aliran di Sungai

Analisis hidrolika aliran di sungai adalah perhitungan untuk mencari parameter hidrolika pengaliran. Parameter aliran tersebut meliputi kedalaman dan kecepatan aliran, kemiringan dasar sungai, elevasi permukaan air, luas penampang basah aliran, serta parameter aliran yang lain di sepanjang alur sungai yang ditimbulkan oleh debit inflow yang masuk kedalam alur dan kedalaman aliran di batas hilir.

Analisis hidrolika aliran dapat diselesaikan dengan model matematika HEC-RAS. Model ini dibangun dengan mengelompokkan analisis yaitu aliran permanen dan aliran tidak permanen. HEC-RAS menggunakan metode hitungan yang berbeda untuk masing-masing kelompok aliran tersebut. Pendekatan analisis aliran permanen dilakukan dengan memakai persamaan energi kecuali di tempat tempat terjadi aliran yang melewati kedalaman kritis. Pada kondisi khusus yaitu di tempat terjadi loncat air, pertemuan alur, dan aliran dangkal melalui jembatan, HEC-RAS memakai persamaan kekekalan momentum. Di tempat terjadi terjun, aliran melalui peluap, aliran melalui bendung, HEC-RAS memakai persamaan-persamaan empiris. Pendekatan analisis HEC-RAS pada aliran tak permanen dilakukan dengan memakai persamaan kekekalan massa (kontinuitas) dan persamaan momentum. Kedua persamaan dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial, yang kemudian diselesaikan dengan metode *finite difference approximation* berskema implisit. Skematisasi aliran model HEC-RAS disajikan pada Gambar 2-11.

HEC-RAS dapat digunakan untuk menghitung profil muka air di sepanjang alur dari satu tampang lintang ke tampang lintang berikutnya pada kondisi aliran permanen. Ketinggian muka air dihitung dengan memakai persamaan energi menggunakan pendekatan *bernouli* yang diselesaikan dengan metode *standard step method*. Gambar 2-11 memberikan ilustrasi profil aliran yang menunjukkan komponen aliran sesuai dengan persamaan energi. Pada skematisasi aliran tersebut tampak bahwa kedalaman aliran diukur ke arah vertikal tidak tegak lurus dengan dasar aliran. Hal ini membawa konsekuensi bahwa hitungan profil muka air dengan HEC-RAS tidak tepat apabila media pengaliran memiliki kemiringan dasar sungai yang curam.



Gambar 2-11. Skematisasi Aliran Berubah Beraturan (*User Manual HEC-RAS, 2016*).

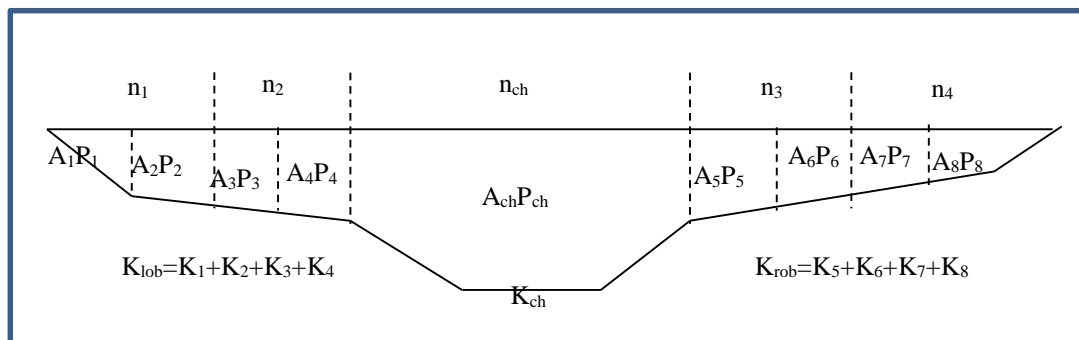
Pendekatan yang dilakukan HEC-RAS pada penampang melintang adalah membagi area penampang berdasarkan dari nilai koefisien kekasaran *Manning* (n) sebagai dasar dalam pembagian penampang. Setiap aliran yang terjadi pada tiap bagian dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.1.

$$Q = K S_f^{1/2} \text{ dan } K = \frac{1}{n} A R^{2/3} \dots\dots\dots(2-1)$$

dimana:

- K = nilai ruas pengaliran (m^3/dt),
- n = koefisien kekasaran *manning* ($dt/m^{1/3}$),
- A = luas bagian penampang (m^2),
- R = jari-jari hidrolis (m),
- S_f = kemiringan aliran.

Perhitungan nilai K dapat dihitung berdasarkan kekasaran *manning* yang dimiliki oleh bagian penampang tersebut. Skematisasi perhitungan nilai K disajikan pada Gambar 2-12.



