

## KEPUTUSAN MULTIKRITERIA DALAM MENILAI KONSTRUKSI RUMAH TINGGAL TERHADAP LINGKUNGAN Multicriteria Decision in Assess the House Construction to Environment

Wahyu Wuryanti

Pusat Litbang Permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum  
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan - Kabupaten Bandung 40393  
E-mail: wuryantiwahyu@gmail.com

Diterima : 06 Januari 2012; Disetujui : 10 Mei 2012

### Abstrak

Selama ini dalam penilaian rancangan rumah masih mengedepankan pendekatan konvensional seperti aspek ekonomi dan aspek teknis. Sementara itu isu lingkungan yang seharusnya juga dipertimbangkan sebagai fenomena global belum disentuh. Ketika kebutuhan rumah tinggal masih tinggi di Indonesia, industri konstruksi akan menjadi penyebab terbesar polusi lingkungan. Keputusan penggunaan teknologi konstruksi dan bahan bangunan sepatutnya telah mempertimbangkan beberapa aspek termasuk aspek lingkungan. Tulisan ini menyajikan penilaian multikriteria terhadap empat alternatif rancangan konstruksi rumah tinggal. Metodologi penelitian menggunakan teknik analisis keputusan multikriteria yakni metoda simple additive weighting dan metoda multiplicative exponential weighting. Hasil studi menunjukkan bahwa konstruksi rumah yang menggunakan rangka beton bertulang dengan dinding panel dan penutup atap asbes mendapatkan skor tertinggi berarti merupakan pilihan terbaik dalam evaluasi. Namun untuk pengembangan produksi rumah massal hasil evaluasi ini perlu disikapi dengan bijaksana karena produk asbes berbahaya bagi kesehatan.

**Kata Kunci :** Rumah tinggal, multi-kriteria, simple additive weighting, multiplicative exponential weighting

### Abstract

During this time in the assessment of houses design still emphasizes the conventional approaches such as economic aspects and technical aspects. Meanwhile, environmental issues should also be considered as a global phenomenon has not been addressed. When the house needs still high in Indonesia, the construction industry will be the biggest cause of environmental pollution. Decision of the use of technology of construction and building materials should have been considering several aspects including environmental aspects. This paper presents the multi-criteria assessment of four alternatives of house construction. The research methodology uses multi-criteria decision analysis consisting of simple additive weighting and the multiplicative exponential weighting methods. Results of the study showed that house construction using reinforced concrete frame with wall panels and roof cover asbestos get highest score means is the best option in the evaluation. However, for the development of mass production this evaluation results should be handled wisely because the product of asbestos harmful to health.

**Keywords :** House, multi-criteria, simple additive weighting, multiplicative exponential weighting

### PENDAHULUAN

Di Indonesia, program pembangunan rumah tapak (*landed house*) tetap diselenggarakan untuk menghadapi animo masyarakat berpenghasilan menengah ke bawah untuk memiliki rumah tapak masih tetap tinggi. Dalam penilaian rancangan konstruksi selama ini menggunakan pendekatan konvensional yang lebih mengedepankan aspek ekonomi yaitu biaya dan waktu konstruksi dan aspek teknis yaitu kekuatan konstruksi. Sementara itu isu lingkungan yang juga seharusnya dipertimbangkan sebagai sebuah fenomena global masih menjadi wacana dan belum diimplementasikan.

Seperti disinyalir dalam berita media elektronik bahwa Indonesia termasuk penghasil emisi gas rumah kaca terbesar ketiga di dunia, disebabkan terutama dari industri, pembangkit listrik dan transportasi (Indolife, 29 Desember 2011). Industri konstruksi ditengarai sebagai penyumbang 40% emisi gas CO<sub>2</sub>.

Telah diketahui bahwa gas rumah kaca terdiri dari beberapa gas dan gas CO<sub>2</sub> memberikan kontribusi terbesar yaitu sebanyak 56%. Oleh sebab itu upaya untuk mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> dan meningkatkan teknologi konstruksi ramah lingkungan perlu terus digalakkan khususnya dari sektor industri konstruksi. Program tersebut tidak mudah dan

perlu usaha keras dan kerjasama yang baik dari seluruh pemangku kepentingan. Salah satunya adalah melalui penggunaan bahan bangunan rendah emisi dalam rancang bangunan.

Di awal suatu rancangan konstruksi ada tantangan tersendiri dalam memutuskan jenis bahan bangunan dan teknologi konstruksi yang akan digunakan. Tidak mudah mengumpulkan rekaman penilaian suatu produk bahan secara lengkap. Perlu melibatkan perencana sebagai konseptor rancangan akhir, kontraktor sebagai aktor pelaksana lapangan, dan estimator yang menilai aspek ekonomisnya.

Saat ini banyak produk bahan yang telah dikembangkan dan menjadi pilihan untuk diaplikasikan dalam konstruksi bangunan. Memilih bahan bangunan dengan kadar emisi gas rendah semata-mata belum tentu menjadi pilihan terbaik dan efisien manakala proses pelaksanaannya sulit. Perlu mempertimbangkan beberapa kriteria seperti aspek ekonomi, aspek teknis, estetika, tren, dan/atau lainnya. Kenyataannya tidak ada satu pun bahan bangunan yang selalu memiliki keunggulan pada setiap kriteria penilaian. Tergantung pada kriteria apa yang digunakan dalam menilai performa bahan (Garrison, 2008).

Menjadi tantangan tersendiri bagi pengambil keputusan dalam memberikan keputusan yang tepat menghadapi berbagai alternatif dalam proyek konstruksi. Hal ini tidak mudah. Melalui teknik *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) telah dikembangkan metoda pengambilan keputusan dengan mempertimbangkan berbagai kriteria penilaian. Suatu keputusan akan tergantung pada nilai dan preferensi dari pengambil keputusan, sehingga perlu ditetapkan dahulu tujuan dan kriteria yang diharapkan.

