

Model dekonstruksi bangunan berkelanjutan berbasis “reverse 4D BIM”

Tri Joko Wahyu Adi^{1,*}, Novalia Andriyani^{1,2}

¹Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS, Surabaya, Jawa Timur

²Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, BRIN (Badan Riset Inovasi dan Nasional), Serpong, Tangerang

*Corresponding authors: trijokowahyudi@gmail.com

Submitted: 21 March 2023, Revised: 22 November 2023, Accepted: 1 December 2023

ABSTRACT: Indonesia's increasing population and limited land have made the need for shelter, workplaces, and vertical buildings increase. As a consequence, buildings that have exceeded their service life, have changed their function, have been damaged by a disaster, and are not fit for function need to be demolished. Demolition needs special attention because the process requires complex planning, is hidden, carries high risks, and generates more than 40% of the total solid waste in developing countries. In Indonesia in particular, deconstruction has not been carried out by many demolition service providers. The government does not yet have comprehensive regulations for sustainable building demolition. This study aims to propose a sustainable demolition model by prioritizing the conservation of demolition waste material. In this study, the "reverse 4D BIM" technology is used to visualize the sequencing of the demolition process and predict the type, volume, and scheduling of disposal of demolition waste. The predicted results of demolition waste are then classified for their use using reduce, reuse, and recycle (3R) concept to maximize the sustainability of the demolition process and the circular economy. To implement this model, a 4D BIM-based building simulation is used. The simulation results show that the proposed model is effective and can be implemented for sustainable building demolition.

KEYWORDS: deconstruction; green building; material conservation; reverse 4D BIM; sustainable demolition.

ABSTRAK: Pertambahan penduduk Indonesia dan lahan yang terbatas membuat kebutuhan akan tempat tinggal, tempat bekerja dan bangunan vertikal meningkat. Konsekuensinya, bangunan-bangunan yang sudah melebihi masa layan, terjadi perubahan fungsi, rusak akibat bencana dan tidak layak fungsi, perlu dilakukan pembongkaran (demolisi). Demolisi perlu menjadi perhatian khusus karena proses membutuhkan perencanaan yang kompleks, pembongkaran yang selektif, memiliki risiko tinggi dan menghasilkan limbah bongkaran lebih dari 40% dari total limbah padat di negara berkembang. Di Indonesia khususnya, demolisi yang berkelanjutan (dekonstruksi) belum banyak dilaksanakan oleh penyedia jasa demolisi. Pemerintahpun belum memiliki aturan yang komprehensif untuk demolisi bangunan yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan model demolisi berkelanjutan, dengan mengutamakan aspek konservasi material limbah bongkaran. Dalam penelitian ini, teknologi "Reverse 4D BIM" digunakan untuk visualisasi sequencing proses demolisi, memprediksi jenis, volume dan penjadwalan pembuangan limbah sisa bongkaran. Hasil prediksi limbah demolisi kemudian diklasifikasikan pemanfaatannya menggunakan konsep reduce, reuse dan recycle (3R) untuk mengakomodasi proses demolisi berkelanjutan dan circular economy. Untuk mengimplementasikan model ini, digunakan simulasi 4D BIM pada bangunan gedung studi kasus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model yang diusulkan efektif dan dapat diimplementasikan untuk pelaksanaan demolisi bangunan yang berkelanjutan.

KATA KUNCI: dekonstruksi; green building; konservasi material; reverse 4D BIM; demolisasi berkelanjutan.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Pertambahan penduduk Indonesia dan lahan yang terbatas membuat kebutuhan akan tempat tinggal, tempat bekerja dan bangunan vertikal meningkat. Konsekuensinya, bangunan-bangunan yang sudah melebihi masa layan, terjadi perubahan fungsi, rusak akibat bencana dan tidak layak fungsi, perlu dilakukan pembongkaran (demolisi). Demolisi perlu menjadi perhatian khusus karena proses membutuhkan perencanaan yang kompleks, pembongkaran yang selektif, memiliki risiko tinggi dan menghasilkan

limbah bongkaran lebih dari 40% dari total limbah padat di negara berkembang.

Demolisi yang berkelanjutan (*deconstruction*) di Indonesia belum banyak dilaksanakan oleh penyedia jasa demolisi. Pemerintahpun belum memiliki aturan yang komprehensif untuk demolisi bangunan yang berkelanjutan. Berdasarkan survey pendahuluan yang dilakukan, penyedia jasa demolisi masih melaksanakan pembongkaran bangunan secara manual, menggunakan tenaga kerja manusia, dan peralatan sederhana seperti *hammer* dan *handy stone breaker*. Beberapa penyedia jasa sudah ada yang menggunakan alat berat, seperti *excavator* yang di modifikasi

fungsinya menjadi *stone breaker*. Pengamatan dan monitoring terhadap keselamatan pekerja, polusi dan limbah sisa hasil bongkaran juga belum dipertimbangkan. Limbah hasil demolisi masih tercampur dan belum terklasifikasikan, sehingga menyulitkan proses pemanfaatan kembali. Seringkali, waktu atau target pembongkaran yang dijadikan alasan untuk tidak melakukan klasifikasi material sisa hasil bongkaran. Akibatnya, proses material akan banyak terbuang dan tidak dapat di *Reduce, Reuse*, atau *Recycle* (3R) baik dalam lingkungan proyek, atau untuk dimanfaatkan di proyek atau industri lainnya.