Gambar 2-12. Skematisasi Penampang Aliran yang Melalui Saluran

Perhitungan metode HEC-RAS dilakukan dengan memulai perhitungan penampang aliran dari bagian hilir. Konsep dasar perhitungan profil muka air ini mengikuti persamaan energi pada Persamaan 2-2.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + he \dots\dots\dots(2-2)$$

dimana :

- Z = elevasi bidang referensi (m)
- Y = elevasi muka air (m)
- v = kecepatan aliran (m/dt)
- g = percepatan gravitasi (m/dt²)
- α = koefisien kecepatan (*koriolis*)
- he = kehilangan energi (m)

Kehilangan energi diantara dua penampang lintang terdiri dan dua komponen yaitu kehilangan energi karena gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi karena perubahan tampang (*contraction or expansion losses*). Pendekatan perhitungan kehilangan energi dapat diformulasikan pada Persamaan 2-3.

$$he = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right| \dots\dots\dots(2-3)$$

dimana:

- L = jarak antara dua penampang (m),
- S_f = kemiringan aliran,
- C = koefisien kehilangan energi (penyempitan, pelebaran atau belokan).

Analisis HEC-RAS dapat disederhanakan dengan pendekatan mulai dari data kondisi aliran di bagian hilir. Langkah langkah perhitungan adalah dengan menghitung kondisi aliran di bagian hulu sesuai dengan kondisi media pangaliran segmen di bagian hulunya. Setelah pengaliran di bagian hulunya dapat diketahui maka digunakan untuk perhitungan ruas berikutnya.

2.4.2 Analisis Stabilitas Kelongsoran Tebing Sungai

Analisa stabilitas kelongsoran tebing sungai dilakukan untuk mengetahui stabilitas lereng terhadap kelongsoran. Perhitungan kestabilan pada tebing sungai dapat dilakukan dengan menggunakan model Geoslope. Dasar yang dipakai untuk menghitung stabilitas lereng adalah suatu limit *equilibrium method* (cara keseimbangan batas), yaitu dengan menghitung besarnya kekuatan geser yang diperlukan dengan kekutan geser yang ada,

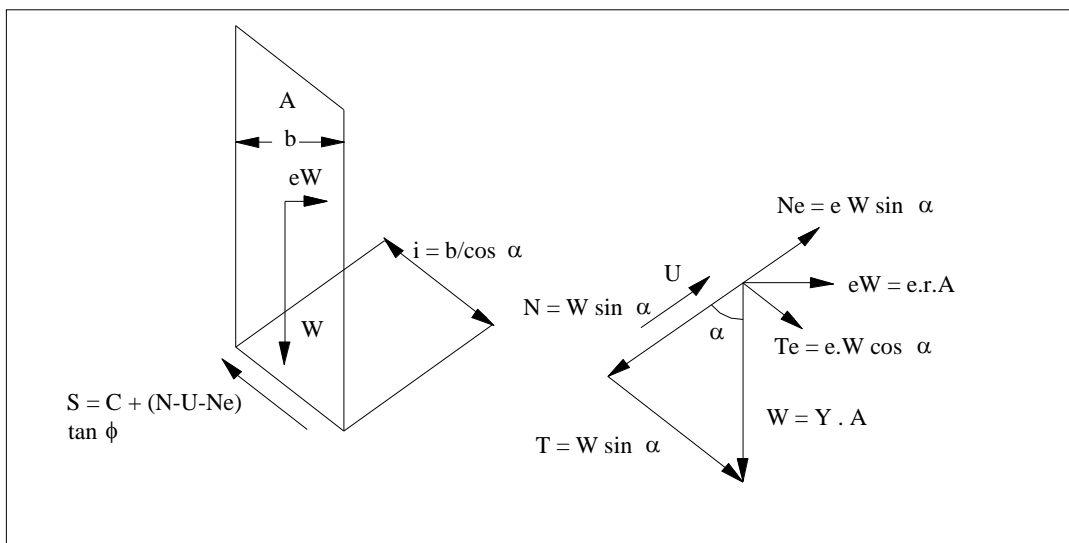
dari perbandingan tersebut didapatkan faktor keamanan. Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan secara umum dengan Persamaan 2-4.

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots\dots(2-4)$$

dimana :

- τ = tegangan geser tanah (kg/cm²)
- σ = tegangan normal pada bidang geser (kg/cm²)
- u = tegangan air pori (kg/cm²)
- c' = kohesi efektif (kg/cm²)
- ϕ' = Sudut geser dalam efektif (°)

Analisis kestabilan tebing dapat diasumsikan akan terjadi kelongsoran pada suatu bidang gelincir tertentu. Prinsip analisis adalah dengan menghitung gaya dan momen yang menyebabkan kelongsoran pada bidang tersebut terutama akibat berat tanah. Gaya dan momen longsor disebut penggerak (*sliding force*) atau momen penggerak (*turning moment*). Pada komponen penahan dihitung gaya dan moment yang melawan kelongsoran terutama akibat kekuatan geser tanah. Gaya dan momen penahan tersebut disebut momen melawan (*resisting moment*). Perbandingan antara momen melawan (*resisting moment*) dengan momen penggerak (*turning moment*) pada Gambar 2-13, merupakan faktor keamanan terhadap kelongsoran pada bidang geser yang bersangkutan. Metode analisis tersebut digunakan sebagai dasar Geoslope dengan melakukan iterasi beberapa kali pada bidang gelincir lain sampai didapat nilai faktor keamanan terkecil.