Dalam tulisan ini membahas penilaian multikriteria untuk memutuskan pengaruh konstruksi rumah tinggal terhadap lingkungan. Objek penilaian lebih mengutamakan pada penggunaan bahan bangunan. Tujuannya adalah menentukan pilihan terbaik terhadap empat alternatif pilihan unit konstruksi rumah yang ditinjau dari berbagai kriteria penilaian.

**Kajian Pustaka**

Dalam membuat suatu keputusan penggunaan produk konstruksi, perlu ditetapkan nilai-nilai penerimaan (*acceptable values*) secara kuantitatif untuk memudahkan dalam analisis pengambilan keputusan.

**Dampak Bangunan terhadap Lingkungan**

Energi yang digunakan selama hidup bangunan dapat dibedakan menjadi dua jenis energi yaitu *embodied energy* dan energi operasional. Pengertian *embodied energy* adalah jumlah energi yang dikonsumsi dalam seluruh proses produksi material atau sistem. Sementara energi operasional adalah konsumsi energi selama bangunan beroperasi sehingga tergantung pada pengguna. Emisi *embodied CO<sub>2</sub>* (emisi *ECO<sub>2</sub>*) merupakan jumlah total emisi gas rumah kaca (GHG) yang dihitung sebagai satuan karbon dioksida ekuivalen (*CO<sub>2</sub>-e*) selama proses mulai dari ekstraksi bahan baku, transportasi, fabrikasi sampai menjadi produk akhir siap pakai (Chen, et al 2010). Dalam menghitung emisi gas dari bahan bangunan perlu angka konversi dari konsumsi energi menjadi emisi *ECO<sub>2</sub>*. Jumlah total emisi *ECO<sub>2</sub>* merupakan perkalian volume bahan dengan faktor emisi *ECO<sub>2</sub>* menggunakan persamaan (1).

$$ECO_2 = \sum_i Q_i \times ECO_{factor\ i} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan *Q<sub>i</sub>* adalah kuantitas material *i* dan *ECO<sub>factor i</sub>* adalah faktor konversi tergantung pada jenis penggunaan bahan bakar.

Tidak mudah untuk menghitung jumlah emisi *ECO<sub>2</sub>* sehingga banyak metoda yang dikembangkan sesuai batasan sistem. Banyak penelitian berusaha menghitung angka *ECO<sub>factor</sub>* (Chen, et al 2010) dan telah menerbitkan daftar angka faktor. Seperti faktor emisi *ECO<sub>2</sub>* yang dihasilkan oleh Seo dan Hwang, 2001 dalam penelitiannya di Australia yang menghitung berdasarkan konsumsi bahan bakar fosil dan produksi semen. Penelitian Hammond dan Jones, 2008, di Inggris menghitung berdasarkan konsumsi bahan bakar. Sementara penelitian Chen dan rekan-rekannya 2010 juga menghitung angka faktor *ECO<sub>2</sub>* berdasarkan kondisi di Australia dan Inggris. Angka faktor yang telah dihasilkan tersebut tidak dapat dibandingkan satu dengan lainnya, karena metoda, waktu dan lokasinya berbeda. Tabel 1 menyajikan daftar angka *ECO<sub>factor</sub>* yang dihasilkan dari beberapa penelitian sebelumnya.

Sampai saat ini belum ada riset dan *database* yang menghitung faktor *ECO<sub>2</sub>* untuk produk-produk bahan bangunan Indonesia, sehingga data-data yang dikembangkan di negara lain meski tidak akurat tetapi cukup signifikan digunakan dan dapat memberikan informasi yang relevan dalam memperkirakan emisi *ECO<sub>2</sub>*.

Emisi *ECO<sub>2</sub>* yang ditimbulkan untuk transportasi tergantung pada jenis bahan bakar, jumlah

konsumsi bahan bakar dan moda transportasi dari lokasi pengambilan sampai lokasi proyek. Tabel 2 menampilkan faktor emisi sesuai jenis bahan bakar.

**Tabel 1** Faktor  $ECO_2$  dari Penelitian Sebelumnya

Building Material	Hammond and Jones, 2008	Seo and Hwang, 2001	Chen, et al, 2010
	kg-CO <sub>2</sub> /kg	kg-CO <sub>2</sub> /kg	kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Asbes	n.a	0,0109	1668,6
Baja tulangan	1,77	0,4252	12207
Bata	0,22	0,0114	290,8
Batako	0,163*	n.a	153,9
Batu belah	0,056	0,0017	n.a
Beton	0,159	0,0125	333,6
Beton bertulang	0,241	n.a	n.a
Beton FB**	0,102	n.a	302,5
Beton ringan	0,28	n.a	196,9
Genteng beton	0,061	n.a	564
Gypsum board	0,12	0,2293	301,8
Kaca	0,85	0,269	1380,5
Kayu	0,46	0,0262	204,5
Keramik	0,59	0,2061	1920
Mortar 1:4	0,177	n.a	418
Pasir	0,005	0,0005	51
Plywood	0,81	0,1996	650,1
Portland cement	0,83	0,2204	n.a

Note :

\*diasumsikan campuran mortar 1:1:6 semen:kapur:pasir

\*\*beton ringan campuran dengan fly bottom ash

**Tabel 2** Faktor Emisi Bahan Bakar

Jenis Bahan Bakar	Faktor Emisi [kg CO <sub>2</sub> per Liter]
Diesel	2,63
Petrol	2,32
Bio-diesel	0,67

Sumber : Joosen and Luttmer, 2007

Perkalian antara jarak tempuh dan faktor emisi menghasilkan jumlah emisi CO<sub>2</sub> transportasi sesuai persamaan (2).

$$TCO_2 = D \times ECO_{fuel} \dots\dots\dots (2)$$

Dengan D jarak tempuh dan  $ECO_{fuel}$  adalah emisi bahan bakar.