Revolusi industri 4.0 ditandai dengan perkembangan pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi guna mencapai efisiensi yang tinggi dan kualitas produk yang lebih baik. Pemanfaatan BIM (*Building Information Modelling*) dalam pembangunan infrastruktur merupakan terobosan di bidang teknologi khususnya di negara Indonesia (Sopaheluwakan & Adi, 2020). BIM adalah sebuah metodologi dimana seluruh informasi (spesifikasi, kuantitas, harga, tahapan pekerjaan, dll) terintegrasi dengan bentuk 3D model bangunan yang menawarkan manfaat antara lain pengendalian biaya dan waktu, koordinasi saat pelaksanaan yang efisien dan mengoptimalkan manajemen aset infrastruktur. Terbitnya Permen PUPR No.22/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara yang mewajibkan digunakannya BIM dalam perencanaan pembangunan gedung 2 lantai dengan luas minimal 5000 m². Selama ini, konsep 7D BIM digunakan dalam konteks *Asset Life Cycle*, dari perencanaan bangunan (2D-5D), simulasi energy untuk fase operasional (6D) dan 7D BIM yang digunakan untuk manajemen fasilitas sebagai *Digital As built Drawing*. Dalam kenyataannya, proses demolisi yang merupakan fase akhir dari *Asset Life Cycle*, masih belum memanfaatkan BIM.

Penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan model demolisi berkelanjutan, dengan mengutamakan aspek konservasi material limbah bongkaran. Visualisasi dekonstruksi bangunan ini dilakukan dengan pemodelan demolisi bangunan dengan prinsip konstruksi terbalik (*Reverse Construction*) melalui model "Reverse 4D BIM". Database BIM kemudian dimanfaatkan untuk memberikan informasi terkait material komponen penyusun (jenis dan tipe material penyusun), biaya pembongkaran per luasan, volume, luasan dan dimensi komponen dengan memanfaatkan *software* Autodesk Revit. "*Reverse 4D BIM*" juga dapat menghasilkan jadwal pelaksanaan pengeluaran material limbah sisa bongkaran yang telah terklasifikasi dari lokasi proyek, untuk bisa dimanfaatkan kembali dalam bentuk *reuse* atau *recycle* material dekonstruksi diproyek atau industri lain.

2 METODOLOGI

2.1 Dekonstruksi Bangunan

Siklus hidup bangunan dapat dibagi menjadi lima tahap yang berbeda yaitu desain, produksi, konstruksi, penggunaan, dan akhir masa pakai. Pada akhir masa pakainya, komponen bangunan hasil dekonstruksi dapat menjadi beban lingkungan dengan ditimbun di tempat pembuangan akhir atau berdampak positif dengan memasukkannya kembali ke rantai produksi material baru sehingga dapat mengurangi ekstraksi bahan baku (Ruchini et al., 2019). Dekonstruksi adalah skenario akhir masa pakai bangunan yang memungkinkan pemulihan komponen bangunan yang efisien untuk tujuan penggunaan kembali, daur ulang atau *remanufacturing* (Ahmad & Anigbogu, 2010). Dekonstruksi yang dipahami sebagai *reverse construction* atau "konstruksi terbalik" (Kanters, 2018) dapat memperpanjang rantai pasok material sehingga membantu memulihkan persediaan bahan bangunan dalam industri konstruksi melalui penggunaan kembali (*reuse*), daur ulang (*recycle*), dan remanufaktur.

2.2 Green Building

Pengertian *green building* berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 8 tahun 2010, adalah bangunan yang menerapkan prinsip lingkungan dalam perancangan, pembangunan, pengoperasian, dan pengelolaannya dalam aspek penting penanganan dampak perubahan iklim. Prinsip lingkungan ini menekankan tujuan dari pelestarian lingkungan, regenerasi material sesuai konsep ekonomi sirkular dan tujuan hemat energi serta ramah lingkungan. Sehingga *green building* merupakan salah satu konsep yang muncul dalam mendukung pembangunan rendah karbon yakni melalui kebijakan dan program peningkatan efisiensi energi, air dan material bangunan ramah lingkungan serta peningkatan penggunaan teknologi rendah karbon.