Gambar 2-13. Cara Menentukan Harga N dan T

Faktor keamanan dari kemungkinan terjadinya longsor dapat diperoleh dengan menggunakan rumus keseimbangan. Besarnya kondisi keseimbangan gaya mengikuti Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6.

$$F_s = \frac{\sum \{C_l + (N - U - N_e) \tan \phi\}}{\sum (T + T_e)} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$= \frac{\sum C_l + \sum \{\gamma \cdot A (\cos \alpha - e \cdot \sin \alpha) - V\} \tan \phi}{\sum \gamma \cdot A (\sin \alpha + e \cdot \cos \alpha)} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana:

Fs = faktor keamanan

N = beban komponen vertikal yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur = $\gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$

T = beban komponen tangensial yang timbul dari berat setiap irisan bidang luncur = $\gamma \cdot A \cdot \sin \alpha$

U = tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur

Ne = komponen vertikal beban seismik yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur = $e \cdot \gamma \cdot A \cdot \sin \alpha$

Te = komponen tangensial beban seismik yang bekerja pada setiap irisan bidang luncur = $e \cdot \gamma \cdot A \cdot \cos \alpha$

ϕ = sudut gesekan dalam bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur.

C = angka kohesi bahan yang membentuk dasar setiap irisan bidang luncur

Z = lebar setiap irisan bidang luncur

E = intensitas seismis horisontal

γ = berat isi dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

A = luas dari setiap bahan pembentuk irisan bidang luncur

α = sudut kemiringan rata-rata dasar setiap irisan bidang luncur

U = tekanan air pori

Dasar-dasar perhitungan kestabilan lereng sesuai Gambar 2-13 dijelaskan sebagai berikut :

- 1) (W) adalah berat irisan yang dihitung berdasarkan hasil perkalian antara luas irisan (A) dengan berat isi bahan pembentuk irisan (γ), jadi $W=A \cdot \gamma$
- 2) Beban berat komponen vertikal yang bekerja pada dasar irisan (N) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan cosinus sudut rata-rata tumpuan (α) pada dasar irisan yang bersangkutan jadi $N=W \cdot \cos \alpha$

- 3) Beban dari tekanan hidrostatis yang bekerja pada dasar irisan (U) dapat diperoleh dari hasil perkalian antara panjang dasar irisan (b) dengan tekanan air rata-rata ($U/\cos\alpha$) pada dasar irisan tersebut, jadi: $U=U.b/\cos\alpha$
- 4) Beban berat komponen tangensial (T) diperoleh dari hasil perkalian antara berat irisan (W) dengan sinus sudut rata-rata tumpuan dasar irisan tersebut jadi $T=W\sin\alpha$
- 5) Kekuatan tahanan kohesi terhadap gejala peluncuran (C) diperoleh dari hasil perkalian antara angka kohesi bahan (c') dengan panjang dasar irisan (b) dibagi lagi dengan $\cos \alpha$, jadi $C=c'.b/\cos\alpha$
- 6) Kekuatan tahanan geser terhadap gejala peluncuran irisan adalah kekuatan tahanan geser yang terjadi pada saat irisan akan meluncur meninggalkan tumpuannya
- 7) Kekuatan-kekuatan yang menahan (T) dan gaya-gaya yang mendorong (S) dari setiap irisan bidang luncur dijumlahkan, dimana T dan S dari masing-masing irisan dinyatakan sebagai $T = W \sin \alpha$ dan $S = C + (N-U) \tan \emptyset$
- 8) Faktor keamanan dari bidang luncur tersebut adalah perbandingan antara jumlah gaya pendorong dan jumlah gaya penahan yang dirumuskan :

$$F_s = \frac{\sum S}{\sum T} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana:

- F_s = faktor keamanan.
- $\sum S$ = jumlah gaya pendorong.
- $\sum T$ = jumlah gaya penahan.

Nilai F_s pada Persamaan 2.7 dipengaruhi oleh kedua gaya pendorong dan penahan yang saling berpengaruh. Karena itu untuk menghitung besarnya F_s harus digunakan cara iterasi (ulangan). Besarnya faktor keamanan terhadap bahaya longsoran dengan menggunakan cara tegangan efektif (*effective stress analysis*), adalah :

- Tanpa gempa $F_s = 1.50$
- Dengan gempa $F_s = 1.20$

Dengan menggunakan dasar pendekatan kestabilan pada Persamaan 2-7, dari hasil tersebut diatas dapat diketahui besarnya faktor keamanan stabilitas tebing sungai pada kondisi normal dan kondisi penurunan air cepat (*rapid draw down*).

2.4.3 Analisis Stabilitas Longsor Bangunan Pelindung Tebing Batu Bata *Interlock*

Batu bata *interlock* dapat digunakan untuk perkuatan tebing dalam menahan longsor. Peningkatan kemampuan menahan longsor diakibatkan oleh karakteristik batu bata *interlock* yang memiliki tautan (*locking*). Dengan adanya pengaruh kait/tautan di permukaan batu bata maka ada penambahan kemampuan menahan gaya geser yang diakibatkan oleh kohesi antar bata yang diperkuat dengan ikatan kait/tautan.