Dengan demikian total emisi  $ECO_2$  penggunaan bahan bangunan merupakan penjumlahan emisi  $ECO_2$  dan  $TCO_2$  sesuai dengan persamaan (3).

$$Emisi CO_2 = ECO_2 + TCO_2 \dots\dots\dots (3)$$

**Identifikasi Kriteria Penilaian**

Secara tradisional dalam mengevaluasi suatu produk konstruksi hanya berdasarkan pertimbangan ekonomi menggunakan parameter nominal biaya/harga. Namun saat ini dan perkembangan teknologi dan permasalahan masyarakat pengambilan keputusan dalam mengekspresikan nilai keberterimaan tidak hanya berdasarkan faktor ekonomi, tetapi juga

berdasarkan faktor non-finansial seperti lokasi, aksesibilitas, keamanan, dan sebagainya.

Menurut Noris and Marshall (1995) dalam mengevaluasi performa bangunan atau sistem bangunan menggunakan kriteria sebagai berikut dan masing-masing kriteria dapat dikembangkan sesuai dengan kebutuhannya dan tidak perlu seluruhnya harus ada.

- (1) Estetika yaitu tampilan dan daya tarik disain di dalam dan luar gedung serta lingkungan sekitar
- (2) Fungsi bangunan yaitu kinerja bangunan dalam memenuhi kebutuhan pemilik/ pengguna gedung, termasuk efisiensi tata dan fungsi ruang
- (3) Durabilitas yaitu ketahanan gedung dan fasilitasnya selama waktu tertentu
- (4) Ekonomi yaitu nilai, efisiensi dan profitabilitas gedung atau komponen bangunan
- (5) Dampak lingkungan yaitu dampak udara, air, lahan dan sumber energi
- (6) Fleksibilitas penggunaan yaitu kemudahan dan fleksibilitas penggunaan gedung
- (7) Kelengkapan fasilitas teknologi yaitu kapasitas dan fleksibilitas infrastruktur teknologi informasi dalam gedung, termasuk suplai energi, jaringan telekomunikasi dan komputer
- (8) Lokasi yaitu penempatan bangunan untuk menunjang tujuan pemilik gedung
- (9) Ketersediaan penghunian yaitu lama penghunian dan ketersediaan penghuni
- (10) Operasional dan pemeliharaan yaitu kemudahan dan kenyamanan operasional, pemeliharaan, pembersihan, dan perbaikan
- (11) Keandalan yaitu kemampuan sistem bangunan selama beroperasi pada kondisi normal maupun abnormal
- (12) Keamanan yaitu perlindungan pada pengguna, pengunjung dan aset (gedung dan isinya)
- (13) Ketahanan suara dan pandangan yaitu privasi dan kenyamanan terhadap bunyi, pandangan dan pencahayaan
- (14) Ketahanan udara dan termal yaitu kondisi suhu ruangan, kelembaban, ventilasi, kualitas udara
- (15) Transportasi yaitu efisiensi dan kemudahan perpindahan orang dan barang dari dan ke bangunan

Kriteria penilaian produk konstruksi dapat didetailkan dalam sub-kriteria bila perlu. Pada penilaian suatu produk bahan bangunan kriteria



$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{6}$$

Dengan  $\lambda_{max}$  = eigenvalue maksimum, n = jumlah atribut dalam matriks, RI = sesuai jumlah n

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35

Secara prosedur yang didasarkan pada pengalaman (bukan teori) bila  $CR \leq 0,1$  maka cukup konsisten, sehingga bobot penilaian yang dihasilkan dapat digunakan.

Dalam MCDM dengan metoda *Simple Additive Weighting (SAW)*, prosedur analisisnya sebagai berikut :

- a) Untuk setiap alternatif, hitung skor dengan mengalikan rating setiap atribut dengan bobot relatif dan menjumlahkan hasil perkalian untuk seluruh atribut
- b) Skala yang digunakan harus sama, bila tidak harus ditransformasikan terlebih dahulu menggunakan persamaan (8) dan (9).

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}, \text{ jika nilai maksimum} \tag{8}$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}, \text{ jika nilai minimum} \tag{9}$$

- c) Pilih alternatif yang memiliki skor tertinggi. Kriteria optimalisasi matriks dihasilkan dari perkalian bobot dengan kriteria sesuai persamaan (10).

$$d) \quad A^* = \left\{ A_i \left| \max_i \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_j \right. \right\} \tag{10}$$

Dengan  $w_j$  merupakan bobot dari setiap kriteria.

Pada metoda *Multiplicative Exponential Weighting (MEW)* atau *Weighting Product Method (WPM)* prosedur analisisnya sebagai berikut :

- 1) Untuk setiap alternatif, pangkatkan rating setiap atribut dengan bobot atribut dan kemudian dihitung produknya
- 2) Persyaratan atribut harus numerik dan *comparable*
- 3) Pilih alternatif dengan produk tertinggi dengan kriteria optimalisasi dihitung dengan persamaan (11).

$$A^* = \left\{ A_i \left| \max_i \left( \prod_{j=1}^n (X_{ij})^{w_j} \right) \right. \right\} \dots\dots\dots (11)$$

**METODOLOGI**

Metoda yang digunakan dalam studi ini melalui pendekatan *Multi Criteria Decision Analysis (MCDA)* dengan metoda *scoring*. Perhitungan bobot setiap kriteria menggunakan metoda AHP. Untuk pengolahan dengan AHP data diperoleh dari opini pakar di bidang struktur konstruksi, arsitektur dan mekanikal. Untuk mendapatkan penilaian gabungan dilakukan dengan menghitung rataan geometri sesuai persamaan (12).

$$X_g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i} \tag{12}$$

Dalam beberapa kasus, pada kenyataannya dengan metoda yang berbeda akan memperoleh hasil yang berbeda. Oleh sebab itu dalam studi ini digunakan dua metoda yaitu SAW dan MEW. Dalam metoda SAW skor keseluruhan adalah sebagai jumlah rata-rata tertimbang dari nilai-nilai atribut. Sementara dalam metoda MEW skor keseluruhan adalah nilai eksponen dari setiap nilai atribut.