Bangunan lama yang sudah melebihi masa pakai dan tidak layak fungsi memiliki siklus yang bisa menjadi sumber daya baru untuk pembangunan gedung lainnya setelah melalui tahapan transformasi dari limbah bongkaran kemudian didaur ulang (*recycle*) sehingga nilai manfaatnya naik kembali (*up-cycle*). Walaupun proses *recycle* dapat meningkatkan CO₂, beberapa negara mempromosikan bahwa pengelolaan kembali lebih hijau daripada proses produksi sumber bahan baku alam karena dapat lebih merusak alam (Belgum et al., 2006). Hal ini dapat dilakukan jika di awal perancangan bangunan menggunakan material ramah lingkungan dan didesain mudah dibongkar serta sebelum akhir masa pakai direncanakan pengelolaan limbah bongkaran yang ramah lingkungan. Isu inilah yang akan diangkat menjadi latar belakang kriteria dalam penilaian *green building* kategori bangunan baru yaitu kategori material *resource* and *cycle* atau sumber dan siklus material yang disingkat menjadi MRC. Pada kategori MRC yang memiliki 6 aspek penilaian,

kriteria untuk MRC 1 yaitu *building and material reuse* atau penggunaan gedung dan material bekas. Penggunaan material bekas baik dari bangunan lama maupun tempat lain diharapkan setara atau minimal 10% dari total biaya material. Material bekas tersebut dapat berupa bahan struktur utama, fasad, plafon, lantai, partisi, kusen dan dinding.

Pemanfaatan material bekas ini bisa meringankan beban lingkungan dan ekonomi dalam pembongkaran gedung lama dan pembangunan gedung baru. Dari segi lingkungan, penggunaan material bekas berdampak pada penghematan sumber daya yang digunakan untuk produksi material baru. Sedangkan dari segi ekonomi, pihak pembangun bisa menurunkan biaya konstruksi karena biaya yang dikeluarkan untuk membeli material bekas lebih rendah daripada material baru, bahkan ada material bekas yang bisa diperoleh secara cuma-cuma. Tidak hanya itu, jika kesempatan ini bisa dimanfaatkan lebih baik, perekonomian masyarakat pun akan menjadi lebih baik karena terbukanya peluang bisnis jual beli material bekas. Selain itu untuk meningkatkan kepercayaan public terhadap kualitas dari material bekas baik hasil dari *recycle*, remanufaktur maupun reuse, sebaiknya pemerintah mengeluarkan kebijakan sertifikasi produk dari berbagai sudut pandang pemangku kepentingan produk material ramah lingkungan terutama dari hasil daur ulang material limbah bongkaran.

2.3 Sustainability

Pembangunan infrastruktur berbasis konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*) menjadi perhatian Pemerintah saat ini, guna menciptakan konstruksi infrastruktur yang tidak hanya berkualitas tinggi namun berdampak pada keamanan dan kesehatan lingkungan serta peningkatan ekonomi dan kesejahteraan sosial. Sasaran ini berkaitan dengan peran produk infrastruktur dalam mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan (*sustainable development*); yaitu pembangunan yang mendorong generasi saat ini untuk mampu memenuhi kebutuhannya serta juga mampu mempersiapkan generasi mendatang memenuhi kebutuhan mereka kelak (WCED, 1987).

Keberlanjutan memiliki tiga pilar utama: ekonomi, lingkungan, dan sosial. Ketiga pilar ini secara informal disebut sebagai *people, planet, and profit*. Berikut akan dijelaskan konsep keberlanjutan dalam proses dekonstruksi bangunan dari sudut pandang ekonomi, lingkungan dan sosial. Keberlanjutan dalam proses dekonstruksi merupakan korelasi terkait hasil material daur ulang dari limbah bongkaran dekonstruksi sebagai produk baru yang bersertifikat *ecolabel*. Hasil produk olahan dan berlabel *eco* ini juga dapat digunakan oleh desainer, kontraktor dan owner dalam merancang, membangun atau memiliki bangunan dengan konsep penerapan *green building*. Konsep penerapan ini nantinya akan dilihat oleh

seorang tim penilai sertifikasi *green building* terkait prosentasi dari penggunaan material bekas yang terkandung dalam bangunannya jika bangunan tersebut akan disertifikasi *green building*.

Dekonstruksi dapat mengalihkan sebagian besar limbah hasil bongkaran menjadi peluang bisnis lokal masyarakat sehingga tidak langsung dapat menambah kesempatan masyarakat dalam bisnis hasil produk olahan limbah yang ramah lingkungan. Dekonstruksi juga dapat mengurangi jumlah penimbunan puing-puing di TPA sehingga dapat mengurangi beban lingkungan. Dekonstruksi juga memupuk sarana yang berkelanjutan untuk menghilangkan bangunan yang tidak diinginkan sekaligus meningkatkan pertumbuhan ekonomi nasional dan pendapatan masyarakat sekitar area dekonstruksi (Guy, 2006). Dekonstruksi hijau dan berkelanjutan adalah praktik yang selalu mengingat dampak lingkungan, sosial dan ekonomi dari pembongkaran struktur bangunan menjadi proyek pembangunan kembali baik di lokasi yang sama maupun lokasi lain (Andriyani et al., 2023). Praktik ini berfokus secara eksklusif pada pemilihan dan penerapan metode dekonstruksi yang akan memaksimalkan manfaat lingkungan dari penggunaan kembali dan daur ulang bahan konstruksi termasuk untuk meminimalkan biaya.