Persamaan dasar dari kemampuan menahan tegangan geser dengan adanya bata *interlock* menjadi :

$$\tau = (c_s' + (\sigma - u) \tan \phi_s') + (c_b') \dots\dots\dots(2-8)$$

$$\tau_t = (\tau_s + \tau_b) \dots\dots\dots(2-9)$$

$$\tau_t = (c_s' + (\sigma - u) \tan \phi_s') + (c_b' + (\sigma - u) \tan \phi_b') \dots\dots\dots(2-10)$$

dimana :

- τ_t = tegangan geser total (kg/cm²)
- τ_s = tegangan geser material tanah (kg/cm²)
- τ_b = tegangan geser material batu bata (kg/cm²)
- σ = tegangan normal pada bidang geser (kg/cm²)
- u = tegangan air pori (kg/cm²)
- c_s' = kohesi efektif tanah (kg/cm²)
- ϕ_s' = Sudut geser dalam efektif tanah (°)
- c_b' = kohesi batu bata *interlock* (kg/cm²)
- ϕ_b' = Sudut geser dalam efektif bata *interlock* (°)

Nilai kohesi bata *interlock* dan sudut geser dalam bata *interlock* didapatkan dari pengujian *large scale direct shear stress* yang merupakan pengujian batu bata *interlock full scale*.

2.4.4 Analisis Kestabilan Longsor Bangunan Pelindung Tebing Batu Bata *Interlock* dengan Tanaman Akar Wangi

Tanaman akar wangi ditanam pada lubang lubang batu bata *interlock*. Tujuan dari pemberian tanaman pada bangunan pelindung tebing bata *interlock* adalah untuk memperkuat ikatan antar batu bata sehingga seakan akan menjadi material mortar yang menyatukan batu bata. Tanaman akar wangi memiliki akar yang cukup panjang dan cukup kuat. Pengaruh akar tanaman pada kestabilan bangunan pelindung tebing batu bata *interlock* dapat menambah kemampuan menahan gaya geser. Hal tersebut diakibatkan

oleh akar yang mengisi dan mengikat batu bata. Persamaan dasar dari kemampuan menahan tegangan geser dengan adanya bata dan akar akar wangi menjadi :

$$\tau_t = (\tau_s + \tau_b + \tau_v) \dots\dots\dots(2-11)$$

$$\tau_t = (c_s' + (\sigma - u) \tan \phi_s') + (c_b' + (\sigma - u) \tan \phi_b') + (c_v' + (\sigma - u) \tan \phi_v') \dots\dots\dots(2-12)$$

dimana :

- τ_t = tegangan geser total (kg/cm²)
- τ_s = tegangan geser material tanah (kg/cm²)
- τ_b = tegangan geser material batu bata (kg/cm²)
- τ_v = tegangan geser akar tanaman akar wangi didalam lubang (kg/cm²)
- σ = tegangan normal pada bidang geser (kg/cm²)
- u = tegangan air pori (kg/cm²)
- c_s' = kohesi efektif tanah (kg/cm²)
- ϕ_s' = Sudut geser dalam efektif tanah (°)
- c_b' = kohesi efektif batu bata *interlock* (kg/cm²)
- ϕ_b' = Sudut geser dalam efektif batu bata *interlock* (°)
- c_v' = kohesi efektif akar tanaman akar wangi (kg/cm²)
- ϕ_v' = Sudut geser dalam efektif akar tanaman akar wangi (°)

2.5 Research Gap

Penelitian terdahulu mengenai pelindung tebing dan tanaman pengendali erosi serta tanaman pelindung tebing yang ramah lingkungan dan mendukung proses restorasi sungai telah dilaksanakan. Wheaton (2005) dan Kondolf et al. (2007) menyarankan upaya perbaikan pada tebing sungai harus sesuai dengan kegiatan restorasi dan dilakukan dengan menggunakan material setempat. Pan et al. (2016) telah meneliti penggunaan kombinasi tanaman rerumputan yang di tanam di sela-sela material batu *rip-rap* atau beton guna perbaikan tebing agar diperoleh jenis pengelolaan yang alamiah dan ramah lingkungan namun tidak ada ikatan antara tanaman dan material bangunan.

Research gap dalam penelitian ini adalah adanya kelemahan hasil penelitian Pan et al. (2016) yaitu antara material batu *rip-rap* dan blok beton dengan tanaman yang tidak ada ikatan. Penelitian yang dilakukan ini adalah mengganti material batu *rip-rap* dan blok beton dengan batu bata *interlock* yang di bagian dalamnya dilubangi untuk ditanami akar wangi supaya akarnya mengikat batu bata. Batu bata *interlock* relatif kuat menahan

kecepatan aliran air sedangkan tanaman akar wangi dapat memperkuat ikatan batu bata dan meng"angkur" tanah di tebing. Kajian penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian batu bata *interlock* dan akar wangi disajikan pada Tabel 2-3.