Kriteria penilaian terhadap aspek lingkungan dibatasi tidak pada seluruh siklus hidup proyek tetapi dihitung sampai batas pekerjaan pembangunan selesai. Atribut lingkungan yang digunakan sebagai penilaian konstruksi rumah tinggal terhadap lingkungan adalah nilai kadar emisi gas CO<sub>2</sub>. Nilai emisi gas pengadaan bahan bangunan di lokasi proyek meliputi kadar CO<sub>2</sub> yang terkandung selama produksi bahan bangunan dan kadar CO<sub>2</sub> yang digunakan dalam transportasi pengadaan bahan bangunan di lokasi proyek.

Untuk memberikan keputusan berimbang selain aspek lingkungan diperhitungkan pula penilaian aspek kekuatan, kemudahan, kenyamanan dan ekonomi. Aspek kekuatan dalam merupakan kekuatan bahan bangunan sebagai bahan konstruksi. Aspek kemudahan dihitung dari jumlah waktu konstruksi.

Aspek ekonomi merupakan kriteria penilaian yang paling tradisional diekspresikan dengan nilai biaya konstruksi bangunan yang diperlukan untuk pembelian bahan dan pembayaran upah tukang. Dalam upah kerja tergantung pada aspek kemudahan pelaksanaan, sehingga waktu konstruksi untuk pembangunan unit rumah terkait pula dengan aspek ekonomi.

Aspek kenyamanan menurut Undang-undang Bangunan Gedung meliputi kenyamanan ruang gerak, pandangan, termal, kenyamanan terhadap getaran dan kebisingan. Pada kenyamanan ruang gerak, pandangan, dan getaran, karena pada kasus yang ditinjau setiap alternatif memiliki denah tata

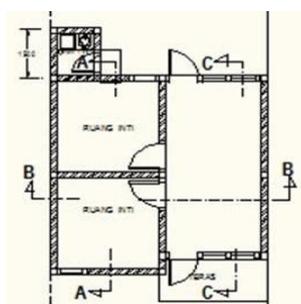
ruang dan lokasi rumah sama, maka tidak relevan digunakan sebagai pembanding, sehingga digunakan ketahanan termal dan insulasi bunyi dari bahan bangunan yang digunakan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

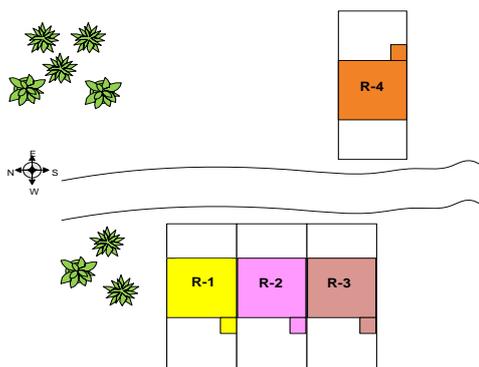
Hasil akhir yang diharapkan dalam studi ini adalah meranking tipe konstruksi sesuai skor tertinggi berdasarkan pertimbangan berbagai interaksi beberapa kriteria penilaian. Data diperoleh dari dokumen perencanaan rumah tinggal meliputi gambar rencana, spesifikasi dan rencana anggaran biaya, yang diperoleh penulis ketika menangani kegiatan penelitian tahun 2010 di Pusat Litbang Permukiman.

#### Alternatif Konstruksi Rumah

Terdapat 4 (empat) alternatif pilihan konstruksi rumah tinggal. Keempat rumah dibangun di lokasi yang sama di kawasan Turangga Kota Bandung dan didirikan pada akhir tahun 2010. Keempat alternatif rumah masing-masing mempunyai luas bangunan seluas 36 m<sup>2</sup> berdiri pada lahan seluas 90 m<sup>2</sup> dengan denah ruang seperti pada gambar 1 dan layout ke empat rumah dituangkan dalam gambar 2.



Gambar 1 Denah rumah



Gambar 2 Layout Penempatan Ke-4 Unit Rumah

Masing-masing alternatif konstruksi rumah mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- Alternatif 1, rumah batako (A<sub>1</sub>); menggunakan fondasi menerus pasangan batu kali, rangka utama beton bertulang, dinding pasangan batako,

rangka kuda-kuda kayu dan penutup atap genteng beton

- Alternatif 2, rumah bata (A<sub>2</sub>); menggunakan fondasi menerus pasangan batu kali, rangka utama beton bertulang, dinding pasangan bata merah, rangka kuda-kuda kayu dan penutup atap genteng beton
- Alternatif 3, rumah baberi (A<sub>3</sub>); menggunakan fondasi menerus pasangan batu kali, rangka utama beton bertulang, dinding pasangan bata beton ringan, rangka kuda-kuda kayu dan penutup atap genteng beton
- Alternatif 4, rumah panel (A<sub>4</sub>); menggunakan fondasi menerus pasangan batu kali, rangka utama beton bertulang, dinding hollow panel berukuran 2400x600x70 mm<sup>3</sup>, rangka kuda-kuda kayu dan penutup atap asbes. Panel dinding merupakan bahan beton ringan yaitu campuran semen agregat terdiri dari pasir dan limbah abu batubara (*fly bottom ash*) diperkuat dengan kawat anyam. Komposisi campuran bahan panel 1 semen : 3 agregat. Komposisi agregat 60% pasir : 20% *fly ash* : 20% *bottom ash*.