Peningkatan pertumbuhan ekonomi juga disebabkan terbukanya lapangan pekerjaan dalam proses dekonstruksi karena metode pelaksanaan secara manual dalam proses pembongkaran secara hati-hati, aman, dan dapat memaksimalkan hasil kualitas produk reuse. Dampak ekonomi dari penjualan produk ke kontraktor yang memanfaatkan material limbah dekonstruksi, baik secara *reuse*, produk *recycle* atau remanufaktur dalam proses pembangunan konstruksi dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi. Dari faktor sosial, peningkatan peluang pekerjaan, Kesehatan penduduk sekitar area pembongkaran bangunan juga merupakan dampak sangat signifikan jika metode dan tahapan pembongkaran tidak selektif, hati-hati dan destruktif. Hal ini dikarenakan debu, polusi udara akibat asap mesin alat berat, kebisingan dan getaran yang tercipta jika dilakukan dengan mekanik. Tercampurnya limbah material menjadi satu baik yang mengandung material bahaya atau tidak juga dapat mengganggu lingkungan karena penambahan jumlah limbah padat di tempat pembuangan akhir. Selain itu, adanya efek terkontaminasi lingkungan dan masyarakat sekitar akibat udara, tanah, air yang tercemar dari limbah berbahaya yang tidak diolah dan ditangani sebelum dibongkar secara selektif dan terkontrol. Studi menunjukkan bahwa dekonstruksi mengurangi limbah di tempat pembuangan akhir sebesar 50%-70% (Browning et al., 2006). Dalam pandangan ini, biaya renovasi atau konstruksi bisa berkurang sekitar 25%-35% jika bahan yang diselamatkan digunakan kembali karena bahan bekas

dijual dengan harga 50% dari harga yang baru (Browning et al., 2006).

2.4 BIM (Building Information Modelling)

Dalam perencanaan pengelolaan limbah yang ramah lingkungan, berkelanjutan dan memanfaatkan kemajuan teknologi dan informasi, maka perencanaannya berbasis building information modelling atau disebut juga BIM. *Inventory* database dari macam-macam dan spesifikasi material yang memiliki sertifikat *ecolabel*, atau material yang ramah lingkungan yang ada di Indonesia belum terperinci dalam suatu dataset. Database macam material hijau tersebut harus dikumpulkan dan dibuatkan dalam format yang dapat terintegrasikan ke dalam BIM dengan kolaborasi dari dataset material lain dari eropa, USA dan lain-lain. Kekurangan dari spesifikasi dan jenis material inventory dalam BIM sekarang kadang kala tidak dapat dijumpai di Indonesia sehingga dalam tahap pembangunan konstruksi, kontraktor menemui kesulitan dalam menemukan tipe dan jenis barang yang sama dengan perencanaan designer.

Material *quantity take-off* (QTO) memainkan peran penting dalam industri konstruksi mulai dari tahap desain awal, sebelum tahap tender dan prakonstruksi, dan selama fase konstruksi untuk membantu penjadwalan dan perhitungan biaya (Monteiro & Martins, 2013). Secara umum, proses QTO meliputi identifikasi barang dan hubungannya pada gambar, memperoleh dimensi, dan menghitung satuan pengukuran seperti area, volume, dan meter linier (Shen & Issa, 2010). Oleh karena itu, terlepas dari pentingnya, QTO membutuhkan banyak waktu untuk menafsirkan gambar cetak dan CAD konvensional (Sabol, 2008). Selain itu, penaksir perlu menyelidiki setiap set gambar dengan hati-hati dan melakukan perhitungan dengan cermat sehingga kesalahan karena penghitungan ganda dan kelalaian dapat dihilangkan (Olsen & Taylor, 2017).

BIM memiliki potensi untuk memungkinkan proses QTO material yang lebih akurat dan lebih cepat sekaligus meminimalisir fluktuasi tahapan perhitungan biaya (Sabol, 2008). Itu karena informasi untuk estimasi biaya sudah disertakan atau ditautkan dalam BIM, yang mengurangi kesalahan dan salah tafsir, dan dapat diperbarui secara otomatis ketika desain berubah (Ashcraft, 2008). Namun, keandalan kuantifikasi berbasis BIM umumnya dipertanyakan karena kesalahan pemodelan, keterbatasan dalam alat BIM, dan tidak menetapkan aturan dasar untuk proses pemodelan. Kesulitan dalam penerapan sistem klasifikasi ke dalam BIM, kurangnya tingkat pengembangan (LOD) dalam fase proyek yang berbeda jika diperlukan, dan pertukaran data bangunan di antara alat yang berbeda juga merupakan tantangan utama bagi QTO berbasis BIM. Selain itu, model desain dapat memberikan jumlah yang tidak memadai dan berlebihan karena mengandung objek BIM yang