Tabel 2-3. Penelitian Terdahulu

No	Konten	Peneliti	Tujuan penelitian	Hasil penelitian	Keterkaitan	Kekurangan
1	Akar wangi	Wardojo and Priyono (1996)	Mengkaji 6 (enam) macam jenis rumput yang memiliki keunggulan masing masing sesuai dengan kondisi lokasi dan keperluan pengendalian erosi,	Tanaman akar wangi menunjukkan kemampuan menahan erosi yang paling baik.	Tanaman akar wangi paling kuat	Meneliti erosi lereng permukaan tanah tidak termasuk tebing sungai
2	Restorasi sungai	Wheaton (2005)	Menganalisis jenis pelindung tebing sungai yang dilakukan dengan menggunakan dua macam cara yaitu: metode struktur bangunan dan dengan menggunakan pendekatan biologis (dengan tanaman pelindung).	Hasil penelitian secara stuktur lebih cepat menunjukan kinerja sedangkan secara biologis hasil kegiatannya memerlukan waktu lebih lama namun lebih murah.	Perbandingan dua jenis penanganan yaitu struktur dan vegetasi	Belum ada alternatif <i>hybrid</i> (bio-struktur), pengujian masih terpisah 2 jenis
3	Pelindung tebing	Budinetro (2006)	Menguji coba konstruksi pegas krib trucuk bambu yang di uji coba di Sungai Andong Kabupaten Ngawi	Uji coba berhasil baik namun pada akhirnya masa penelitian di lokasi tebing banyak ditumbuhi rumput dan pepohonan terutama pohon Kersen/Talok (<i>Muntingia calabura L.</i>)	Konstruksi ramah lingkungan	Cerucuk bambu tidak termasuk metode vegetasi
4	Pelindung tebing	Kondolf et al. (2007)	Meneliti perubahan kebijakan investasi pelindung tebing menjadi ke arah metode <i>bio-engineering</i> yaitu dengan menggunakan material dan tanaman setempat di California, US.	Menghasilkan penegasan arah kegiatan perlindungan tebing menuju perlindungan tebing sungai yang lebih ramah lingkungan	Meneliti perlunya pelindung tebing vegetasi	Hanya mengkaji ekologi belum ada kajian perbaikan kekuatan tebing

Tabel 2-3. Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No	Konten	Peneliti	Tujuan penelitian	Hasil penelitian	Keterkaitan	Kekurangan
5	Akar wangi	Kadek (2012)	Mengidentifikasi berbagai jenis tanaman yang dapat digunakan sebagai tanaman pelindung erosi	Rumput akar wangi memiliki keunggulan sebagai tanaman tropis sejenis rumput-rumputan yang berukuran besar dapat tumbuh lebih kuat dibandingkan jenis rerumputan yang lain.	Rumpur akar wangi paling kuat dengan akar paling panjang	Perlindungan erosi permukaan
6	Tanaman pelindung tebing	Chen and Ho (2013)	Meneliti pelindung tebing kombinasi susunan batu dengan mortar mutu rendah yang di sela-selanya diselingi tanaman rerumputan di lapangan.	Hasil dari penelitian dengan pengujian <i>prototype</i> di lapangan adalah setelah usia mortar lama kemudian menjadi lapuk, maka yang dominan sebagai pelindung tebing adalah tanaman rerumputan	Tanaman rumput dapat tumbuh di sela-sela material batu kali dengan perekat mortar	Tidak ada ikatan antara material struktur dengan vegetasi, hanya mendukung ekosistem
7	Akar wangi	Rahardjo et al. (2014)	Meneliti bangunan perlindungan tebing terhadap erosi tanaman orange yasmin dan akar wangi yang memiliki sifat melindungi erosi dan memperkuat stabilitas lereng	Perlindungan erosi dengan tanaman di uji coba untuk 2 jenis tanaman dengan hasil perlindungan akar wangi lebih baik dibandingkan orange yasmin. Permeabilitas tanah pada tanaman akar wangi lebih besar (porus)	Tanaman akar wangi lebih porus dan mudah meresapkan air	Pengaruh tanaman akar wangi terhadap kekuatan lereng tanpa material konstruksi
8	Akar wangi	Raman & Gnansounou (2015)	Meneliti aspek kiamawi tanaman akar wangi sebagai taman pengendali erosi permukaan.	Hasil penelitian menyimpulkan bahwa tanaman akar wangi dapat berhasil mengendalikan erosi. Hasil penelitian menyimpulkan daun tanaman akar wangi memiliki kadar <i>bioetanol</i> yang baik	Penggunaan tanaman akar wangi pada pengendalian erosi	Meneliti erosi permukaan tanah tidak pada tebing sungai
9	Akar wangi	Eab et al. (2015)	Meneliti keunggulan tanaman akar wangi dibandingkan dengan tanaman penahan erosi permukaan yang lain.	Menyimpulkan bahwa keunggulan tanaman akar wangi guna pengendalian erosi telah banyak diteliti terletak pada akar tanaman yang relatif kuat dan panjang yang berfungsi sebagai ankur.	Kelebihan akar tanaman akar wangi yang panjang dan kuat	Pengendalian erosi permukaan

Tabel 2-3. Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No	Konten	Peneliti	Tujuan penelitian	Hasil penelitian	Keterkaitan	Kekurangan
10	Akar wangi	Tardío and Mickovski (2015)	Meneliti beberapa jenis tanaman perkuatan lereng dan penahan erosi aliran sungai	Hasil merekomendasikan akar wangi sebagai tanaman pengendali erosi permukaan.	Penggunaan tanaman akar wangi	Perlindungan erosi lereng
11	Pelindung tebing <i>Hybrid</i>	Pan et al. (2016)	Meneliti pelindung tebing teknologi bio-struktur. Sudah menggunakan material konstruksi berupa tumpukan/ hamparan batu (<i>rip-rap</i>) dan blok beton dikombinasikan dengan tanaman rerumputan.	Berhasil membuktikan bangunan <i>hybrid</i> kombinasi jenis perlindungan tebing teknologi struktur dan biologi (bio-struktur) dengan kelemahan belum ada ikatan struktural diantara material dan tanaman	Penggunaan batu/blok beton di sela-selanya ditanami rumput	Belum ada ikatan antara tanaman rumput dengan batu/ blok beton
12	Akar wangi	Banerjee et al. (2016)	Meneliti tanaman akar wangi sebagai tanaman pengendali erosi permukaan yang dapat berfungsi menyerap polutan.	Hasil penelitian menyatakan tanaman akar wangi dapat mengendalikan erosi dan memiliki manfaat lebih yaitu memiliki fungsi menyerap limbah logam berat.	Tanaman akar wangi sebagai pengendali erosi permukaan tanah	Cakupan penelitian pada akar wangi yang dapat menyerap polutan