#### Kriteria Penilaian Keputusan

Dengan fungsi dan denah bangunan sama, maka kriteria penilaian konstruksi dipersempit menjadi enam kriteria meliputi :

- (1) kriteria ramah lingkungan diekspresikan dengan nilai emisi CO<sub>2</sub> penggunaan material bangunan meliputi emisi *embodied CO<sub>2</sub>*, *ECO<sub>2</sub>* dan emisi transportasi, *TCO<sub>2</sub>*.
- (2) kriteria ekonomi diekspresikan dengan biaya bahan dan pelaksanaan pembangunan konstruksi satu unit rumah.
- (3) kriteria kenyamanan terhadap panas yaitu kemampuan untuk menghantar panas. Kenyamanan alami rumah tinggal tergantung selain pada letak bukaan juga pada penggunaan bahan bangunan terutama dinding dan atap. Dengan demikian kriteria kenyamanan dihitung berdasarkan nilai kumulatif nilai konduktivitas termal bahan dinding dan bahan penutup atap.
- (4) kriteria kekuatan bahan diekspresikan dengan nilai kuat tekan dan kuat lentur. Kekuatan bahan sepatutnya didasarkan pada semua bahan yang digunakan per unit rumah. Akan tetapi karena jenis rangka utama untuk ke-4 alternatif adalah sama, kecuali untuk bahan dinding dan penutup atap. Untuk kriteria kekuatan yang digunakan merfer pada kekuatan bahan dinding. Pada dinding pasangan digunakan kuat tekan per unit bata, batako dan bata beton ringan, sedangkan dinding panel digunakan kuat tekan lentur.

- (5) Kriteria kenyamanan terhadap kebisingan pada rumah tinggal didominasi karakteristik bahan dinding. Dengan demikian pada kriteria ini diekspresikan dengan nilai insulasi bunyi bahan dinding.
- (6) Kriteria kemudahan pengerjaan di lapangan diekspresikan dengan durasi pelaksanaan pembangunan konstruksi tiap unit rumah. Semakin cepat waktu yang digunakan artinya mudah pengerjaannya.

**Bobot Tiap Kriteria**

Hasil perhitungan konsistensi setiap opini pakar disajikan dalam tabel 5 sampai 7. Notasi masing-masing kriteria adalah sebagai berikut :

- K<sub>1</sub> = emisi CO<sub>2</sub>
- K<sub>2</sub> = biaya pembangunan konstruksi
- K<sub>3</sub> = konduktivitas termal
- K<sub>4</sub> = kekuatan bahan
- K<sub>5</sub> = insulasi bunyi
- K<sub>6</sub> = waktu konstruksi

**Tabel 5** Skor Relatif dan Konsistensinya O<sub>1</sub>

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	CR
K <sub>1</sub>		1/7	1/3	1/2	1/4	1/7	0,061
K <sub>2</sub>			3	2	3	1	Atau
K <sub>3</sub>				1/3	3	1/5	6%
K <sub>4</sub>					3	1/2	
K <sub>5</sub>						1/2	
K <sub>6</sub>							

**Tabel 6** Skor Relatif dan Konsistensinya O<sub>2</sub>

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	CR
K <sub>1</sub>		1/7	1/5	1/7	1/3	1/7	0,040
K <sub>2</sub>			3	1/3	3	1	Atau
K <sub>3</sub>				1/3	3	1/3	4%
K <sub>4</sub>					5	3	
K <sub>5</sub>						1/3	
K <sub>6</sub>							

**Tabel 7** Skor Relatif dan Konsistensinya O<sub>3</sub>

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	CR
K <sub>1</sub>		3	1	1/5	3	1/5	0,080
K <sub>2</sub>			1/5	1/5	3	1	Atau
K <sub>3</sub>				1	5	5	8%
K <sub>4</sub>					3	5	
K <sub>5</sub>						1/3	
K <sub>6</sub>							

Dalam nilai-nilai tabel 5 menunjukkan seberapa penting nilai K<sub>i</sub> terhadap K<sub>j</sub>, dengan *i* adalah nomor baris dan *j* adalah nomor kolom. Misalnya nilai sel baris 1 kolom 2 mempunyai arti bahwa K<sub>1</sub> mempunyai 1/7 lebih penting dari K<sub>2</sub>. Sedangkan nilai pada sel-sel yang kosong artinya mempunyai nilai kebalikan dari pada nilai sel tertimbang.

Demikian seterusnya untuk nilai pada sel-sel lainnya dalam tabel 5. Pemahaman serupa juga dilakukan untuk tabel 6 dan tabel 7.

Dengan nilai CR lebih kecil dari 10% untuk ketiga opini maka ketiganya dapat dianalisis menjadi matriks tunggal menggunakan persamaan (7) disajikan dalam tabel 8 menghasilkan bobot setiap kriteria. Pengertian dalam memahami nilai-nilai yang dihasilkan digunakan pengertian yang sama seperti pada tiga tabel sebelumnya.