kurang rinci karena proses pemodelan (Khosakitchalert et al., 2019). Oleh karena itu, QTO berbasis BIM membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan keandalannya. Dalam kasus bekisting beton, akurasi geometris model BIM dan urutan penempatan beton secara signifikan mempengaruhi hasil kuantifikasi. Biasanya, tidak mungkin untuk mengekstrak QTO bekisting yang lengkap dan sistematis dari model BIM karena persimpangan antara elemen yang berbeda yang menghasilkan kuantifikasi material berlebih (Monteiro & Martins, 2013). Demikian juga, volume komponen struktural dan keterbatasan perangkat lunak yang tumpang tindih mempersulit kuantifikasi bekisting berbasis BIM. Selain itu, bekisting adalah struktur sementara dalam fase konstruksi, dan membuat model bekisting terperinci untuk ekstraksi QTO membutuhkan waktu dan kerja keras (Khosakitchalert et al., 2019).

2.5 Keterkaitan BIM, Green Building dan Dekonstruksi Bangunan

Otomatisasi dalam konstruksi biasanya dikaitkan dengan teknologi bangunan atau manajemen informasi. Otomatisasi sebagian besar berkisar pada perangkat lunak atau software. Saat ini, perangkat lunak adalah sumber daya penting dalam *Architecture, Engineering and Construction* (AEC) software tersebut digunakan untuk perhitungan teknik, konstruksi dan manajemen proyek, perencanaan dan kontrol, dan untuk menghasilkan berbagai jenis dokumentasi terkait AEC termasuk desain bangunan dan spesifikasinya.

Building Information Modeling (BIM), metodologi untuk desain dan manajemen informasi yang dibangun di atas model virtual bangunan, mendukung beberapa jenis perangkat lunak paling menjanjikan yang tersedia untuk industri AEC. Mekanisme sentralisasi database untuk sebagian besar informasi proyek, maka BIM adalah alat yang sangat otomatis dalam memproses input designer dan secara otomatis pula dimasukkan ke model dan output informasi secara otomatis juga akan dihasilkan (Sacks, 2004).

Dalam rangka membuat modelling bangunan agar dapat dilihat secara visual menjadi 3 dimensi dengan penambahan informasi secara otomatis ditambahkan kedalam 3D modelling dan melihat *output* secara visual 3D maka perlu dilakukan survei dan identifikasi komponen material secara langsung terlebih dahulu. Suatu database harus dibangun untuk menggambarkan informasi posisi dan dimensi dari komponen bangunan tertentu atau bahan tertentu pada bangunan yang dihancurkan. Informasi mungkin menggambarkan posisi dan jumlah komponen material yang dapat digunakan kembali seperti jumlah dan posisi jendela, jumlah fitur peralatan kamar mandi, jumlah keramik marmer, jumlah *armature fitting* lampu, jumlah stop kontak, pipa *hydrant* atau pipa *plumbing* yang terekspose dan terbuat dari besi, jumlah pintu

bangunan, dan lain-lain. Hasil identifikasi dan klasifikasi komponen material *reuse* dan material berbahaya atau mudah terkontaminasi dan mengandung B3, merupakan informasi berupa posisi lokasi, jumlah dan dimensi bahan yang diinginkan.

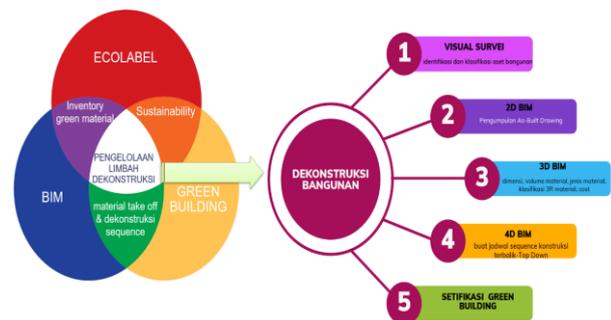
Salah satu persyaratan pertama untuk proses otomatis adalah memiliki sistem yang mengikuti struktur yang diinginkan dalam organisasi informasi. Jenis organisasi ini disebut *Work Breakdown Structure* (WBS). Mengingat luasnya siklus hidup proyek AEC, WBS yang dipilih harus digunakan oleh semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam proyek, untuk menghindari konflik, kesalahan, dan kelalaian (Monteiro, 2018). WBS biasanya dibangun di atas serangkaian level yang semakin rinci dan domain yang berbeda. Setiap elemen WBS dapat diidentifikasi dengan kode tertentu. Cara tercepat untuk menerapkan jenis organisasi ini ke model BIM adalah dengan memasukkan kode dalam bentuk ID atau Layer.