Pada penelitian batu bata ini berupaya untuk menindaklanjuti dan meningkatkan penelitian Pan et al. (2016). Perbedaan penelitian ini dengan penelitian Pan et al. (2016) yang pertama adalah pada penelitian ini terdapat susunan *locking* pada batu bata serta antara material konstruksi dengan vegetasi yang disatukan. Pada penelitian ini tidak menanam rerumputan di sela-sela batu *rip-rap* atau blok beton tetapi tanaman tersebut ditanam di dalam lubang material konstruksi dengan tujuan akar tanaman akan mengikat menyatukan material konstruksi seperti mortar pengikat material bangunan.

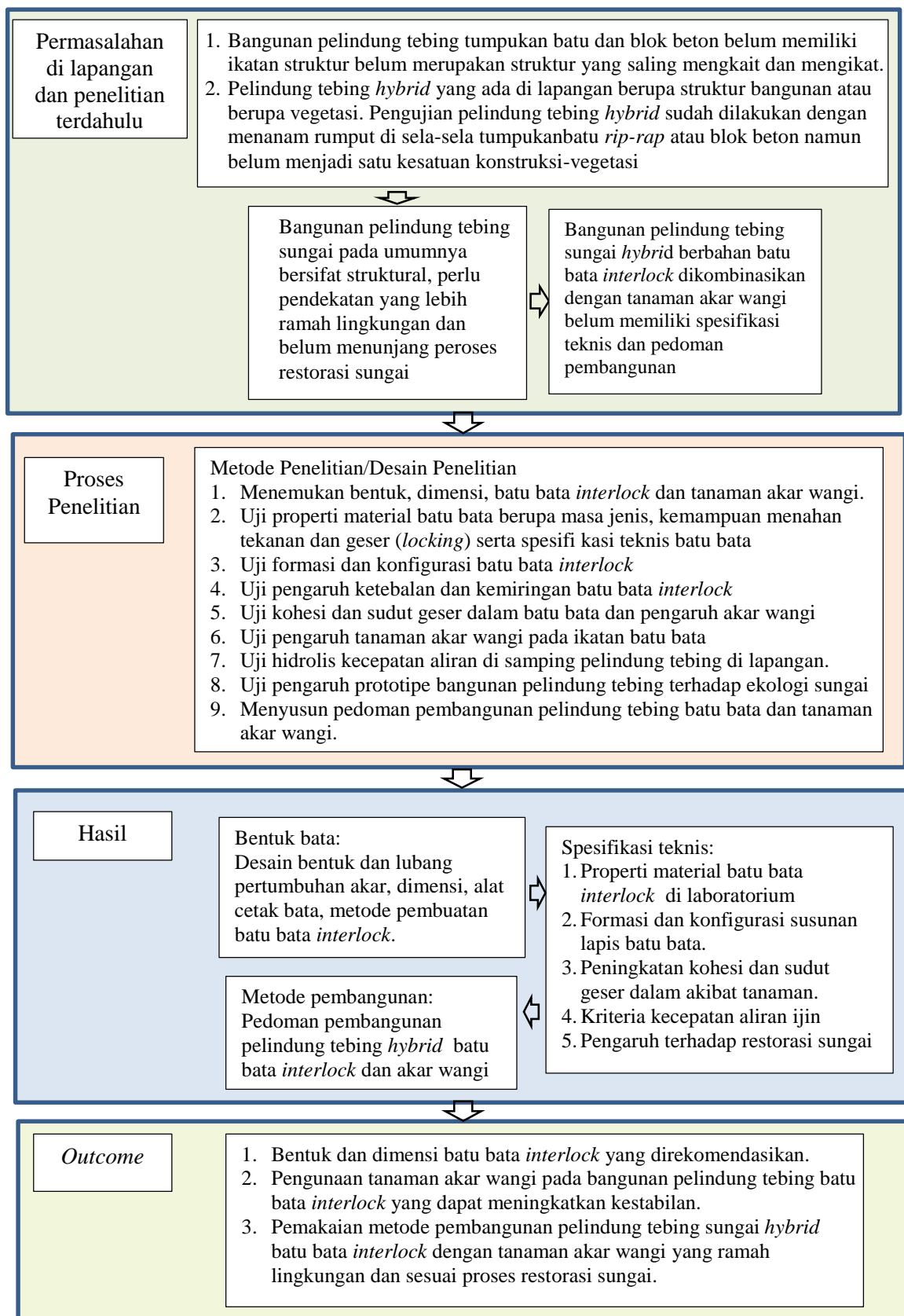
Perbedaan kedua adalah material yang digunakan yaitu batu bata tanah lempung dan bukan batu *rip-rap* dan blok beton. Material batu bata ini memiliki keunggulan terutama di lokasi-lokasi perdesaan yang memiliki keterbatasan material konstruksi seperti batu kali, pasangan batu, beton, bahan kawat bronjong, maupun *sheet pile*. Material batu bata dapat diproduksi di lokasi yang memiliki tanah lempung. Penggunaan metode batu bata *interlock* dan tanaman dapat menghemat material konstruksi yang berbahan semen. Pelindung tebing batu bata sangat sesuai dengan konsep restorasi sungai yang mengarah kepada pengembalian ruas sungai menuju kondisi yang lebih alamiah.