**Tabel 8** Matriks Tunggal Opini Pakar

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>
K <sub>1</sub>		0,394	0,405	0,243	0,693	0,467
K <sub>2</sub>	2,537		1,216	0,405	3,000	1,000
K <sub>3</sub>	2,466	0,822		0,481	3,557	0,693
K <sub>4</sub>	4,121	2,466	2,080		3,557	1,957
K <sub>5</sub>	1,442	0,333	0,281	0,281		0,333
K <sub>6</sub>	2,140	1,000	1,442	0,511	3,000	
W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	W <sub>5</sub>	W <sub>6</sub>	
0,069	0,179	0,167	0,330	0,069	0,186	
CR	0,0155 atau 2%					

**Nilai Matriks Inisial**

Volume bahan utama yang digunakan pada masing-masing alternatif konstruksi disajikan dalam tabel 9. Selanjutnya dihitung emisi ECO<sub>2</sub> dengan mengalikan faktor ECO<sub>2</sub>. Karena data faktor ECO<sub>2</sub> menurut hasil riset Hammond dan Jones, 2008, memberikan data paling lengkap maka data tersebut yang digunakan, lihat tabel 1.

**Tabel 9** Penggunaan Bahan Utama Per Rumah

Bahan	Sat	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
Asbes	lbr	0	0	0	60
Baja tulangan	kg	868	868	868	868
Bata beton ringan	bh	0	0	1500	0
Bata merah	bh	0	6000	0	0
Batako	bh	1500	0	0	130
Batu belah	m <sup>3</sup>	7,56	7,56	7,56	7,56
Beton bertulang	m <sup>3</sup>	3,34	3,34	3,34	3,34
Beton FB ash	m <sup>3</sup>	0	0	0	1,33
Genteng beton	bh	416	416	416	0
GRC 4 mm	lbr	75	75	75	75
Kaca	m <sup>2</sup>	7	7	7	7
Kayu	m <sup>3</sup>	1,14	1,14	1,14	0,94
Keramik	m <sup>2</sup>	48	48	48	48
Mortar 1:5	kg	416	416	416	416
Pasir	m <sup>3</sup>	6,48	6,48	6,48	6,48
Plywood	lm	21	21	21	21
PC	kg	4833	4833	4833	4833

Untuk menghitung emisi transportasi TCO<sub>2</sub> maka perlu informasi jarak tempuh yang dihitung dari pabrik produksi bahan dengan lokasi proyek. Data lokasi pabrik produksi bahan bangunan dan jarak disajikan dalam tabel 10.

**Tabel 10** Faktor Emisi dan Jarak Transportasi

Bahan	Berat Jenis	frt ECO <sub>2</sub> per kg	Lokasi Produksi <sup>a</sup>	Jrk <sup>b</sup>
	Kg/m <sup>3</sup>	Kg-CO <sub>2</sub>		km
Asbes	2100	0,011 <sup>c</sup>	Purwakarta	70
Baja tulangan	7850	1,77	Cilegon	112
Bata ringan	700	0,28	Serang	277
Bata	1500	0,22	Nagrek	63
Batako	2200	0,163	Cileunyi	30
Batu belah	2200	0,056	Karawang	112
Batu split	1650	0,056	Karawang	112
Beton	2400	0,241	----	----
Beton FB ash	1680	0,102	Cileunyi	30
Genteng	2200	0,061	Cibinong	129
GRC 4 mm	2100	0,12	Citeureup	129
Kaca	1150	0,85	Cikampek	90
Kayu	800	0,46	Majalengka	91
Keramik	2600	0,59	Serang	277
Mortar	2200	0,177	----	----
Pasir	1700	0,81	Cimalaka	52
Plywood	600	0,83	Tangerang	212
PC	2700	n.a	Citeureup	129

<sup>a</sup> Digunakan informasi dari pemborong, jarak terdekat dengan lokasi proyek

<sup>b</sup> Diperoleh dari data <http://doctoc.com> tabel jarak antar kota di Jawa Barat

<sup>c</sup> Berdasarkan data dari Seo and Hwang, 2001

Dengan menggunakan persamaan (1), (2) dan (3) diperoleh jumlah emisi CO<sub>2</sub> setiap rumah. Data mengenai karakteristik bahan sebagian besar diperoleh dari hasil uji di laboratorium Pusat Litbang Permukiman dan lainnya diperoleh dari literatur. Matriks inisial yang digunakan sebagai data untuk analisis disajikan dengan tabel 11.

**Tabel 11** Data Analisis sebagai Matriks Inisial

Kriteria	Sat	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
K <sub>1</sub>	kg-CO <sub>2</sub>	12793	12572	11560	10103
	ECO	12255	12021	10925	9577
	TCO	538	551	635	526
K <sub>2</sub>	juta Rp <sup>a</sup>	81,42	82,37	87,37	79,45
K <sub>3</sub>	W/m K <sup>b</sup>	1,770	1,750	1,524	1,350
	dinding	0,710	0,609	0,464	1,184
	atap	1,060	1,060	1,060	0,166
K <sub>4</sub>	N/mm <sup>2</sup>	1,71 <sup>c</sup>	2,28 <sup>c</sup>	3,65 <sup>d</sup>	5,02 <sup>e</sup>
K <sub>5</sub>	STC <sup>f</sup>	57	54	47	52
K <sub>6</sub>	hari	59	62	55	40

Catatan :

<sup>a</sup> Analisis biaya tahun 2010 Kota Bandung

<sup>b</sup> Data Pusat Litbang Permukiman dan informasi [www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d)

<sup>c</sup> Laporan uji proyek Pusat Litbang Permukiman-Koica, 2002

<sup>d</sup> Informasi [http://jayacelcon/using\\_jaya\\_celcon.pdf](http://jayacelcon/using_jaya_celcon.pdf)

<sup>e</sup> Laporan penelitian Pusat Litbang Permukiman 2010

<sup>f</sup> Berdasarkan korelasi massa

### Analisis Ranking Metoda SAW dan MEW

Berdasarkan matriks inisiasi pada tabel 11 dilakukan kompilasi setiap kriteria. Data arah optimasi dan bobot disajikan dalam tabel 12.