Quantity Take Off (QTO) otomatis adalah cara untuk menghilangkan banyak aspek negatif dari proses pengukuran secara manual. Saat ini, BIM mungkin merupakan cara terbaik untuk mengotomatisasi QTO (Sattineni, 2011) QTO adalah fitur yang telah ditentukan sebelumnya di sebagian besar alat BIM. BIM mengikuti pendekatan pemodelan parametrik berorientasi objek (Succar, 2009); (Lee, 2006), dan yang singkatnya berarti model tersebut merupakan kumpulan dari berbagai elemen yang menyusun bangunan. Setiap elemen memiliki konfigurasi uniknya sendiri, yang ditambahkan ke model dalam bentuk properti. Model dapat menggunakannya untuk mengelola dan mengatur interaksi dan kendala antara elemen yang berbeda. Arsitektur model memungkinkan aplikasi BIM untuk menjalankan beberapa rutinitas untuk ekstraksi otomatis informasi visual seperti denah lantai, ketinggian, bagian 2D dan 3D, bagian terperinci, rendering, dan informasi berbasis teks, termasuk jumlah, nilai konfigurasi spasial, analisis model, dan hasil simulasi.

Proses estimasi tidak sepenuhnya otomatis. QTO berbasis BIM tidak menyediakan semua data yang diperlukan untuk membuat estimasi biaya dan Bill of Quantities. Bahkan selalu perlu untuk menilai apakah data yang diekstraksi dari model memberikan representasi yang akurat dari bangunan yang sebenarnya atau tidak. Tergantung pada kerangka kerjanya, terserah *surveyor* atau penaksir untuk menyelesaikan masalah ini dan mengisi kesenjangan dengan input manual (Ma, 2014). Estimasi biaya diperbarui berdasarkan kuantitas BIM semakin sulit seiring dengan perkembangan proyek dan lebih banyak detail ditambahkan ke dalamnya. Lebih detail berarti lebih banyak elemen, lebih banyak properti, dan lebih banyak tautan, hubungan, dan batasan antara elemen model dan item biaya. Oleh karena itu, mendefinisikan tingkat detail (LOD) untuk setiap fase adalah cara yang baik untuk menjamin input hanya data yang benar-

benar diperlukan. Menambahkan lebih banyak detail mengarah pada estimasi biaya yang lebih akurat dan andal, tetapi menambahkan terlalu banyak detail juga dapat membahayakan pemodelan, lepas landas dan proses estimasi, karena lebih banyak waktu diperlukan untuk memodelkan elemen, untuk parameterisasi lepas landas kuantitas dan pembuatan tautan ke estimasi. Oleh karena itu, analisis biaya-manfaat sangat penting untuk estimasi biaya berbasis BIM. Prinsip untuk menghitung estimasi biaya yang harus dilakukan di luar BIM sama dengan menghitung prediksi volume limbah dekonstruksi yang nanti akan dihasilkan. *Software* microsoft excel adalah salah satu alat untuk dapat membantu menghitung BOQ dan volume limbah dekonstruksi dikarenakan ada faktor pengali untuk dapat menghasilkan faktor koreksi perubahan volume dari sebelum dan sesudah dilakukan pembongkaran.

Gambar 1 menunjukkan keterkaitan dalam pengelolaan limbah dekonstruksi, selain informasi-informasi terkait jenis, tipe, macam material dan volume serta harga satuan kedalam BIM. Dalam proses pembuatan 4D BIM, maka diperlukan informasi jadwal dari WBS yang sudah dibuat sebelumnya sehingga secara otomatis pula, simulasi tahapan proses dekonstruksi dapat dilihat secara visual dalam bentuk 3 dimensi. Hal ini menjadi informasi dan pengambilan keputusan bagi owner atau kontraktor dalam perencanaan keputusan untuk melakukan perpindahan limbah menuju lokasi pembangunan konstruksi baru yang direncanakan nantinya dilakukan sertifikasi green building dari sisi penambahan point pada kategori MRC 1 yaitu prosentase penggunaan material *reuse* dan *recycle* pada bangunan baru.

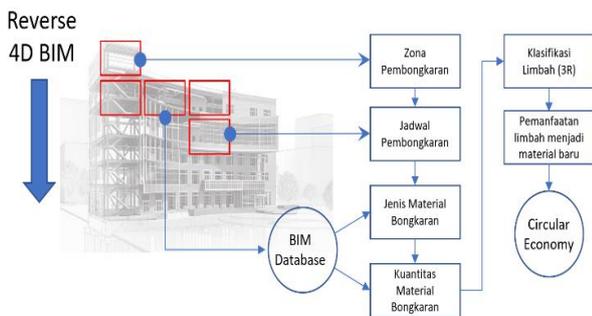


Gambar 1. Keterkaitan BIM, ECOLABEL, dan *green building* dalam proses dekonstruksi

2.6 Reverse 4D BIM

Proses demolisi merupakan kebalikan dari proses pembangunan gedung/bangunan. Pada proses demolisi, bangunan dihancurkan dari puncak bangunan menuju ke dasar bangunan. 4D BIM, selama ini digunakan sebagai model untuk melakukan *sequence* atau urutan pembangunan gedung/bangunan. Urutan pembangunan dikolaborasikan dengan jadwal (*schedule*) proyek, sehingga bisa diidentifikasi tahapan, zona, komponen bangunan yang akan di