2.6 Kerangka Berpikir

Research gap yang tersaji pada Sub Bab 2.5 mengindikasikan adanya kekurangan yang perlu diperbaiki pada pelindung tebing *hybrid* kombinasi material konstruksi dengan tanaman. Kesenjangan utama adalah tidak adanya ikatan struktur (*construction joint*) antara material batu atau material blok beton karena pelaksanaan hanya di tumpuk atau dihamparkan sebagaimana *rip-rap*. Kesenjangan ke dua atau *gap* ke dua pada penelitian terdahulu adalah tidak adanya kesatuan sambungan antara material konstruksi dengan tanaman. Hal tersebut karena hanya ditanam di sela-sela material. Kesenjangan ke dua tersebut dapat diatasi dengan menggunakan akar untuk menyatukan material konstruksi. Kedua *gap* tersebut menjadi permasalahan utama yang masih bisa ditingkatkan dan ditemukan solusinya yaitu dengan menyatukan material secara struktur dan menyatukan dengan menggunakan akar tanaman untuk mengikat batu batanya.

Penelitian ini dimulai dari menemukan bentuk dan spesifikasi teknis batu bata *interlock* kemudian dilanjutkan desain bangunan pelindung tebing batu bata *interlock* dengan tanaman akar wangi yang adaptif di lapangan, menemukan spesifikasi teknis dan menyusun metode pelaksanaan serta menemukan pengaruh bangunan pelindung tebing terhadap proses restorasi sungai dapat dibuktikan dengan menggunakan pengujian di dua kelompok kegiatan yaitu uji di laboratorium dan uji di lapangan. Kegiatan di laboratorium dimulai dari kegiatan studi dan perencanaan bentuk batu bata, desain lubang yang sesuai untuk pertumbuhan akar tetapi kuat dan tidak pecah, melaksanakan pengujian material batu bata, tata letak dan detail desain dimensi bangunan pelindung tebing.

Kelompok kegiatan kedua dalam penelitian ini yaitu membangun *prototype* bangunan pelindung tebing di lapangan dengan menggunakan hasil penelitian tahap satu. Pengujian di lapangan dilakukan dengan menggunakan material bata *interlock* hasil pengujian spesifikasi teknis di laboratorium yang dikombinasikan dengan penelitian tanaman akar wangi di lapangan. Pengujian di lapangan yang paling utama ada 3 kelompok yaitu: (1) mendapatkan kecepatan alir yang nyata yang masih bisa diakomodasi oleh *prototype* bangunan, (2) menguji pengaruh tekanan tanah pada bangunan dengan mengamati lendutan bangunan, (3) meneliti pengaruh bangunan terhadap ekosistem ruas bangunan pelindung tebing. Kerangka pikir dimulai dari permasalahan yang ditemukan di lapangan maupun di dalam kajian pustaka, sampai mendapatkan *outcome* hasil penelitian selengkapnya disajikan pada Gambar 2-14.



Gambar 2-14. Kerangka Berpikir.

Pada penelitian ini menggunakan beberapa perangkat pendukung mulai proses perencanaan/desain prototipe sampai dengan pelaksanaan pendataan. Perangkat desain aspek hidrolika menggunakan HEC-RAS, untuk itu memerlukan informasi geometri sungai. Perangkat desain kestabilan lereng dianalisis dengan menggunakan Geoslope, untuk maksud tersebut maka diperlukan informasi topografi dan indeks properties material konstruksi dan mekanis tanah. Pengujian pengaruh kecepatan aliran diukur dengan *current meter*. Evaluasi hasil pengujian adalah menemukan hubungan parameter kecepatan aliran dengan kondisi batu bata *interlock* serta kondisi tanaman akar wangi. Kinerja bangunan yang meliputi fungsi dan kondisi bangunan dan tanaman pasca banjir dievaluasi untuk mendapatkan pedoman dalam perencanaan.

Tata cara pembangunan perkuatan tebing sungai dengan menggunakan metode kombinasi batu bata diperkuat tanaman akar wangi belum banyak dipahami oleh akademisi, praktisi bangunan dan masyarakat umum. Metode pembangunan pelindung tebing *hybrid* menarik untuk diteliti dengan harapan manfaatnya nanti akan dapat diterapkan oleh masyarakat perdesaan. Keberhasilan pembangunan pelindung tebing dengan batu bata *interlock* dan tanaman akar wangi yang lebih ramah lingkungan di tingkat perdesaan di hulu diharapkan memberikan dampak dan kontribusi positif bagi pengelolaan sungai di kawasan hilir.