**Tabel 12** Optimasi dan Bobot Tiap Kriteria

Kriteria	Sat.	Opt.	Bobot
K <sub>1</sub> Emisi CO <sub>2</sub>	kg-CO <sub>2</sub>	min	0,069
K <sub>2</sub> Biaya konstruksi	juta Rp	min	0,179
K <sub>3</sub> Kondisi termal	W/m K	min	0,167
K <sub>4</sub> Kekuatan bahan	N/mm <sup>2</sup>	max	0,330
K <sub>5</sub> Insulasi bunyi	STC	min	0,069
K <sub>6</sub> Waktu konstruksi	hari	min	0,186

Dari hasil analisis pembobotan dalam tabel 12 ternyata kriteria kekuatan bahan mempunyai bobot paling tinggi di antara lima kriteria lainnya, mendekati 2 kali dari bobot biaya konstruksi dan waktu konstruksi. Ketika isu penggunaan bahan bangunan ramah lingkungan menjadi penting, ternyata dalam kriteria penilaian konvensional yang meliputi kekuatan, biaya dan waktu konstruksi masih tetap menjadi prioritas dan lebih penting sekitar 3 kali dibandingkan dengan kriteria ramah lingkungan. Hal ini menjadi gambaran bahwa isu untuk lebih peduli pada lingkungan masih sulit diwujudkan.

Dengan memperhatikan kondisi optimasi diperoleh matriks inisial untuk setiap kriteria mengikuti tabel 13.

**Tabel 13** Matriks Inisial dan Optimasi

	Opt.	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
K <sub>1</sub>	min	12793	12572	11560	10103
K <sub>2</sub>	min	81,42	82,37	87,37	79,45
K <sub>3</sub>	min	1,770	1,750	1,524	1,350
K <sub>4</sub>	max	1,71	2,28	3,65	5,02
K <sub>5</sub>	min	57	54	47	52
K <sub>6</sub>	min	59	62	55	40

Agar mendapatkan skala yang sama dilakukan transformasi nilai menggunakan persamaan (8) dan (9), dihasilkan matriks normalisasi disajikan dalam tabel 14.

**Tabel 14** Matriks Normalisasi SAW dan MEW

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
K <sub>1</sub>	0,790	0,804	0,874	1,000
K <sub>2</sub>	0,976	0,965	0,909	1,000
K <sub>3</sub>	0,763	0,771	0,886	1,000
K <sub>4</sub>	0,341	0,454	0,727	1,000
K <sub>5</sub>	0,825	0,870	1,000	0,904
K <sub>6</sub>	0,678	0,645	0,727	1,000

Analisis menggunakan persamaan (10) disajikan dalam tabel 15 dan ranking sesuai nilai tertinggi Hasil analisis dengan metoda SAW diperoleh bahwa konstruksi rumah yang menggunakan dinding panel campuran beton dengan limbah batu bara merupakan tipe konstruksi terbaik berdasarkan penilaian enam kriteria. Sedangkan konstruksi dengan dinding batako merupakan pilihan terburuk.

**Tabel 15** Keputusan dengan Metoda SAW

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
K <sub>1</sub>	0,054	0,055	0,060	0,069
K <sub>2</sub>	0,174	0,172	0,162	0,179
K <sub>3</sub>	0,128	0,129	0,148	0,167
K <sub>4</sub>	0,112	0,150	0,240	0,330
K <sub>5</sub>	0,057	0,060	0,069	0,063
K <sub>6</sub>	0,126	0,120	0,136	0,186
A* SAW	0,652	0,687	0,815	0,993
Ranking	4	3	2	1

Hasil analisis multikriteria dengan metoda MEW menggunakan persamaan (11) disajikan dalam tabel 16.

**Tabel 16** Keputusan dengan Metoda MEW

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
K <sub>1</sub>	0,984	0,985	0,991	1,000
K <sub>2</sub>	0,996	0,994	0,983	1,000
K <sub>3</sub>	0,956	0,957	0,980	1,000
K <sub>4</sub>	0,701	0,771	0,900	1,000
K <sub>5</sub>	0,987	0,990	1,000	0,993
K <sub>6</sub>	0,930	0,922	0,942	1,000
A* MEW	0,603	0,659	0,810	0,993
Ranking	4	3	2	1

Hasil analisis dengan metoda MEW diperoleh keputusan yang sama seperti pada metoda SAW.

Berdasarkan urutan skor tertinggi menunjukkan bahwa rumah panel merupakan pilihan terbaik. Diikuti dengan konstruksi rumah bata beton ringan dan terakhir adalah konstruksi rumah batako.

### Diskusi

Bila ditinjau dari hasil analisis SAW dan MEW telah diputuskan bahwa konstruksi terbaik dari 4 pilihan alternatif adalah rumah panel yaitu rumah dengan konstruksi rangka utama beton bertulang normal, dinding panel dengan campuran limbah *fly bottom ash* dan penutup atap asbes. Skoring yang dihasilkan rumah panel rata-rata 1,58 kali lebih baik dari rumah batako, dan 1,48 kali dari rumah bata yang mana keduanya merupakan jenis konstruksi yang paling banyak digunakan.

Keputusan tersebut di atas merupakan hasil analisis data satu unit rumah sederhana. Keputusan optimis tersebut perlu direspon dengan hati-hati ketika memperhatikan penggunaan asbes sebagai bahan penutup atap. Dari keempat alternatif yang dikaji hanya rumah panel yang menggunakan penutup atap asbes sementara lainnya menggunakan atap genteng.