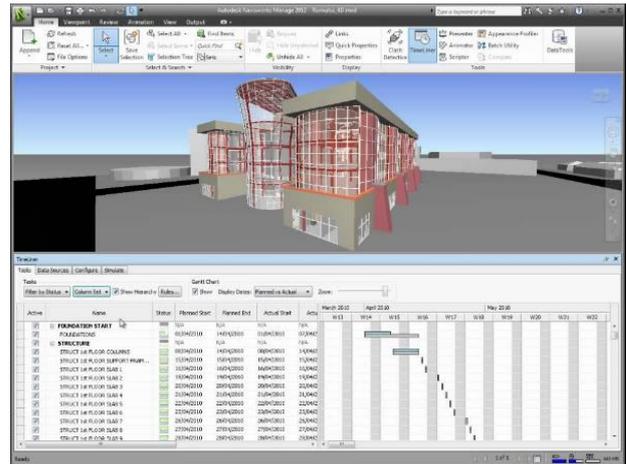
konstruksi. Jadwal pelaksanaan pun bisa disimulasikan, agar perencana dapat melihat kendala atau risiko yang bisa terjadi saat pelaksanaan konstruksi. Dalam proses demolisi, 4D BIM dapat dimanfaatkan untuk melakukan konstruksi terbalik *reverse construction*, yaitu proses pembongkaran gedung, dimana zona, atau tahapan pembongkaran material dapat dijadwalkan dari atas menuju ke dasar bangunan. Selain itu, database BIM, yang meliputi jenis material/ komponen bangunan, volume material bangunan, sudah dapat teridentifikasi saat pembongkaran. Sebagai hasilnya, jadwal pembongkaran, volume dan jenis material yang dihasilkan dari proses pembongkaran dapat diketahui, sehingga material sisa bongkaran bisa segera diklasifikasikan. Proses 3R pun dapat segera di aplikasikan. Konsep inilah yang menjadi pertimbangan penggunaan “Reverse 4D BIM” untuk proses demolisi berkelanjutan. Material yang telah di proses melalui 3R, pada akhirnya dapat menjadi material bangunan yang baru, yang bisa digunakan didalam proyek maupun digunakan pada proyek atau industri lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh (Adi, 2020), menunjukkan pemanfaatan kembali beberapa material konstruksi hasil demolisi menjadi material baru yang dapat digunakan untuk dekonstruksi. Pemanfaatan kembali ini, akan memperpanjang siklus hidup material bangunan, sehingga memberikan nilai tambah ekonomis atau disebut *circular economy*. Gambar 2 di bawah ini merupakan konsep penggunaan Reverse 4D BIM untuk demolisi berkelanjutan.



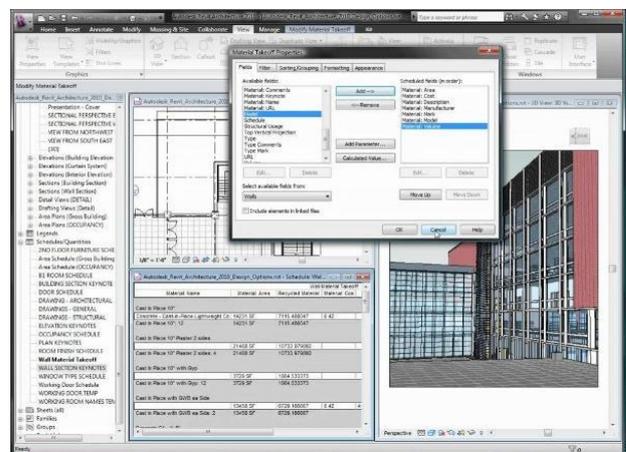
Gambar 2. Konsep reverse 4D BIM untuk demolis berkelanjutan

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bangunan gedung ini merupakan bangunan gedung perkantoran dengan ketinggian 6 lantai. Komponen struktur yang digunakan adalah rangka struktur beton bertulang. Komponen arsitektur dalam bangunan meliputi komponen interior dan eksterior yang melekat dengan bangunan. Gambar 3 dan Gambar 4 berikut ini merupakan proses penjadwalan pembongkaran bangunan menggunakan “Reverse 4D BIM”, dan *Quantity Take off* per zona pembongkaran (jenis dan volume material) menggunakan software BIM.