2.7 Hipotesis Penelitian

Sesuai dengan *research gap* yang dikaji dari permasalahan di lapangan dan studi literatur mengenai pelindung tebing serta kerangka berpikir penelitian, maka rumusan hipotesis dalam penelitian ini adalah :

- 1) Susunan batu bata *interlock* dapat digunakan untuk meningkatkan perlindungan tebing.
- 2) Terdapat pengaruh penanaman tanaman akar wangi pada ikatan batu bata *interlock*.
- 3) Konstruksi pelindung tebing sungai *hybrid* berupa kombinasi batu bata *interlock* dengan perkuatan tanaman akar wangi dapat berfungsi meningkatkan kestabilan lereng tebing.
- 4) Pelindung tebing *hybrid* batu bata *interlock* dengan perkuatan tanaman akar wangi dapat menunjang dan sesuai proses restorasi sungai, menjadi ruas sungai yang alamiah.

2.8 Kebaruan.

Kebaruan dalam penelitian ini sebagai kontribusi dalam rekayasa pelindung tebing sungai yang ramah lingkungan dan mendukung proses restorasi sungai adalah:

- 1) Kebaruan pertama adalah menemukan batu bata *interlock* berbahan tanah dibakar untuk material pelindung tebing. Pada saat ini belum ada referensi mengenai pelindung tebing batu bata *interlock* berbahan material tanah lempung untuk pelindung tebing. Batu bata *interlock* yang umumnya berbahan pasir-semen adalah sebagai dinding bangunan maupun untuk perkuatan lantai. Pembangunan pelindung tebing sungai batu bata *interlock* dapat menggunakan hasil penelitian ini yang meliputi: bentuk dan dimensi, spesifikasi teknis, formasi peletakan dan konfigurasi susunan batu bata *interlock*. Hasil penelitian ini juga menemukan pedoman untuk merencanakan dan melaksanakan pembangunan pelindung tebing batu bata *interlock* di lapangan.
- 2) Kebaruan ke dua adalah menemukan cara penggunaan tanaman akar wangi pada konstruksi pelindung tebing *hybrid* sebagai pengikat batu bata menggantikan mortar. Pada saat ini tanaman akar wangi sudah lazim untuk mengendalikan erosi permukaan, akan tetapi belum ada yang menggunakan untuk mengikat material bangunan sebagaimana fungsi mortar. Penelitian ini menemukan fungsi tanaman akar wangi untuk memperkuat dan mengikat batu bata supaya menyatu dan dalam jangka panjang diharapkan bisa meng-angkur sampai kedalam tanah yang dilindungi. Bangunan ini memadukan material struktur dan tanaman yang akarnya difungsikan sebagai pengikat material struktur. Penerapan akar tanaman yang berfungsi seperti mortar dapat menggunakan hasil uji coba tata cara mengikat batu bata *interlock* dengan tanaman akar wangi. Penggunaan tanaman akar wangi dan desain lubang batu bata sebagai tempat akar agar dapat mengikat batu bata *interlock* menjadi satu kesatuan struktur dapat menggunakan cara yang diujicobakan di lapangan.
- 3) Kebaruan ke tiga adalah menemukan bangunan pelindung tebing *hybrid* kombinasi batu bata *interlock* dengan tanaman akar wangi. Bangunan ini memiliki keunggulan yang lebih alamiah, ramah lingkungan dan dapat mendukung proses restorasi sungai. Bangunan ini lebih ramah lingkungan karena struktur material dasarnya berasal dari material tanah yang diikat oleh akar tanaman tanpa menggunakan material mortar. Jika pelindung tebing ini digunakan di tebing sungai maka sejalan dengan proses

restorasi sungai karena selaras dengan upaya mengembalikan kondisi sungai yang lebih natural, lebih alamiah seperti tanpa bangunan, lebih hijau, lebih ramah lingkungan yang dapat menunjang ekosistem sungai. Proses restorasi sungai yang baik adalah yang dapat mengembalikan ekosistem sungai sebagaimana sebelum ada gangguan. Ekosistem sungai yang dimaksud adalah menyatunya komponen flora dan fauna yang biasa hidup dan berkembang di daerah setempat yang seirama dengan morfologi sungainya.

Pada penelitian ini hasilnya diharapkan dapat bermanfaat bagi masyarakat utamanya di lokasi perdesaan di daerah aliran sungai bagian hulu yang melaksanakan pembangunan pelindung tebing dengan teknologi yang sederhana (*low skill*). Sasaran pengguna adalah pada lapisan masyarakat desa yang dapat melaksanakan semangat gotong royong dengan berswasembada dana dan tenaga. Bangunan pelindung tebing batu bata *interlock* dengan perkuatan tanaman akar wangi ini diharapkan akan memberi kontribusi yang besar pada upaya teknologi ramah lingkungan (*green infrastruktur*) yang selaras dengan kegiatan mengembalikan kondisi sungai kembali seperti sebelum ada bangunan. Pengurangan penggunaan material mortar juga sangat penting untuk mengurangi volume pembuatan *portlant cement*. Penggunaan akar tanaman untuk menggantikan fungsi mortar adalah sesuatu yang baru yang belum banyak referensi dan aplikasi di lapangan, dengan demikian masih akan diperlukan penelitian lanjutan untuk aplikasi bangunan-bangunan ramah lingkungan yang lainnya.