Telah disadari bahwa paparan debu asbes dapat membahayakan kesehatan manusia, sehingga perlu regulasi khusus untuk mengatur penggunaan asbes. Menurut panduan penggunaan asbes yang dikeluarkan oleh pemerhati bahan bangunan menyarankan untuk mengganti penutup atap asbes

secara teratur setiap 5 tahun meski belum menunjukkan tanda-tanda rusak. Demikian tingginya risiko terhadap keselamatan manusia sehingga pemakaian produk asbes sebagai bahan konstruksi perlu diawasi dengan ketat.

Meski dari hasil studi ini diputuskan bahwa rumah panel dengan atap asbes merupakan tipe konstruksi terbaik, karena volume produk asbes yang digunakan sedikit melalui penilaian aspek lingkungan hanya berdasarkan pada kandungan emisi CO<sub>2</sub>, maka hasil keputusan masih dianggap valid. Namun demikian ketika keputusan tersebut akan digunakan untuk memproduksi rumah massal maka kriteria penilaian aspek lingkungan sebaiknya tidak hanya berdasarkan pada kadar emisi CO<sub>2</sub> saja tetapi perlu dilengkapi dengan kriteria lain yang berkaitan dengan parameter lingkungan.

Faktor lain yang mempengaruhi hasil keputusan adalah penggunaan bahan dinding, sebagai komponen bahan yang pemakaiannya paling dominan. Keputusan yang menetapkan bahwa rumah dinding panel sebagai pilihan terbaik telah mengindikasikan bahwa teknologi prefabrikasi dalam pengembangan rumah massal merupakan salah satu solusi terbaik untuk memproduksi rumah ramah lingkungan.

### KESIMPULAN

Memutuskan tipe konstruksi terbaik hanya meninjau satu kriteria penilaian semata belum tentu dapat menghasilkan keputusan terbaik. Melalui keputusan multikriteria dapat membantu pengambil keputusan dalam menentukan pilihannya berdasarkan preferensi tertentu. Tulisan ini menilai tipe konstruksi rumah terbaik terhadap lingkungan berdasarkan analisis multikriteria. Terdapat empat tipe rumah yang distudi yaitu rumah batako, rumah bata, rumah bata beton ringan dan rumah panel. Pengambilan keputusan berdasarkan enam kriteria penilaian yakni aspek lingkungan, ekonomi, kenyamanan termal, kekuatan bahan, kenyamanan suara dan kemudahan. Masing-masing diekspresikan dengan nilai emisi CO<sub>2</sub>, biaya konstruksi, konduktivitas termal, kekuatan bahan, insulasi suara dan waktu konstruksi.

Dari hasil analisis diperoleh keputusan bahwa rumah panel menghasilkan skor tertinggi yaitu rata-rata 0,993. Hal ini berarti rumah panel yaitu rumah dengan konstruksi rangka beton bertulang normal, dinding panel dengan bahan campuran *fly bottom ash* dan penutup atap asbes merupakan

pilihan terbaik di antara empat alternatif. Pilihan selanjutnya adalah rumah bata beton ringan dengan skor rata-rata 0,812, rumah bata dengan skor rata-rata 0,673, dan yang terburuk adalah rumah batako dengan skor rata-rata 0,628.

Meski telah diputuskan bahwa rumah panel merupakan tipe konstruksi terbaik pengaruhnya terhadap lingkungan, tetapi penggunaan bahan asbes sebagai bahan penutup atap tidak disarankan karena risiko paparan debu asbes berbahaya terhadap kesehatan manusia. Dengan demikian keputusan ini harus disikapi dengan bijaksana bila tipe rumah berdinding panel beratap asbes akan digunakan dalam mengembangkan produksi rumah massal dan ramah lingkungan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Baker, D., Bridge, D., et al., 2001. *Decision making guidebook*. Department of energy, USA <http://www.dss.dpem.tuK.gr>. (Diakses 15 Jan 2011).
- Chew, D., Syme, M., Seo, A., Chan, W.Y., Zhou, M., and Medding, S., 2010. *Development of An Embodied CO<sub>2</sub> Emission Module for Accurate. Forest & Wood Product Australia, CSIRO Sustainable Ecosystems.*
- Castro, Eduardo, Bastos, Leopoldo., Virgone, Joseph, 2008. Using multicriteria analysis to aid building conception. *Proceeding International Conference on Engineering Optimization*, Rio de Janeiro, 01-05 June 2008
- Communities and local government, 2009. *Multi-criteria Analysis : A Manual*. Department for Communities and Local Government; London
- Garison, P. 2005. *Basic Structure for Engineer*. Blackwell Publishing.
- Hammond, G., Jones, C., 2008. *Inventory of Carbon & Energy (ICE) version 1.6a*, Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK. <http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied> (diakses 12 Agst 2011).
- Indolife, 2011. Multimedia message layanan telkomsel, 29 Des 2011.
- Joosen, S. And Luttmmer, M., 2007. *Cooking Book: CO<sub>2</sub> Balancing: In Framework of the Balance Project*. ECOFYS. The Netherlands
- Saaty, T.L., 2008. *Decision Making with the Analytic Hierarchy Process*. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, [http://www.colorado.edu/geography/leyk/geog\\_5113/readings/saaty\\_2008.pdf](http://www.colorado.edu/geography/leyk/geog_5113/readings/saaty_2008.pdf) (diakses 15 Agst 2011).
- Seo, S., Hwang, Y., 2001. *Estimation of CO<sub>2</sub> Emissions in Life Cycle or Residential Buildings*, Journal of Construction Engineering and Management, September/October.
- Wuryanti, W., 2011. Multi criteria decision of type and building material for simple house construction. *Proceeding the 3<sup>rd</sup> international conference of European Asian Civil Engineering Forum (EACEF)*. Yogyakarta, Indonesia 20-22 September 2011.