Gambar 3. Penjadwalan reverse 4D BIM



Gambar 3. Quantity take off

4 KESIMPULAN

Hasil simulasi model dalam penelitian ini menunjukkan bahwa, model *Reverse 4D BIM* dapat digunakan untuk melaksanan demolisi berkelanjutan. Proses pembongkaran menggunakan BIM dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak. Dari sisi pemilik bangunan, proses pembuangan/ pengeluaran material dari lokasi proyek berdampak lokasi proyek yang bersih dan aman dari limbah sisa bongkaran. Selain itu material yang terklasifikasi jenis dan volumenya dapat di *reuse* dan *recycle*, sehingga memberikan nilai tambah ekonomis dan memperpanjang siklus hidup material (*circular economy*). Dari kaca mata pemerintah, demolisi berkelanjutan ini akan membantu mengurangi beban limbah bongkaran, yang faktanya semakin membebani tempat pembuangan akhir (TPA) diberbagai daerah, khususnya kota kota besar di Indonesia. Penelitian ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan efektif dan bisa diimplementasikan untuk pelaksanaan demolisi bangunan yang berkelanjutan.

5 DAFTAR PUSTAKA

- Adi, T. J. W., & Wibowo, P. (2020). Application of Circular Economy in the Indonesia Construction Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(012049).
- Ahmad, Z. B., & Anigbogu, N. A. (2010). Deconstruction: A Sustainable End to a Building. *Nigerian Journal of Construction Technology and Management*, 11(2), 63-69.
- André, M. & João Poças M. (2018). A Survey on Modeling Guidelines for Quantity Takeoff Oriented BIM-Based Design. *J. Automation in Construction*, 35, 238-253.
- Andriyani, N., Adi, T. J. W., Suprobo, P., Aspar, W. A. N., Rachmawati, F., & Pradono, M. H. (2023). *AIP Conf. Proc.* 2847, 040007. <https://doi.org/10.1063/5.0165463>
- Anoop, S. & Bradford, R. H. (2011). Estimating With BIM: A Survey of US Construction Companies. *Proceedings of the 28th ISARC*, Seoul, Korea, 564-569.
- Ashcraft, H. W. (2008). Building Information Modeling: A framework for collaboration. *Construction Lawyer*, 28.
- Bazjanac, V. (2005). *Model Based Cost And Energy Performance Estimation During Schematic Design*. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. Berkeley. USA.
- Bilal, S. (2009). Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. *J. Automation in Construction*, 18(3), 357-375.
- Environmental Protection Agency (2008). *Lifecycle Construction Resource Guide*. USA. www.epa.gov/region4/p2.
- Ghang, L., Rafael, S., & Charles, M. E. (2006). Specifying Parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System. *J. Automation in Construction*, 15(6), 758-776.
- Guy, B. & Korber, A. (2006). *Design for Disassembly in the Built Environment*, Pennsylvania State University's Hammer Center for Community Design and The Community Housing Resource Center. Lifecycle Construction Resource Guide. Environmental Protection Agency
- Guy, B. (2006). The Optimization of Building Deconstruction for Department of Defense Facilities: Ft. McClellan Deconstruction Project. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 6(3/4), 386-404.
- Kanters, J. (2018). Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. *Buildings*, 8(150).
- Kementerian PUPR. (2018). *Pembangunan Bangunan Gedung Negara*. Permen PUPR No.22.
- Kementerian LH. (2010). *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 8*.
- Khosakitchalert, C., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2019). Improving the Accuracy of BIM-Based Quantity Takeoff for Compound Elements. *J. Automation in Construction*, 106.
- Khosakitchalert, C., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2019). Automatic Concrete Formwork Quantity Takeoff Using Building Information Modeling. *In Proceedings of the 19th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR)*, 21-28.
- Ma, Z., & Liu, Z. (2014). BIM-Based Intelligent Acquisition of Construction Information for Cost Estimation of Building Project. *Procedia Engineering*, 85, 358-367.
- Monteiro, A., & Martins, J. (2013). A Survey on Modeling Guidelines for Quantity Takeoff-Oriented BIM-Based Design. *J. Automation in Construction*, 35, 238-253.
- Olsen, D., & Taylor, J. M. (2017). Quantity Take-Off Using Building Information Modeling (BIM), and Its Limiting Factors. *Procedia Engineering*, 196, 1098-1105.
- Ruchini, S.J., Raufdeen R., & Nicholas C. (2019). Exploring Sustainable Post-End-Of-Life of Building Operations. *J. Engineering, Construction and Architectural Management*. 26(4), 689-722.
- Sabol, L. (2008). *Challenges in Cost Estimating with Building Information Modeling. Design and Construction Strategies*. Retrieved 8th December 2010, 1-16.
- Sacks, R., Eastman, C. M., & Lee, G. (2004). Parametric 3D Modeling in Building Construction with Examples from Precast Concrete. *J. Automation in Construction*, 13(3), 291-312.
- Shen, Z., & Issa, R. R. A. (2010). Quantitative Evaluation of the BIM-Assisted Construction Detailed Cost Estimates. *J. Information Technology in Construction*, 15, 234-257.
- Sopaheluwakan, M. P., & Adi, T. J. W. (2020). Adoption and Implementation of Building Information Modeling (BIM) by the Government in the Indonesian Construction Industry. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 4th International Conference on Civil Engineering Research*. Surabaya, 22-23 July 2020, 930.